

ANTECEDENTES RECOPIADOS POR EL MMA

PARTE 3

ANTECEDENTES SOBRE ASTRONOMÍA

- Bortle, J, (2001), Introducing the Bortle Dark-Sky Scale.
- Iniciativa StarLight, (2007), Declaración sobre la defensa del cielo nocturno y el derecho a la luz de las estrellas.
- Addere Consultores, Ministerio de Economía, División de Innovación, (2012), Capacidades y oportunidades para la industria y la academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile.
- Aubé, M, et al (2013), Evaluating Potential Spectral Impacts of Various Artificial Lights on Melatonin Suppression, Photosynthesis, and Star Visibility.
- Barentine, J, et al, (2018), Skyglow Changes Over Tucson, Arizona, Resulting From A Municipal LED Street Lighting Conversion.
- European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere, (2020), Astronomía y Sociedad, Resumen de cooperación entre ESO y Chile 2020.

Introducing the Bortle Dark-Sky Scale

Excellent? Typical? Urban? Use this nine-step scale to rate the sky conditions

at any observing site. | **By John E. Bortle**

How dark is your sky? A precise answer to this question is useful for comparing observing sites and, more important, for determining whether a site is dark enough to let you push your eyes, telescope, or camera to their theoretical limits. Likewise, you need accurate criteria for judging sky conditions when documenting unusual or borderline observations, such as an extremely long comet tail, a faint aurora, or subtle features in galaxies.

On Internet bulletin boards and newsgroups I see many postings from beginners (and sometimes more experienced observers) wondering how to evaluate the quality of their skies. Unfortunately, most of today's stargazers have never observed under a truly dark sky, so they lack a frame of reference for gauging local conditions. Many describe observations made at "very dark" sites, but from the descriptions it's clear that the sky must have been only moderately dark. Most amateurs today cannot get to a truly dark location within reasonable driving distance. Thus, upon finding a semirural observing site where stars of magnitude 6.0 to 6.3 are marginally apparent to the unaided eye, they believe they have located an observing Nirvana!

Thirty years ago one could find truly dark skies within an hour's drive of major population centers. Today you often need to travel 150 miles or more. In my own observing career I have watched the extent to which ever-growing light pollution has sullied the heavens. In years long past I witnessed nearly pristine skies from parts of the highly urbanized northeastern United States. This is no longer possible.

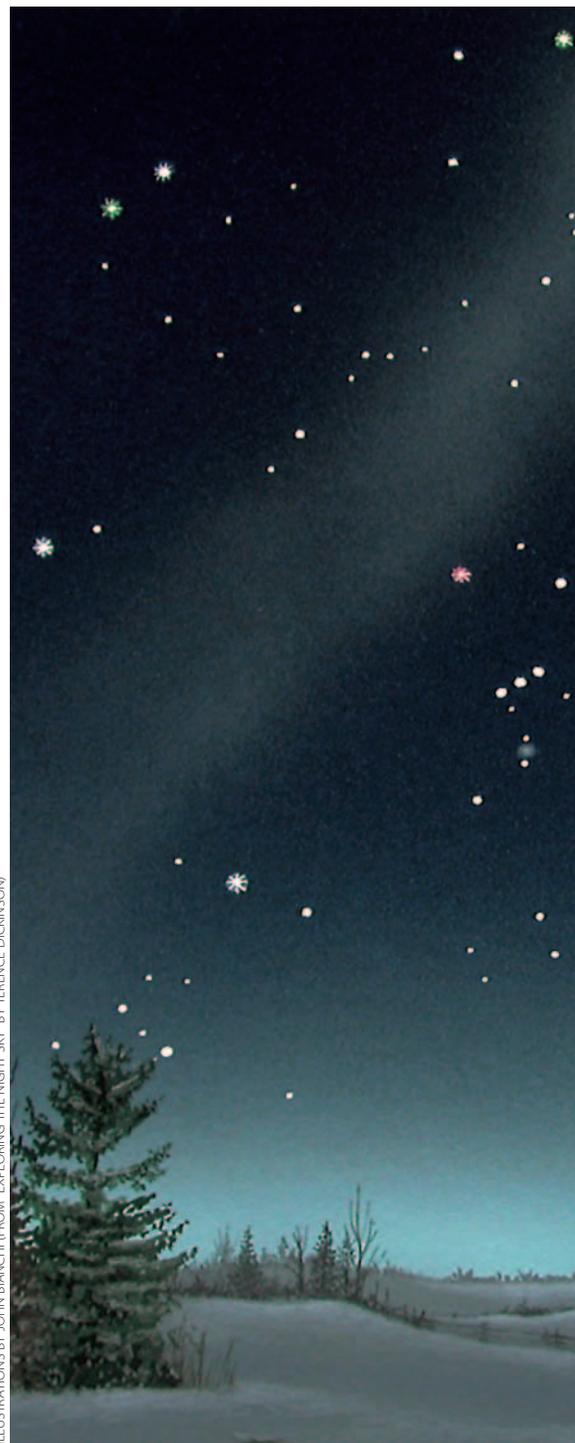
Limiting Magnitude Isn't Enough

Amateur astronomers usually judge their skies by noting the magnitude of the faintest star visible to the naked eye. However, naked-eye limiting magnitude is a poor criterion. It depends too much on a person's visual acuity (sharpness of eyesight), as well as on the time and effort expended to see the faintest possible stars. One person's "5.5-magnitude sky" is another's "6.3-magnitude sky." Moreover, deep-sky observers need to assess the visibility of both stellar and nonstellar objects. A modest amount of light pollution degrades diffuse objects such as comets, nebulae, and galaxies far more than stars.

To help observers judge the true darkness of a site, I have created a nine-level scale. It is based on nearly 50 years of observing experience. I hope it will prove both enlightening and useful to observers — though it may stun or even horrify some! Should it come into wide use, it would provide a consistent standard for comparing observations. Researchers would also be better able to assess the plausibility of an unusual or marginal observation. All around, it could be a boon to those of us who regularly scan the heavens.

Rate Your Skies

Class 1: Excellent dark-sky site. The zodiacal light, gegenschein, and zodiacal band (*S&T*: October 2000, page 116) are all visible — the zodiacal light to a striking degree, and the zodiacal band spanning the entire sky. Even with direct vision, the galaxy M33 is an obvious naked-eye object. The Scorpius and Sagittarius region of the Milky Way casts obvious diffuse shadows on the ground. To the unaided eye the limiting magnitude is 7.6 to 8.0



ILLUSTRATIONS BY JOHN BIANCHI (FROM "EXPLORING THE NIGHT SKY" BY TERENCE DICKINSON)

(with effort); the presence of Jupiter or Venus in the sky seems to degrade dark adaptation. Airglow (a very faint, naturally occurring glow most evident within about 15° of the horizon) is readily apparent. With a 32-centimeter (12½-inch) scope, stars to magnitude 17.5 can be detected with effort, while a 50-cm (20-inch) instrument used with moderate magnification will reach 19th magnitude. If you are observing on a grass-covered field bordered by trees, your telescope, companions, and vehicle are almost total-



Left: Winter constellations in a suburban or rural-suburban transition sky, with the winter Milky Way visible but not dramatically so. Such a sky, fairly good by many people's standards, might rate 4 or 5 on Bortle's scale. Many fainter stars than are depicted here would be visible with close scrutiny. *Right:* The same constellation panorama in an urban, Class 8 or 9 sky. For another way to rate sky brightness, see page 138.

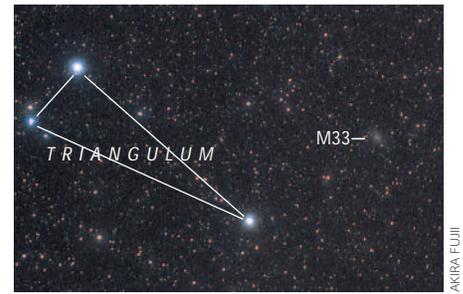
ly invisible. This *is* an observer's Nirvana!

Class 2: Typical truly dark site. Airglow may be weakly apparent along the horizon. M33 is rather easily seen with direct vision. The summer Milky Way is highly structured to the unaided eye, and its brightest parts look like veined marble when viewed with ordinary binoculars. The zodiacal light is still bright enough

to cast weak shadows just before dawn and after dusk, and its color can be seen as distinctly yellowish when compared with the blue-white of the Milky Way. Any clouds in the sky are visible only as dark holes or voids in the starry background. You can see your telescope and surroundings only vaguely, except where they project against the sky. Many of the

Messier globular clusters are distinct naked-eye objects. The limiting naked-eye magnitude is as faint as 7.1 to 7.5, while a 32-cm telescope reaches to magnitude 16 or 17.

Class 3: Rural sky. Some indication of light pollution is evident along the horizon. Clouds may appear faintly illuminated in the brightest parts of the sky



The galaxy M33 in Triangulum is a key indicator of sky conditions. A fully dark adapted observer should be able to spot it under skies good enough to rate Class 4 or better on the Bortle scale.

near the horizon but are dark overhead. The Milky Way still appears complex, and globular clusters such as M4, M5, M15, and M22 are all distinct naked-eye objects. M33 is easy to see with averted vision. The zodiacal light is striking in spring and autumn (when it extends 60° above the horizon after dusk and before dawn) and its color is at least weakly indicated. Your telescope is vaguely apparent at a distance of 20 or 30 feet. The naked-eye limiting magnitude is 6.6 to 7.0, and a 32-cm reflector will reach to 16th magnitude.

Class 4: Rural/suburban transition. Fairly obvious light-pollution domes are apparent over population centers in several directions. The zodiacal light is clearly evident but doesn't even extend halfway to the zenith at the beginning or end of twilight. The Milky Way well above the horizon is still impressive but lacks all but the most obvious structure. M33 is a difficult averted-vision object and is detectable only when at an altitude higher than 50°. Clouds in the direction of light-pollution sources are illuminated but only slightly so, and are still dark overhead. You can make out your telescope rather clearly at a distance. The maximum naked-eye limiting magnitude is 6.1 to 6.5, and a 32-cm reflector used with moderate magnification will reveal stars of magnitude 15.5.

Class 5: Suburban sky. Only hints of the zodiacal light are seen on the best spring and autumn nights. The Milky Way is very weak or invisible near the horizon and looks rather washed out overhead. Light sources are evident in most if not all directions. Over most or all of the sky, clouds are quite noticeably brighter than the sky itself. The naked-eye limit is around 5.6 to 6.0, and a 32-cm reflector will reach about magnitude 14.5 to 15.

Advertisement

Class 6: Bright suburban sky. No trace of the zodiacal light can be seen, even on the best nights. Any indications of the Milky Way are apparent only toward the zenith. The sky within 35° of the horizon glows grayish white. Clouds anywhere in the sky appear fairly bright. You have no trouble seeing eyepieces and telescope accessories on an observing table. M33 is impossible to see without binoculars, and M31 is only modestly apparent to the unaided eye. The naked-eye limit is about 5.5, and a 32-cm telescope used at moderate powers will show stars at magnitude 14.0 to 14.5.

Class 7: Suburban/urban transition. The entire sky background has a vague, grayish white hue. Strong light sources are evident in all directions. The Milky Way is totally invisible or nearly so. M44 or M31 may be glimpsed with the unaided eye but are very indistinct. Clouds are brilliantly lit. Even in moderate-size telescopes, the brightest Messier objects are pale ghosts of their true selves. The naked-eye limiting magnitude is 5.0 if you really try, and a 32-cm reflector will barely reach 14th magnitude.

Class 8: City sky. The sky glows whitish gray or orangish, and you can read newspaper headlines without difficulty. M31 and M44 may be barely glimpsed by an experienced observer on good nights, and only the bright Messier objects are detectable with a modest-size telescope. Some of the stars making up the familiar constellation patterns are difficult to see or are absent entirely. The naked eye can pick out stars down to magnitude 4.5 at best, if you know just where to look, and the stellar limit for a 32-cm reflector is little better than magnitude 13.

Class 9: Inner-city sky. The entire sky is brightly lit, even at the zenith. Many stars making up familiar constellation figures are invisible, and dim constellations such as Cancer and Pisces are not seen at all. Aside from perhaps the Pleiades, no Messier objects are visible to the unaided eye. The only celestial objects that really provide pleasing telescopic views are the Moon, the planets, and a few of the brightest star clusters (if you can find them). The naked-eye limiting magnitude is 4.0 or less.

John Bortle is no stranger to truly dark skies — he has observed more than 200 comets and made 150,000 variable-star estimates in nearly 50 years of observing. He can be contacted via e-mail at JBortle@aol.com.

Advertisement

Reproduced with permission of the copyright owner. Further reproduction prohibited without permission.

DECLARACIÓN
SOBRE LA DEFENSA DEL CIELO
NOCTURNO Y EL DERECHO
A LA LUZ DE LAS ESTRELLAS



DECLARACIÓN DE LA PALMA
La Palma, 19-20 de Abril de 2007



StarLight

DECLARACIÓN
SOBRE LA DEFENSA DEL CIELO NOCTURNO
Y EL DERECHO A LA LUZ DE LAS ESTRELLAS

(Declaración de La Palma)



Conferencia Internacional en Defensa de
la Calidad del Cielo Nocturno
y el Derecho a Observar las Estrellas

La Palma, Islas Canarias, España - 2007



Imagen de los Cielos de La Palma tomada el 20 de Abril de 2007, la misma noche en que fue adoptada la Declaración.

© Bob Crelin

Publicado por:

INICIATIVA STARLIGHT

RESERVA MUNDIAL DE LA BIOSFERA LA PALMA / INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS /

GOBIERNO DE CANARIAS / MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE / UNESCO - MaB.

La Palma, Islas Canarias, España, 2007.

Versión final revisada de la Declaración adoptada el 20 de Abril en la Conferencia Starlight 2007.

Coordinación:

Cipriano Marín, Jafar Jafari.

Revisión:

Giuseppe Orlando

Con la colaboración y sugerencias de:

Peter Bridgewater, Laura Calero Hernández, Phil Cameron, Miguel Clüsener-Godt, Eduardo Fayos Solá, José María Garrido,

Istvan Gyarmathy, Javier Gallego, Luis Gortázar Díaz-Llanos, Hiroji Isozaki, Ángel Landabaso, Luis Martínez,

Juan Antonio Menéndez Pidal, Margarita Metaxa, Friedel Pas, Ferdinando Patat, Nigel Pollard, Rosa M. Ros, Antonio San Blas,

Francisco Sánchez, Ramón San Martín, Anna Sidorenko-Dulom, Malcom Smith, Dirk Spennemann, Richard Wainscoat, David Welch,

Arthouros Zervos.

Diseño y maqueta:

Luis Mir

Imagen de portada:

IAC - Fotografía de Luis Martínez - Composición de Gabriel Pérez.

Imagen de contraportada:

Miguel Briganti y Gabriel Pérez (IAC). Composición fotográfica tomada desde el Observatorio del Teide en Tenerife.

Imagen interior de portada:

Javier Méndez (ING) y Nik Szymanek. Galaxia M51 - Telescopio William Herschel.

DECLARACIÓN SOBRE LA DEFENSA DEL CIELO NOCTURNO Y EL DERECHO A LA LUZ DE LAS ESTRELLAS

(DECLARACIÓN DE LA PALMA)

Los participantes en la Conferencia Internacional en Defensa de la Calidad del Cielo Nocturno y el Derecho a Observar las Estrellas, reunidos en La Palma, Islas Canarias, España, el 19 y 20 de Abril de 2007, conjuntamente con representantes de la UNESCO, OMT, IAU, PNUMA-CMS, CE, SCDB, COE, Programa MaB y Convención Ramsar,

Conscientes que la visión de la luz de las estrellas ha sido y es una inspiración para toda la Humanidad, que su observación ha representado un elemento esencial en el desarrollo de todas las culturas y civilizaciones, y considerando que la contemplación del firmamento ha sustentado a lo largo de la historia muchos de los avances científicos y técnicos que definen el progreso;

Guiados por los principios enunciados en la introducción de la propuesta de la Declaración del 2009 como Año Internacional de la Astronomía (33ª Sesión de la Asamblea General de la UNESCO) que define al cielo como una herencia común y universal, y una parte integrante del ambiente percibido por la Humanidad;

Recordando que la Humanidad ha observado siempre el firmamento para interpretarlo y para entender las leyes físicas que gobiernan el universo, y que este interés en la astronomía ha tenido implicaciones profundas en la ciencia, la filosofía, las costumbres, y en nuestra concepción general del mundo;

Reconociendo que la calidad del cielo nocturno y, por tanto, el acceso a la luz de las estrellas y de cuantos objetos llenan el universo, se está deteriorando en muchas zonas, que su contemplación se hace cada vez más difícil, y que este proceso nos enfrenta a la pérdida generalizada de un recurso cultural, científico y natural con consecuencias imprevisibles;

Comprobando que el deterioro de la nitidez de la noche comienza a representar un serio riesgo para la continuidad de las observaciones astronómicas, siendo una rama de la ciencia que produce en la actualidad un caudal de beneficios directos e indirectos cada vez más apreciados;

Considerando que en la Conferencia de Río de 1992 se proclamó la necesaria defensa de “la naturaleza integral e interdependiente de la Tierra”, y que esta defensa incluye la dimensión de los cielos nocturnos y la calidad de la atmósfera;

Recordando que la Declaración Universal de los Derechos Humanos de las Generaciones Futuras afirma que las personas pertenecientes a las generaciones venideras tienen derecho a una tierra indemne y no contaminada, incluyendo el derecho a un cielo limpio, y tienen derecho a disfrutar de esta Tierra que es el soporte de la historia de la humanidad, de la cultura y de los lazos sociales, lo que asegura a cada generación y a cada individuo su pertenencia a la gran familia humana;

Teniendo en cuenta la vigencia de la Declaración Universal de los Derechos Humanos, adoptada por la Asamblea General de las Naciones Unidas, y las diversas declaraciones internacionales sobre el desarrollo sostenible, así como los convenios y protocolos sobre medio ambiente, salvaguarda de la diversidad cultural, la diversidad biológica y el paisaje, los relativos a la conservación del patrimonio cultural y a la lucha contra el cambio climático, y que todos ellos, directa o indirectamente, inciden sobre la necesidad de salvaguardar la limpieza de los cielos nocturnos;

Considerando la urgente prioridad de proteger los cielos nocturnos de la intrusión de la luz artificial atendiendo a los beneficios que reporta para la ciencia, la cultura, la educación, el medio ambiente, la salud y la gestión responsable de los recursos energéticos;

Convencidos de la necesidad de establecer alianzas eficaces y urgentes entre los principales actores que pueden frenar con sus decisiones el proceso de degradación de la calidad del cielo nocturno, con el fin de forjar la esperanza de recuperar y garantizar la pervivencia del legado de la luz de las estrellas;

APELAN a la comunidad internacional, y en particular *INSTAN* a los gobiernos, a las demás autoridades e instituciones públicas, a los decisores, planificadores y profesionales, a las asociaciones e instituciones privadas concernidas, al mundo de la ciencia y de la cultura, y a todos los ciudadanos a título individual, a adoptar los siguientes principios y objetivos de esta declaración:

1 El derecho a un cielo nocturno no contaminado que permita disfrutar de la contemplación del firmamento, debe considerarse como un derecho inalienable de la Humanidad, equiparable al resto de los derechos ambientales, sociales y culturales, atendiendo a su incidencia en el desarrollo de todos los pueblos y a su repercusión en la conservación de la diversidad biológica.

2 La progresiva degradación del cielo nocturno ha de ser considerada como un riesgo inminente que hay que afrontar, de la misma manera que se abordan los principales problemas relativos al medio ambiente y a los recursos patrimoniales.

3 La conservación, la protección y la puesta en valor del patrimonio natural y cultural asociado a la visión del firmamento, representa un ámbito privilegiado para la cooperación y defensa de la calidad de vida. Por parte de todos los responsables, esta actitud implica un auténtico reto de innovación cultural, tecnológica y científica, que exige realizar un esfuerzo continuado que haga posible redescubrir el valor del cielo nocturno como parte viva de nuestro legado patrimonial y de nuestra cultura cotidiana.

4 El conocimiento, apoyado en la educación, constituye la clave que permite integrar la ciencia en nuestra cultura actual, contribuyendo al avance de la Humanidad. La difusión de la astronomía, así como la promoción de los valores científicos y culturales asociados a la contemplación del firmamento, deberán considerarse como contenidos básicos a incluir en la actividad educativa en todos los ámbitos, algo imposible de realizar si no se dispone de un cielo poco contaminado y de una apropiada formación de los educadores en estas materias.

5 Los efectos negativos sobre la calidad atmosférica de los cielos nocturnos en los espacios naturales, causados por el incremento de las emisiones y la intrusión de la luz artificial, afectan gravemente a muchas especies, hábitats y ecosistemas. El control de la contaminación lumínica debe por lo tanto ser un requisito básico en las políticas de conservación de la naturaleza, incorporando esta dimensión en la gestión de las áreas protegidas, garantizando de forma más efectiva la protección del medio natural y la conservación de la diversidad biológica.

6 Habida cuenta que la noche estrellada forma parte integrante del paisaje que la población de cada territorio percibe, incluyendo las áreas urbanas, se considera necesario que las políticas de paisaje desarrolladas en los diferentes ordenamientos jurídicos incorporen las normas correspondientes orientadas a la preservación de la calidad del cielo nocturno, permitiendo así garantizar el derecho de todos a la contemplación del firmamento.

7 Ha de promoverse el uso racional de la iluminación artificial, de tal forma que el resplandor que provoca en el cielo se reduzca a un mínimo aceptable, evitando igualmente los impactos nocivos sobre los seres humanos y la vida en la naturaleza. Las administraciones públicas, la industria de la iluminación y los principales actores que inciden en la toma de decisiones, han de asegurar un uso responsable de la luz artificial por parte de todos los usuarios, integrando esta dimensión en la planificación y en las políticas de sostenibilidad energética, las cuales habrán de apoyarse en mediciones de la contaminación lumínica, tanto desde la tierra como desde el espacio. Tal actitud implica un uso más eficiente de la energía en consonancia con los acuerdos sobre el cambio climático y la protección del medio ambiente.

8 Los ámbitos privilegiados para la observación astronómica constituyen un bien escaso en el planeta, y su conservación representa un esfuerzo mínimo en comparación con los beneficios que aportan al conocimiento y al desarrollo científico y tecnológico. La protección de la calidad de los cielos en estos espacios singulares deberá constituir una prioridad en las políticas medioambientales y científicas de carácter regional, nacional e internacional. Habrán de extremarse las medidas y disposiciones que permitan proteger tales espacios de los efectos nocivos de la contaminación lumínica, radioeléctrica y atmosférica.

9 Al igual que otras actividades, el turismo puede convertirse en un poderoso instrumento para desarrollar una nueva alianza en favor de la calidad del cielo nocturno. El turismo responsable puede y debe integrar el paisaje del cielo nocturno como un recurso a resguardar y valorar en cada destino. La generación de nuevos productos turísticos basados en la observación del firmamento y los fenómenos de la noche, abre posibilidades insospechadas de cooperación entre los actores turísticos, las comunidades locales y las instituciones científicas.

10 Los espacios pertenecientes a la Red Mundial de Reservas de la Biosfera, los Sitios Ramsar, los declarados Patrimonio de la Humanidad, los Parques Nacionales o las Reservas Naturales que combinan valores excepcionales naturales o paisajísticos dependientes de la calidad del cielo nocturno, están llamados a integrar la protección de los cielos limpios como un factor clave que refuerza su función de conservación de la naturaleza.

Deberán ponerse en práctica todas las medidas necesarias con el fin de informar y sensibilizar al conjunto de implicados en la protección del medio ambiente nocturno, ya sea a nivel local, nacional, regional o internacional, sobre el contenido y los objetivos de la Conferencia Internacional en Defensa de la Calidad del Cielo Nocturno y el Derecho a Observar las Estrellas celebrada en la Isla de La Palma.

RESOLUCIONES FINALES

La Conferencia Internacional en Defensa de la Calidad del Cielo Nocturno y el Derecho a Observar las Estrellas considera imprescindible hacer los siguientes llamamientos públicos:

1. En consonancia con los principios enunciados en esta Declaración, la Conferencia recomienda a los gobiernos y autoridades locales formular, con carácter de urgencia, planes de acción para una protección efectiva de sus cielos nocturnos y de salvaguarda del patrimonio cultural y natural asociado, en particular en las zonas de interés para la observación astronómica, las áreas naturales sensibles a la pérdida de la luz natural del cielo nocturno y lugares de especial relevancia relacionados con el patrimonio astronómico.
2. La Conferencia acuerda trasladar al Director General de la UNESCO la Declaración sobre la Defensa del Cielo Nocturno y el Derecho a la Luz de las Estrellas para su reconocimiento y, si procede, sea recomendada a los Organismos y Agencias del sistema de Naciones Unidas, a las convenciones internacionales relacionadas con los principios y objetivos abordados en la Declaración, y a otros organismos directamente implicados como la IAU (Unión Astronómica Internacional).
3. A instancias del Gobierno de Canarias, y tras la aprobación en su Consejo de Gobierno del mes de abril de 2007, la Conferencia aprueba elevar ante la UNESCO y el Gobierno de España para su tramitación, la propuesta de declaración del 20 de Abril como Día Mundial en favor del Derecho a la Observación de las Estrellas, que en su formulación de campaña adoptará la denominación de “Noche Mundial”.
4. La Conferencia propone al Secretariado del Programa MaB de la UNESCO que las conclusiones y acuerdos alcanzados sean presentados en el III Congreso Mundial de Reservas de la Biosfera, a celebrarse en Madrid en 2008, con el fin de que la protección de cielo nocturno pueda ser asumida, si procede, en el nuevo Plan de Acción de las Reservas de la Biosfera, reconociendo además el importante papel que las Reservas de la Biosfera pueden jugar en este sentido como auténticos laboratorios del desarrollo sostenible.
5. La Conferencia solicita a las cinco convenciones representadas en el Grupo de Enlace sobre la Diversidad Biológica que examinen los resultados de las deliberaciones y, si se estima oportuno, la toma en consideración por sus órganos de gobierno del papel que dichas convenciones pueden jugar en favor de la protección del cielo nocturno, entendiendo que esta acción tendrá efectos positivos en la conservación y en el uso apropiado de la biodiversidad. La conferencia también recomienda a la UICN (Unión Internacional de la Conservación de la Naturaleza) examinar las propuestas de la Conferencia Starlight en el IV Congreso Mundial de la Naturaleza de la UICN, a celebrarse en Barcelona a finales de 2008.

6. La conferencia solicita al Centro del Patrimonio Mundial de la UNESCO informar al Comité del Patrimonio Mundial en su 31ª Sesión, que tendrá lugar en Christchurch, Nueva Zelanda, en 2007, sobre el desarrollo del acuerdo marco entre la iniciativa de la UNESCO “Astronomía y Patrimonio Mundial” y la iniciativa “Starlight”, con el objeto de definir el concepto de “Reserva Starlight”, en orden a identificar las propiedades de nominación que deben definir, en todo el mundo, los paisajes excepcionales de la noche de importancia para la observación del firmamento.

RESOLUCIÓN ADICIONAL SOBRE EL COMITÉ DE SEGUIMIENTO Y EL COMITÉ CIENTÍFICO.

Transcurrida la Conferencia Internacional StarLight, una vez aprobada la “Declaración sobre la Defensa del Cielo Nocturno y el Derecho a la Luz de las Estrellas” y considerando la trascendencia de los acuerdos tomados, se hace necesario prever su futuro. La continuidad de la línea de trabajo y de colaboración ya emprendida es de vital importancia, y para consolidarla resulta conveniente y necesario su seguimiento para impulsar y aplicar los principios de la Declaración y las recomendaciones sobre el Plan de Acción.

Con este objeto, se adoptan los siguientes acuerdos:

1. La creación del Comité de Seguimiento de la Declaración y de su Plan de Acción (Iniciativa Starlight) integrado por las instituciones y organismos internacionales componentes del Comité Organizador de la Conferencia, a las que se sumarán las representaciones de la OMT (Organización Mundial del Turismo), Convención Europea del Paisaje, la IAU (Unión Astronómica Internacional), Convenio de Ramsar, CMS-PNUMA (Secretariado de la Convención sobre la Conservación de las Especies Migratorias de vida Silvestre), SCDB (Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica), Comisión Española de la UNESCO y, si procede, aquellas iniciativas y organizaciones relacionadas con las diversas materias, competencias y disciplinas que afectan a la protección del cielo nocturno que así lo requieran, tras acuerdo del Comité de Seguimiento.
2. El Comité de Seguimiento de la Iniciativa Starlight velará por la difusión, promoción y circulación de la Declaración y de su Plan de Acción, y su mejor aplicación siguiendo las recomendaciones y propuestas del Comité Científico, así como la realización de todo tipo de actividades que garanticen su continuidad.
3. El Comité de Seguimiento se hará cargo de la elevación y seguimiento de los acuerdos de esta Conferencia y asumirá la responsabilidad de hacer circular y presentar la Declaración ante los protagonistas principales, incluyendo los gobiernos, autoridades locales, las instituciones científicas, las iniciativas por la defensa del cielo oscuro y las organizaciones involucradas en la protección del medio ambiente, la diversidad cultural y la promoción del desarrollo sostenible.

4. El Comité Científico propondrá la realización de informes, la elaboración de estudios, campañas, propuestas de cooperación, iniciativas y acciones encaminadas a la protección y valorización de los cielos nocturnos que contribuyan a la consecución de los objetivos trazados en la Declaración.
5. Entre las iniciativas específicas que han surgido de la Conferencia y que competen a los trabajos a desarrollar por el Comité Científico y el Comité de Seguimiento destacan:
- Establecimiento del partenariado y desarrollo de una iniciativa conjunta con la Campaña Energía Sostenible para Europa (Comisión Europea), con la colaboración del EREC (Consejo Europeo de las Energías Renovables), orientada al desarrollo de acciones que engargen la defensa del cielo nocturno con la promoción del ahorro energético, el uso eficiente de la energía y la promoción de las energías renovables.
 - Desarrollo de un acuerdo de cooperación entre el Centro de Patrimonio Mundial de la UNESCO a través de la Iniciativa Temática “Astronomía y Patrimonio Mundial” y la “Iniciativa Starlight”, que incluiría también la puesta en marcha de un proceso de consulta internacional orientado a la elaboración del concepto “Reservas StarLight”.
 - Trasladar la Declaración al Parlamento Europeo y a la Comisión Europea con el fin que sus principios y objetivos puedan ser difundidos y, si procede, asumidos al nivel que se estime pertinente, considerando que la defensa de los cielos nocturnos limpios es también una dimensión importante de la lucha contra el Cambio Climático.
 - Trabajar conjuntamente con la OMT (Organización Mundial del Turismo) y el ITR (Instituto de Turismo Responsable) en la promoción y el reconocimiento de los cielos nocturnos como recurso a valorar en la actividad turística, apoyando el desarrollo de destinos y de nuevos productos turísticos responsables sustentados en la observación de las estrellas.
 - Estrechar los lazos de cooperación y apoyo mutuo con las iniciativas y organizaciones orientadas a la defensa del cielo oscuro, particularmente con el IDA (International Dark Sky Association).
 - Trabajar conjuntamente con la Convención Europea del Paisaje en la implementación de la nueva dimensión de los paisajes nocturnos relacionados con la visión del firmamento en el marco de la Convención.
 - Abrir fórmulas de cooperación para la valorización del legado cultural, material e inmaterial, relacionado con la observación del firmamento, con las entidades del mundo de la cultura y, en primera instancia, con la Unión Latina y la SEAC (Sociedad Europea de Astronomía Cultural).
 - Trabajar conjuntamente con la CIE (Comisión Internacional de la Iluminación) con el objeto de promover el uso inteligente de la iluminación exterior en todas sus aplicaciones, entendiendo que las acciones a desarrollar se enmarcan en el objetivo de promover el ahorro y uso eficiente de la energía, así como limitar los impactos nocivos de la luz artificial en el medioambiente nocturno.



StarLight2007

COMITÉ DE HONOR
COMITÉ DE ORGANIZACIÓN
RELATORES
COMITÉ CIENTÍFICO
ORGANIZACIONES

COMITÉ DE HONOR

Presidente:

**S.A.R. el Príncipe de Asturias
Don Felipe de Borbón y Grecia**

Adán MARTÍN MENIS
Presidente del Gobierno de Canarias

Koïchiro MATSUURA
Director General de la UNESCO

José Luis PERESTELO RODRÍGUEZ
Presidente de la Reserva de la Biosfera La Palma

Cristina NARBONA RUÍZ
Ministra de Medio Ambiente

Mercedes CABRERA CALVO-SOTELO
Ministra de Educación y Ciencia

Francisco SÁNCHEZ MARTÍNEZ
Director del Instituto de Astrofísica de Canarias

COMITÉ DE ORGANIZACIÓN

Antonio SAN BLÁS ÁLVAREZCodirector de la Iniciativa Starlight
Gerente de la Reserva de la Biosfera La Palma**Luis MARTÍNEZ**Codirector de la Iniciativa Starlight
Jefe del Gabinete de Dirección del IAC**Juan GARAY ZABALA**Director General
Organismo Autónomo de Parques Nacionales
Ministerio de Medio Ambiente**Miguel Ángel PULIDO RODRÍGUEZ**Director General de Ordenación del Territorio
Gobierno de Canarias**Miguel CLÜSENER-GODT**División de Ciencias Ecológicas
MAB - UNESCO**Cipriano MARÍN**

Coordinador de la Iniciativa Starlight

RELADORES

Javier GALLEGO LORCA

Universidad Politécnica de Valencia

Ana VIÑA BRITOComité Científico de la Reserva de la Biosfera La Palma
Universidad de La Laguna**Carlos FERNÁNDEZ HERNÁNDEZ**

Comité Técnico de la Reserva de la Biosfera La Palma

Antonia VARELA PÉREZ

IAC - Instituto de Astrofísica de Canarias

Eulalia PÉREZ SEDEÑO

Directora General, FECYT (Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología)

Felisa HODGSON

CUC

Francisco LENO

Plan de Excelencia Turística de Santoña

*Relator General***Luis GORTÁZAR DÍAZ-LLANOS**

GAIA

*Secretario General de la Conferencia***Juan Antonio MENÉNDEZ PIDAL**

Unión Latina

COMITÉ CIENTÍFICO

Presidente

Jafar JAFARI

Universidad de Wisconsin

Tomás AZCÁRATE BANG
Presidente, Instituto de Turismo Responsable.

Pedro BALLESTEROS TORRES
Administrador de la Campaña
“Energía Sostenible para Europa”
DG TREN - Comisión Europea

Marco BARBIERI
Secretariado de la
Convención sobre la Conservación de las Especies
Migratorias de Animales Silvestres

Alexander BOKSENBURG
Presidente de la Comisión Nacional de la UNESCO
del Reino Unido
Profesor Honorario de Astronomía Experimental de la
Universidad de Cambridge

Peter BRIDGEWATER
Secretario General
Convención Ramsar

Manuel CENDAGORTA
Director
ITER (Instituto Tecnológico y de Energías Renovables)

David L.CRAWFORD
Director Ejecutivo
International Dark-Sky Association (IDA)

Rafael DARANAS HERNÁNDEZ
Comité Científico
Reserva de Biosfera La Palma

Maguelonne DÉJEANT-PONS
Jefa de la División de Paisaje y Planificación Territorial
Consejo de Europa

Eduardo FAYOS SOLÁ
Director
Educación y Gestión del Conocimiento
OMT - Organización Mundial del Turismo

Antonio FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ
Vicerrector de Investigación
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

Manuel Nicolás FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ
Comité Científico
Reserva de Biosfera La Palma

Javier GALLEGO
Ex Director General de la Fundación OMT:Themis
Universidad Politécnica de Valencia

Fernando HIRALDO
CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas)
Director de la Estación Biológica de Doñana

Natarajan ISHWARAN
Director de la División de Ciencias Ecológicas y de la
Tierra - UNESCO

Hiroji ISOZAKI
Universidad Meiji Gakuin, Japón

Wolf Michael IWAND
TUI AG, Director Ejecutivo
División de Gestión Medioambiental

Lamine KADI
Rector - Universidad de Mostaganem Argelia.

Ángel LANDABASO
DG - RTD
Comisión Europea

Pierre LASSERRE
Miembro de la Academia Europaea
Universidad Pierre & Marie Curie

Gloria I. LÓPEZ MORALES
Presidenta del Conservatorio Nacional del Patrimonio
Cultural - Mexico

Juan Antonio MENÉNDEZ-PIDAL
Director - España
Unión Latina

Nigel POLLARD
Director: Division 5 (Exterior lighting)
International Commission on Illumination (CIE)

César PORTELA
Arquitecto

Luis RAMALLO
Presidente
Comisión Nacional de la UNESCO

Francisco SÁNCHEZ
Director - Instituto de Astrofísica de Canarias

Antonio SERRANO RODRÍGUEZ
Secretario General para el Territorio y la Biodiversidad
Ministerio de Medio Ambiente

Anna SIDORENKO-DULOM
Coordinadora de la Iniciativa Temática
“Astronomía y Patrimonio Mundial”
UNESCO Centro del Patrimonio Mundial

Malcolm G. SMITH
Director, Observatorio AURA de Chile
Director de la División XII de UAI (Unión Astronómica
Internacional)

Arthouros ZERVOS
Presidente
Consejo Europeo de las Energías Renovables
Universidad Nacional Técnica de Atenas

Coordinación:
Cipriano MARÍN
Coordinator of the Iniciativa Starlight

ORGANIZACIONES, INSTITUCIONES e INICIATIVAS participantes en la Conferencia STARLIGHT 2007

Organismos Internacionales de carácter gubernamental:

Consejo de Europa (División de Ordenación del Territorio y del Paisaje)
Comisión Europea - DG-TREN (Campaña Energía Sostenible para Europa)

Convenio de Ramsar

ESO (Observatorio Europeo Austral)
OMT (Organización Mundial del Turismo)

PNUMA-CMS (Convención sobre la Conservación de las Especies Migratorias de vida Silvestre)

SCBD (Secretariado del Convenio sobre la Diversidad Biológica)

UAI (Unión Astronómica Internacional)

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura)

Unión Latina

Organizaciones Internacionales no gubernamentales:

CIE (Comisión Internacional de la Iluminación)
EREC (Consejo Europeo de Energías Renovables)
IDA (International Dark Sky Association)
ITR (Instituto de Turismo Responsable)
SEAC (Sociedad Europea de Astronomía Cultural)

Promotores - Organizadores:

Cabildo de La Palma
Gobierno de Canarias

IAC (Instituto de Astrofísica de Canarias)
Ministerio de Medio Ambiente - España
Reserva de la Biosfera La Palma

UNESCO-MAB (División de Ciencias Ecológicas - Programa Hombre y Biosfera)

OPTICON

Optical Infrared Co-ordination Network for Astronomy
INTERNATIONAL DARK-SKY ASSOCIATION EUROPE

ALEMANIA

MPI FÜR ASTRONOMIE HEIDELBERG
MUSEUM AM SCHÖLERBERG. Natur und Umwelt - Planetarium
TUI-AG - División de Gestión Medioambiental.
Working Group DARK SKY OF THE GERMAN AMATEUR
ASTRONOMICAL SOCIETY

ARABIA SAUDÍ

CIUDAD DE LA CIENCIA Y DE LA TECNOLOGÍA KING
ABDULAZIZ. Instituto de Investigación Geofísica y Astronómica.
Instituto de Investigación Espacial.

UNIVERSIDAD KING SAUD. Facultad de Ciencia, Departamento de
Física y Astronomía.

ARGELIA

UNIVERSIDAD DE MOSTAGANEM

ARGENTINA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN
Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión.

ARMENIA

OBSERVATORIO ASTROFÍSICO BYURAKAN

AUSTRALIA

UNIVERSIDAD CHARLES STURT
UNIVERSIDAD DE AUSTRALIA DEL SUR
Escuela de Arte de Australia del Sur

AUSTRIA

THÜRINGER LANDESSTERNWARTE TAUTENBURG
VEREIN KUFFNER-STERNWARTE

BÉLGICA

TELESCOPIO MERCATOR
PREVENTIE LICHTHINDER VZW
VERENIGING VOOR STERRENKUNDE VZW WERKGROEP
LICHTHINDER

CANADÁ

ASTROLAB DE MONT-MÉGANTIC
MEMO ENVIRONNEMENT
MUSKOKA HERITAGE FOUNDATION
PARKS CANADA
REAL SOCIEDAD ASTRONÓMICA DE CANADÁ
UNIVERSIDAD DE QUEEN
UNIVERSIDAD DE SHERBROOKE
Grupo de Investigación y de aplicaciones en física.
Centro de investigación y aplicaciones en teledetección.

CHILE

OBSERVATORIO INTERAMERICANO DE CERRO TOLOLO
 OPPC- Oficina de Protección de la Calidad del Cielo del Norte de Chile.
 PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO

ESPAÑA

AAC Centro de Acústica Aplicada S. L.
 AAP - Agrupación Astronómica Isla de La Palma
 AYUNTAMIENTO DE ADEJE. Departamento de Medio Ambiente
 AYUNTAMIENTO DE ALICANTE
 AYUNTAMIENTO DE SANTA CRUZ DE LA PALMA
 AYUNTAMIENTO DE BREÑA BAJA
 AYUNTAMIENTO DE LOS LLANOS DE ARIDANE
 AYUNTAMIENTO DE GARAFÍA
 AYUNTAMIENTO DE SAN ANDRÉS Y SAUCES
 ASOCIACIÓN DE TURISMO RURAL ISLA BONITA
 ASTROPALMA
 CÁMARA DE COMERCIO DE LA PALMA
 CENTRO UNESCO DE CANARIAS
 CELFOSC. Asociación contra la Contaminación Lumínica de Cataluña.
 COLEGIO DE INGENIEROS INDUSTRIALES DE SANTA CRUZ DE TENERIFE
 CSIC – Instituto de Astrofísica de Andalucía.
 FECYT. Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología.
 FUNDACIÓN GALILEI INAF . Telescopio Nazionale Galileo
 GOAT - Grupo de Observadores Astronómicos de Tenerife.
 GRUPO ARQUEOASTRONÓMICO IRUENE LA PALMA
 GRUPO DE TELESCOPIOS ISAAC NEWTON
 INDAL
 ISONORTE EMPLEO. LA PALMA
 ITER – Instituto Tecnológico y de Energías Renovables.
 LABORATORIO DEL PAISAJE DE CANARIAS
 MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CIENCIA
 NATURA CONSULTORÍA Y GESTIÓN S.L.
 ORM – Observatorio del Roque de los Muchachos.
 OTPC-IAC. Oficina Técnica para la Protección de la Calidad del Cielo.
 PATRONATO DE TURISMO DE LA PALMA
 PLAN DE EXCELENCIA TURÍSTICA DE SANTOÑA
 RESERVA DE LA BIOSFERA DOÑANA
 RESERVA DE LA BIOSFERA EL HIERRO
 RESERVA DE LA BIOSFERA GRAN CANARIA
 RESERVA DE LA BIOSFERA LANZAROTE
 RESERVA DE LA BIOSFERA MENORCA
 RESERVA DE LA BIOSFERA SIERRA NEVADA
 RESERVA DE LA BIOSFERA URDAIBAI
 REVISTA ASTRONOMÍA.
 REVISTA CAOS Y CIENCIA.
 SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA
 UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
 ASAAF-UCM. Departamento de Astrofísica y C.C. de la Atmósfera.
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
 UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA
 UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

FRANCIA

CAP ASTRO
 CERN

GRECIA

PHILEKPAIDEUTIKI ETAIREIA.
 NTUA-RENES
 UNIVERSIDAD NACIONAL POLITÉCNICA DE ATENAS

HUNGRÍA

PARQUE NACIONAL DE HORTOBÁGY
 OBSERVATORIO DE KONKOLY
 PARQUE NACIONAL DE DUNA-DRÁVA

ISRAEL

UNIVERSIDAD BAR-ILAN
 Dep. de Matemáticas.

ITALIA

ISTITUTO DI SCIENZA E TECNOLOGIA
 DELL'INQUINAMENTO LUMINOSO.

JAPÓN

UNIVERSIDAD MEIJI GAKUIN

NEUEA ZELANDA

EARTH AND SKY LTD. Lake Tekapo.
 UNIVERSITY OF CANTERBURY
 Dept. of Physics and Astronomy

POLONIA

PARQUE NACIONAL DE BIALOWIEZA

REINO UNIDO

UNIVERSIDAD DE MONTFORT – Facultad de Derecho.
 SOCIEDAD BRITÁNICA DE ASTRONOMÍA
 CAMPAÑA “DARK SKIES”
 NBP LIGHTING CONSULTANCY.

SUIZA

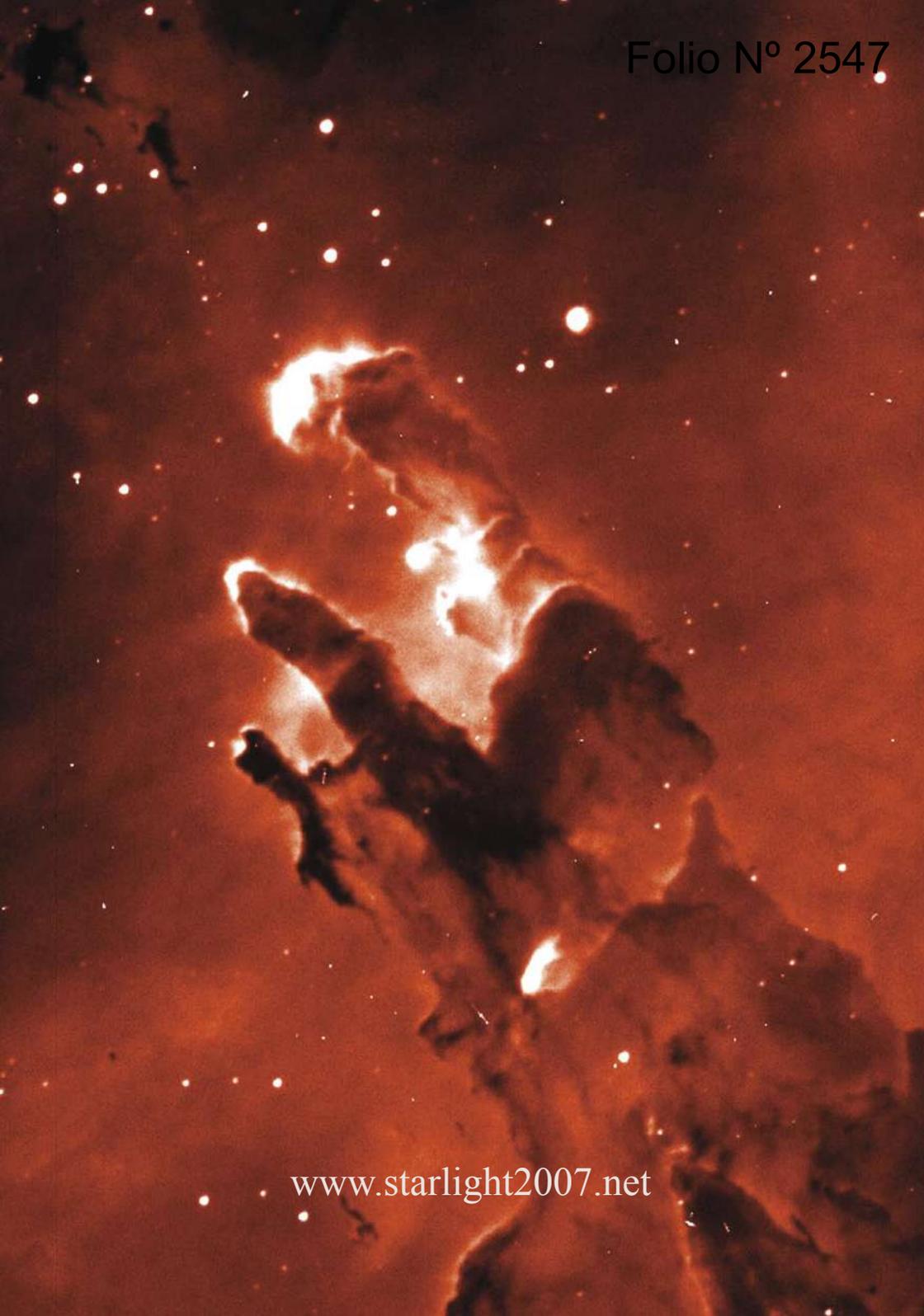
OFICINA FEDERAL DEL MEDIO AMBIENTE

TÚNEZ

CIUDAD DE LAS CIENCIAS – Proyecto UNAWA.

USA

AURA/NOAO
 ANNALS OF TOURISM RESEARCH.
 CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY. PALOMAR
 OBSERVATORY
 CRELIN CREATIVE - THE GLAREBUSTER.
 STELA - SPACE TRAVEL LAW ASSOCIATION
 THE URBAN WILDLANDS GROUP
 UNIVERSIDAD DE CONNECTICUT. Departamento de Física.
 UNIVERSIDAD DE HARVARD
 UNIVERSIDAD DE HAWAII. Instituto de Astronomía.
 UNIVERSIDAD DE WISCONSIN
 UCLA
 Department of Geography, Institute of the Environment, Department
 of Ecology and Evolutionary Biology.
 US NATIONAL PARK SERVICE. Night Sky Team .
 US NAVAL OBSERVATORY
 UTICA COLLEGE. Department of Biology.



Organizadores:



La Palma
Reserva de Biosfera



Instituto de
Astrofísica de Canarias



Gobierno de Canarias



Cabildo de La Palma



Conferencia Internacional en Defensa de la Calidad del
Cielo Nocturno y el Derecho a Observar las Estrellas

StarLight 2007

**CAPACIDADES Y OPORTUNIDADES PARA LA
INDUSTRIA Y ACADEMIA EN LAS
ACTIVIDADES
RELACIONADAS O DERIVADAS DE LA
ASTRONOMÍA Y LOS GRANDES
OBSERVATORIOS
ASTRONÓMICOS EN CHILE**

Estudio realizado para el Ministerio de Economía de Chile,
División de Innovación
Addere Consultores, 2012



PRESENTACIÓN

Este Estudio fue realizado durante los primeros meses del año 2012 para el Ministerio de Economía, Fomento y Turismo de Chile, División de Innovación, bajo la modalidad de licitación pública¹ adjudicada a Addere Consultores.

En el curso del trabajo se recopiló información que fue estructurada, analizada y luego se elaboraron conclusiones y recomendaciones.

Este informe consta de dos tomos. El primero presenta los principales resultados en la perspectiva de identificar las oportunidades y de recomendar acciones a seguir.

El segundo tomo contiene los anexos. Se incluye también información de soporte cuyo objetivo es aportar elementos adicionales que complementan, profundizan o detallan la información contenida en el primer tomo.

EQUIPO DE TRABAJO Y COLABORADORES

Director y Responsable del Estudio:	Gerardo Rivas Perlwitz, M.Sc., ADDERE Consultores.
--	--

Las personas nombradas a continuación han aportado una valiosa colaboración al Estudio elaborando, recopilando y/o revisando información. Sin embargo, el producto final del Estudio no necesariamente refleja sus opiniones ni necesariamente recoge de manera literal la información entregada por ellos.

La responsabilidad del contenido del Estudio es por tanto exclusivamente Addere Consultores.

Asesor Astrónomo:	Patricio Rojo, PhD.
Asesor Astroingeniería:	Mauricio Solar, PhD.
Asesor en Ciencia y Conectividad:	Paulina López.

¹ Licitación Pública 4872-13-LE11 de ChileCompra.

Asistentes de investigación	<p>Elise Servajeon Bergoeing (astronomía en Chile) Katherine Torrejon (turismo astronómico) Rodolfo García (bases de datos de empresas en Chile) Mario Garcés (Empresas nacionales y mundiales) Diego Herrera (Empresas nacionales y mundiales) María Paz González (encuesta)</p>
------------------------------------	--

REPRESENTANTES DE OBSERVATORIOS O DE ASOCIACIONES QUE HAN SIDO ENTREVISTADOS (por orden alfabético)	<p>Estas personas han sido entrevistadas en el marco del Estudio. Sin embargo, el producto final del Estudio no necesariamente refleja sus opiniones ni necesariamente recoge de manera literal la información entregada por ellos.</p>
Eduardo Hardy	AUI
Miguel Roth	Director del Observatorio Las Campanas.
Chris Smith	Director de CTIO, NOAO
Massimo Tarenghi	Representante de ESO en Chile
Álvaro Urzúa	Presidente de la Asociación de la Industria Eléctrica y Electrónica de Chile.
Ulrich Weilenmann	Deputy Director en Paranal

EXPERTOS ENTREVISTADOS (por orden alfabético)	<p>Timothy Abbott. Fernando Álvarez. Jeff Barr. Maxime Boccas. Peter Gray. Gerhard Hüdepohl. Jorge Ibsen. Diego Mardones. Angel Otarola. Matteo Pozzibin. Gary Sanders. Ricardo Schmidt. Jacques Sebag.</p>
<p>Estas personas han sido entrevistadas en el marco del Estudio. Sin embargo, el producto final del Estudio no necesariamente refleja sus opiniones ni necesariamente recoge de manera literal la información entregada por ellos.</p>	

Entidades gubernamentales que apoyaron activamente el Estudio.	División de Innovación, Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. (Contraparte). Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile. Corporación de Fomento de las Producción. Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica, Gobierno de Chile.
Foto de portada	Francisco Martínez Hernández

CONTENIDO

1	LA ASTRONOMÍA	1
1.1	Astronomía en Chile	1
1.1.1	Telescopio de la Humanidad	1
1.1.2	Las mejores condiciones	4
1.1.3	El más seco del mundo	7
1.1.4	Otros Factores	8
1.2	Infraestructura	10
1.2.1	Modos de Observación	10
1.2.2	Tipos de observatorios	15
1.2.3	Telescopios	17
1.3	Observatorios Profesionales en Chile	26
1.3.1	Presente	26
1.3.2	Futuro	38
1.3.3	Pasado	45
1.3.4	Emplazamientos	47
2	MARCO DE ANÁLISIS DEL ESTUDIO	51
3	LOS OBSERVATORIOS	54
3.1	CICLO DE VIDA	54
3.1.1	Desarrollo del Concepto	55
3.1.2	Etapas de diseño, prototipos y análisis	56

3.1.3	Etapa de construcción e instalación	57
3.1.4	Etapa de Operación	59
3.2	ESTIMACIÓN DEL TAMAÑO DE LOS CONTRATOS INTERNACIONALES	62
3.2.1	Presentación	62
3.2.2	Características de la información disponible.	63
3.2.3	Las cifras globales de inversión	65
3.2.4	Los principales ítems de inversión	66
3.2.5	Desglose de cifras de inversión de los principales proyectos astronómicos en Chile	72
3.2.5.1	<i>Proyecto European Extremely Large Telescope (E-ELT)</i>	72
3.2.5.2	<i>The Cornell Caltech Atacama Telescope (CCAT)</i>	75
3.2.5.3	<i>Large Synoptic Survey Telescope (LSST)</i>	77
3.2.5.4	<i>Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)</i>	81
3.2.6	Gastos de operación de los principales proyectos astronómicos en Chile	82
3.3	REQUERIMIENTOS DE TECNOLOGÍA Y SERVICIOS DE LOS OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS	84
3.3.1	Alta tecnología: Diseño y construcción del Telescopio, Montura y los Instrumentos Científicos.	85
3.3.2	Mediana tecnología: Sistemas, componentes y dispositivos mecánicos, eléctricos, electrónicos, hidráulicos, ópticos.	88
3.3.3	Diseño y construcción de la Infraestructura	92
3.3.4	Servicios especializados de mantención, reparaciones y gestión de datos	95
3.3.5	Bienes y servicios no diferenciados.	97
3.3.6	Normas de aplicación general utilizadas por los observatorios	98

3.3.7	Ejemplo de estructura de un Service Level Agreement para contratos de servicios de un observatorio	101
4	INDUSTRIA: ACTORES NACIONALES E INTERNACIONALES	102
4.1	MUESTRA DE EMPRESAS PROVEEDORAS DE LA ASTRONOMÍA A NIVEL MUNDIAL.	102
4.2	EMPRESAS INSTALADAS EN CHILE QUE PROVEEN SERVICIOS A LOS CENTROS ASTRONÓMICOS	105
4.3	IDENTIFICACIÓN DE UNA MUESTRA DE EMPRESAS NACIONALES	106
4.4	CASOS DE TRABAJOS CON LOS OBSERVATORIOS.	107
5	CAPITAL HUMANO EN CHILE PARA TECNOLOGÍAS E INDUSTRIA LIGADAS A LA ASTRONOMÍA	122
5.1	CAPITAL HUMANO EN ASTRONOMÍA	123
5.2	CAPITAL HUMANO EN ASTROINGENIERÍA	126
5.2.1	Laboratorio de ondas milimétricas Universidad de Chile	128
5.2.2	Centro de astro-ingenería AIUC - Pontificia Universidad Católica de Chile	131
5.2.3	Computer Systems Research Group (CSRG), Departamento de informática, Universidad Técnica Federico Santa María	134
5.2.4	Laboratorio de Radioastronomía – Centro de óptica y fotónica - Universidad de Concepción	135
5.2.5	Laboratorio de Astroinformática CMM	138
5.2.6	Grupo de Astrometeorología Universidad de Valparaíso	139
5.2.7	El capital de confianza de los grupos de astroingeniería en Chile	140
5.2.8	Capital humano para los proyectos y servicios de alta exigencia en base a tecnologías consolidadas.	141

5.2.9	Capital humano para proyectos, bienes y servicios no diferenciados	142
6	ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO DE UN ECOSISTEMA IMPULSADO POR LA ASTRONOMÍA	143
6.1	TRABAS Y FALENCIAS.	143
6.1.1	En el ámbito del desarrollo de tecnologías de frontera	143
6.1.2	En el ámbito de proyectos y servicios de alta exigencia en base a tecnologías consolidadas.	146
6.1.3	En el ámbito de proyectos, bienes y servicios no diferenciados	147
6.2	DIFERENTES MODELOS A NIVEL MUNDIAL DE APOYO AL DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA ASTRONOMÍA	148
6.2.1	En el ámbito de Tecnologías de Frontera	148
6.2.2	En el ámbito de Aplicaciones de alta exigencia en base a tecnologías consolidadas.	150
6.2.3	Ejemplos de Modelos en el mundo: Reino Unido, Brasil, España.	151
6.2.3.1	<i>Entidades de apoyo a la Astronomía</i>	151
6.2.3.2	<i>Entidades para Astroingeniería</i>	153
6.3	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO LIGADOS A LA ASTRONOMÍA A NIVEL MUNDIAL.	158
6.3.1	Proyección de la astroingeniería en el mundo	158
6.3.1.1	<i>OECD</i>	159
6.3.1.2	<i>FRANCIA</i>	160
6.3.1.3	<i>SUIZA</i>	161
6.3.1.4	<i>CANADA</i>	161
6.4	ÁREAS CON POTENCIAL IMPACTO NACIONAL	163
6.4.1	Líneas con potencial de desarrollo en Chile	163

6.4.2	Condiciones para insertarse estas áreas.	164
7	ESTIMACIÓN DE IMPACTO ECONÓMICO	167
7.1	PRESENTACIÓN	167
7.2	METODOLOGÍA DE CUANTIFICACIÓN ECONÓMICA DEL IMPACTO	170
7.3	OPORTUNIDADES DERIVADAS DEL USO DUAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE FRONTERA EN ASTROINGENIERÍA	171
7.3.1	Ejemplos de casos en la experiencia internacional	172
7.3.2	Limitaciones para la estimación del impacto económico de las aplicaciones duales	175
7.3.3	Hipótesis de cuantificación del impacto en Chile de las tecnologías de uso dual	179
7.3.3.1	<i>Variables para la estimación</i>	181
7.3.3.2	<i>Impacto en un escenario intermedio</i>	184
7.3.3.3	<i>Impacto en un escenario bajo</i>	186
7.3.3.4	<i>Impacto en un escenario alto</i>	187
7.4	ESTIMACIÓN DEL IMPACTO EN LA CADENA DE SUMINISTRO NACIONAL	187
7.4.1	Volumen del mercado en términos de facturación bruta.	187
7.4.2	Impacto en la cadena productiva.	188
7.4.3	Activos intangibles para las empresas a partir de su participación en proyectos y servicios para los grandes observatorios.	190
7.4.4	Resumen: hipótesis de tamaño del mercado	192
8	CREACIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS DE APOYO PARA EL DESARROLLO DE LA ASTRONOMÍA EN CHILE.	193

9	POLÍTICAS ESPECÍFICAS PARA EL DESARROLLO DE LAS ÁREAS DE OPORTUNIDAD EN ASTROINGENIERÍA	199
9.1	ESTRATEGIA DE FOMENTO A NEGOCIOS TECNOLÓGICOS BASADOS EN USO DUAL DE ASTROINGENIERÍA	199
9.2	RECOMENDACIONES	202

ANEXOS E INFORMACIÓN DE SOPORTE

1	EMPRESAS VINCULADAS A SERVICIOS Y EQUIPAMIENTO PARA LA ASTRONOMÍA.	1
1.1	EMPRESAS A NIVEL MUNDIAL	2
1.2	EMPRESAS EN CHILE QUE PROVEEN SERVICIOS A LOS CENTROS ASTRONÓMICOS	44
1.3	LISTA DE ENTIDADES ACADÉMICAS EN CHILE QUE PROVEEN SERVICIOS A LOS CENTROS ASTRONÓMICOS	55
1.4	MUESTRA DE EMPRESAS NACIONALES	60
2	TURISMO ASTRONÓMICO EN CHILE.	98
2.1	Centros de astronomía en Chile.	100
2.1.1	Observatorios científicos	101
2.1.2	Observatorios Turísticos	102
2.1.3	Puntos de observación	104
2.2	Actividades y costos de los Observatorios Turísticos en Chile.	105
2.2.1	Costo de observaciones astronómicas turísticas.	106
2.2.2	Tarifa promedio de Tours astronómicos.	107
2.2.3	Precio promedio de cursos básicos de astronomía.	109
2.3	Atracción de Turistas Europeos	109
2.4	Ingresos por turismo	110
2.5	Iniciativas público – privadas para potenciar el turismo astronómico	112

3	INFORMACIÓN DE SOPORTE	114
3.1	EJEMPLO DE ESTRUCTURA DE UN SERVICE LEVEL AGREEMENT PARA CONTRATOS DE SERVICIOS DE UN OBSERVATORIO	114
3.2	30 BEST SMALL ELECTRONICS COMPANIES	116
3.3	Ejemplos de entidades y programas de fomento en la Unión Europea	118
3.3.1	Reino Unido	118
3.3.2	Francia	118
3.3.3	ESA (European Space Agency)	119
3.3.4	LOSTESC (Leveraging on Space Technologies to Enhance SMEs' Competitiveness)	121
3.3.5	Technology Transfer at ESO	122
3.4	MUESTRA DE ENTIDADES DE APOYO A LA ASTRONOMÍA	123
3.4.1	REINO UNIDO	123
3.4.2	BRASIL	127
3.4.3	ESPAÑA	132
3.5	LA ASTRONOMÍA CHILENA EN EL MUNDO	134
3.6	ESTUDIO SOBRE ASTRONOMÍA EN LATINOAMÉRICA	140
3.7	Astroingeniería	142
3.8	Astro-Informática	146
3.8.1	Proyectos en el mundo	146
3.8.2	Grandes Volúmenes de Datos Astronómicos: de Data-Driven a Data-Intensive	148
3.8.3	Minería de Datos (DM)/Aprendizaje de Máquina (ML)	153
3.8.4	Computación de Alto Rendimiento	154

3.8.5	Innovaciones en Descubrimiento y Ofrecimiento de Datos	159
3.8.6	Investigaciones de Tecnologías Emergentes	160
3.8.7	Infraestructura Computacional	164
3.8.8	Cambios Educativos.	164
3.8.9	Observatorio Virtual (VO)	166
3.8.10	Plataforma de alto rendimiento para análisis de datos de gran volumen.	169
3.8.11	Minería de datos e inteligencia computacional para extracción de información	171
3.9	Desafíos de I+D para los Datos a nivel de Petascale en el LSST	174
3.9.1	Temas de fiabilidad y rendimiento para BD muy grandes	174
3.9.2	Evaluación automatizada de calidad de datos eficiente	175
3.9.3	Control operacional y supervisión del DMS	175
3.9.4	Alcanzar Tasas aceptablemente bajas de alertas de Falsos Transientes	175
3.9.5	Detección eficiente y determinación de órbita para objetos del sistema solar	176
3.9.6	Alcanzar exactitud fotométrica y precisión requerida	176
3.9.7	Alcanzar exactitud astrométrica y precisión requerida	176
3.9.8	Alcanzar detección óptima de objetos y medida de forma de las pilas de imágenes	177
3.9.9	Necesidad de desarrollar un enfoque flexible que permita la clasificación sumamente confiable de objetos	177
3.9.10	Resintonía adaptativa del comportamiento del algoritmo	178
3.9.11	Necesidad de verificar la utilidad científica del esquema de BD del LSST y su implementación con queries realistas	178

3.10	Óptica Adaptativa	178
3.11	Casos de Desarrollo de Astroinformática en Chile	180
3.11.1	CONTROL Code Generation Refactoring	181
3.11.2	DocuShare customization, web spider	182
3.11.3	ACS Code Generation	183
3.11.4	Software Quality Assurance	184
3.11.5	Logging service for ACS based on DDS	184
3.11.6	Array scheduling problem in ALMA	185
3.11.7	Transporter and Antenna Scale Design	186
3.11.8	Artificial Intelligence for the Very Large Telescope	186
3.11.9	Generic State Machine Engine Project	186
3.11.10	Hevelius	187

1 LA ASTRONOMÍA

1.1 Astronomía en Chile

La mayoría de la superficie reflectora de telescopios profesionales del planeta se encontrará en nuestro país hacia el final de esta década, convirtiendo a Chile en el Telescopio de la Humanidad. Lo anterior no es coincidencia, sino que es posible porque las mejores condiciones para la astronomía se dan en nuestro desierto, el más seco del mundo junto a otros importantes factores.

1.1.1 Telescopio de la Humanidad

La investigación astronómica en Chile se inicia en 1847 con la llegada de una expedición de la armada de los Estados Unidos liderada por teniente James T. Gillis. La instrumentación de esta expedición fue comprada por el gobierno chileno para establecer el Observatorio Astronómico Nacional (OAN) en 1852, uno de los primeros observatorios en Latinoamérica y quizá el más activo durante el siglo XIX. Su ubicación era el cerro Santa Lucía, un pedregoso cerro en las afueras de Santiago (figura 1). Entre los logros más importantes de sus primeros años se encuentra la correcta determinación de la posición del puerto de Valparaíso que desplazó el trazado de toda la costa occidental de Sudamérica.

En 1903 una segunda expedición norteamericana encabezada por William Wright llega a Chile y se instala en el cerro San Cristóbal. Posteriormente, estas instalaciones fueron compradas por un privado y donadas a la Universidad Católica. Actualmente este observatorio ha sido declarado Monumento Nacional.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Mientras tanto, escapando del crecimiento de la ciudad, las instalaciones del OAN fueron reubicados en la Quinta Normal, en Lo Espejo y finalmente en Cerro Calán, su emplazamiento actual. Varios instrumentos, incluyendo meridianos y dos telescopios refractores, se fueron agregando a su funcionamiento. En 1927, el OAN pasó a cargo de la Universidad de Chile.

En 1950, Federico Rutllant asume la dirección del OAN para liderar un importante cambio en el rumbo de la investigación astronómica en el país. En 1958 visita a Estados Unidos buscando alianzas e invitando la instalación de observatorios profesionales en Chile. En 1959, tras una alianza con la Institución Carnegie de Washington, se logra instalar el primer radiotelescopio en Maipú. Luego, varias expediciones al norte del país para medir condiciones meteorológicas determinaron las excepcionales condiciones para la astronomía en el desierto chileno. En 1967 se inaugura el primer telescopio en Cerro Tololo por parte de la Asociación de Universidades para la Investigación Astronómica en EEUU (AURA). También en 1967 se inaugura el telescopio Maksutov en el Cerro El Roble. En 1969 se inaugura las instalaciones del Observatorio Europeo Austral en La Silla y el Observatorio de la Institución Carnegie de Washington en el Cerro Las Campanas.

En las décadas posteriores, la excelente calidad para la astronomía de los cielos del norte de Chile continuó atrayendo la llegada de nuevos proyectos internacionales con la más moderna tecnología, estableciéndose en alguno de los cerros Tololo, La Silla o Las Campanas. En 1999 se inaugura las instalaciones de la ESO (European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere) en Cerro Paranal, mientras que en 2002 se inaugura el telescopio Gemini en Cerro Pachón. La organización ESO¹ es una organización intergubernamental que cuenta con 15 miembros: Austria, Bélgica, República Checa, Alemania, Finlandia, Francia, Dinamarca, Italia, Países Bajos, Portugal, España, Suecia, Suiza, Reino Unido y prontamente Brasil.

Académicamente, el primer departamento de Astronomía fue creado en 1965 en la Universidad de Chile, al alero del OAN, impartiendo desde sus inicios el grado de

¹ <http://www.eso.org>

Licenciatura. A pesar de que el segundo departamento de astronomía en Chile fue creado solamente en 1998, en el presente existen 8 universidades con centros astronómicos, los que combinados constan con más de 60 puestos permanentes de profesores, más de 100 alumnos en programa de pregrado y más de 50 alumnos en programa de postgrado.

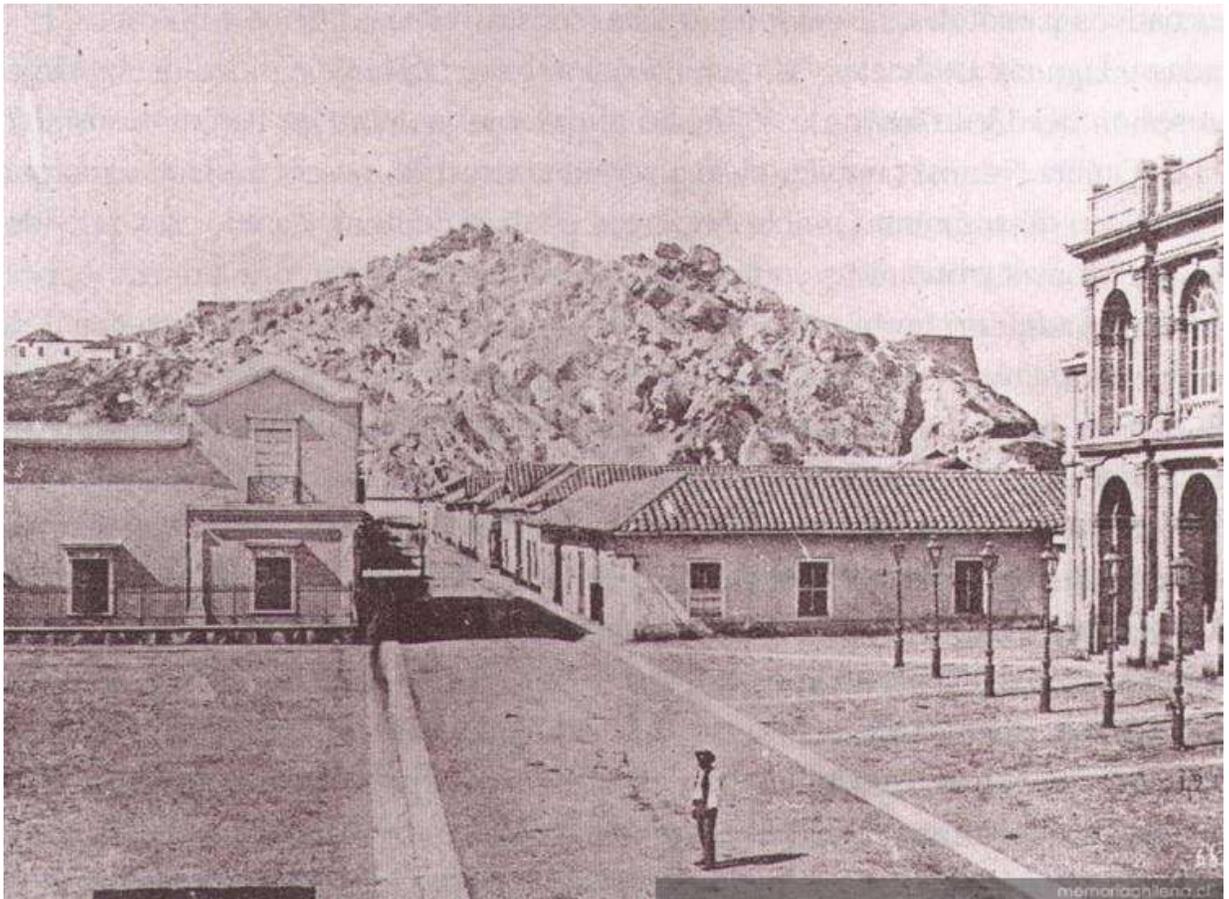


Figura 1.1: Vista del primer emplazamiento astronómico del país: el Cerro Santa Lucía previo a su remodelación en la década de 1870. Fuente: Colección Biblioteca Nacional (www.memoriachilena.cl)

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

1.1.2 Las mejores condiciones

Chile tiene excelentes condiciones para la astronomía porque el desierto de Atacama es un lugar extremadamente seco. Esta sequedad produce efectos muy favorables para la astronomía, entre ellos:

- Se minimiza la absorción que produce el vapor de agua en nuestra atmósfera. Las figuras 2 y 3 muestran que la transmisividad de nuestra atmósfera (porcentaje de la luz que logra atravesarla) es fuertemente influenciada por la cantidad de vapor de agua presente, especialmente en el infrarrojo mediano y en longitudes milimétricas.
- Aumenta el número de noches sin nubes por año. Típicamente, los sitios con observatorios profesionales en el norte de Chile tienen 300 o más noches utilizables por año.

La distorsión que la atmósfera produce en las imágenes es reducida. Esta distorsión, llamada *seeing* en términos técnicos, produce imágenes menos nítidas, más borrosas. El *seeing* se cuantifica como el ancho completo a media altura de una fuente puntual (estrella). Es común encontrar un *seeing* menor de 1" en los sitios de los observatorios profesionales. Este es un valor varias veces menor que en típicos lugares urbanos/rurales. En los distintos lugares que han elegido los observatorios, se observan distintas condiciones medioambientales y de observación astronómica. Además de la sequedad, los principales factores que afectan la calidad de los sitios son los patrones de viento o turbulencia y la altura. A modo de referencia, las figuras 4 y 5 resumen las condiciones encontradas en los últimos años en los observatorios de ESO.

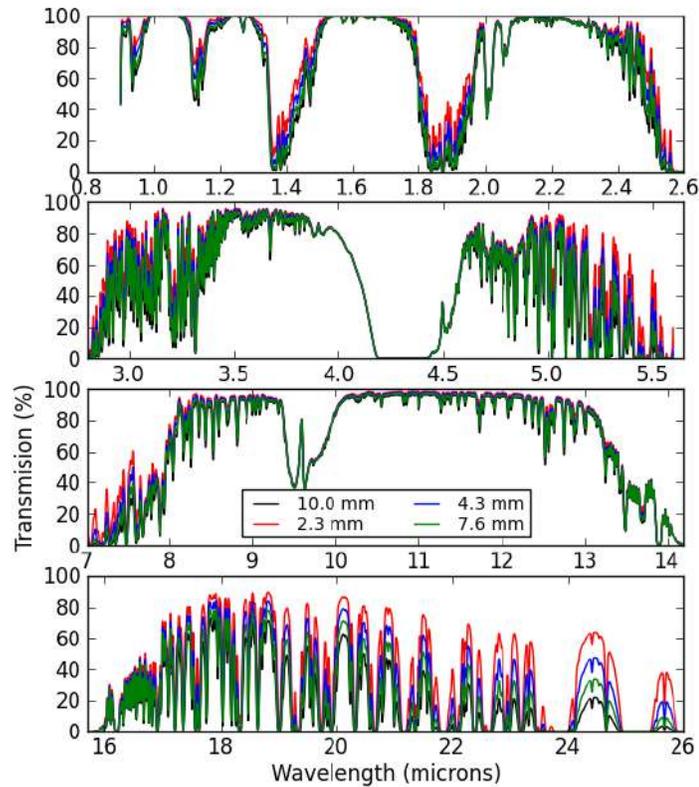


Figura 1.2: Transmisividad de la atmósfera (porcentaje de la radiación incidente del espacio que llega a la superficie terrestre tras atravesar la atmósfera) por unidad de longitud de onda para distintos valores de vapor de agua presente. El vapor de agua presente se mide como milímetros de agua precipitable. Fuente: Gemini Observatory (<http://www.gemini.edu/?q=node/10789>)

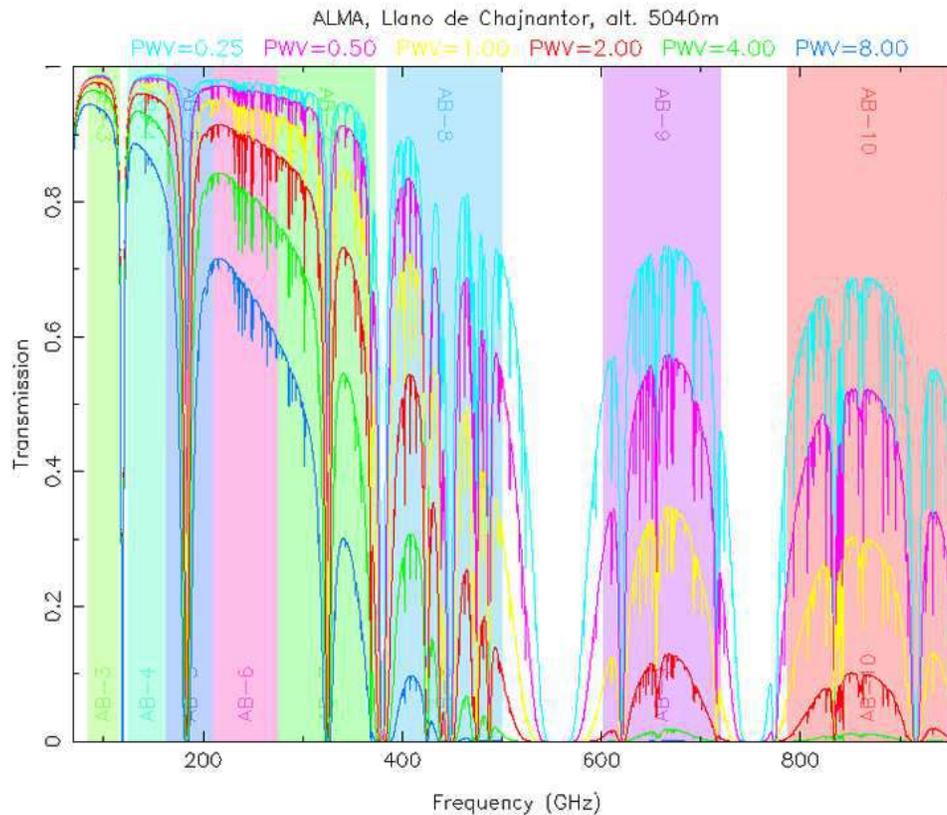


Figura 1.3: Transmisividad como en Figura 1.2 pero para mayores longitudes de ondas (sensibles para el telescopio ALMA). Fuente: NRAO (<https://almascience.nrao.edu/about-alma/weather/atmosphere-model>)

Los otros dos lugares del planeta con condiciones climáticas para la astronomía comparables con el desierto chileno, son en la cima del volcán extinto Mauna Kea (Islas de Hawái, EEUU) y en ciertos lugares de la Antártica. El primero es un sitio con un área muy pequeña (al compararse con el desierto chileno), pero es el mejor lugar explotado en el hemisferio Norte y en consecuencia muy necesario. Ciertos sitios en la Antártica también presentan excelentes condiciones, pero además de las obvias complicaciones logísticas y financieras, los sitios actuales de este continente presentan una capa turbulenta en las primeras decenas de metros que debe ser evitada para obtener las condiciones ideales.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

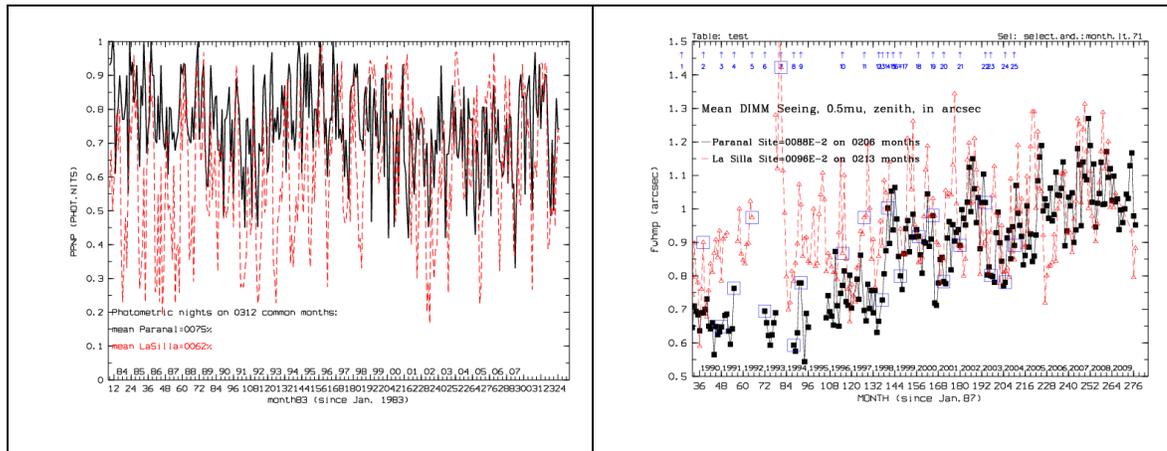


Figura 1.4: (Izquierda) Porcentaje de noches fotométricas (noches sin nubosidad) en Paranal y La Silla por mes desde 1984. En promedio, el 75% y 62% de las noches fueron fotométricas en cada cerro, respectivamente. (Derecha) *Seeing* promedio en cerros Paranal (negro) y La Silla (naranja) desde 1990. En Paranal el seeing ha ido empeorando continuamente hasta tener valores indistinguibles de La Silla, lugar en él que el seeing se ha mantenido mucho más similar en el tiempo. Fuente: European Southern Observatory (<http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/site/astroclimate.html>)

1.1.3 El más seco del mundo

Como se indicó en la sección anterior, la idoneidad del desierto chileno para la astronomía es debida en gran parte a su extrema sequedad. Esta situación excepcional se produce principalmente por dos coincidencias:

- Cercano a los 30° de latitud, se encuentran el límite descendente de las celdas Hadley y la de latitud media (Figura 1.6). Por lo tanto, el aire llega predominantemente seco a la superficie desde la tropopausa favoreciendo la formación de desiertos: Savana Africana, Outback Australiano y planicies Argentinas en el hemisferio sur; Sahara, desierto Árabe y desierto mexicano/estadounidense en el hemisferio norte.
- Las Cordilleras de la Costa y de los Andes producen una barrera natural a los vientos húmedos, los que son naturalmente secos al ser forzados a elevarse para pasar las cordilleras.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

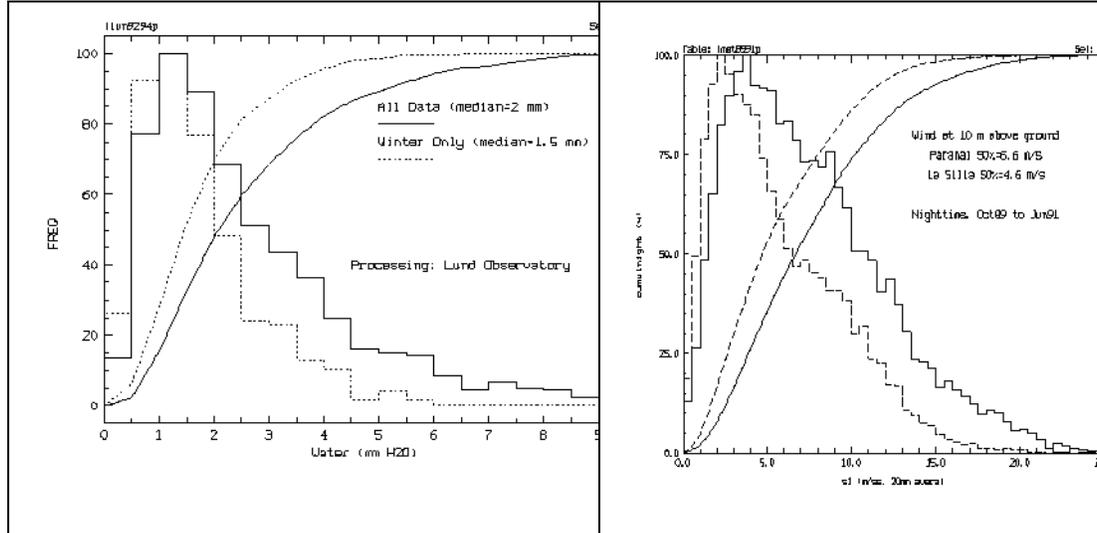


Figura 1.5: (Izquierda) Distribución de vapor de agua en Paranal: durante el invierno, las noches son más secas. (Derecha) Distribución de velocidad de viento en los sitios de la ESO: Paranal es más ventoso que La Silla. Fuente: European Southern Observatory (<http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/site/astroclimate.html>)

1.1.4 Otros Factores

Además de las ideales condiciones climáticas del Desierto de Atacama, el rápido posicionamiento de Chile como capital mundial de la astronomía también ha sido posible gracias a otros factores que deben mantenerse libres de amenazas.

- Estables condiciones en el país han dado seguridad para que las necesarias grandes inversiones puedan hacer planes en el largo plazo². Los observatorios no son transportables, por lo que la inversión se encuentra ligada a un emplazamiento geográfico.
- La contaminación humana puede afectar severamente las prístinas condiciones que el cielo del desierto posee. La clásica contaminación conocida como *smog* obviamente afecta la transparencia atmosférica, pero ese tipo de contaminación es raramente relevante en los aislados emplazamientos astronómicos en las cimas de cerros.

² La única excepción histórica a esta seguridad largo-placista fue el emplazamiento Ruso en el Cerro El Roble que debió abandonar el país en 1973.

Por otra parte, la contaminación lumínica es efectivamente la mayor preocupación para los observatorios (Figura 1.7). La antigua tecnología de ampollas incandescentes junto al masivo uso de luminarias y propagandas con intensidades desmesuradas y direccionamiento inadecuado es la principal amenaza del cielo nocturno. La ampolla incandescente emite (contamina) en un rango de frecuencias que va más allá del sensible a nuestros ojos; sin embargo, la tecnología moderna es capaz de disminuir de gran forma la contaminación innecesaria en longitudes de onda a los que nuestros ojos no son sensibles.

Varios de los emplazamientos astronómicos se encuentran por lo tanto en medio de una gran zona protegida, en las que se prohíbe o regula fuertemente las fuentes de contaminación lumínica como urbes, caminos, faenas mineras, entre otros. De forma equivalente, la observación radioastronómica requiere de legislación adecuada para proteger ciertas frecuencias de radioemisiones como teléfonos celulares, comunicación radial, y televisión.

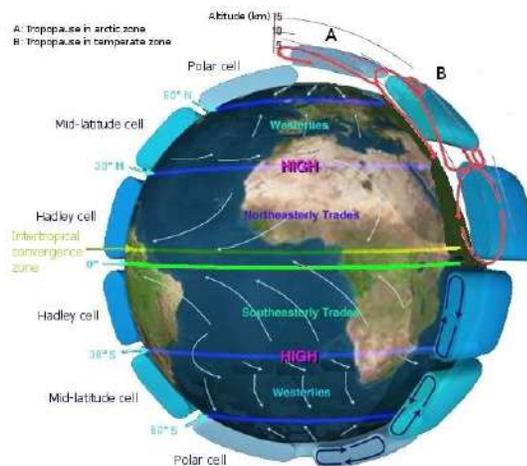


Figura 1.6: Modelo idealizado de la circulación general de la Tierra que produce tres celdas convectivas por hemisferio. Derechos de autor de imagen: Dominio Público (www.wikipedia.org)



Figura 1.7: Imagen compuesta de las luces nocturnas compilado entre Octubre 1994 y Marzo 1995, cuando la iluminación de la Luna era débil. Fuente: NASA

La oficina de Protección de la Calidad del Cielo del Norte de Chile (OPCC³) apoya la regulación de la iluminación en el norte de Chile.

1.2 Infraestructura

En esta sección se resume la nomenclatura relevante de infraestructura astronómica.

1.2.1 Modos de Observación

Existen diferentes modos de observación científica. Típicamente, las noches son asignadas por concursos semestrales en que el astrónomo debe demostrar que solicita el instrumento adecuado para responder una inquietud científica relevante.

³ <http://www.opcc.cl>

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

1.2.1.1 Visitante

Este es el modo clásico de observación astronómica en que el científico para tomar sus datos se desplaza al observatorio donde se encuentra el instrumento de su elección. Generalmente, además del científico en cuestión, se encuentra presente un asistente de observación que maneja el telescopio bajo las indicaciones del astrónomo, así éste último se pueda enfocar en la adquisición de los datos sin preocuparse de los problemas técnicos que puedan presentarse. La presencia del asistente va a depender de la complejidad del manejo del telescopio y del presupuesto del observatorio. En general, todos los telescopios de clase 4 metros o mayores siempre tienen asistente.

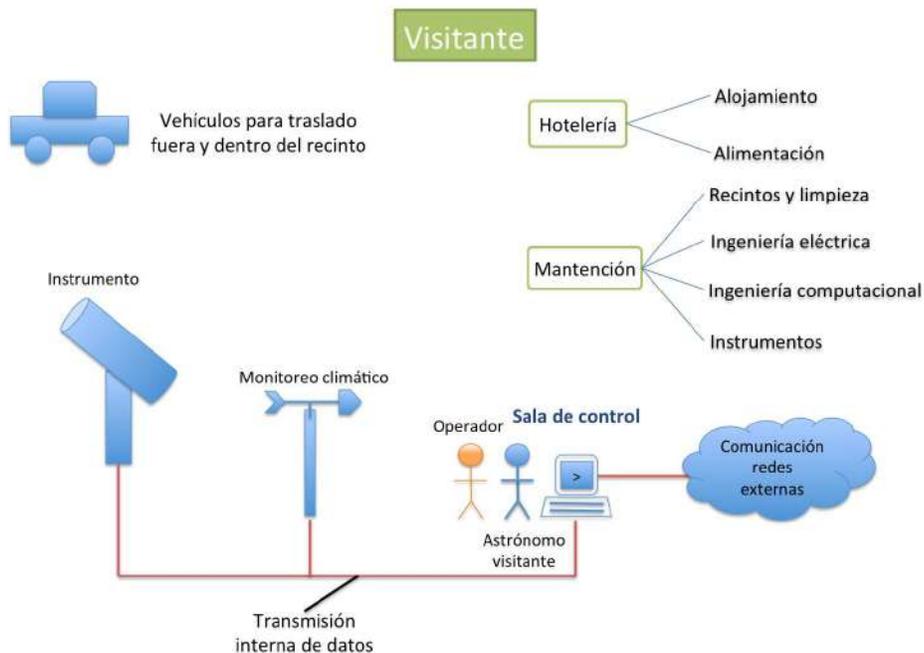


Figura 1.8: Requerimientos para los modos de observación Servicio y Visitante. Iconos naranjos indican requerimientos opcionales

Un beneficio importante de este método es que el científico tiene control total sobre su tiempo de observación con lo cual puede tomar decisiones para optimizarlo. En un modo como éste se necesita servicio de hotelería, de mantención, personal de apoyo y transporte (Figura 1.8). Es por lo tanto el modo de más alto costo para el observatorio

1.2.1.2 Con intervención remota

Existen dos posibilidades de observación con intervención remota del astrónomo:

- **Modo Remoto:** Esta modalidad consiste en utilizar un instrumento que posea un sistema de control remoto a través de conexión de red en tiempo real. Los sistemas de control están diseñados para recibir órdenes y entregar información a través de una conexión protegida de internet. Una característica importante para este tipo de observaciones es que se requiere una interfaz de usuario cómoda, fácil e intuitiva ya que no se tiene soporte técnico. Los beneficios de este modo son que cualquier persona del mundo puede utilizarlo sin necesidad de desplazarse, el astrónomo mantiene total control de la ejecución, el instrumento puede encontrarse en un lugar muy remoto sin que sea un inconveniente para el usuario y no se requiere de un servicio exclusivo de hotelería en el lugar (Figura 1.9). Pero esto impone condiciones específicas de conectividad del instrumento hacia el mundo externo, principalmente en materia de latencia (tiempo de respuesta de los enlaces), disponibilidad, operación continua, etc. No se puede correr el riesgo que un usuario dé una instrucción al instrumento y al segundo siguiente pierda conexión con éste.

- **Modo Servicio con contacto con el operador:** En este modo el astrónomo se conecta vía red al sistema de control de la cámara y a su vez se encuentra en contacto con un operador que se encarga de controlar los movimientos del telescopio según los requerimientos del mismo. De esta forma, a pesar de no estar el astrónomo en el lugar, tiene la posibilidad de tomar las decisiones y dar indicaciones al operador. El beneficio de esta posibilidad es que a pesar de no estar presente el astrónomo tiene mayor control sobre lo que ocurre durante su tiempo y el operador en terreno puede ser capaz de resolver problemas que se presenten durante la noche que necesiten una presencia física (Figura 1.8). En este modo también el componente de conectividad, ahora desde

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

la sala de control al mundo externo cobra relevancia, para mantener una comunicación efectiva y de calidad con el operador en sitio.

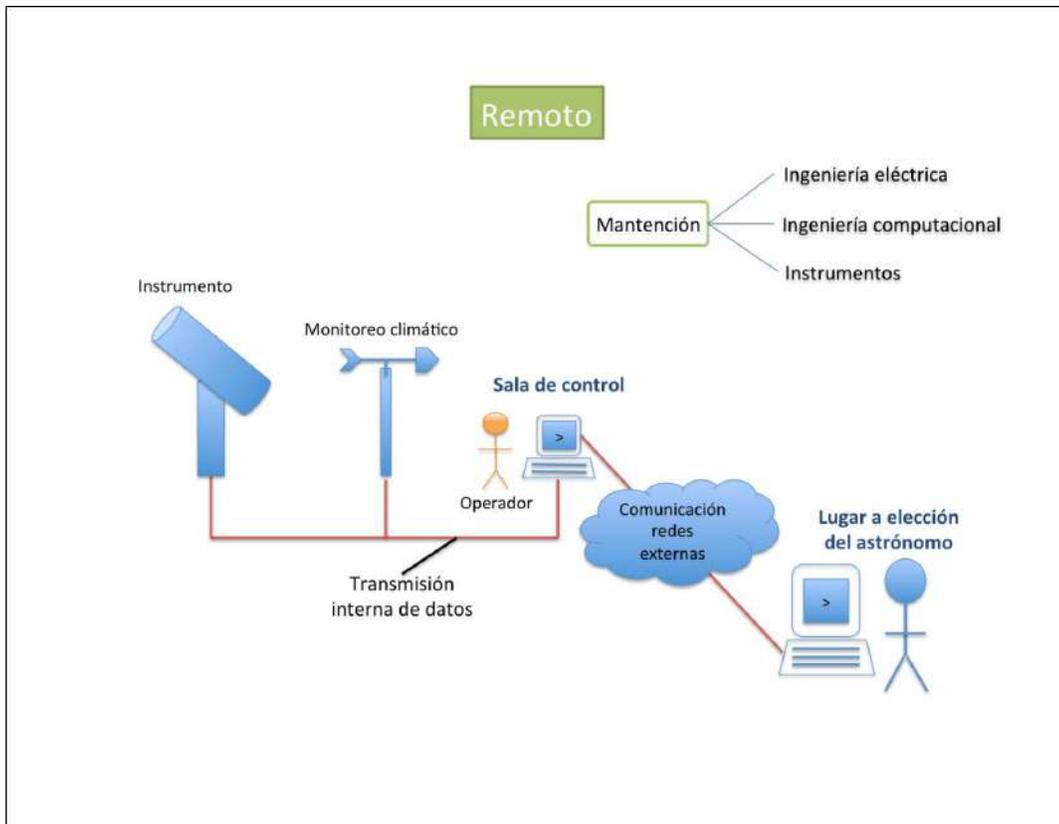


Figura 1.9: Requerimientos para el modo de observación Remoto. Iconos naranjos indican requerimientos opcionales

1.2.1.3 Sin intervención

En este caso el astrónomo no tiene contacto ninguno con el telescopio durante las observaciones. Lo que se hace es generar un plan de observación y éste se lleva a cabo sin poder realizar ningún cambio. Las observaciones se pueden llevar a cabo de los siguientes modos:

- **Modo Servicio sin contacto con el operador:** En este caso se utiliza generalmente lo que se conoce como cola de observación. Una vez que el tiempo de observación es distribuido se crea un calendario fijo con los requerimientos que fueron solicitados por los investigadores. El operador, posiblemente asistido por un astrónomo en turno de

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

servicio, entonces ejecuta únicamente lo que los requerimientos indican sin que pueda haber modificaciones. Posteriormente, los resultados son enviados a quienes lo solicitaron. El principal problema de este método es la falta de control sobre el tiempo de observación y su principal beneficio es que se optimiza el uso del telescopio ya que se minimizan las pérdidas de tiempo y se aprovechan las condiciones meteorológicas más adecuadas para los distintos proyectos.

- **Modo robótico:** Este modo consiste en tener un telescopio que funcione sin intervención humana alguna. Para ello se realiza un programa de observación y se le entregan al instrumento una serie de condiciones para su operación. El código para controlar un sistema como este es mucho más complejo ya que el mismo telescopio debe ser capaz de cerrar si el tiempo no es adecuado o de enfocar el objeto que está intentando observar entre otras muchas complicaciones. El beneficio de este modo es que siendo comandado por un buen algoritmo de observación la optimización del tiempo es máxima, los datos se reciben vía red y no es necesario que haya una persona que constantemente se encargue de que las observaciones funcionen. En este caso la conectividad también es un punto crítico porque es por un medio de comunicación (enlace) por el cual se le debe entregar la información al telescopio, pero a diferencia de los otros modos, en teoría este enlace no requiere grandes capacidades ni tiempos de respuesta, pero esto va a depender del algoritmo de control que se implemente. También es importante notar que en este modo no se requiere hotelería exclusiva y se puede ubicar al telescopio en lugares de difícil acceso (Figura 1.10).

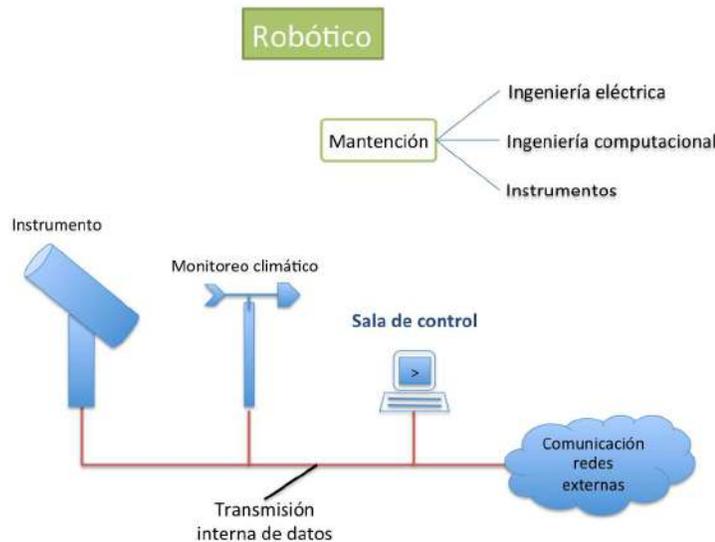


Figura 1.10: Requerimientos para el modo de observación Robótico. Iconos naranjos indican requerimientos opcionales

1.2.2 Tipos de observatorios

1.2.2.1 Astronomía óptica, NIR y MIR

La astronomía visible es el área de la astronomía que para estudiar el universo usa luz en una pequeña región del espectro electromagnético, coincidente en su mayor parte con la que el ojo humano puede detectar. Es la técnica más antigua de la astronomía. Las imágenes ópticas originalmente se dibujaban a mano y fue a fines del siglo XIX y la mayor parte del XX que se utilizaron placas fotográficas. Actualmente, se utilizan detectores digitales llamados CCD (dispositivo de carga acoplada).

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

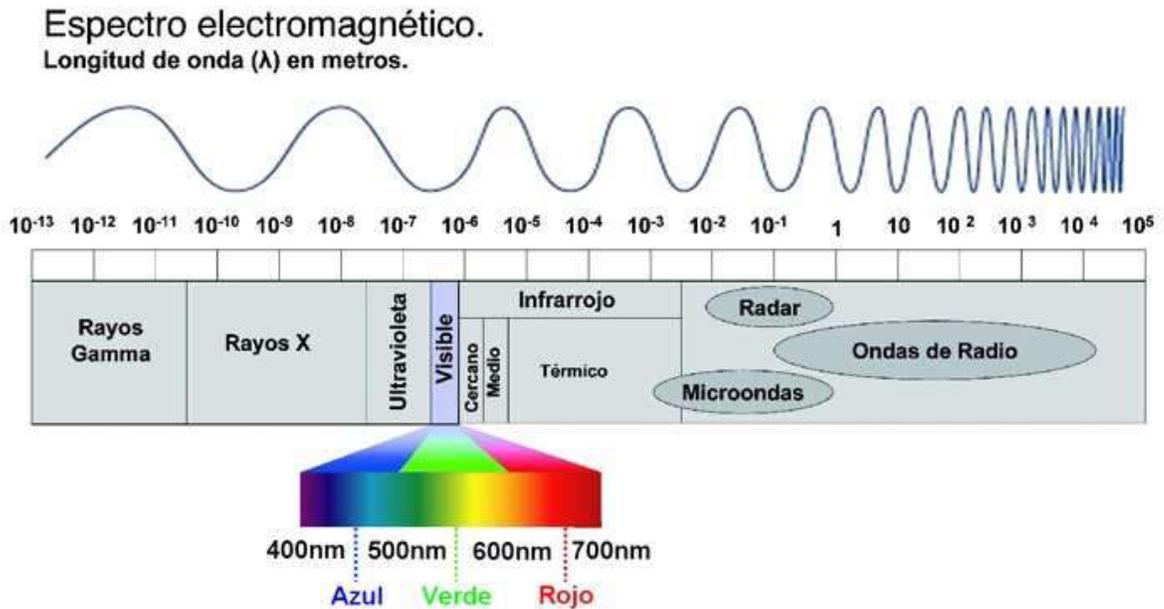


Figura 1.11: Divisiones del espectro electromagnético

El rango de longitudes de onda de luz visible cubre aproximadamente de 400nm a 700nm (Figura 1.11), el rango de astronomía infrarroja cercana (NIR) cubre aproximadamente de 700nm a $4\mu\text{m}$ y la de infrarrojo medio (MIR) de 5 a $40\mu\text{m}$. Los detectores para estos 3 tipos de luz tienen arreglos de multipixeles con tecnologías optimizadas para cada rango, siendo el visible el que tiene la tecnología más explorada. Los espejos para todos estos rangos son los mismos, excepto que se requiere un control termal más estricto para longitudes de onda más grandes. Es por ello que muchos telescopios ópticos también poseen instrumentos para rangos de longitud de onda dentro del NIR y del MIR.

1.2.2.2 Astronomía FIR o submilimétrica

La astronomía infrarroja lejana (FIR) o submilimétrica se encarga de detectar la radiación IR termal que tiene longitudes de ondas mayores que la luz visible y cubre un rango de $200\mu\text{m}$ a 1 mm aproximadamente. Este tipo de radiación es fuertemente absorbida por el vapor de agua de la atmósfera terrestre con lo cual los observatorios

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

IR deben encontrarse en lugares altos y secos o en el espacio. Este tipo de astronomía se utiliza para detectar objetos que son demasiado fríos para emitir en el óptico.

Los detectores para radiación submilimétrica son llamados bolómetros y consisten en fotodetectores semiconductores o superconductores cuya resistividad eléctrica depende de la temperatura. El absorbente (semiconductor o superconductor) recibe la radiación y se mide con mucha precisión su variación de temperatura. Responde de igual forma a todas las longitudes de onda que absorbe y es por lo mismo que el uso de filtros que limiten el rango de longitudes de onda es necesario.

Dado que la mayor parte de la radiación de objetos de ~100 grados Kelvin se emite como radiación termal en el rango IR estos telescopios deben estar muy bien aislados del entorno.

1.2.2.3 Radio astronomía

El rango de longitudes de onda a las que se dirige la radio astronomía es mayor a 1mm. No se encuentran instrumentos con estas características en Chile, con lo cual cuando hablamos de radio astronomía refiriéndonos a observaciones nacionales nos referimos a submilimétrico y milimétrico ya que la forma de observación es la misma. Para poder detectar radiación de estas características se necesitan grandes interferómetros y antenas de grandes diámetros como el radiotelescopio de Arecibo en Puerto Rico con 305 metros de diámetro.

1.2.3 Telescopios

1.2.3.1 Monturas

Una montura es una estructura mecánica que sostiene el telescopio y a su vez permite su movimiento controlado. Sin duda, los dos primeros son los más utilizados:

– **Montura altacimutal:** Este tipo de montura (Figura 1.12) realiza movimientos a través de ejes horizontal y vertical. El horizonte (acimut) se divide en grados (0° a 360° , desde el Norte hacia el Este) y la altura también en grados (0° a 90° , desde el horizonte

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

al cenit). Al ser coordenadas locales y debido a la rotación terrestre, ambas la altura y el acimut de un astro cambian de momento a momento. Los algoritmos para predecir todas estos cambios están bien establecidos, pero previo a la era digital era impensable utilizar este tipo de monturas.

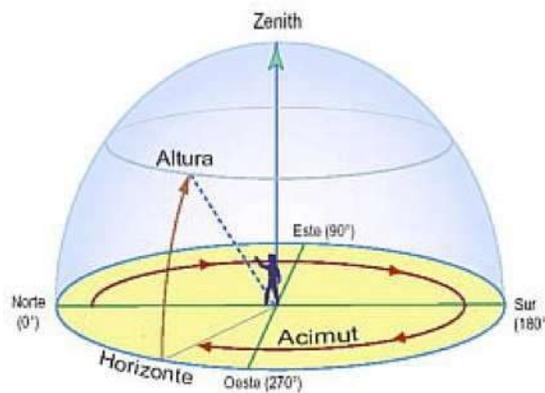


Figura 1.12: Movimiento de montura altacimutal

- **Montura ecuatorial:** Estas monturas utilizan como plano fundamental el ecuador celeste (Figura 1.13), utilizando ejes que siguen el movimiento de la ascensión recta (R.A., por sus siglas en inglés) y declinación (Dec.), que son las coordenadas sobre la esfera celeste análogas de las coordenadas terrestres longitud y latitud, respectivamente. Dado que la montura ecuatorial permite contrarrestar el movimiento de rotación terrestre con el movimiento de un solo eje, fue la preferida durante siglos. Tan solo recientemente, para telescopios de gran peso, se prefiere la montura altacimutal.



Figura 1.13: Movimiento de montura ecuatorial

– Algunos telescopios no tienen montura, por lo que solo apuntan en una dirección fija y dejan que la Tierra se mueva para mirar distintos objetos. Esta modalidad se usa para telescopios extremadamente grandes o porque su objetivo científico así lo permite. Algunos ejemplos son los radiotelescopios de Arecibo en Puerto Rico con 305 metros de diámetro, RATAN-600 en Rusia con 576 metros de diámetro.

1.2.3.2 Concentrando Fotones

La potencia de un telescopio se define principalmente por la cantidad de fotones que es capaz de recibir por unidad de tiempo, es decir proporcional al área recolectora de la superficie primaria. Esta superficie generalmente es de forma paraboloide (Figura 1.14). Esta superficie primaria luego redirecciona los fotones a través de un camino óptico⁴ por una o más superficies secundarias en dirección al detector. La curvatura, convexidad y cantidad de espejos dependen de los requerimientos de cada telescopio. El material con que se construye la parábola depende de la longitud de onda que se necesita observar, el tamaño de la parábola que se requiere construir, la flexibilidad que se busca y la respuesta a diferentes temperaturas, entre otros factores. Algunos materiales utilizados son: pyrex, berilio, titanio, aluminio, cuarzo con silicona y

⁴ Camino óptico es un término genérico que se utiliza para indicar el trayecto de fotones dentro de un telescopio. Su uso no está limitado a fotones ópticos.

pyroceram entre otros⁵.

Para aquellas superficies de mayor peso, que inevitablemente se deformaran a medida que se apunte a distintas posiciones del cielo, se invento el sistema de óptica activa. Cada vez que se apunta a una nueva posición, se busca a través de un sistema de retroalimentación, como deformar la superficie primaria para que su forma vuelva a ser una parábola. Esta deformación se logra a través de actuadores: como referencia cada espejo del VLT (8m de diámetro, 17cm de grosor y 22 toneladas de peso) posee 150 actuadores que lo deforman.

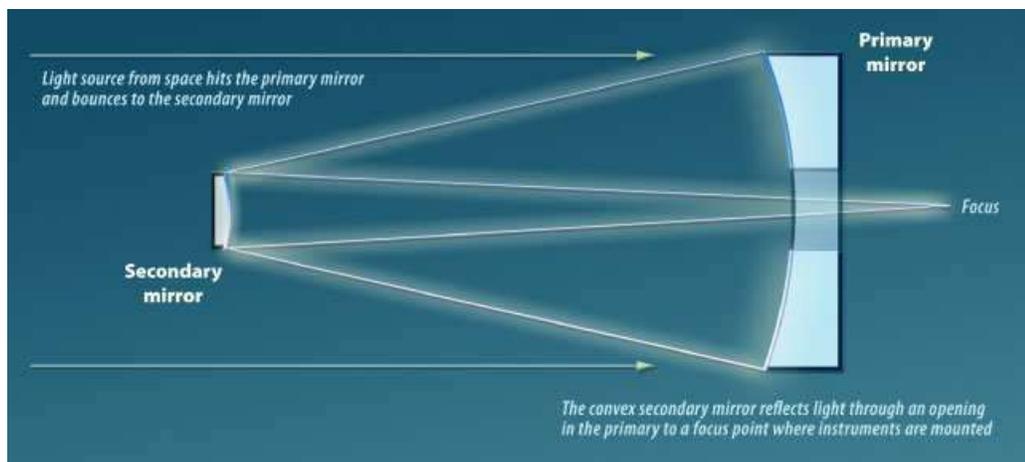


Figura 1.14: La luz llega al espejo primario parabólico y después al secundario y finalmente llega al detector enfocada Fuente: <http://ifa.hawaii.edu>.

Los espejos para longitudes ópticas/IR suelen estar fabricados de vidrio de borosilicatos o similares, pero existen incluso aquellos de mercurio líquido. De espejos de una sola pieza se ha pasado a utilizar espejos segmentados que facilitan la precisión durante su creación. Lo que define finalmente la calidad del espejo es el recubrimiento de la capa reflectante. Los materiales más utilizados para la capa reflectante son el aluminio, el cuarzo, la plata y el oro. El proceso de recubrimiento se repite anualmente o cada cierto número de años, ya que se degrada debido a polvo, polen, humedad y otros contaminantes. El método más utilizado para llevar a cabo este

⁵ Más información en Telescopes Gerard P. Kuiper y Barbara M. Middlehurst.

proceso de recubrimiento, consiste en colocar el espejo primario al interior de una cámara de vacío (del orden de 10^{-6} torr) para luego depositar el material reflectante por evaporación. Las técnicas más modernas incluyen cámaras de ionización para aplicar la película reflectante en el sustrato de vidrio así como métodos de evaporación termal o evaporación a través de haz de electrones.

Para observaciones en longitudes mayores se utilizan antenas cuyas superficies son manufacturadas de material conductor. Las antenas tienen el beneficio de que su superficie no es tan delicada como los espejos por lo que no necesitan albergarse al interior de ningún lugar. La precisión en la forma de la superficie en los radiotelescopios más modernos es mayor que $25 \mu\text{m}$.

DETECTORES

Los detectores ópticos e infrarrojos se dividen en dos categorías: termales y fotodetectores. De estos detectores la única información que se obtiene es la amplitud ya que la fase de la onda no es reconocible a través de estos métodos. Los detectores termales detectan la radiación a través del aumento de temperatura que genera la misma sobre un elemento sensible a estos cambios. Estos últimos suelen ser menos sensibles que los fotodetectores pero responden a un rango mayor de longitudes de onda, un ejemplo de este tipo de detectores son los bolómetros. Entre las tecnologías fotodetectoras están aquellos en los cuales los fotones interactúan directamente con los electrones del detector a través del efecto fotoeléctrico (como los CCD), o aquellos que presentan un cambio de conductividad con la intensidad de la iluminación que reciben por lo que para detectar la radiación se monitorea la variación de la corriente (fotoconductores). Muchos materiales pueden ser utilizados para este tipo de detectores.

Como mientras más caliente sea un cuerpo, más fotones y a menores longitudes emite, es necesario enfriar el detector para reducir la corriente oscura. Típicamente, en el óptico y el infrarrojo cercano -- NIR -- se utiliza nitrógeno (77K), en el infrarrojo medio -- MIR -- helio líquido (4K) y en el infrarrojo lejano -- FIR -- se requieren temperaturas tan bajas como 100mK. Asimismo, el detector debe estar protegida de la humedad para evitar que la misma se empañe. Los detectores utilizados generalmente son

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

fotoconductores para NIR y MIR y bolómetros para FIR.

La detección de señales de radio tiene dos etapas, primero un sensor produce una señal eléctrica y después es procesada. Para todo el rango de radio hay detectores coherentes (que mantienen la información de la fase). En el rango de MHz el sensor suele ser un dipolo colocado directamente en el foco del telescopio. En el rango GHz o mayor frecuencia (es decir menor longitud de onda) se utiliza un dispositivo superconductor-aislante-superconductor (SIS). En un detector de este tipo un electrón en un superconductor absorbe un fotón entregándole al electrón suficiente energía para pasar a través de la barrera aislante hacia el otro superconductor, lo que produce un electrón por cada fotón. La señal es entonces transferida al receptor cuya labor es convertir la alta frecuencia de la corriente a una forma conveniente, generalmente se disminuye su frecuencia y después se digitaliza (Figura 1.15). Más detalles sobre detectores en *Astronomical Techniques* de W.A.Hiltner.

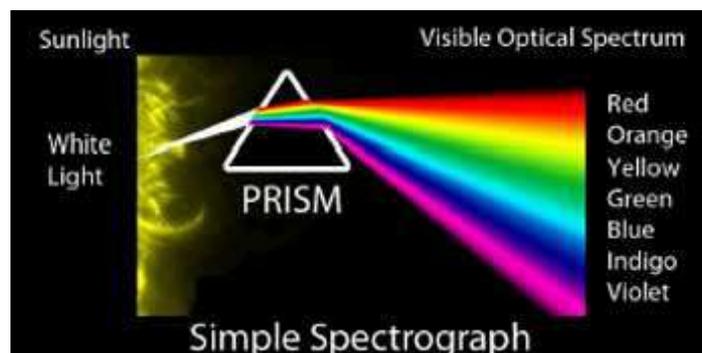


Figura 1.15: Esquema de un espectrógrafo simple de prisma. La luz blanca llega al prisma y se separa en un espectro. Fuente: <http://spacegrant.montana.edu>

ESPECTROSCOPÍA

Los espectroscopios o espectrógrafos son unidades que se colocan en el camino óptico de los fotones de forma que en distintas ubicaciones del detector se reciba distintas longitudes de onda. Más información en *Observational Astronomy* de D.Scott Birney, Guillermo González y David Oesper. Los espectrógrafos se basan en los principios físicos interferencia o de refracción diferenciada. Típicamente, un

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

espectrógrafo consiste de una rendija que deja pasar sólo un haz de luz que luego es dispersada por un prisma (Fig. 15), grilla, o una combinación de estos. Un problema importante es que la imagen del objeto puede ser ensanchada por la turbulencia atmosférica hasta un tamaño varias veces el ancho de la rendija, con lo cual solo una pequeña porción de la luz emitida por el objeto entra en la rendija. Más información en *Astronomical Optics* de D.J.Schroeder.

Existen también instrumentos para obtener espectros de varios objetos a la vez llamados multi-objeto. Lo que se hace en este caso es colocar varias rendijas, cada una sobre un objeto de interés, y a cada rendija se le acopla una fibra óptica o un sistema de espejos que transporta la luz para que siga el proceso ya antes mencionado.

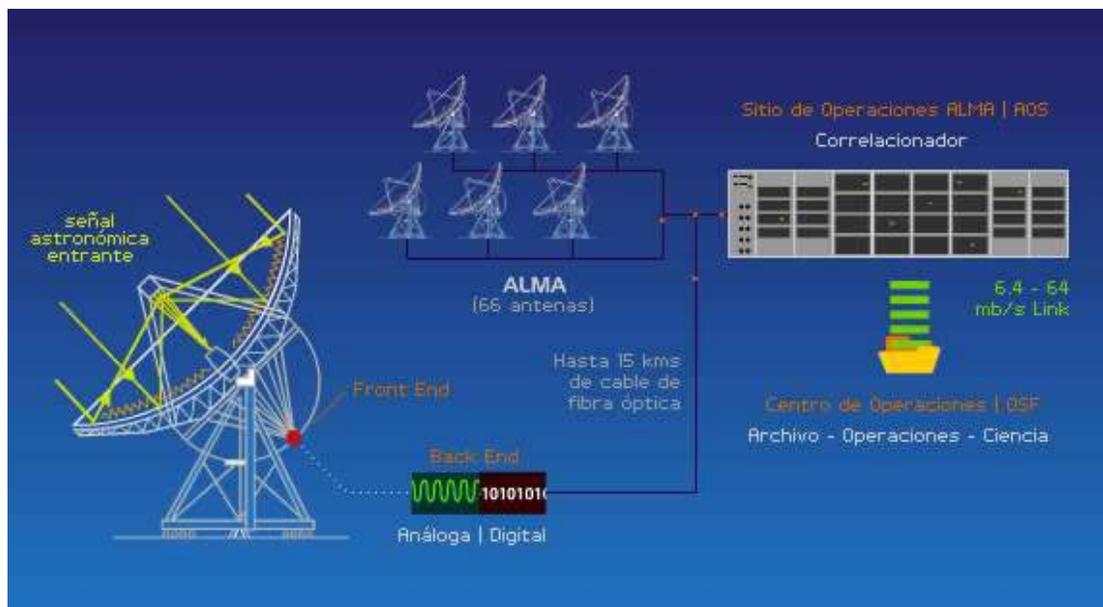


Figura 1.16. Esquema del trayecto que sigue una señal astronómica captada por una antena de ALMA. En un primer momento, la señal es recibida por la antena y enviada al *frontend* donde se reduce su frecuencia. Luego la señal es digitalizada por el *backend* y transmitida por fibra óptica hasta el edificio central, donde el correlacionador combina la señal de todas las antenas. ALMA es controlada desde el Centro de Operaciones (OSF, por su sigla en inglés), donde se recibe, procesa y almacena la información.

Fuente: <http://www.almaobservatory.org>

INTERFEROMETRÍA

La interferometría es una técnica utilizada en astronomía que consiste en combinar la luz proveniente de diferentes receptores, telescopios o antenas de radio para obtener una imagen de mayor resolución. Esta técnica se utiliza especialmente en radioastronomía, siendo más difícil su implementación en longitudes de onda más corta dado que es primordial conocer el camino recorrido por la señal con una precisión varias veces menor que la longitud de onda observada. En todos los casos el principio físico utilizado es que dos ondas de luz que coinciden en fase se amplifican mientras que dos ondas en oposición de fase se cancelan, existiendo también cualquier combinación intermedia. Para longitudes de onda óptica y visible (como el VLTI) la luz se interfiere directamente, mientras que en el caso de observaciones de radio, la señal de cada una de los instrumentos es reducida de frecuencia, digitalizada y transmitida por fibra óptica hasta un correlacionador que combina las señales de todos los instrumentos (Figura 1.16).

En Chile se encuentra el proyecto hasta el momento más ambicioso de interferometría submilimétrica, el proyecto ALMA en el llano de Chajnantor.

DOMOS

Cualquier telescopio óptico/IR necesita que sus partes sean protegidas por una estructura externa. Tradicionalmente esto ha tomado la forma de un domo semiesférico con una abertura por donde el telescopio puede observar. El domo debe girar para que el telescopio pueda mirar a cualquier parte del cielo y la abertura debe poder cerrarse para proteger completamente el telescopio durante el día o cuando el clima no permite observaciones. Un problema que generan estas estructuras es el calentamiento al interior, y corrientes de aire que se puedan producir mientras está abierto que deterioran la calidad de la señal. Actualmente, se les adiciona a los domos sistemas de ventanas laterales que permiten que la temperatura exterior e interior sean lo más parecidas posibles para que no se produzca turbulencia en la interfaz.

CONTROL

El control del telescopio se divide en dos partes: control del movimiento del telescopio y del domo, y control del detector. Ambos son sistemas independientes pero que deben

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

estar en contacto. El control del movimiento del telescopio se encarga de la parte mecánica de apuntar el telescopio al lugar deseado y al domo con la abertura alineada con el telescopio. El control del detector por otra parte entrega las órdenes para las observaciones como el tiempo de exposición, el filtro, etc. Este sistema debe poder obtener información del control del telescopio ya que a cada dato que se obtiene se le asocia información como las coordenadas a las que se están observando, la hora exacta, etc. Además se tiene un sistema de foco que es independiente a los ya mencionados. Tanto el sistema de control de telescopio como el sistema de control del detector son computacionales, por otra parte, el sistema de foco puede ser un simple sistema mecánico (Figura 1.17).

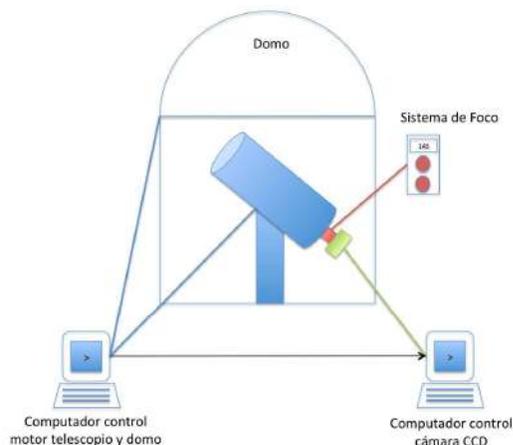


Figura 1.17. El sistema de control se divide en dos partes principales: control del telescopio y control del detector, ambos deben estar comunicados. Además se requiere un sistema de foco

SOPORTE / RECURSOS HUMANOS

Como ya se ha mencionado anteriormente dependiendo del modo de observación utilizado se requieren diferentes servicios y soportes. Los distintos servicios e importancia relativa de cada uno varía de observatorio a observatorio, pero los más básicos son:

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

- **Hotelería:** se debe entregar alojamiento y alimentación al personal permanente del telescopio y a los astrónomos visitantes. También se requiere de mantención y limpieza de las instalaciones.
- **Logística:** dado que los telescopios suelen estar en lugares alejados se debe tener un sistema para hacer llegar todos los insumos necesarios así como comida, agua, etc.
- **Mantención:** se debe tener mantención mecánica, eléctrica, informática y otros dependiendo de la instalación.
- **Transporte:** para que tanto el personal como los astrónomos puedan llegar a las instalaciones se requiere de un servicio coordinado de transporte que dependiendo de las instalaciones tiene diferentes sistemas pero suele ser diario excepto en feriados y fines de semana donde se entregan servicios extraordinarios.
- **Recursos Humanos:** la administración de todos los recursos humanos es importante, aunque no necesariamente deben encontrarse en el observatorio mismo. Los observatorios suelen tener oficinas en las ciudades cercanas a las instalaciones.
- **Conectividad:** Conectividad. Independiente del modo de observación, los telescopios, sobre todo los telescopios en implementación y más aun los futuros, requieren contar con una robusta conectividad tanto para la operación como para la transmisión de datos. En términos generales esta conectividad se establece entre el Telescopio y el Centro de Operaciones, ubicado en las cercanías del telescopio, y desde el Centro de Operaciones a los repositorios de datos y a distintas herramientas y catálogos online.

1.3 Observatorios Profesionales en Chile

1.3.1 Presente

Esta sección describe los distintos sitios de emplazamiento de instalaciones astronómicas instalados actualmente ordenados por su tamaño de mayor a menor.

ALMA El *Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array* (ALMA⁶) es un arreglo de radiotelescopios que se encuentran en el Llano de Chajnantor en el desierto de

⁶ <http://www.almaobservatory.org>

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Atacama, dentro de la zona protegida *Parque Astronómico de Atacama* bajo los auspicios del Programa de Astronomía de la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile (CONICYT). Su ubicación a 5000 metros de altura es crucial para las observaciones en este rango de longitudes de onda ya que se requiere de bajos niveles de vapor de agua. Está compuesto por 54 antenas de 12 metros de diámetro y 12 antenas de 7 metros de diámetro. Desde 2011 se encuentra operando en modo de *Ciencia Temprana* con un número reducido de antenas, gradualmente se irán incorporando el resto de las antenas hasta que el arreglo sea completado en los próximos años.



Figura 1.18: 19 antenas de ALMA sobre el Llano de Chajnantor (<http://www.almaobservatory.org>).

ALMA es una colaboración internacional entre Europa, América del Norte, Asia del Este y Chile. Se trata del proyecto más caro de telescopio terrestre hasta el momento. ALMA es financiado en Europa por la Organización Europea para la Investigación Astronómica en el Hemisferio Sur (ESO), en Norteamérica por la Fundación Nacional de Ciencias de EE.UU. (NSF) en cooperación con el Consejo Nacional de

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Investigaciones de Canadá (NRC) y el Consejo Nacional de Ciencia de Taiwán (NSC) y en Asia del Este por los Institutos Nacionales de Ciencias Naturales (NINS) de Japón en cooperación con la Academia Sínica (AS) en Taiwán. La construcción y operación de ALMA son conducidas a nombre de Europa por ESO, a nombre de Norteamérica por el Observatorio Radio Astronómico Nacional (NRAO), que es operado por Associated Universities, Inc. (AUI), y a nombre de Asia del Este por el Observatorio Astronómico Nacional de Japón (NAOJ). El Joint ALMA Observatory (JAO) tiene a su cargo la dirección general y la gestión de la construcción, como también la puesta en marcha y las operaciones de ALMA. La administración del tiempo de observación Chileno es responsabilidad de la Universidad de Chile (dos tercios) y Conicyt (un tercio).

La fabricación de las antenas está siendo llevada a cabo por los socios de ALMA que deben cumplir las estrictas especificaciones técnicas. ESO ha encargado 25 antenas de 12 metros a AEM Consortium (formado por Alcatel Alenia Space France, Alcatel Alenia Space Italy, European Industrial Engineering S.r.L. y MT Aerospace), y tiene la posibilidad de pedir 7 más. Los socios norteamericanos hicieron el mismo pedido a Vertex RSI, mientras las 4 antenas de 12 metros más las 12 antenas de 7 metros que constituyen el Conjunto Compacto Atacama (ACA, en su sigla en inglés) han sido encargadas por el Observatorio Astronómico Nacional de Japón (NAOJ) a MELCO (Mitsubishi Electric Corporation)

Sin duda serán muchas las sorpresas que nos deparan los datos de ALMA, pero hay tres áreas en las que se esperan importantes avances: (1) el estudio de las primeras estrellas y galaxias que surgieron de las “épocas oscuras” cósmicas hace miles de millones de años, (2) revelar los detalles de estrellas jóvenes y planetas que aún se encuentran en formación, y por último (3) aprender en detalle acerca de la química compleja de las nubes gigantes de gas y polvo.

El funcionamiento de ALMA es interferométrico y presenta múltiples desafíos de precisión. Las 66 antenas deben apuntar al mismo exacto lugar, la sincronización de toda la electrónica de cada una de las antenas debe tener una precisión de una millonésima de segundo, y el camino recorrido en las fibras por la señal astronómica, desde su llegada a cada antena hasta que es combinada en el computador central

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

(llamado correlacionador), debe ser conocido con una exactitud menor al diámetro de un cabello humano (del orden de 1 micrón). Otro problema es reducir la posible atenuación y perturbación que sufre la señal desde que toca cada antena, hasta ser digitalizada y transmitida por varios kilómetros de fibra óptica hacia el computador central. Asimismo, para ayudar en la corrección telúrica que deben enfrentar todos los observatorios terrestres, se utilizarán modelos atmosféricos sofisticados, 7 estaciones de monitoreo de condiciones climáticas y radiómetros para medir la cantidad de vapor de agua presentes en la línea de visión de cada antena.

La posibilidad de desplazar las antenas es una de las características que hacen de ALMA un telescopio tan potente. Cada antena pesa más de 100 toneladas, por lo que se necesitan vehículos especiales para desplazarlas por los 28 kilómetros que separan el Centro de Operaciones (OSF), a 2.900 metros de altitud, y el llano de Chajnantor, situado a una altitud de 5.000 metros, así como para reubicarlas en el mismo llano. ALMA utilizará dos camiones gigantes con estas características: Otto y Lore. Cada uno tiene 20 metros de largo, 10 metros de ancho y 6 metros de alto, y se desplaza sobre 28 llantas. Su peso sin carga asciende a 130 toneladas cada uno. Cada camión está equipado con dos motores diesel de aproximadamente 700 caballos y dos tanques de 1.500 litros. Estos camiones serán capaces de posicionar las antenas con una precisión milimétrica sobre las plataformas.

Very Large Telescope (VLT) El *Very Large Telescope array* (VLT⁷) es el instrumento óptico más avanzado hasta el momento, fue construido y es operado por el observatorio ESO. Consta de cuatro telescopios con espejos primarios de 8,2 metros de diámetro y cuatro telescopios móviles auxiliares de 1,8 metros de diámetro. Los telescopios primarios llamados Antu, Kueyen, Melipal y Yepun pueden trabajar de forma individual o conjunta. Cuando trabajan juntos generan el gran interferómetro VLTI (*Very Large Telescope Interferometer*) lo que permite a los astrónomos ver detalles con 25 veces más resolución que con los telescopios trabajando de forma individual. Los rayos de luz se combinan en el VLTI mediante un complejo sistema de

⁷ <http://www.eso.org/public/teles-instr/vlt.html>

espejos en túneles donde los caminos de luz deben mantenerse de la misma longitud con una precisión menor a 1 micrómetro.

Estos telescopios son de montura altacimutal y se encuentran emplazados en Cerro Paranal a 2635 metros de altura. Los instrumentos del VLT incluyen cámaras de gran campo de visión, guiaje laser, óptica adaptativa y espectrógrafos así como espectrógrafos de alta resolución y multi-objeto cubriendo una gran región espectral desde el ultravioleta (300nm) hasta el infrarrojo medio (24 μm).



Figura 1.19. Vista de los cuatro telescopios principales del VLT y de los cuatro telescopios auxiliares (<http://www.eso.org>).

Los telescopios principales son albergados en edificios compactos, térmicamente controlados que rotan de forma sincronizada con los telescopios. Este diseño minimiza cualquier efecto adverso de las condiciones de observación por ejemplo la turbulencia del aire. Los telescopios principales son generalmente utilizados para observaciones utilizándolos de forma individual ya que las observaciones interferométricas están limitadas a algunas noches por año. En cambio, los telescopios auxiliares no son

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

nunca utilizados de forma individual sino que únicamente en las noches aginadas para uso interferométrico son utilizados para permitir el funcionamiento del mismo.

Los telescopios auxiliares se albergan en una estructura redondeada formada de seis segmentos que se pueden abrir y cerrar. Su labor es proteger al telescopio del polvo y de las pocas lluvias del lugar. La estructura redondeada es soportada por una base móvil cuadrada que a su vez contiene el equipamiento electrónico, el sistema de líquido refrigerante, las unidades de aire acondicionado y energía. Durante las observaciones astronómicas la estructura y la base móvil son aisladas mecánicamente del telescopio para que las vibraciones no afecten a los datos obtenidos. Las bases móviles se mueven sobre rieles que permiten que los telescopios auxiliares se puedan colocar en 30 posiciones diferentes y así poder ajustar el interferómetro a las necesidades de las observaciones.

Los VLT pueden ser controlados en modo visitante o servicio.

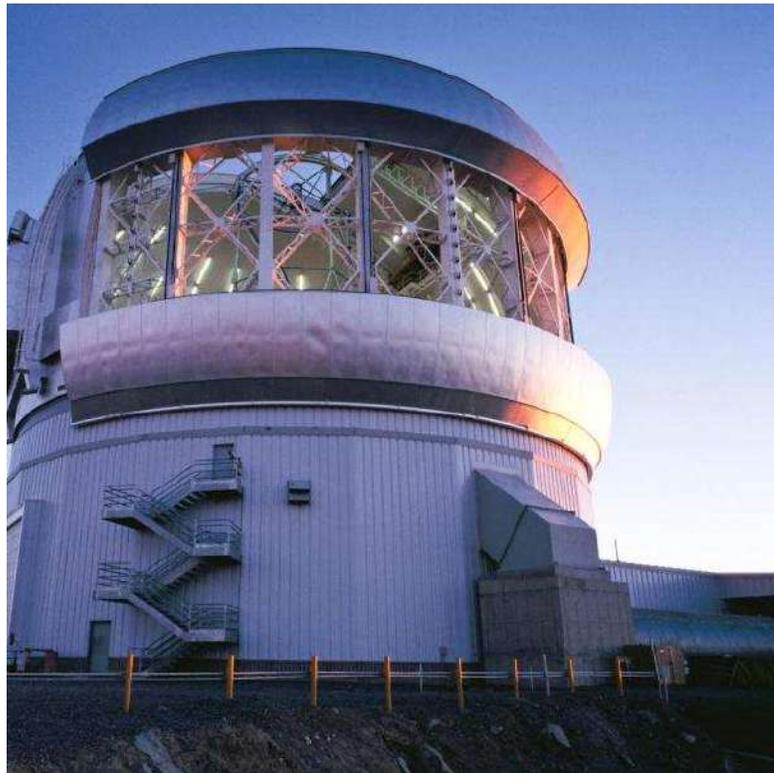


Figura 1.20. Telescopio Gemini Sur en Cerro Pachón. (<http://www.gemini.edu>)

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Telescopio Gemini Sur El Observatorio Gemini⁸ consiste en dos telescopios ópticos / IRs gemelos de 8.1 metros de diámetro que se encuentran uno en Hawaii (hemisferio norte) y otro en Chile (hemisferio sur) para una cobertura total de la esfera celeste. Gemini fue construido y es operado por un consorcio de siete países: Estados Unidos, Reino Unido, Canadá, Chile, Australia, Brasil y Argentina.

El telescopio del hemisferio sur (Gemini Sur) se encuentra a 2750 metros sobre el nivel del mar en Cerro Pachón. Comparte hospedaje y algunos recursos con el telescopio SOAR que se encuentra adyacente y los telescopios del Observatorio Inter-Americano Cerro Tololo que se encuentran en una cima cercana.

Ambos telescopios Gemini han sido diseñados para aprovechar la tecnología de punta y control termal para sobresalir en una amplia variedad de capacidades ópticas e infrarrojas.

El programa de instrumentos de Gemini mantiene al observatorio a la vanguardia de la investigación astronómica incorporando tecnologías como el guiaje laser, óptica adaptativa multi-conjugada y espectroscopía multi-objeto.

Gemini Sur puede ser controlado en modo visitante o servicio.

Telescopios Magallanes Los telescopios Magallanes son dos telescopios gemelos de 6,5m llamados Baade y Clay. Los dos telescopios se encuentran en Cerro Maqui a 60 metros del resto de las instalaciones del Observatorio Las Campanas⁹ (2300 m. de altura). Ambos tienen un diseño altacimutal. Los espejos primarios fueron realizados y pulidos por *Steward Observatory Mirror Lab* y son de silicato de boro con una liviana estructura de panal. Su cobertura es de aluminio.

Ambos telescopios trabajan en el rango óptico/IR y tienen instrumentos que permiten fotometría y espectrografía multi-objeto y echelle. Se incorporaron también controles de óptica activa. El espejo primario tiene un control para corregir las aberraciones ópticas de bajo orden y el secundario tiene un mecanismo de tip-tilt para guiaje rápido.

⁸ <http://www.gemini.edu>

⁹ <http://www.lco.cl>

El telescopio y su domo han sido diseñados para minimizar la degradación de la imagen debido a efectos termales. Tiene sistemas de ventilación separados para el domo, la estructura del telescopio y el espejo primario que hacen que la temperatura en las superficies internas al domo se mantengan a la misma temperatura que en el exterior durante la noche.

Los telescopios Magallanes pueden ser controlados en modo visitante o servicio.



Figura 1.21. Telescopios gemelos Magallanes en Observatorio Las Campanas.
(<http://aporcel.wordpress.com>)

Telescopio ACT El *Atacama Cosmology Telescope Project* (ACT¹⁰) es un telescopio de seis metros que se encuentra en Cerro Toco en el desierto de Atacama a 5190 metros de altura. Está diseñado para observaciones de alta resolución de mapeo del cielo en micro-ondas con el fin de estudiar el fondo de radiación cósmico (CMB). Las metas científicas de este proyecto son estudiar cómo comenzó el Universo, de qué está formado y cómo evolucionó hasta su estado actual.

Este proyecto es una colaboración entre la Universidad de Princeton, la Universidad de Pennsylvania, NASA/GSFC, la Universidad de British Columbia, NIST, la Pontificia Universidad Católica de Chile, la Universidad de KwaZulu-Natal, la Universidad de Cardiff, Universidad de Rutgers, Universidad de Pittsburgh, Universidad de Columbia, Haverfor College, INAOE, LLNL, NASA/JPL, Universidad de Toronto, Universidad de

¹⁰ <http://physics.princeton.edu/act>

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Cape Town, Universidad de Massachusetts y York College. Su financiamiento depende de NSF (US National Science Foundation)



Figura 1.22. Vista del telescopio ACT y su entorno (<http://atacamafotografia.wordpress.com>).

El ACT es un radiotelescopio gregoriano fuera de eje con un colector primario de seis metros y uno secundario de dos metros. Ambos segmentados en paneles de aluminio, el primario en 71 segmentos y el secundario en 11. Este telescopio observa una franja de cielo, por lo general de cinco grados de ancho escaneando de un lado a otro en azimut a la tasa de dos grados por segundo. La parte giratoria del telescopio pesa aproximadamente 32 toneladas, lo que generó un desafío de ingeniería importante. Para evitar la contaminación de radiación de micro-ondas del suelo posee una pantalla alrededor del telescopio.

Las observaciones se realizan en tres frecuencias: 145, 215 y 280 GHz. y posee un total de 3.072 detectores. Los detectores son superconductores de alta sensibilidad que permiten la medición de la temperatura del CMB dentro de unas pocas millonésimas de grado. Este conjunto posee un sistema de refrigeradores criogénicos de helio para mantener los detectores a un tercio de grado sobre el cero absoluto.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

La ubicación del ACT en un lugar tan alto y árido disminuye la contaminación de la emisión del vapor de agua en la atmósfera en radiación de microondas.

Telescopios de clase 4m Son numerosos los telescopios de cuatro metros o menos que se encuentran en Chile. La gran mayoría se dedican a observaciones en el óptico o infrarrojo. Se encuentran ubicados en los diversos observatorios que hay en el país y los más pequeños tienen la particularidad de que su modo de observación no requiere de asistente de observación. Su instrumentación se mantiene actualizada con las últimas tecnologías.

Los telescopios de este tipo en los diferentes observatorios son los siguientes:

- Cerro Pachón: El telescopio SOAR (*Southern Astrophysical Research Telescope*) tiene 4.1 metros de diámetro y se desempeña en el rango óptico e infrarrojo cercano. Su modo de observación es remoto con apoyo de operador en el telescopio.
- Cerro Tololo: El telescopio Blanco de 4 metros trabaja en los rangos óptico e infrarrojo. Funciona en modo visitante. Está siendo modificado para alojar el instrumento DECam (*Dark Energy Camera*), que lo convertirá en un instrumento de rastreo óptico de campo amplio, especialmente sensible a la luz corrida al rojo de galaxias distantes.
- Cerro La Silla: El telescopio NTT (*New Technology Telescope*) tiene 3.58 metros de diámetro y se desempeña en el rango óptico e infrarrojo. Su modo de observación es visitante. Además, se encuentra el telescopio de 3.6m que hoy se usa exclusivamente con el espectrógrafo cazador de planetas HARPS.
- Cerro Paranal: El telescopio VISTA (*Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy*) tiene 4.1 metros de diámetro y rastrea el cielo a longitudes de onda ópticas y de infrarrojo cercano. El objetivo de VISTA es estudiar objetos fríos, oscurecidos por nubes de polvo o porque su luz se ha extendido hacia longitudes de onda más rojas debido a la expansión del Universo. Se trata de un telescopio de rastreo con lo cual no tiene modo de observación para astrónomos no

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

pertenecientes al proyecto.

- Llano de Chajnantor: El radiotelescopio NANTEN2 (en japonés *nan* es sur y *ten* es cielo) tiene de 4 metros de diámetro y trabaja en el rango submilimétrico. Se enfoca en estudiar la distribución a gran escala, dinámica, estructura y química del medio intergaláctico de la Vía Láctea y otras galaxias cercanas. Su modo de observación es visitante.

Telescopios de clase 1m Son numerosos los telescopios de tipo 1 metro. La gran mayoría se dedican a observaciones en el óptico o infrarrojo. Se encuentran ubicados en los diversos observatorios que hay en el país. No suelen tener instrumentos de última generación aunque permiten, en algunas áreas, realizar astronomía completamente competitiva. En parte para disminuir los costos de operación, muchos de estos telescopios son operados de forma robótica, remota, o visitante sin operador.

Según su ubicación los telescopios de este tipo que hay son:

- Cerro Tololo: El menor de todos es el telescopio CHASE500 (*Chilean Automatic Supernova sEarch*) de 0.5 metros trabaja en modo robótico para la búsqueda automática de explosiones de supernovas en la banda óptica. Los telescopios PROMPT (*Panchromatic Robotic Optical Monitoring and Polarimetry Telescopes*) son seis telescopios robóticos de 0.61 metros que trabajan en el rango óptico y se dedican a la búsqueda de explosiones de rayos Gamma (GRBs) y de supernovas. El telescopio de uso remoto SARA tiene 0.6m. También de 0.61 metros es el telescopio *Curtis-Schmidt Telescope* que se dedica al seguimiento de escombros artificiales en el espacio para la NASA, trabaja en modo visitante. A continuación se encuentran en grupo de telescopios SMARTS (*Small and Moderate Aperture Research Telescope System*) que son de 0.9, 1.0, 1.3 y 1.5 metros, el más pequeño de ellos trabaja en modo visitante y en modo servicio sin contacto con el operador, el de 1.0 metros trabaja únicamente en modo visitante y los dos restantes trabajan en modo servicio sin contacto con el operador con sistema de cola de observación, los dos más pequeños, 0.9 y 1.0, se desempeñan en el rango óptico mientras

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

que los dos más grandes, 1.3 y 1.5, se desempeñan en el rango óptico e infrarrojo.

- Cerro La Silla: El menor de ellos es de 0.25 metros y es el TAROT (*Télescope à Action Rapide pour les object Transitoires*), se trata de un telescopio robótico que trabaja en el rango óptico y se dedica a la búsqueda de explosiones de rayos Gamma. A continuación el REM (*Rapideye Mount Telescope*) también se trata de un telescopio robótico que observa explosiones de rayos Gamma pero en el rango óptico, solo tiene modo servicio. El telescopio suizo TRAPPIST de uso remoto tiene un diámetro de 0.6m. El telescopio Euler es de 1.2 metros y se dedica en gran parte a la búsqueda de planetas extrasolares, su modo de observación es visitante y trabaja en el rango óptico. Seguido en tamaño está el telescopio Danés (*Danish Telescope*) que es 1.54 metros, trabaja en el modo visitante y se desempeña en el rango óptico. Finalmente se encuentra el telescopio MPG/ESO de 2.2 metros que trabaja en el rango óptico y tiene dos modos de operación que son el visitante y el servicio sin contacto con el operador.
- Cerro Las Campanas: Son dos los telescopios de este tipo. El primero el *Henrietta Swope Telescope* que es de 1.0 metro y se desempeña en el rango óptico. El segundo es el *Irénée du Pont Telescope* tiene 2.5 metros y trabaja en el óptico en infrarrojo. Ambos telescopios funcionan en modo visitante.
- Cerro Paranal: El único telescopio de este tipo es el VST (*VLT Survey Telescope*) que es un telescopio de 2.6 metros que mapea el cielo en el rango óptico. Como este telescopio es para realizar mapeos no tiene modo de observación para astrónomos externos, se opera directamente desde el observatorio por los miembros del proyecto.
- Cerro Armazones: Hay tres telescopios de estas características en este observatorio. Todos trabajan en modo visitante y en el rango óptico. Tienen 0.41, 0.84 y 1.5 metros. El telescopio de 0.84 metros se desempeña realizando un monitoreo de quásares.
- Llano de Chajnantor: El CBI (*Cosmic Background Imager*) es un interferómetro

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

milimétrico compuesto de 13 antenas de 1.4 metros de diámetro cada una. Está diseñado para estudiar la radiación de fondo cósmica de microondas originada en el universo temprano.

1.3.2 Futuro

Esta sección describe los principales proyectos que se instalarían en nuestro país en los próximos años. Cabe hacer notar que probablemente serán varios más los telescopios más modestos que también se instalarán en este periodo. Se encuentran ordenados de mayor a menor según la superficie de su área colectora.

1.3.2.1 E-ELT

El European Extreme Large Telescope (E-ELT) es un revolucionario y nuevo concepto de telescopio basado en tierra que tendrá 39.3 metros en diámetro y será el telescopio óptico/infrarrojo cercano más grande del mundo. Este telescopio será construido y operado por ESO.

Con el inicio de las operaciones planificadas para comienzos de la próxima década, el E-ELT abordará los mayores desafíos científicos de nuestro tiempo y se espera que consiga notables primicias, incluyendo el seguimiento de planetas similares a la Tierra que están alrededor de otras estrellas en las “zonas habitables” donde podría existir vida. También realizará “arqueología estelar” en galaxias cercanas así como contribuciones fundamentales a la cosmología a través de la medición de las propiedades de las primeras estrellas y galaxias e investigando la naturaleza de la materia y energía oscuras.

El concepto actual es de un telescopio con un espejo primario segmentado y un secundario de 4.2m. Para compensar el desenfoque de las fotografías estelares debido a la turbulencia atmosférica se incorporan a la óptica del telescopio un espejo adaptativo sostenido por 8000 actuadores que pueden distorsionar su forma mil veces por segundo.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

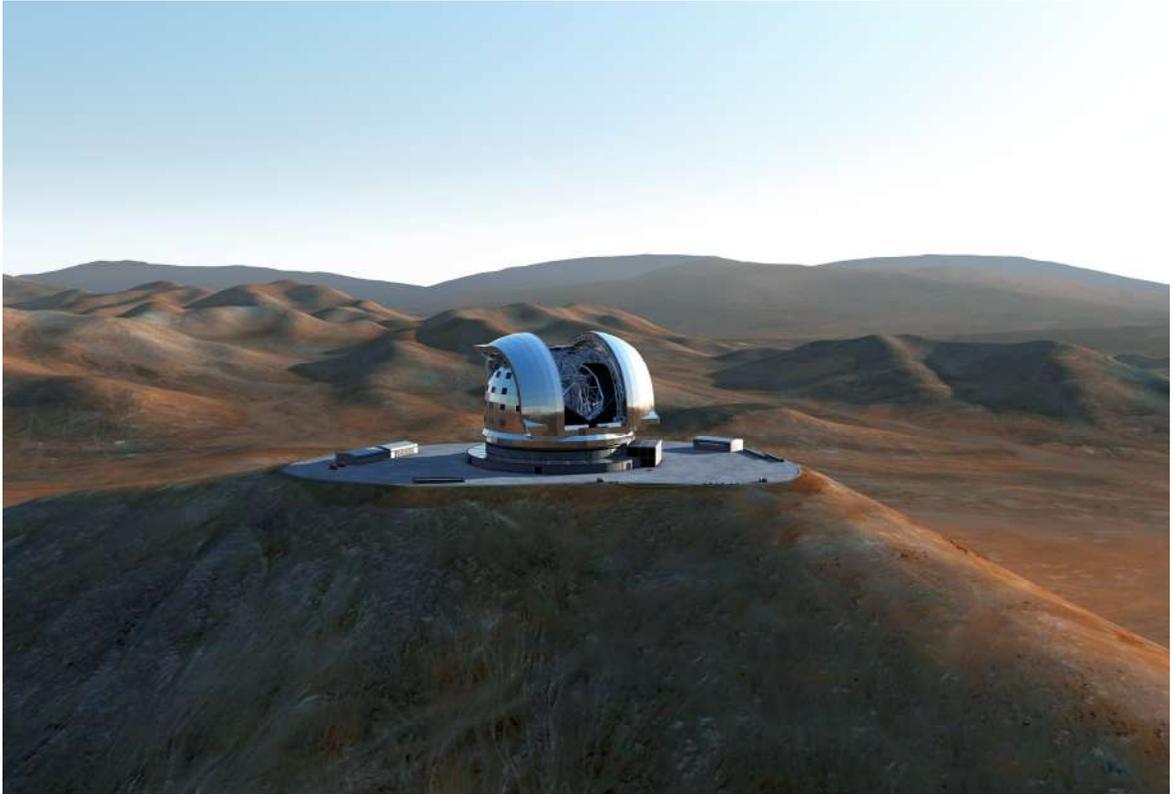


Figura 1.23. Imagen digital del diseño del telescopio E-ELT en Cerro Armazones (<http://www.eso.org>).

El telescopio tendrá varios instrumentos científicos que se irán incorporando año a año. Hasta el momento se proyecta tener siete entre ellos una cámara y espectrógrafo para detección y observación de planetas, una cámara y espectrógrafo en el infrarrojo medio, un espectrógrafo de alta resolución, un espectrógrafo multi-objeto y una cámara y espectrógrafo en infrarrojo cercano. Aún se está evaluando cuales serán exactamente los instrumentos que se instalarán y cuál será su orden de utilización.

Una de las ventajas de este telescopio será pasar de un instrumento a otro en minutos sin perder tiempo de observación. El telescopio y la cúpula también serán capaces de cambiar de posición en muy corto tiempo. La habilidad de observar a través de un amplio rango de longitudes de onda, desde la óptica hasta el infrarrojo intermedio, permitirá a los científicos aprovechar el tamaño del telescopio en toda su extensión.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

1.3.2.2 GMT

El Giant Magellan Telescope (GMT¹¹) será otro de los telescopios terrestres gigantes que prometen revolucionar nuestra visión y comprensión del universo. Sus principales objetivos son buscar vida en otros planetas además de estudiar cómo se formaron las primeras galaxias, en qué consisten la materia y la energía oscura y cuál es el destino del universo. Este telescopio se emplazará en el Cerro Las Campanas a 2550 metros de altura.

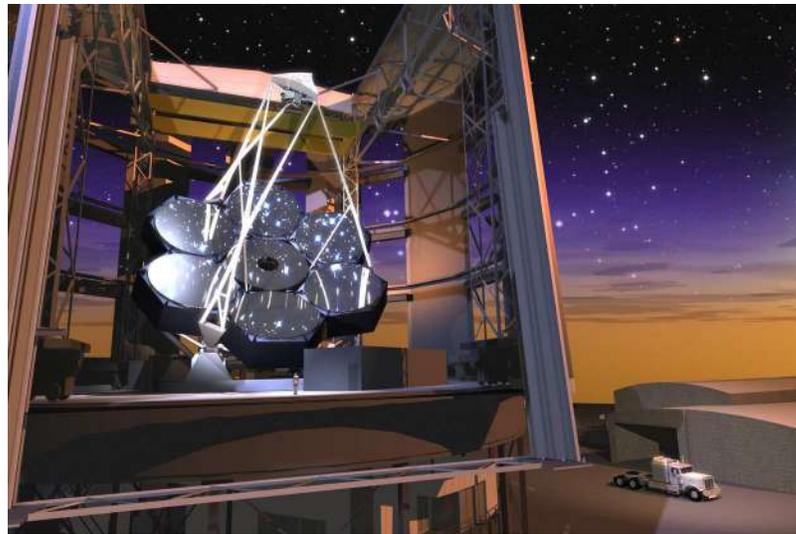


Figura 1.24: Impresión artística del diseño del telescopio GMT (<http://www.gmto.org>).

El GMT tiene un diseño único que ofrece varias ventajas. Se trata de un telescopio con un espejo segmentado que cuenta con siete de los más grandes espejos monolíticos rígidos como segmentos. Seis de ellos fuera del eje con 8,4 metros de diámetro que rodean el eje central formando una sola superficie óptica con un área colectora de 24,5 metros de diámetro. El GMT tendrá un poder de resolución 10 veces mayor que el Telescopio Espacial Hubble. El proyecto GMT es el trabajo de un consorcio internacional que incluye: Astronomy Australia Ltd., Universidad Nacional de Australia, Carnegie Institution for Science, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics,

¹¹ <http://www.gmto.org>

Universidad de Texas Austin, Universidad de Texas A&M, Universidad de Arizona, Universidad de Chicago y Korea Astronomy and Space Science Institute.

Uno de los aspectos más sofisticados desde el punto de vista de ingeniería en este proyecto es el sistema de óptica adaptativa de los espejos secundarios. Contará con siete espejos secundarios que serán flexibles bajo los cuales habrá cientos de accionadores que ajustarán constantemente los espejos para contrarrestar la turbulencia atmosférica. Este telescopio trabajará en el rango de la astronomía óptica/IR).

1.3.2.3 CCAT

El Cornell Caltech Atacama Telescope (CCAT¹²) será un telescopio de 25 metros que se dedicará a la astronomía submilimétrica y estará situado a 5600 m de altura en el Cerro de Chajnantor. CCAT combinará alta sensibilidad, un amplio campo de visión y una amplia gama de longitudes de onda (200, 350, 450, 620, 740 y 850 μ m). Los objetivos de ciencia incluyen la formación de galaxias y su evolución a lo largo de la historia del Universo, el gas caliente que impregna los cúmulos de galaxias, la formación de estrellas, los discos protoplanetarios, y discos de polvo en la galaxia Vía Láctea, y los objetos del cinturón de Kuiper, en los confines del sistema solar. Su instrumentación incluirá cámaras de bolómetro, espectrómetros de detección directa, y arreglos de receptores de heterodino.

El consorcio CCAT incluye a la Universidad de Cornell, el Instituto de Tecnología de California (Caltech) y el Laboratorio de Propulsión Jet, que es administrado por Caltech para la NASA, la Universidad de Colorado, la Universidad de Colonia y la Universidad de Bonn, la Universidad de McGill, la Universidad de McMaster, la Universidad de British Columbia, la Universidad de Calgary, la Universidad de Toronto, la Universidad de Waterloo, y la Universidad de Western Ontario y Associated Universities, Inc. CCAT funciona en el Parque Astronómico de Atacama en el norte de Chile.

¹² <http://www.submm.org>

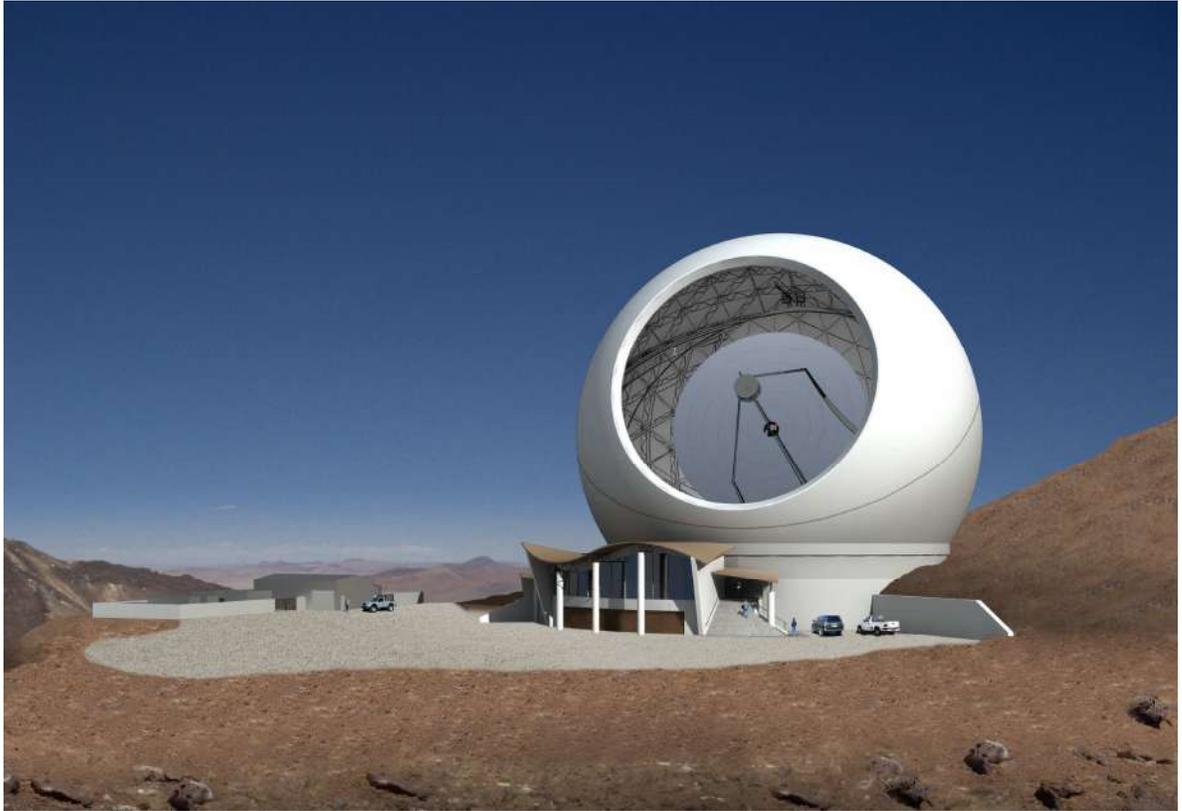


Figura 1.25: Diseño del proyecto CCAT con su innovadora cúpula en el Cerro Chajnantor (<http://www.submm.org>).

1.3.2.4. LSST

El Large Synoptic Survey Telescope (LSST¹³) será un nuevo tipo de telescopio con un espejo de 8.4 metros de diámetro ubicado en Cerro Pachón. Con un poder de recolección de luz entre las más grandes del mundo, que puede detectar objetos débiles con exposiciones cortas. Su campo de visión amplio único le permitirá observar grandes áreas del cielo a la vez, y por ser compacto y ágil, podrá moverse rápidamente entre las imágenes. La cámara cubrirá diez grados cuadrados del cielo con un área colectora de cuarenta metros cuadrados. Tomará más de 800 imágenes panorámicas cada noche cubriendo así el cielo dos veces cada semana.

¹³ <http://www.lsst.org>



Figura 1.26: Instalaciones del telescopio LSST y del telescopio atmosférico Calypso (<http://www.lsst.org>).

Los datos de LSST serán utilizados para crear un mapa 3D del Universo con una profundidad y detalle sin precedentes. Este mapa podrá ser utilizado para localizar la materia oscura y caracterizar las propiedades de la energía oscura.

Los planes para compartir los datos de LSST con el público son tan ambiciosos como el propio telescopio. El proyecto LSST proporcionará herramientas de análisis para permitir a los estudiantes y al público en general participar en el proceso del descubrimiento científico. El proyecto se divide en tres áreas principales: La cámara, el telescopio y el sitio, y finalmente la gestión de datos.

Uno de los desafíos de este proyecto es el sistema de transferencia de datos ya que se espera que cada noche se generen 15 Terabytes de datos que deben ser transmitidos a un centro de datos y que a su vez generará una base de datos que tendrá un total de varios Petabytes. La velocidad de transferencia actual con fibra óptica no es suficiente para esta cantidad de datos y es por ello que una de las áreas del proyecto es la gestión de datos que se dedica a analizar además del problema de la transferencia el desafío del almacenaje de datos. Para posibilitar la transferencia de estos volúmenes de información se requiere contar con una red de datos de grandes capacidades, la

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

proyección es que al 2020 exista al telescopio capacidades de 100Gbps (las redes más potentes hoy en día en el país alcanzan un decimo de esta capacidad). Por otro lado, estas redes son de propósito específico y de investigación, su orientación es a activar estos enlaces con redes científicas ya que se requiere de implementación e investigación en protocolos de avanzada, experimentar en diversas técnicas para optimización de transferencia de datos, etc.; propósito que escapa a la norma de una red de carácter comercial.

El LSST es una asociación público-privada, y los datos se harán públicos inmediatamente. Una corporación sin fines de lucro, llamada Corporación LSST, se ha creado para gestionar la colaboración de más de 100 científicos e ingenieros, y para aumentar el financiamiento privado y de la Fundación Nacional de Ciencias de EE.UU. (NSF).

1.3.2.5 TAO

El University of Tokyo Atacama Observatory (TAO¹⁴) es un observatorio ubicado en el Cerro Chajnantor a 5640 metros de altura. Se encuentra a menos de 5 km. del Llano de Chajnantor. El proyecto consiste en instalar un telescopio de 6.5 metros de diámetro para operar en el rango óptico/IR. Un primer paso para este proyecto fue la instalación del telescopio piloto llamado miniTAO de 1m de diámetro en 2009.

El espejo primario del telescopio tendrá una cobertura de plata. El espejo secundario estará equipado de óptica adaptativa para compensar la turbulencia atmosférica y a su vez tendrá un espejo terciario que permitirá cambiar entre instrumentos. Tendrá cámaras y espectrómetros para observaciones en el infrarrojo medio a 20-30 μ m y en el infrarrojo cercano 1-3 μ m y dos espectrógrafos para el rango óptico. Las cámaras del infrarrojo medio serán las de mayor sensibilidad en el mundo para estas longitudes de onda.

¹⁴ <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/TAO/>



Figura 1.27: Imagen del espejo primario del TAO en construcción (<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp>).

1.3.3 Pasado

Esta sección describe someramente los sitios de astronomía profesional que no se encuentran actualmente actualizados con instrumentación astronómica de punta. Están ordenados cronológicamente.

Observatorio Astronómico Nacional El Observatorio Astronómico Nacional (OAN) se encuentra ubicado en la cima del cerro Calán en la comuna de Las Condes (Santiago). En la actualidad posee telescopios y cúpulas históricas, en conjunto con telescopios modernos dirigidos a la difusión y a la docencia. Anteriormente estuvo ubicado en Quinta Normal y en Lo Espejo antes de llegar a su ubicación actual. Este observatorio depende de la Facultad de Ciencias Físicas y matemáticas de la Universidad de Chile y en él se alberga el Departamento de Astronomía de esta universidad.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”



Figura 1.28: Observatorio en Cerro Calán.

Cerro El Roble La estación astronómica Cerro el Roble está ubicada al norponiente de Santiago, debido a las favorables condiciones astronómicas del lugar. Depende del Departamento de Astronomía de la Universidad de Chile y su instalación se realizó en 1965 gracias a un convenio de coparticipación entre Chile y la Unión Soviética. En este observatorio se encuentra el telescopio del sello de Correos de Chile, correspondiente al MAKUKOV (cámara astrográfica de 70 cm. de apertura).

Parque Radioastronómico de Maipú Este observatorio radioastronómico se encontraba en la Rinconada de Maipú (Santiago) y fue construido por la Universidad de Chile en 1959 convirtiendo a Chile en el primer país Latinoamericano en iniciar investigaciones radioastronómicas. Dejó de funcionar hace más de diez años.

Observatorio Astrofísico San Cristóbal En 1903 se instaló en una de las cumbres del Cerro San Cristóbal (Santiago) un observatorio astronómico (actualmente denominado Manuel Foster), gemelo del Observatorio Lick de California. En su época fue el más grande del Hemisferio Sur y el décimo en tamaño del mundo. Esta instalación pertenece en el presente a la Pontificia Universidad Católica de Chile.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

1.3.4 Emplazamientos

Las siguientes figuras resumen los distintos emplazamientos astronómicos en Chile.



Figura 1.29: Mapa de Chile con regiones de emplazamientos astronómicos

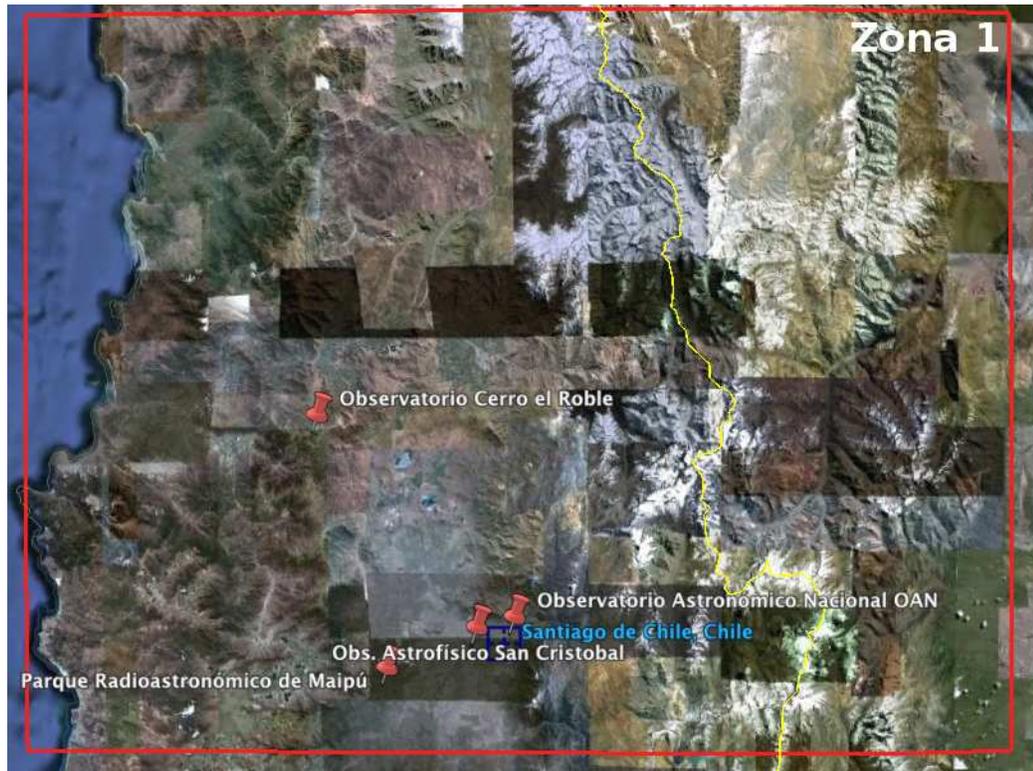


Figura 1.30. Detalle de zona 1 de la figura 1.29



Figura 1.31. Detalle de zona 2 de la figura 1.29



Figura 1.32. Detalle de zona 3 de la figura 1.29

2 MARCO DE ANÁLISIS DEL ESTUDIO

Las tecnologías, sistemas, productos y servicios que pertenecen al ecosistema de la astronomía son heterogéneos en su nivel tecnológico y en su diferenciación respecto de otras áreas productivas.

Para el análisis de los requerimientos de los observatorios, del capital humano en Chile y de las oportunidades para la industria y la academia, es necesario recurrir a la distinción de tres categorías para diferenciar los niveles de tecnología involucrados.

Estas categorías son:

- a. Desarrollo de tecnologías de frontera
- b. Proyectos y servicios de alta exigencia en base a tecnologías consolidadas.
- c. Proyectos, bienes y servicios no diferenciados

La primera categoría, “**desarrollo de tecnologías de frontera**”, responde a la demanda de los astrónomos de observar más lejos, en más bandas del espectro electromagnético, con mayor resolución espacial óptica, con mayor resolución espectral, desafíos que no son satisfechos con los instrumentos disponibles en un momento dado.

Esto implica el desarrollo de nuevas tecnologías cuya factibilidad, performance, costo, fiabilidad, no pueden ser conocidos a priori y son por tanto materia de investigación.

Una tecnología de frontera se caracteriza por un alto riesgo tanto en la probabilidad de alcanzar las funcionalidades esperadas como en los costos y plazos que demanda el desarrollo.

Como consecuencia, las nuevas tecnologías desarrolladas pueden dar lugar a aplicaciones en otras áreas productivas, cuyo alcance es generalmente desconocido.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

La segunda categoría, “**proyectos y servicios de alta exigencia en base a tecnologías consolidadas**”, se refiere a exigencias que son en gran medida propias a la astronomía, pero cuyos insumos tecnológicos son conocidos y generalmente han sido probados en otras áreas productivas.

A modo de ejemplo, si bien las comunicaciones por fibra óptica son conocidas desde hace tiempo, su instalación y conexión a las alturas de los nuevos observatorios representaron una incertidumbre que debió ser resuelta.

En otro ámbito, acciones que podrían ser triviales como reemplazar un actuador de un espejo, exigen un cuidado especial incluso al momento de sacar o poner una tuerca ya que un movimiento en falso podría dañar estructura delicadas.

De esta manera, muchos de los proyectos o servicios que se basan en tecnologías probadas, como son las comunicaciones de datos, el aislamiento térmico de los edificios, el control de vibraciones, son exigidos al máximo desde el punto de vista de las prestaciones, de la precisión y de la calidad.

Por último, la tercera categoría, “**proyectos, bienes y servicios no diferenciados**”, incluye tanto los servicios del sector no transable tales como alimentación, transporte, construcción de edificios de oficinas, instalación de aire acondicionado, así como bienes no diferenciados entre los cuales se pueden incluir los computadores de escritorio, artículos eléctricos. Se trata de bienes y servicios para los cuales existe una oferta amplia en Chile y en particular en el Norte, por parte de empresas que prestan ese mismo servicio a empresas de la gran minería del cobre u otras áreas productivas. Lo mismo es válido para los bienes “off the shelf” que necesitan los observatorios.

Esta diferenciación es necesaria al momento de analizar las capacidades, oportunidades y falencias existentes en Chile, ya que las métricas para cada nivel deben necesariamente estar diferenciadas, lo que también se extiende a las políticas de apoyo al desarrollo de un ecosistema ligado a la astronomía.

La frontera entre estos niveles no es taxativa, por lo que es posible que la clasificación de algún desarrollo o servicio pudiera ser materia de discusión.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

NIVEL	CARACTERÍSTICAS	EJEMPLOS	IMPACTO
<p>Desarrollo de tecnologías de frontera</p>	<p>Nuevas tecnologías cuya factibilidad, performance, costo, fiabilidad, son materia de investigación.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alto riesgo • Alta incertidumbre 	<ul style="list-style-type: none"> • Nuevos detectores • Nuevos revestimientos de espejos • Nuevos algoritmos de tratamiento de imágenes 	<ul style="list-style-type: none"> • Probabilidad de alto impacto en otras áreas (medicina, industria)
<p>Proyectos y servicios de alta exigencia en base a tecnologías consolidadas.</p>	<p>Uso de tecnologías probadas y consolidadas que deben ser usadas para la astronomía en condiciones inéditas y/o de mayor exigencia</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mediano riesgo • Mediana incertidumbre 	<ul style="list-style-type: none"> • Fibra óptica en elevada altura. • Comunicaciones de datos de grandes flujos (Tb/s) a grandes distancias 	<ul style="list-style-type: none"> • Consolida, mejora la calidad de empresas que realizan el proyecto o servicio. • Entrega “track record” para apertura de otros mercados. • La experiencia puede generar nuevas soluciones para minería, industria.
<p>Proyectos, bienes y servicios no diferenciados</p>	<p>Bienes y servicios que los observatorios utilizan de la misma manera que otras áreas como la minería o industria.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Riesgo controlable • Muy baja incertidumbre 	<ul style="list-style-type: none"> • Bienes y Servicios del sector no transable: obras civiles, transporte, jardinería. • Hardware y equipos “off the shelf” (dominan importaciones) 	<ul style="list-style-type: none"> • Beneficio igual a la facturación • Es posible estimar un multiplicador de impacto en la cadena productiva según la matriz insumo-producto.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

3 LOS OBSERVATORIOS

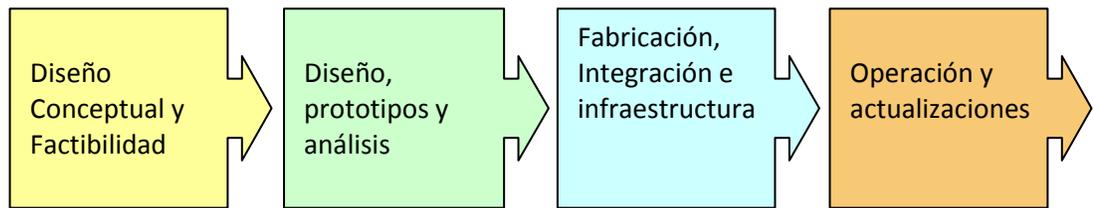
3.1 CICLO DE VIDA

Los grandes observatorios astronómicos son proyectos de alta complejidad y heterogeneidad en sus componentes y sistemas, tanto en la etapa de la construcción como de la operación. Por ello, tanto los requerimientos de calidad como las inversiones involucradas varían en función de esa complejidad y es necesario metodológicamente diferenciar las distintas etapas y los distintos niveles de tecnología que un observatorio requiere.

Para este fin, se presenta un esquema de ciclo de vida elaborado más desde la perspectiva de la ingeniería que desde la astronomía, indicando de manera genérica las tecnologías involucradas. Posteriormente, se realiza una sistematización con un nivel de mayor detalle de los requerimientos tecnológicos, enfocada en los proyectos que tienen a Chile como anfitrión.

Se ha esquematizado el proceso en cuatro etapas que son el diseño conceptual y análisis de factibilidad, el diseño de ingeniería básica y de detalle, la fabricación e integración. Por último, está la operación del observatorio, periodo que puede abarcar más de 50 años.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”



3.1.1 Desarrollo del Concepto

El proceso tiene como punto de partida una inquietud científica o “science case” respecto de la ciencia astronómica para la cual los instrumentos en operación en un momento dado no resultan suficientes para entregar los datos que desean los astrónomos.

Ejemplos de algunos “science case” actuales son la búsqueda de planetas extra-solares, la tasa de expansión del universo, el mapa de la materia oscura.

El “science case” determina las especificaciones conceptuales del instrumento científico y del espejo o antena: qué frecuencias del espectro electromagnético se quiere observar (luz visible, infrarroja, radio) el área de recolección de fotones (espejo de 10 ó 30 metros, antenas de radio sobre una gran superficie), especificaciones particulares tales como “alta resolución en la medida del desplazamiento hacia el rojo”, “polarización”.

Estas especificaciones son estudiadas por grupos académicos para determinar la factibilidad tecnológica así como para obtener una primera aproximación al costo de construcción. Se trata de determinar qué detectores ópticos o de infrarrojo o banda de receptores radiofrecuencia se requieren. Se llevan a cabo estudios y simulaciones para evaluar la geometría del espejo o de la antena y analizar las alternativas de materiales de construcción.

Paralelamente, se comienza la evaluación de alternativas de sitios de construcción. Los sitios candidatos son evaluados respecto de las condiciones meteorológicas que

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

ofrezcan el mayor número de noches de observación, las menores perturbaciones atmosféricas, la infraestructura disponible (camino, energía, comunicaciones) o la factibilidad de construirla, condiciones políticas y administrativas.

De esta etapa, el resultado es una propuesta técnico – económica que sirve de base para la búsqueda de financiamiento.

3.1.2 Etapa de diseño, prototipos y análisis

Esta etapa implica organizar el proyecto en subsistemas y asignar los trabajos de diseño y validación a diferentes grupos.

Instrumentos, espejo / antena: El desarrollo conceptual y básico de los instrumentos científicos se realiza uno a uno y exige recurrir a nuevas tecnologías. El impulso del desarrollo instrumental puede ser por una licitación de parte de un observatorio (por ejemplo, ESO, NOAO o AURA) o partir directamente de la iniciativa de un grupo académico motivados por un caso científico a responder. Típicamente, por esta última vía se desarrollan instrumentos para una inquietud científica particular, mientras que las licitaciones apuntan a instrumentación de variado alcance científico. Esto puede ser válido también para el desarrollo del reflector (espejo o antena) e incluye los sistemas para óptica activa o adaptativa. En esta etapa puede ser necesaria la fabricación de prototipos tanto para la prueba de concepto como para pruebas de integración entre subsistemas. En esta etapa se especifican en detalle y se diseñan los detectores que pueden ser ópticos, infrarrojo, receptores radiofrecuencia, los sistemas de electrónica de bajo ruido y criogenia.

Montura: corresponde al estudio, diseño y validación del soporte en donde se montarán el reflector y los instrumentos científicos. Es un elemento crítico que incluye las estructuras de soporte, los mecanismos de movimiento, motores, encoders y control de guiage para que los instrumentos apunten con precisión a la región del cielo

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

deseada. Incluye los análisis de deformaciones térmicas y gravitacionales, mediante simulaciones matemáticas (FEM).

Domo: es la estructura que se diseña para proteger los instrumentos científicos del ambiente, pero que a la vez necesita una movilidad tal que permita apuntar el telescopio o radiotelescopio en la dirección deseada. Comprende por una parte el diseño estructural y por otra parte el diseño de los mecanismos de movimiento. Ambos diseños pueden ser encargados a empresas distintas, que se deben coordinar entre sí. Este diseño incluye las fundaciones sobre las cuales se asentará el domo y los sistemas de ventilación cuyo objetivo es mantener un gradiente de temperatura estable.

Infraestructura y edificios: se trata del diseño de ingeniería básica y de detalle de toda la infraestructura en el sitio de emplazamiento, tales como caminos, edificios, energía eléctrica, comunicaciones.

De esta etapa, el resultado son planos de ingeniería de detalle, diagramas de flujo, planos de arquitectura y estructurales, especificaciones técnicas, lista de componentes y toda otra documentación necesaria para abordar la fabricación, construcción y montaje del sistema.

3.1.3 Etapa de construcción e instalación

Construcción e integración del instrumento científico, espejo y montura: cada subsistema es construido de acuerdo a las especificaciones y los planos. Esta construcción es común que se lleve a cabo en diferentes lugares e incluso en diferentes países.

Los elementos son construidos, ensamblados, calibrados y luego el o los instrumentos científicos son unidos con el espejo o con la antena y ambos son colocados en la montura.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

La integración se completa con los sistemas electrónicos de control de los instrumentos (filtros, tiempo de exposición), los sistemas electrónicos de control de posición del telescopio o antena (guiaje) y elementos de monitoreo de variables críticas tales como temperatura y vibraciones.

Parte del conjunto puede ser la óptica adaptativa que comprende equipos láser, control de deformación de espejos, software de retroalimentación, entre otros.

Construcción y montaje del domo: las partes del domo son fabricadas comúnmente en lugares lejanos al sitio que albergará el telescopio. En el sitio se construyen las fundaciones y la parte fija del domo. Sobre ésta, se arma la parte móvil y se integran los sistemas mecánicos de movimiento, los motores, encoders, sujeciones. Preferentemente, al lado del domo se construyen las instalaciones para montaje y desarme de los espejos e instrumentos.

Sistemas y enlaces para flujos de datos: Con mayor énfasis en los nuevos proyectos, la generación de datos es de tal volumen que no basta con pensar en soluciones de capacidad sino en soluciones de infraestructura dedicada.

Salas de control: Dependiendo del modo de observación (modo visitante, modo remoto), se requiere de una o de varias salas de control eventualmente en distintos lugares del mundo. Aparte de los edificios propiamente tales, es necesario configurar e instalar el Software y Hardware de los distintos sistemas que deben ser controlados y que van desde la óptica adaptativa, el sistema de guiaje, el control de exposición y filtros, y el monitoreo de variables de instrumentos, hasta la interfaz de usuario.

Edificios: construcción de instalaciones para mantenimiento, operación y alojamiento. Algunas de estas construcciones se realizan en el sitio mismo mientras que otras se realizan en centros urbanos.

Infraestructura y servicios: se trata de la instalación en el lugar del cableado eléctrico, sistemas eléctricos de respaldo, tendido de fibra óptica, equipos para comunicaciones de voz, video, internet, así como las instalaciones y conexiones a

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

redes de agua y de electricidad. Gran parte de este trabajo se realiza en el terreno mismo por empresas locales.

3.1.4 Etapa de Operación

Las principales actividades durante la fase de operación de un observatorio son:

Control de la observación: selección y control de los instrumentos científicos por parte del astrónomo, control de posicionamiento del domo, control de dirección (guiaje), filtros, tiempos, movimientos. Control de adquisición de datos, correladores, espectrógrafos, etc.

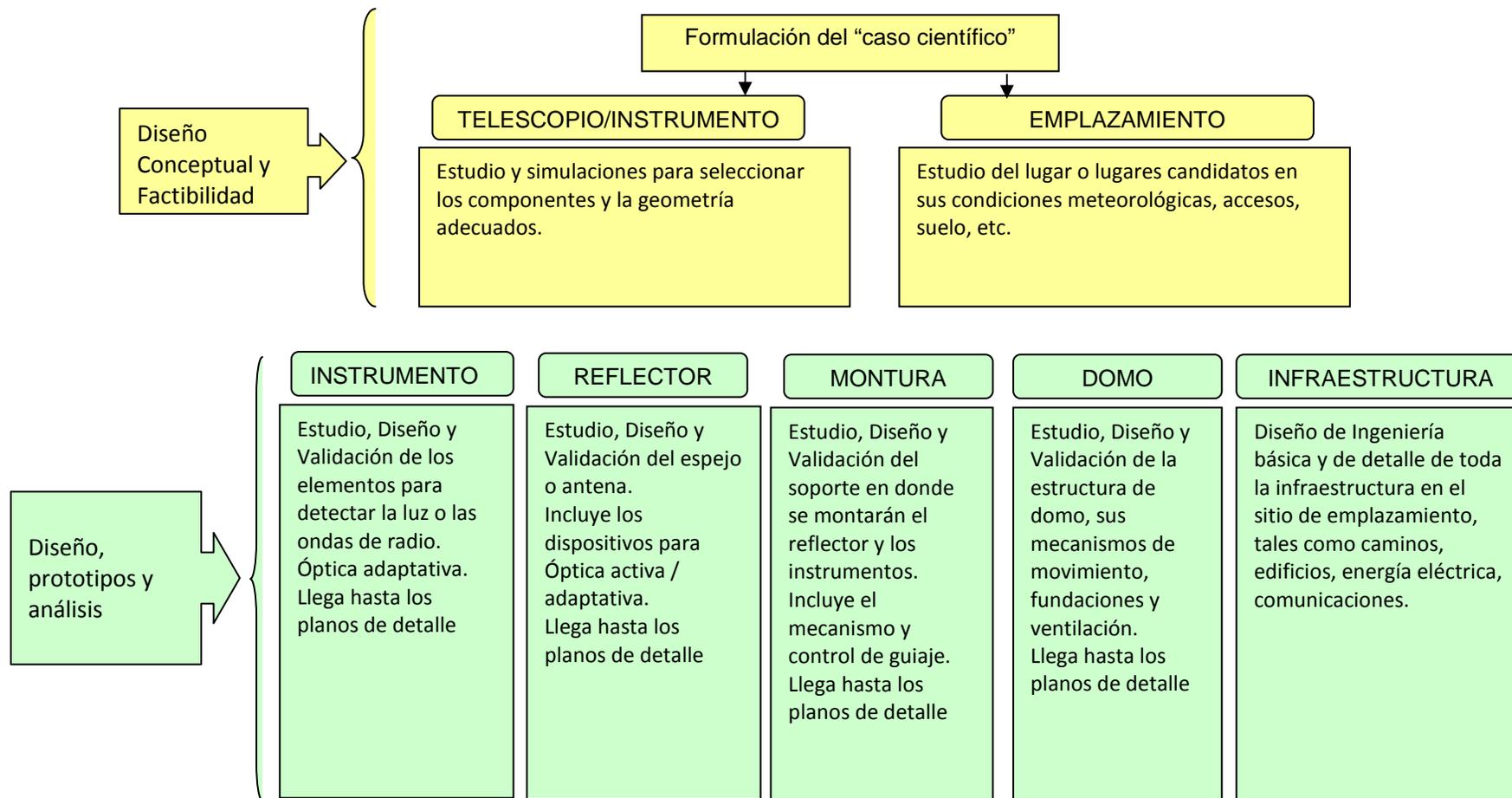
Gestión de datos: adquisición y procesamiento de las señales, transmisión y almacenamiento. Desarrollo de software especializado para el procesamiento de datos y extracción de la información científica de interés.

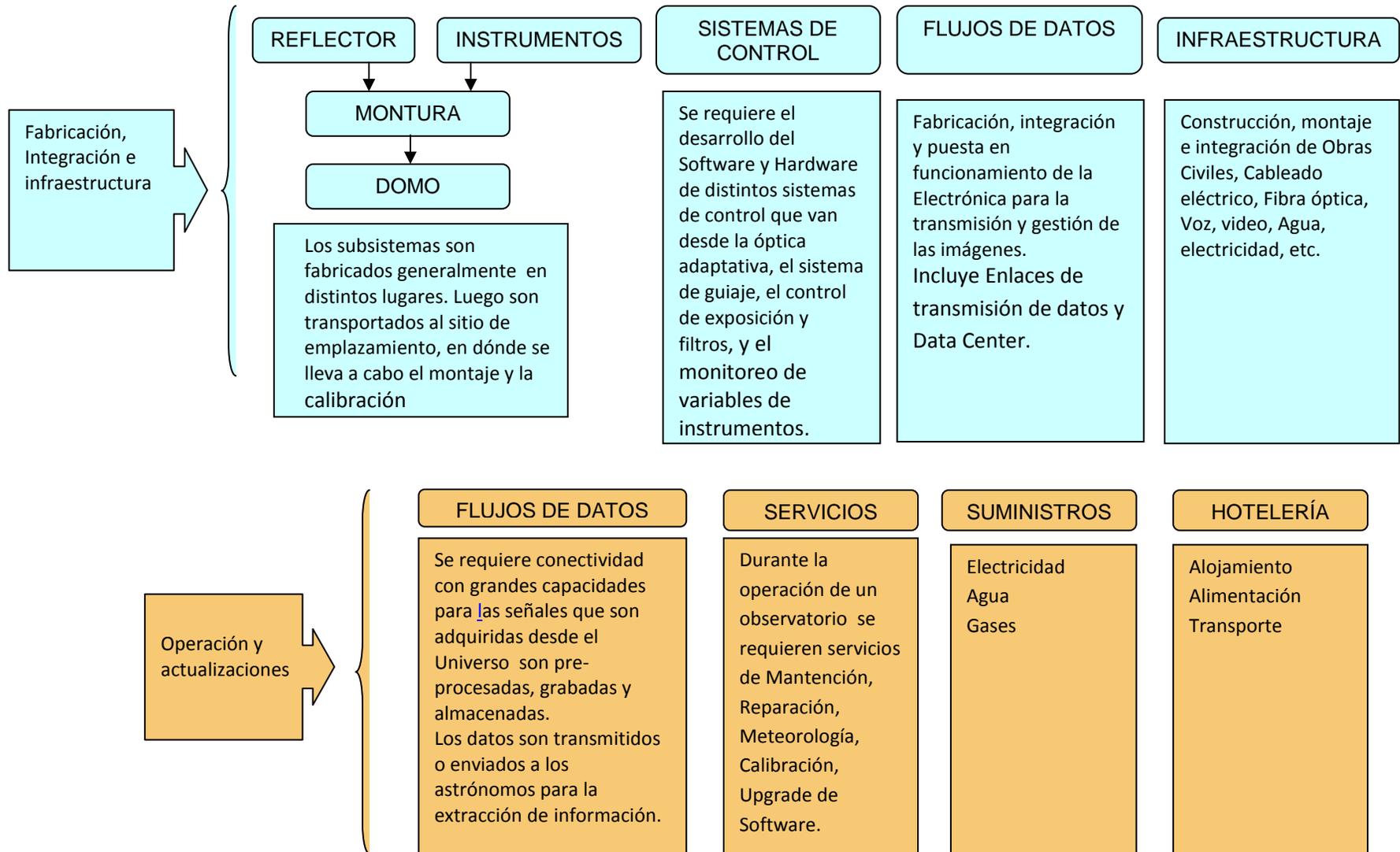
Servicios especializados: Mantenimiento preventivo y predictivo de instrumentos y espejos, reparación, servicios de meteorología, calibración, actualización de Software, insumos para criogenia, fabricación de partes y piezas especiales.

Suministros generales: Energía eléctrica, agua, servicios de limpieza, mantención no especializada (gasfitería, aire acondicionado, carpintería, mantención eléctrica).

Hotelería y transporte: servicios de transporte, alojamiento y alimentación.

CICLO DE VIDA DE UN OBSERVATORIO ÓPTICO O RADIOASTRONÓMICO





3.2 ESTIMACIÓN DEL TAMAÑO DE LOS CONTRATOS INTERNACIONALES

DISPONIBILIDAD DE LA INFORMACIÓN

- a. Existen limitaciones de acceso a la información de los observatorios acerca de la inversión en proyectos astronómicos anunciados para Chile en los próximos años. La información es considerada confidencial en sus detalles, estando accesibles de manera pública solamente las cifras agregadas.
- b. De acuerdo a los observatorios, respecto de las cifras de inversión no existe información pública adicional a la que se encuentra en Internet.
- c. No obstante, para algunos de los proyectos astronómicos se han publicado cifras de inversión con más detalle. De dicha información se ha seleccionado aquella que es más relevante para estimar la inversión potencial en Chile.
- d. Las cifras públicas que se manejan para cada proyecto están estructuradas de manera no homogénea y están en constante revisión.
- e. Las cifras estimadas varían en el tiempo por motivos técnicos (avance en ingeniería de detalle) de mercado (precios de insumos como el acero) y presupuestarios.

3.2.1 Presentación

Esta sección tiene como objetivo entregar una estimación del tamaño de los contratos internacionales de servicios y de desarrollo adjudicados por los observatorios en Chile, así como su inversión en el país.

Para una correcta lectura de las cifras entregadas en esta sección, es importante indicar la existencia de limitaciones de acceso a la información de los observatorios, ya que ésta es considerada confidencial en sus detalles, estando accesibles de manera pública solamente las cifras globales. No obstante, para algunos de los proyectos astronómicos se han publicado cifras de inversión con más detalle. De dicha información se ha seleccionado aquella que es más relevante para estimar la inversión potencial en Chile

Esta sección no se limita a estimar las inversiones efectivamente realizadas en Chile. En el presente estudio, uno de los objetivos es “identificar las oportunidades que presenta la instalación de nuevos proyectos astronómicos” en Chile. Se ha considerado relevante en consecuencia comenzar por una estimación global de cómo se asignan los montos de inversión a los principales ítems, independientemente de si esas inversiones se realizan en Chile o en otros países.

Muchas de las cifras pueden haber sido corregidas según los resultados de licitaciones, de la disponibilidad de financiamiento o de imprevistos. No obstante dichas cifras constituyen una estimación de los órdenes de magnitud esperados.

3.2.2 Características de la información disponible.

a. Información divulgada por los observatorios

En lo que respecta a los montos de inversión para la construcción de los grandes telescopios, para cada uno de los proyectos existen estimaciones globales con un nivel de desagregación menor a una decena de ítems. Estas estimaciones se modifican en el tiempo según el proyecto avanza en la ingeniería de detalle y según los resultados de las licitaciones de contratos de construcción y de montaje.

Las cifras entregadas por los observatorios incluyen estimaciones de contingencia, a veces integrados en cada ítem, otras veces como un ítem aparte.

Un factor adicional que provoca variación de las cifras es la corrección monetaria según el año de referencia del dólar así como de la tasa de cambio del euro respecto del dólar cuando se trata de proyectos europeos.

Respecto del porcentaje de la inversión que se materializa en Chile, los observatorios entregan estimaciones globales que se sitúan el gasto en Chile entre el 10% y el 20% del total de la inversión estimada.

En lo que respecta a contratos específicos, por ejemplo contratos de construcción o de montaje ejecutados en Chile, el monto exacto de cada contrato se define en el momento de resolver la licitación y dichos montos exactos no son divulgados ni antes

ni después de la ejecución de los contratos, contando en algunos casos solamente con un orden de magnitud.

Es ilustrativo de esta práctica, el texto de una “solicitation” de la Association of Universities for Research in Astronomy, Inc. (AURA), October 5, 2005 (el subrayado es nuestro):

“The Association of Universities for Research in Astronomy, Inc. (AURA) invites letters of intent for the development of key technologies and design studies needed to advance an alternative concept for an Extremely Large Telescope (ELT). The funding available for the full term of this subaward cannot be fully described at present in view of the annual funding available from the NSF. However it is AURA’s goal, in accordance with our proposal of July 2004, to provide a total of \$14,000,000 pending funding actions by the National Science Foundation.”

Respecto de los gastos de operación, la información también es divulgada de manera agregada.

b. Información divulgada por las empresas en Chile

Las empresas chilenas que han ejecutado contratos con los grandes observatorios, no entregan información de detalle de los montos de los contratos por razones de confidencialidad.

c. Información adicional

Una parte de las estimaciones de costos de inversión y de costos de operación que se presentan en este estudio han sido ajustadas utilizando información adicional que fue entregada de manera personal por profesionales que han trabajado en proyectos de astronomía. Se trata por tanto de información no oficial cuya importancia es entregar estimaciones más precisas sobre ítems particulares.

3.2.3 Las cifras globales de inversión

Se estima que los grandes proyectos astronómicos que se materializarán en Chile en los próximos años demandarán inversiones del orden de los 3.000 millones de dólares.

A este monto se agrega el proyecto ALMA, actualmente en fase de construcción y ya con una parte en operación. El proyecto ALMA presupuesta una inversión de casi 800 millones dólares para la construcción a lo cual se agregan gastos de operación que llevan la inversión proyectada a unos 1.000 millones de dólares o más.

Por su parte, los grandes proyectos en Chile que ya están en operación, han significado inversiones de más de 1.000 millones de dólares, lo que significa que los montos totales invertidos para la construcción de grandes observatorios en Chile superarían los 4.000 millones de dólares.

Sin embargo, como sucede en todo proyecto de inversión por ejemplo en minería, solamente una parte de estos montos corresponde a insumos, servicios o desarrollos originados en Chile.

En efecto, los componentes cruciales de los observatorios son elementos de alta tecnología, fabricados uno por uno, cuya responsabilidad recae en entidades académicas y en empresas de los países que financian la construcción. Se destaca que la prioridad de los contratos la tienen los proveedores que pertenecen a los países que aportan los recursos para el diseño, construcción y operación de los observatorios.

Tabla n° 2.1.	
Costos de Construcción de los Grandes Observatorios en Chile	
En Operación	Costo aproximado (millones de USD)
Magellan Telescopes	100
Gemini	300
VLT	700
ACT	40
TOTAL CONSTRUIDO	1.140
En construcción	
ALMA	1.000
Proyectado	
TAO	100
LSST	500
CCAT	200
GMT	800
E-ELT	1.500
TOTAL PROYECTADO	3.100

Fuente: elaborado a partir de Dr. Mónica Rubio, “**Overview of Astronomy Facilities in Chile**”, Pucón Symposium 2011: Advanced Mathematical Tools for Frontier Astronomy and other Massive Data-driven Sciences. 16.08.2011

Los montos señalados son en gran parte ejecutados en los países miembros de los consorcios y no significan capitales que ingresan al país sino equipamiento de alta tecnología que llega ya fabricado al país, mientras que en Chile los gastos se concentran en bienes y servicios no transables tales como construcción de caminos, de edificios, suministro eléctrico y otros ítems no diferenciados.

Se requiere por tanto un análisis más desagregado de cómo los montos señalados en la Tabla n°2.1 se reparten en los distintos ítems.

3.2.4 Los principales ítems de inversión

Para este análisis se han considerado los proyectos ALMA, LSST, CCAT, GMT y E-ELT.

Respecto del proyecto TAO, no se ha considerado debido a que se trata de un monto menos importante y no se cuenta con información de detalle.

Las cifras que se entregan a continuación han sido obtenidas de la información pública más reciente que ha sido posible encontrar.

PRINCIPALES ASPECTOS DEL GASTO DE INVERSIÓN Y DE OPERACIÓN DE LOS OBSERVATORIOS

De los miles de millones de dólares de inversión en proyectos astronómicos anunciados para Chile en los próximos años, es importante destacar que:

- a. En lo que concierne al diseño y la fabricación, una parte importante de la inversión se materializa en los mismos países que financian la construcción del observatorio. Esto es particularmente relevante en el caso de los instrumentos científicos, de los espejos y de las antenas que históricamente se han construido en los países miembros de los consorcios. A Chile llegan los sistemas una vez fabricados. Localmente, se ensamblan, se calibran, actividades que tienen costos inferiores a los que representa el diseño y construcción.
- b. Un porcentaje de los gastos de construcción corresponden a bienes no transables tales como edificios, caminos, suministro eléctrico, de agua, que por ende solamente pueden ser provistos por empresas con base local.
- c. Existe una zona de ítems de inversión que está en niveles intermedios de tecnología o de ingeniería. Es decir, tienen un nivel superior a la tecnología “commodity” o no diferenciada pero sin llegar a los niveles de tecnologías de frontera. Esta zona podría ser abierta a que en la competencia participen empresas chilenas.
- d. El monto de los gastos de operación, considerados en el total de la vida útil de un observatorio, supera nominalmente los costos de inversión.
- e. Los gastos de operación son primordialmente gastos en recursos humanos. Los subcontratos de mantención durante la fase de operación de los observatorios, representan montos menores y se trata principalmente de servicios de telefonía, Internet, mantención de edificios, mantención de instalaciones, jardinería, gasfitería.
- f. Respecto de la mantención más especializada, tales como mantención de los instrumentos científicos y de los telescopios, así como de electrónica especializada y mecánica de precisión, se observa una preferencia de los observatorios por el trabajo interno (“in house”) a cargo de ingenieros que forman parte de la planilla de los consorcios.
- g. La preferencia por personal interno es también válida para las labores de operación y control de observación.
- h. En el estado actual, el límite de gasto en el sitio alcanza un 20% del costo total.

De acuerdo a lo señalado por la ESO, para los proyectos europeos o con participación europea, no existe información adicional a dichas cifras.

Los valores se han estructurado con el objetivo de analizar los porcentajes asignados a los distintos ítems y no tienen validez oficial.

En algunos casos, los datos de un mismo proyecto provienen de diferentes fuentes y se ha intentado ajustar las cifras para lograr un resultado coherente.

Por ejemplo, para el proyecto ALMA se ha utilizado como referencia del costo del diseño, el monto informado por la NSF. Para los ítems generales de ALMA se ha utilizado la base de Rafal (2002) ajustada con datos de Beasley (2005). El total del costo de ALMA no incluye costos adicionales que llevan el proyecto a los 1,3 mil millones de dólares que es la estimación a la fecha.

Tabla n° 2.2. Costos Estimados de Construcción de proyectos de Observatorios en Chile. Incluye contingencia		
Observatorio	Costo total estimado (incluye contingencia)	Contingencia
LSST	473	102
CCAT	108,75	0
E-ELT	1.407,9	130
GMT	611	
ALMA	855	0
TOTAL	3.456	231

Fuente: elaboración propia a partir de información pública

La Tabla n° 2.2. resume las estimaciones de los observatorios respecto del monto total que requiere la construcción en instalación de cada telescopio o radio telescopio en el sitio. Se indica cuándo un presupuesto incluye un monto de contingencia que considera tanto el riesgo tecnológico del proyecto como el riesgo económico. El riesgo tecnológico se refiere especialmente a la eventual necesidad de incorporar nuevos materiales, nuevos dispositivos o mayor complejidad de programación para lograr las prestaciones requeridas. El riesgo económico se refiere a las fluctuaciones de precio de insumos claves como por ejemplo el acero.

Tabla n°2.3 Costos Estimados de Diseño de Observatorios en Chile			
Observatorio	Costo total estimado (sin contingencia)	Costo estimado del Diseño	Porcentaje
LSST	371	40	10,8%
CCAT	109	10	9,2%
E-ELT	1278	74	5,8%
GMT	611	57	9%
ALMA	855	32	3,7%

Fuente: elaboración propia a partir de información pública

La Tabla n° 2.3 resume las estimaciones de los costos de diseño de los diversos proyectos. La cifra que corresponde a ALMA ha sido obtenida del sitio WEB de la NSF norteamericana y corresponde al gasto en el año 2003.

Se observa que el costo del diseño oscila entre el 5% y el 10% del total del proyecto. El diseño es generalmente asumido por consorcios de universidades y empresas bajo la dirección de personal de los observatorios. Concurren también expertos externos. Los costos del personal propio de los observatorios o de los expertos pueden estar incluidos no en los costos de diseño sino en los costos de operación. Por ejemplo, el costo señalado del diseño del E-ELT corresponde al monto del contrato con el consorcio encargado del diseño y no toma en cuenta los costos de recursos humanos de la ESO.

La Tabla n° 2.4 indica los costos estimados del componente central del telescopio. Este costo incluye los espejos o antenas, los instrumentos científicos (detectores de fotones, espectrógrafos) la montura de los espejos o antenas y domos. Incluye también los dispositivos de control de posición de los telescopios, la electrónica de adquisición y transmisión de datos, correladores y hardware en general.

Estos datos se presentan agrupados en un solo monto para entregar una idea del orden de magnitud del gasto que se efectúa en los países miembros de los consorcios de observatorios.

Tabla n° 2.4 Costos Estimados de Construcción de Telescopios e instrumentos			
Observatorio	Costo total estimado (sin contingencia)	Costo estimado de construcción del telescopio, instrumentos científicos, domos, hardware	Porcentaje
LSST	371	307	82,6%
CCAT	109	75	69,2%
E-ELT	1278	1128	88,3%
ALMA	855	586	68,5%
GMT	611	506	82,8%

Fuente: elaboración propia a partir de información pública

En efecto, si bien dentro de las cifras indicadas en la Tabla n° 2.4 están incluidos gastos de integración y de montaje en Chile, los montos asociados a esos gastos son un porcentaje menor. La parte importante son los instrumentos científicos que, como se detalla más adelante, cada uno de ellos puede tener un costo del orden de 30 a 50 millones de dólares mientras que un espejo de gran dimensión puede alcanzar cerca de los 100 millones de dólares incluyendo el soporte o montura y la óptica adaptativa.

En el caso de ALMA, la cifra contiene el monto de 50 millones de dólares de electrónica que incluyen el correlador y el subsistema de computación.

Es relevante por tanto considerar que casi un 70% de los costos estimados de un gran proyecto de astronomía se ejecuta en los países miembros del consorcio y en el caso de ALMA, no representa necesariamente los costos reales sino las estimaciones de los aportes de los países miembros. A Chile llegan los sistemas ya construidos para ser integrados o montados. La participación de empresas chilenas en estos ítems es aún marginal.

La Tabla n° 2.5 presenta las estimaciones del gasto en la habilitación del sitio en que será instalado el telescopio. Incluye la edificación de oficinas en ciudades chilenas y las instalaciones para mantenimiento del equipamiento.

Este gasto se refiere fundamentalmente a bienes y servicios no transables, si bien puede incluir elementos importados como equipos de aire acondicionado, telefonía, iluminación.

Tabla n°2.5 Costos Estimados de Desarrollo del sitio para proyectos de Observatorios en Chile			
Observatorio	Costo total estimado (sin contingencia)	Desarrollo del sitio	Porcentaje
LSST	371	17	4,4%
CCAT	109	12	10,6%
E-ELT	1278	75	5,9%
ALMA	855	141	16,4%
GMT	611	48	7,9%

Fuente: elaboración propia a partir de información pública

Se aprecia que el gasto en el sitio fluctúa entre un 5% y un 16%.

No obstante, estas cifras se refieren a los subcontratos que se realizan con empresas constructoras o de servicios. Es necesario agregar el costo de los recursos humanos que los observatorios deben destinar en Chile así como sus gastos de operación.

Si a ello se suman los costos de test en terreno, el montaje de los sistemas, la calibración de los instrumentos, esta cifra aumenta en algunos puntos. La ESO estima que del total del costo de un proyecto de observatorio astronómico, hasta un 20% puede ser gastado en el sitio. (Comunicación verbal del Dr. Massimo Tarenghi, Director General de ESO en Chile)

En el estado actual de la participación chilena en los proyectos de observatorios, este 20% representa el máximo que podría ser facturado en Chile.

La Tabla n° 2.6 presenta las estimaciones de los gastos anuales de operación de cada proyecto. Estas cifras incluyen recursos humanos, depreciación, mantenimiento y algunos gastos de desarrollo científico. Típicamente se estima que un 70% de este gasto de operación se ejecuta en Chile. Sin embargo, estas cifras están sujetas a constante revisión en función del presupuesto real asignado año a año a cada proyecto.

Observatorio	Costo total estimado (sin contingencia)	Gastos de operación por año	Porcentaje
LSST	371	37	10,0%
CCAT	109	10	9,2%
E-ELT	1278	65	5,1%
ALMA	855	65	7,6%
GMT	611	32	5,2%

Fuente: elaboración propia a partir de información pública

Lo relevante de esta tabla es indicar que, considerando una esperanza de vida de 30 años para cada observatorio, el gasto de operación en todos los casos supera a la inversión inicial de diseño y construcción de un telescopio.

3.2.5 Desglose de cifras de inversión de los principales proyectos astronómicos en Chile

3.2.5.1 Proyecto European Extremely Large Telescope (E-ELT)

El proyecto E-ELT se ha estado desarrollando desde el año 2005, a cargo de la ESO.

Este telescopio contará con un espejo de 42 metros de diámetro. Para su instalación se eligió el cerro Armazones, en la región de Antofagasta, Chile.

El costo del proyecto bordea los 1080 EUR. En las referencias y reportes se considera este valor como el costo de la construcción del proyecto.

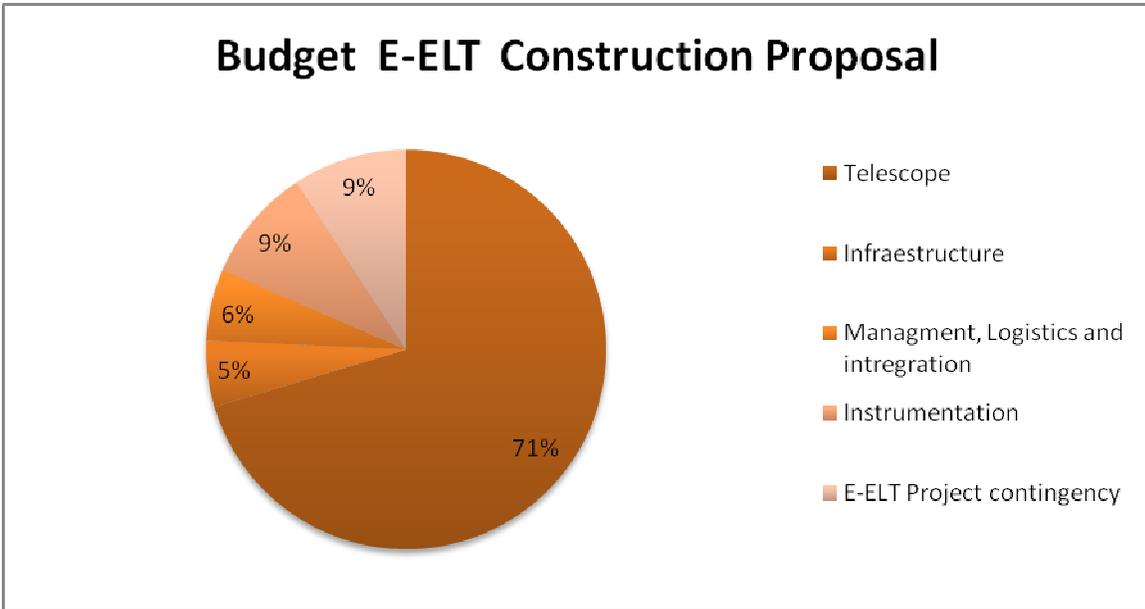
El costo de diseño se estima en 57 millones de euros, de acuerdo a la información del sitio http://www.eso.cl/e_elt.php.

Los detalles del presupuesto de construcción se encuentran en el reporte oficial de ESO, “The E-ELT Construction Proposal” que informa los siguientes valores:

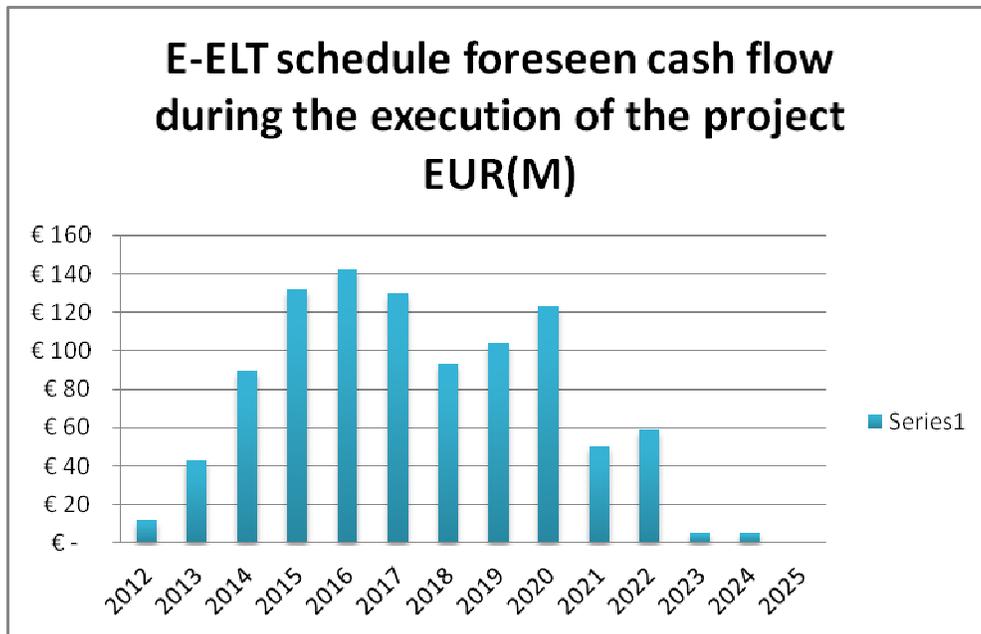
Tabla n° 2.7	
Budget E-ELT Construction Proposal	
Telescope	EUR (M)
Dome and main structure	€ 349
Optomechanical System	€ 366
Control System	€ 47
Infraestructure	
Civil and supporting infraestructure	€ 58
Managment, Logistics and intregation	
Project Office	€ 38
AI VC, Site Logistics and Data Operatio	€ 25
Instrumentation	
Instrumentation	€ 100
Sub-total	€ 983
E-ELT Project contingency	€ 100
Total	€ 1.083

Fuente: The E-ELT Construction Proposal ESO.

La distribución de inversión según el elemento se muestra en el siguiente gráfico, en el cual se puede observar de manera clara, que dentro de la construcción del proyecto, el gasto de inversión más grande se realiza en el propio telescopio, correspondiendo a un 71% del costo total de la inversión. Este ítem contempla, la estructura principal, el domo, sistema de control y sistemas mecánicos propios de la estructura.



Fuente: elaboración propia a partir del documento ESO “The E-ELT Construction Proposal”



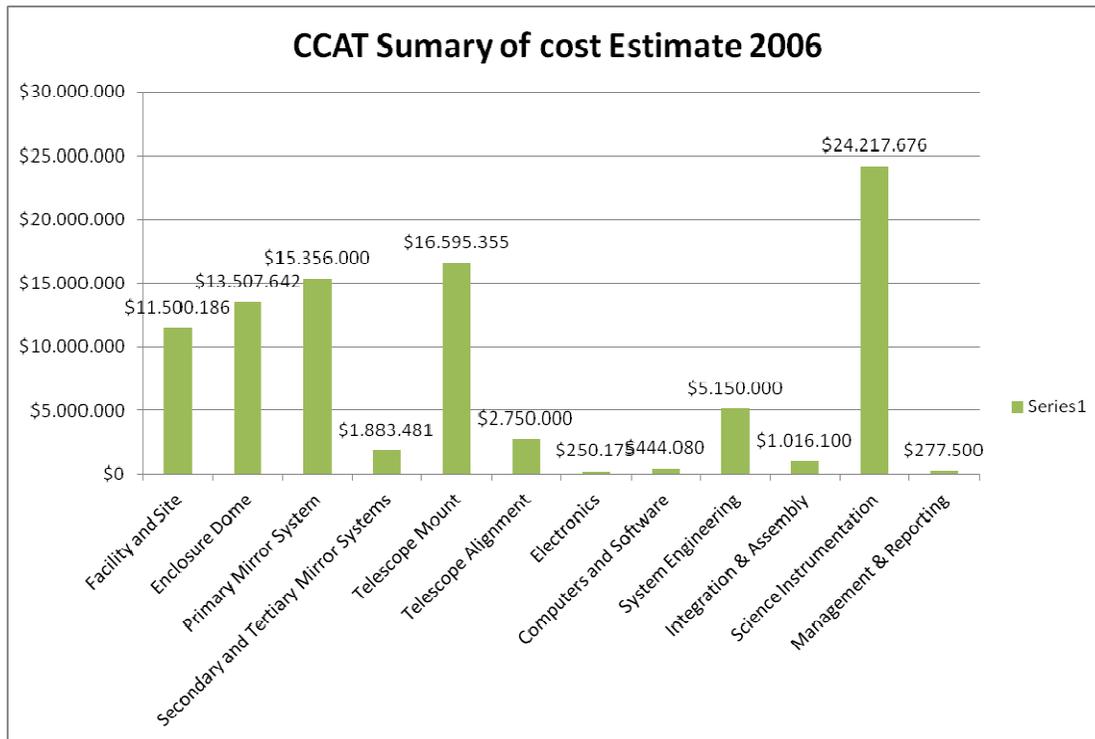
Fuente: The E-ELT Construction Proposal ESO.

3.2.5.2 The Cornell Caltech Atacama Telescope (CCAT)

The Cornell Caltech Atacama Telescope, es un proyecto de la Universidad y el Instituto de Tecnología de California. Este proyecto es administrado por un consorcio. La vida útil de este proyecto se contempla de al menos en 20 años.

El costo total del proyecto ha sido estimado por un estudio realizado entre el año 2004-2006 por Giovanelli, extraído de pagina web oficial del proyecto¹. Se estima un costo total de alrededor de US\$ 110,37 M.

La distribución de elementos para la construcción del CCTA, se muestran en el siguiente gráfico, en el cual se puede observar que la mayor inversión se realiza en 'Science Instrumentation'.



Fuente: CCAT Riccardo Giovanelli, John Carpenter, Simon Radford, Thomas Sebring, Thomas Soifer, Gordon Stacey, Jonas Zmuidzinas & the CCAT Collaboration

¹ <http://www.submm.org/doc/pubs.html>

Tabla n° 2.8	
CCAT Cost Summary (unit=10 ⁶ US\$)	
Wbs Area	Cost
Observatory Facility	\$ 7,62
Lower Elevation Support Facility	\$ 2,81
Telescope Dome	\$ 10,22
Primary Mirror	\$ 13,95
Secondary and Tertiary Mirrors	\$ 2,68
Mount	\$ 14,20
Optical Assemblies	\$ 2,02
Misc. Electronics	\$ 0,25
Telescope Control System	\$ 0,44
System Engineering Contracts	\$ 1,00
Integration & Commissioning	\$ 1,02
First Light Instrumentation	\$ 20,00
Management non-labor Costs	\$ 0,28
Total for Contracts & Purchases	\$ 76,40
Labor Cost	
Raw labor	\$ 7,16
Fringes & benefits 32%	\$ 2,29
Overhead 10%	\$ 0,94
Total labor cost	\$ 10,30
Aditonal Cost	
Travel 20% of raw labor	\$ 1,43
Contingency 25% of Budget	\$ 22,07
Total project Cost	\$ 110,37

Fuente: CCAT Riccardo Giovanelli, John Carpenter, Simon Radford, Thomas Sebring, Thomas Soifer, Gordon Stacey, Jonas Zmuidzinas & the CCAT Collaboration.

Este proyecto ha publicado información acerca del detalle de la asignación de costos de diseño por un monto de 3 millones de dólares, que se detallan en la Tabla 4.2.9.

Se aprecia que los subcontratos de estudios geotécnicos, diseño de caminos y de los edificios del sitio, suman unos 200.000 dólares.

Tabla n° 2.9 Detalle de costos de diseño del proyecto CCAT		
WBS	Tasks	\$3M
1.0 Facility and Site	Geotechnical Survey	\$50
	Road Design and Analysis	\$50
	Facility Conceptual Design Including Foundations	\$150
2.0 Dome	Dome Structure Design	\$100
	Dome Mechanicm Design	\$150
3.0 Primary Mirror System	Primary Mirror Truss Design and Analysis	\$50
	Segment Raft Concept Design Study	\$125
	Machined Al Tile Study/Demo	\$125
	Segment Sensor Development	\$50
4.0 M2 and M3	Integrated Optic/Truss/Sensing/Control Study	\$200
	M2 &M3 Optics Design Study	\$50
	M2 &M3 Mechanisms Study	\$75
5.0 Telescope Mount	Mount Concept Design Update and Analysis	\$200
	Calibration Interferometer Development	\$100
6.0 Optical Asssemblies	Guider Concept Development	\$50
	Electronics Scope and Cost Study	\$50
7.0 Electronics	Control Architecture Concept Development	\$100
8.0 Computers and Software	Telescope Performance Model	\$225
9.0 System Engineering	staff	
10.0 Integration &Assembly	Instrument Design Studies	\$100
11.0 Science Instruments		\$900
12.0 Staff Salaries	Contingency	\$100
TOTAL		\$3,000

Fuente: CCAT Concept Design Phase 2010- 2011, www.astro.cornell.edu

3.2.5.3 Large Synoptic Survey Telescope (LSST)

El 'Large Synoptic Survey Telescope (LSST), es un proyecto de telescopio de 8,4 metros que será instalado en el Cerro Pachón, región de Coquimbo, y su inicio de funcionamiento está contemplado para el año 2012.

De acuerdo al informe de Donald Sweeney, LSST Project Managment, el proyecto en si tiene una duración de 10 años, donde se contemplan las 3 grandes etapas:

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Diseño y Desarrollo

Construcción.

Operaciones.

El costo del diseño, contemplado en un periodo de 4 años (2005-2008) varía entre los US\$ 29 Millones², a los US\$ 40 Millones³.

El costo de construcción se estimaba en US\$ 295 millones en el año 2006, de acuerdo al reporte de Donald Sweeney. La distribución de costos según dicha estimación, se distribuyen según la Tabla n°2.10.

Tabla n° 2.10 Detalle de costos de diseño del proyecto LSST	
Asignación Total de costos de Construcción	US\$ M
Project Office	10,3
Data Managment	79,2
Camera	89,5
Telescope and Site	116
Total	295

Fuente: Reporte de Donald Sweeney, Director Project Management LSST en el año 2006.

Una estimación posterior, del año 2007 estimaba el costo total en US\$ 390 millones⁴. Esta misma fuente estima un costo del equipo de operación en Chile de 15 millones de dólares anuales, si bien las estimaciones del total del costo de operación alcanzan un total de 37 millones⁵.

Los contratos de construcción que deben ser licitados se estima que alcanzarán unos 92 millones dólares, de acuerdo al detalle de la Tabla n°4.2.11.

² The Large Synoptic Survey Telescope Design and Development Proposal, submitted to the National Science Foundation by the LSST Corporation, December, 2003

³ Donald Sweeney, LSST Project Manager, LSST Project Management - LSST Director's Review – SLAC March 8-9, 2006

⁴ Dr. Charles F. Claver, Dr. Chris Smith, "LARGE SYNOPTIC SURVEY TELESCOPE" presentado en SOFOFA, Santiago, Chile, Junio 2007.

⁵ DOE-NSF_Joint_Programs_Craig_Foltz.pdf

Si bien las estimaciones del costo total de la infraestructura que se instalará en Chile superan los 160 millones de dólares⁶, de ello solamente un poco más de 10 millones de dólares son claramente contratos que deben ser ejecutados por empresas chilenas o establecidas en Chile y comprende los edificios de oficina, el “Base Computing” y el “Data Access Center”⁷.

Tabla n° 4.2. 11 Contratos de construcción del proyecto LSST	
Subsystem	Budget (US\$)
Summit facility	12 M
Telescope mount	23 M
Dome	10 M
Base facility	2 M
Primary Mirror	20 M
Secondary Mirror	10 M
Coating facility	10 M
Calibration telescope	4 M
Architect and engineering	1 M

Fuente: Dr. Charles F. Claver, Dr. Chris Smith, “LARGE SYNOPTIC SURVEY TELESCOPE” presentado en SOFOFA, Santiago, Chile, Junio 2007

⁶ Dr. Charles F. Claver, Dr. Chris Smith, “LARGE SYNOPTIC SURVEY TELESCOPE” presentado en SOFOFA, Santiago, Chile, Junio 2007.

⁷ Idem.

Tabla n° 4.2.12
Detalle de costos de construcción del proyecto LSST

LSST PROJECT		
	Subsystem Total	Componet Total
Project Mgmt Office	\$ 259.000.000	\$ 259.000.000
Contingency, project Management	\$ 10.300.000	
		\$ 2.000.000
1.01 Project management office		\$ 4.000.000
1.02 Project Controls		\$ 1.100.000
1.03 System Engineering		\$ 900.000
1.04 LSST Science		\$ 400.000
1.05 Safety and Enviornmental Assurance		\$ 400.000
1.06 Performance Assurance		\$ 400.000
1.07 Special Project and R&D		\$ 1.100.000
	Total	\$ 10.300.000
Data Managment	\$ 79.200.000	
Contingency, Data Management		\$ 15.840.000
2.01 System Management		\$ 900.000
2.02 System Engineering		\$ 900.000
2.03 Safety and Enviornmental Assurance		\$ 500.000
2.04 Performance Assurance		\$ 500.000
2.05 Hardware/ Software Deliverables		
02.05.1.1	Nightly Data Pipelines and Products	\$ 12.100.000
02.05.1.2	Science Data Archive	\$ 8.200.000
02.05.2	Middleware	\$ 8.100.000
02.05.3.1	Mountain/Base Facility Infraestructure	\$ 3.560.000
Telescope And Site	\$ 116.000.000	
Contingency, Telescope and Site		\$ 23.200.000
4.01 System Management		\$ 4.000.000
4.02 System Engineering		\$ 750.000
4.03 Safety and Environmental Assurance		\$ 500.000
4.04 Performance Assurance		\$ 500.000
4.05 Hardware / Software Deliverables		
04.05.1	Facilities and infraestructure	\$ 12.800.000
04.05.2	Dome	\$ 6.000.000
04.05.3	Telescope Mount	\$ 22.400.000
04.05.4	Mirrors	\$ 31.500.000
04.05.5	WFS and Aligment	\$ 1.000.000
04.05.6	Calibration System	\$ 4.000.000
04.05.7	Software and Control	\$ 4.300.000
04.05.8	Observatory Mointoring System	\$ 700.000
04.05.9	Equipment and Support Subsystem	\$ 11.500.000
4.06 Telescope Integration and Test		\$ 3.000.000
4.7 Observatory Integration, Test and Commissioning support		\$ 2.000.000

Fuente: Reporte de Donald Sweeney, Director Project Management LSST en el año 2006.

3.2.5.4 Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)

ALMA es un proyecto que ya está en operación con una parte del total de las antenas proyectadas.

Los contratos principales se refieren al diseño y construcción de las antenas y sus sistemas de instrumentos y correlador.

La construcción de un prototipo de antena, contratado a la empresa Vertex Antenna Systems, significó un monto de 6,2 millones de dólares el año 2000⁸.

Se estima que en total, el proyecto ALMA gastó \$31.99 millones de dólares en Diseño y Desarrollo⁹.

Para la construcción de las antenas, cada participante firmó contratos con empresas de su país o zona.

La ESO firmó un contrato por 147 millones de Euros (aproximadamente 190 millones de dólares) en diciembre del 2005, con un consorcio liderado por Alcatel Alenia Space, que incluye la empresa italiana European Industrial Engineering y la alemana MT Aerospace¹⁰ para construir 25 antenas.

Por su parte, el socio norteamericano firmó un contrato de 169 millones de dólares con General Dynamics C4 Systems en julio de 2005 para construir otras 25 antenas por su filial VertexRSI.

Japón aporta las antenas adicionales construidas por Mitsubishi Electric Co. (MELCO)¹¹.

En el acceso a conectividad internacional REUNA apoya a ALMA en estas necesidades para transferir los datos a Europa, Japón y Norteamérica.

⁸ NRAO Home - Press Releases - Contracts Awarded for ALMA Prototype Antennas *March 14, 2000*

⁹ Información de NSF web site: http://www.nsf.gov/about/budget/fy2003/nar_mrefc.htm

¹⁰ <http://www.eso.org/public/news/eso0540/>

¹¹ . Andrew Clegg, ED Online ID #14304, December 2006

Las estimaciones de costos son presentadas de manera referencial en la Tabla n° 4.2.11. Dicha tabla ha sido elaborada a partir de la información original de Marc Rafal, de NRAO, ALMA-US Project Manager. Las cifras de Rafal fueron ponderadas de acuerdo a la estimación de Tony Beasley.

Tabla n°4.2. 13 Costos de construcción del proyecto ALMA	
1 Management / Admin	86,3
2 Site Development	140,5
3 Antenna Subsystem	311,5
4 Front End Subsystem	116,7
5 Backend Subsystem	57,3
6 Correlator	10,9
7 Computing Subsystem	41,3
8 System Eng. & Integration	48,1
9 Science / EPO	10,4
Total	823,0

Fuente: elaboración propia a partir de Marc Rafal, NRAO, ALMA-US Project Manager, Project Science Workshop, January 18-19, 2002, Pasadena, California, corregidas con la información de Tony Beasley, ALMA

3.2.6 Gastos de operación de los principales proyectos astronómicos en Chile

Esta sección está basada en información aportada por profesionales que tienen experiencia en el trabajo de los observatorios, pero no constituye información oficial de los consorcios.

El observatorio de Tololo declara que en su presupuesto de operación, mantiene subcontratos con proveedores locales por unos 6 millones de dólares por año. Estos subcontratos son fundamentalmente servicios no diferenciados como jardinería, mantención de edificios, alimentación, transporte, Internet, telefonía de voz.

El objetivo de este punto es ilustrar las prácticas de gastos en mantención más especializada e indicar órdenes de magnitud de los gastos, si éstos son estimables.

No se consideran los servicios no diferenciados.

- a. Soporte de ingeniería para el telescopio y los instrumentos: provisto por staff interno o por especialistas contratados por periodos de tiempo limitados. El gasto anual puede estar entre US\$500K a US\$ 1 Millón para un observatorio grande y entre US\$100 a 500K para uno pequeño.
- b. Mantenimiento de partes mecánicas y estructuras: provisto por profesionales de la planta interna de los observatorios
- c. Mantenimiento criogénico: provisto por empresas extranjeras. Gasto entre US\$50.000 y US\$ 200.000 por año.
- d. Operación de maquinaria CNC para fabricación de piezas especiales. provisto por profesionales de la planta interna de los observatorios pero para trabajos de bajo nivel tecnológico se recurre a empresas locales. Gasto entre US\$50.000 y US\$-100.000 por año.
- e. Mantenimiento eléctrico: provisto tanto por profesionales de la planta interna de los observatorios como por contratistas externos. Gasto entre US\$50.000 y US\$-100.000 por año.
- f. Diagnóstico y reparación de dispositivos electrónicos: provisto tanto por profesionales de la planta interna de los observatorios como por los fabricantes extranjeros. Los observatorios pueden enviar las piezas al fabricante extranjero para su reparación. Gasto entre US\$50.000 y US\$-100.000 por año.
- g. Mantenimiento y reparación de componentes ópticos: provisto por los fabricantes extranjeros. Los observatorios pueden enviar las piezas al fabricante extranjero para su reparación. Gasto entre US\$5.000 y US\$-20.000 por año.
- h. Mantenimiento de espejos: provisto por profesionales de la planta interna de los observatorios. Gasto entre US\$100.000 y US\$ 200.000 por año.
- i. Mantenimiento de actuadores: la ESO Paranal planeaba originalmente repararlos en Europa, pero tomó la decisión de hacerlo en Chile, con personal interno. Gasto entre US\$10.000 y US\$ 50.000 por año.
- j. Mantenimiento del suministro eléctrico: por personal interno o contratistas locales. Existen casos como. Paranal cuyas turbinas son monitoreadas remotamente por un contratista suizo. Gasto entre US\$20.000 y US\$ 50.000 por año.
- k. Helio, nitrógeno y aire comprimido. Provisto por subcontratistas. Gasto de unos US\$ 50.000 por año
- l. Transmisión de datos: subcontrato con grandes empresas de telecomunicaciones.
- m. Servicios de meteorología: proveedores europeos o USA. Gasto entre US\$10.000 y US\$ 20.000 por año.

3.3 REQUERIMIENTOS DE TECNOLOGÍA Y SERVICIOS DE LOS OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS

REQUERIMIENTOS DE TECNOLOGÍA Y DE SERVICIOS

- a. Los espejos, las antenas, los instrumentos científicos tales como cámaras IR y espectrógrafos, son elementos construidos uno a uno y tienen requerimientos de funcionamiento que están en la frontera de la tecnología. No existe por tanto un estándar o normas predefinidas.
- b. Los elementos de soporte y protección de los telescopios, tales como monturas y domos, tienen exigencias menos elevadas, pero superan el estándar común de construcciones mecánicas o de edificios ya que tienen requerimientos especiales respecto de comportamiento térmico, vibraciones, precisión de movimientos.
- c. Para todos los componentes y dispositivos, electrónicos, mecánicos, hidráulicos, sean éstos diseñados específicamente para el observatorio o sean adquiridos “off the shelf”, se aplican las normas ISO, IEC, EN, MIL, EMC, que sean de aplicación en los países miembros del consorcio.
- d. Al igual que en las industrias productivas o de recursos naturales, existe la preocupación de que los sistemas o componentes que provienen de diferentes proveedores respondan a normas y protocolos comunes que garanticen la compatibilidad entre proveedores y faciliten el mantenimiento.
- e. Respecto de la infraestructura, todas las construcciones, las instalaciones eléctricas, las sanitarias, deben cumplir con las normas europeas o norteamericanas, a la vez que con las regulaciones chilenas. La práctica de los contratistas es cumplir con la norma más restrictiva de todas ellas.
- f. Se está difundiendo la práctica de que los servicios contratados por los observatorios se basen en un SLA (Service Level Agreement).
- g. Respecto de la mantención de equipos, partes y piezas de los telescopios e instrumentos, la práctica de los observatorios privilegia la contratación interna de profesionales para realizar estas actividades, debido a la especificidad de cada instrumento. La externalización no es una práctica.
- h. Con frecuencia se observa que los requerimientos de calidad por parte de los grandes observatorios se refieren con más fuerza a las capacidades profesionales y a la experiencia de los proveedores que a los productos y a los servicios mismos. El concepto de “trusted provider” y la experiencia previa de las empresas, grupos universitarios o consorcios, son dominantes.

Esta sección analiza los requerimientos de los proyectos de grandes observatorios. El producto ha sido definido como “Identificar y cuantificar los requerimientos, en cuanto a tecnología y servicios, de los observatorios astronómicos instalados y por instalarse en Chile; así como la calidad o nivel del servicio requerido”.

El análisis ha sido estructurado de acuerdo a los niveles de tecnología que demandan los diferentes componentes, niveles que van desde las tecnologías de frontera a los servicios no diferenciados.

3.3.1 Alta tecnología: Diseño y construcción del Telescopio, Montura y los Instrumentos Científicos.

Los observatorios son recurrentes en señalar que sus componentes más específicos, es decir los espejos o antenas y los instrumentos científicos tales como cámaras CCD, espectrógrafos, son diseñados y construidos uno a uno por lo cual no existen requerimientos genéricos ni estándares como es el caso del material militar o industrial.

Cada nuevo proyecto responde a una necesidad científica no satisfecha con los instrumentos en uso. Por tanto, cada nuevo proyecto se sitúa, según los científicos, “well beyond the state-of-art”.

El diseño y la construcción de los nuevos observatorios es por tanto una tarea de alto riesgo, de incertidumbres tanto respecto de la factibilidad tecnológica como de los costos y plazos en que se puede lograr el nuevo instrumento.

En atención a que cada uno de los proyectos es específico en sus requerimientos, se presentan aquí solamente ejemplos de cómo se especifican los sistemas y los desafíos que conllevan su diseño y su construcción.

Los espejos son especificados en primer lugar en cuanto a su diámetro y posiblemente respecto del número de segmentos que lo compondrían. También es parte del concepto inicial el sistema de óptica adaptativa.

Es común que la definición de los materiales y las geometrías específicas sean definidas por consorcios de universidades y/o empresas, según los requerimientos funcionales.

Dichos requerimientos funcionales tienen que ver con elementos tales como las máximas deformaciones aceptables en condiciones de gradientes de temperatura así como las deformaciones gravitacionales producto del movimiento de los espejos o antenas.

A modo de ejemplo, el diseño del E-ELT especifica que¹²:

“Industrial and academic teams across Europe have been mobilised to answer the primary design questions on how to build this ambitious telescope within reasonable bounds of cost and risk, whilst meeting the demanding requirements generated by the science teams.”

“The E-ELT primary mirror will need to maintain its surface shape to around 10nm rms across its 42m diameter – proportionally equivalent to limiting waves to 2mm in height across the Atlantic Ocean. The E-ELT primary mirror will be made from 984 near-hexagonal segments, each 1.4m across. The challenge of manufacturing these segments was the subject of a previous article in Ingenia 35 (Precision Surfaces, June 2008). Each of these segments will be supported by three actuators, and have sensors that enable its position to be maintained against gravitational and low-speed wind forces.”

“The critical engineering challenges to be addressed in designing and building this giant telescope are all to do with maintaining optical performance of the system in the face of perturbations. These are caused by the fluctuations of refractive index of the atmosphere, variable mechanical loads as the telescope slews round the sky to follow astronomical targets and mechanical disturbance caused by wind forces. There is also the added consideration of possible earthquakes to factor in, if one of the anticipated locations in Chile is chosen.”

El proyecto CCAT por ejemplo, especifica el estudio para el diseño del soporte del espejo, estudio que es encargado a empresas de ingeniería¹³:

“The current efforts are intended to validate whether open-loop control of PM segment positions based on look-up tables will perform adequately to meet CCAT specifications. Depending on the outcome of these studies, conceptual design of either the CFRP truss or a steel truss (if a closed-loop control option is selected) will be performed. This will include the truss interface to segments via the segment actuators, detailed design of tubes and joints for the truss, mounting of the truss to the telescope mount, development of assembly plans, and detailed FEM analysis of the truss. The FEM will be a deliverable item suitable for integration into a full telescope FEM. The work will include an estimate of cost. The design of the truss is likely to best be performed by Stutzki Engineering of Milwaukee, the current truss study contractor.”

¹² www.eso.org/sci/facilities/eelt

¹³ CCAT Concept Design Phase 2010- 2011

Este mismo proyecto, especifica para el diseño de la montura:

“The study proposed here would take the design of the mount to the next level of detail; developing designs for the structures, bearings, drives, encoders, brakes, interfaces, and other critical system elements. The designs would be developed in an integrated CAD model suitable for use as part of the CCAT Integrated System Model. Analysis would provide accurate estimates of thermal and gravitational deformations and deflections due to acceleration during scanning modes of operation. The study would also include initial servo control modeling to assist in selection of motors and prediction of following errors and other control parameters. The overall output would include a detailed FEM/control model suitable for inclusion in the overall TPM”

En lo que respecta a los instrumentos científicos, el E-ELT es un ejemplo de la manera en que se especifican los requerimientos:

“An example of the technology challenges is shown here from the UK-French EAGLE concept. This instrument aims to improve the efficiency of the telescope by collecting and analysing infrared light from 20 galaxies simultaneously. The robotic target selection system is used to place pick-off mirrors on the focal plane of the instrument at the images of the galaxies. The beam steering mirrors relay these images to a set of imaging spectrometers. Each channel incorporates an adaptive optics system using a new technique called Multi-Object Adaptive Optics. The EAGLE instrument will enable dynamics of galaxies in the early universe to be studied, to help understand how they came to exist and how rapidly star formation occurred in them.”

Los requerimientos de los espejos, antenas, monturas e instrumentos científicos son por tanto un terreno en el cual cada proyecto tiene su especificidad y que representan desafíos de ingeniería, si bien algunos elementos como la criogenia y la electrónica de bajo ruido son recurrentes.

En todos los casos, los diseños son altamente exigentes en cuanto a la precisión de funcionamiento, la complementariedad entre las diferentes partes y la modelación matemática mediante métodos de FEM para asegurar el comportamiento térmico, la deformación mínima y la precisión geométrica.

En este nivel, los observatorios identifican a proveedores de confianza (trusted providers) para abordar las etapas desde el diseño conceptual hasta la fabricación. Dichas etapas típicamente son:

- Especificaciones conceptuales.
- Diseño de detalle
- Modelamiento
- Validación de los diseños,
- Estimación de costos
- Análisis de riesgo
- Fabricación de prototipos.
- Fabricación de partes
- Integración
- Calibración
- Test final

Para aportar un ejemplo de marco de trabajo entre la ESO y el consorcio tecnológico encargado de MATISSE (Multi-AperTure mid-Infrared SpectroScopic Experiment), puede verse el documento: G. van Belle, G. Rupprecht, M. Casali, **VERY LARGE TELESCOPE INTERFEROMETER – MATISSE, Statement of Work**, Doc. No.: VLT-SOW-ESO-15860-4819, Issue: 1 (draft 6), Date: 13.05.2011

3.3.2 Mediana tecnología: Sistemas, componentes y dispositivos mecánicos, eléctricos, electrónicos, hidráulicos, ópticos.

Se ha indicado en secciones anteriores que los telescopios son sistemas complejos que, para la operación de los espejos, antenas e instrumentos científicos, necesitan diversos sistemas y dispositivos que tienen un menor nivel tecnológico en el sentido de que su diseño y fabricación representa una menor incertidumbre o bien que los componentes pueden ser adquiridos “off the shelf” en el mercado.

A esta categoría pertenecen los componentes mecánicos de movimiento de montura y de domo, los sistemas electrónicos de control de movimiento y de guiaje de los telescopios así como los sistemas para la adquisición y gestión de los datos científicos, los elementos de monitoreo de variables críticas tales como temperatura y vibraciones.

Para los instrumentos, se requieren suministros particulares como los sistemas de criogenia, el control de exposición, control de filtros. Para el domo, se requieren sistemas mecánicos de movimiento, motores, encoders, sujeciones. Para las salas de control, es necesario configurar e instalar la interfaz de usuario, realizar el monitoreo de variables de instrumentos. La adquisición y gestión de los datos científicos puede requerir de filtros digitales correladores y otros soportes para el procesamiento de señales.

Como se ha indicado, estos componentes y dispositivos, electrónicos, mecánicos, hidráulicos, pueden ser diseñados específicamente para el observatorio, pueden ser programados como el caso de los filtros digitales implementados con FPGA o pueden ser adquiridos directamente “off the shelf”.

Para este tipo de componentes, dispositivos o sistemas, tanto las organizaciones norteamericanas como las europeas aplican los conceptos de¹⁴:

- En cada dominio, si existen soluciones “off the shelf” ofrecidas por la industria, deben seleccionarse éstas. Si no son satisfactorias, nuevas soluciones deben ser diseñadas.
- Si son de aplicación normas ISO, IEC, EN, CE, MIL, etc, deben ser cumplidas. Las normas específicas dependen del país o región de cada observatorio. Los proyectos conjuntos como ALMA, en que participan USA, Europa, Japón, elaboran la lista de normas y regulaciones que deben ser aplicadas.
- Las regulaciones de seguridad deben ser estrictamente cumplidas.

Un documento de la ESO¹⁵, preparado para el VLT, sintetiza también la modalidad de aplicación o no de las normas estándares:

¹⁴ Interpretación libre de los documentos “ELT LGS WFS Controller Requirements, Author Javier Reyes. Reference Issue 1.0, Updated: 10.08.10” y “ALMA FE - Hazard Analysis & Risk Assessment, FEND-40.90.00.00-006-B-REP, Version: B (draft) 2009-05-14”

“Many Electro-mechanical hardware assemblies and software are developed by ESO for the telescope control and data acquisition systems. In addition, many other commercially available components and standards are adopted for the various VLT systems and sub-systems. Even if not mandatory, it is advisable that as far as possible these standardised items shall also be used for VI control in order to:

- Improve the maintainability of the instruments (hardware and software),
- Increase the reliability of the complete system.
- Standalone instruments are not required to use standardised items.”

“Electronic standards were an important issue during the construction of the VLT and were a major contribution to its widely recognised reliability. With equipment provided by dozens of firms and institutions, maintenance would have been extremely troublesome if each supplier selected their own components and standards“

“It is obviously still too early to specify all the E-ELT standards; and these will in any case evolve as the project develops. Manufacturers receiving major contracts may also select standards that will thereafter become de facto E-ELT standards. But the process of selecting standards is not easy and requires many considerations”. “Standards should also have a broad industrial acceptance to allow multi-vendor procurement”

En este nivel por tanto, los requerimientos pertenecen a tres categorías:

Primera categoría: Normas de aplicación general a todos los productos o sistemas de una industria, por ejemplo normas de compatibilidad electromagnética, que son aplicadas a los insumos de la astronomía.

En atención a que se trata de normas universales y conocidas por todo profesional de las áreas respectivas, este informe sólo se limita a indicar el tipo de norma aplicable sin entrar en detalle ni explicaciones de cada norma. Una lista más completa se encuentra en el punto 3.3.6 al final de esta sección.

Segunda categoría: Normas específicas para la astronomía.

No se han identificado normas particulares, exceptuando la recomendación ITU:

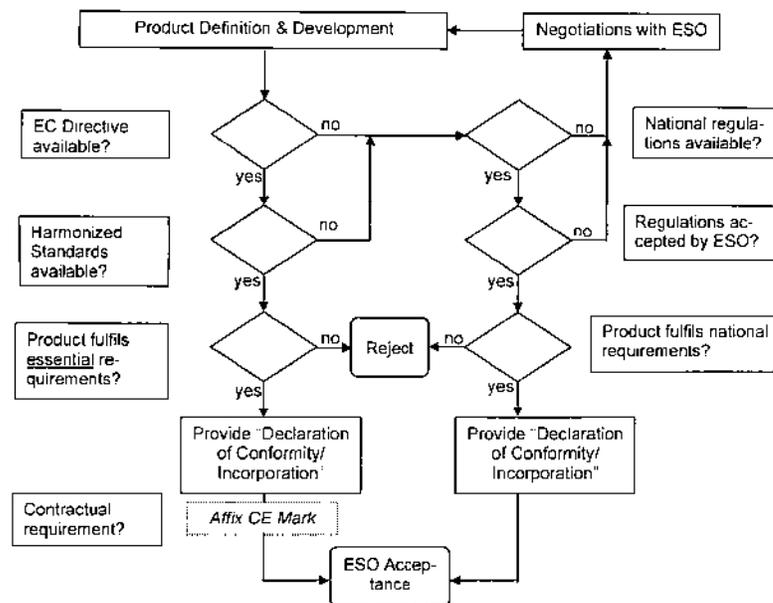
¹⁵ VERY LARGE TELESCOPE, VLT Observatory requirements for visitor instruments at the VLTI, Doc. Nr.: VLT-ICD-ESO-15000-4824, Issue: 1, 19.08.09, Prepared by: P. Haguenaer

“Protection criteria used for radio astronomical measurements” RECOMMENDATION ITU-R RA.769-2 Question ITU-R 145/7, 1992-1995-2003, The ITU Radiocommunication Assembly.

Tercera categoría: Normas específicas de una organización (EOS, NRAO, AURA) o para un proyecto astronómico específico (E-ELT, ALMA).

Desde el punto de vista de las normas de una organización, aplicables a todos los proyectos, la ESO, ha anunciado la publicación de un documento sobre los estándares técnicos: “ESO Technical Standards’ document no. GEN-SPE-ESO-00000-2961”. Su publicación está pendiente. Está disponible el document “ESO - Safety Conformity Assessment Procedure For All Project Phases Until Preliminary Acceptance” Doc. No.1 SAF-1N S-ESO-00000-3444, Issue: I, Date: 10.10.2006

La ESO ha elaborado un diagrama de flujo aplicado para evaluar la conformidad de los productos con los estándares de riesgo. El diagrama es reproducido en la figura siguiente:



El proyecto para el cual existe la mayor documentación respecto de normas es ALMA. Lo cual resulta evidente dado que en la construcción de ALMA concurren actualmente tres asociados cuyos aportes tecnológicos deben ser compatibles entre sí.

Los documentos de requerimientos de ALMA han sido elaborados tanto bajo la responsabilidad de NRAO como de la ESO. Éstos se basan en los estándares de cada país o zona y agregan requerimientos específicos al proyecto.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Los principales documentos son:

ALMA-80.11.00.00-001-D-GEN, “ALMA Product Assurance Requirements”

ALMA safety standards, policies, and procedures Conditions Governing the Call for Proposals

ALMA-80.02.00.00-003-G-STD ALMA “Documentation Standards”

ALMA-80.02.00.00-011-C-PLA ALMA “Documentation Control Plan”

ALMA-80.02.00.00-016-A-SPE ALMA Guidelines for Identification and Labeling of ALMA Components

ALMA-80.03.00.00-001-M-LIS, “ALMA Product Tree”.

ALMA-80.04.00.00-005-B-SPE “ALMA System Technical Requirements”

ALMA-80.05.00.00-001-B-SPE “ALMA Power Quality Specification”

ALMA-80.05.00.00-005-C-SPE “ALMA System Electrical Design Requirements”

ALMA-80.05.01.00-001-B-SPE, “ALMA System Electromagnetic Compatibility Requirements”

ALMA-80.05.02.00-001-B-SPE “ALMA Environmental Specification”

ALMA-80.05.00.00-004-B-STD “Standard for Plugs, Socket-outlets, and Couplers”

ALMA-80.09.00.00-001-D-PLA, “ALMA Design Reviews - Definitions, Guidelines and Procedures”

ALMA10-08.00.00.003-G-STD ALMA “General Safety Design specification”

ALMA-10.08.00.00-004-A-GEN ALMA “Safety Risk Analysis Procedures”

ALMA-80.07.00.00.001-D-PLA ALMA Interface Management Plan

3.3.3 Diseño y construcción de la Infraestructura

La infraestructura que se construye en las ciudades no tiene requerimientos especiales.

La infraestructura que debe albergar al telescopio o soportar el peso de las antenas presenta desafíos de ingeniería especiales.

Además de las consideraciones sísmicas, es necesario diseñar las instalaciones de manera que las estructuras no transmitan a los telescopios y a los instrumentos vibraciones que afecten la observación. El diseño de las estructuras debe considerar por

tanto las frecuencias propias de los telescopios y modelar los modos propios de los edificios así como las condiciones de amortiguación de movimientos.

Uno de los desafíos de ingeniería son los domos, que se componen de una parte fija y de un parte móvil. Ambas partes pueden ser diseñadas y construidas por empresas distintas, en estrecha colaboración.

Este elemento resulta más estandarizado que los instrumentos señalados en el párrafo anterior y tiene como exigencia primaria proteger el telescopio del clima y el polvo, pero permitiendo abrir la estructura para el trabajo de observación del cielo¹⁶.

Para estas estructuras, existen requerimientos que son adicionales a toda construcción de estructuras mecánicas o de edificios:

- a. Capacidad de movimiento de rotación preciso a la vez que rápido para apuntar el telescopio en la dirección deseada en el mínimo tiempo.
- b. Un control preciso de la temperatura al interior del domo, minimizando las variaciones de la temperatura media así como minimizando los gradientes de temperatura interna.
- c. Proveer atenuación de las fuerzas de vientos.
- d. Elementos para manipular las partes del telescopio para mantenimiento de componentes.
- e. Mecanismos de control de la posición, que incluye encoders, electrónica y software de control de posición.
- f. Diseño de partes que facilite el montaje en el sitio.

Mientras que para la parte móvil de un domo es posible la fabricación en el extranjero y luego el montaje en Chile, la infraestructura fija, de carácter “no importable” (no transable) necesariamente debe contemplar proveedores locales y considerar los permisos y normas chilenas.

¹⁶ “With a telescope of big size, even the enclosure is challenging. It has more in common with modern sports stadiums than existing telescope enclosures, given the huge opening doors needed to allow the telescope to view the sky”

Para las firmas de ingeniería y para las empresas constructoras de obras civiles, proveedores de cableado e instalación eléctrica, resultan de aplicación tanto las normas vigentes en los países de origen de los observatorios, como las normas chilenas.

Un ejemplo de esto se puede ilustrar con la documentación de llamado a presentar ofertas para construir la fundaciones de APEX.

Para el concreto, el contratista debe ceñirse a dos conjuntos de normas¹⁷:

a. American Concrete Institute Standards

ACI-301- 89 "Specifications for Structural Concrete in Buildings"

ACI-302.1 " Guide for Concrete Floor and Slab Construction"

ACI-318 "Building Code Requirements for Reinforced Concrete.

ACI – 306 R- 88 coal Weether Concreting

b. Estándares Chilenos

Norma Chilena Oficial 170.Of.85 "Hormigón- Requisitos Generales-

Norma Chilena Oficial 429.EOf 57 "Hormigón Armado -I parte-

Norma Chilena Oficial 430.EOf 61 " Hormigón Armado - II parte-

Norma Chilena Oficial NCh 163 " Aridos para Morteros y Hormigones"

Norma Chilena Oficial NCh 203.Of.77 " Acero para uso estructural-Requisitos"

Norma Chilena Oficial NCh 204.Of.77 "Acero-Barras laminadas en caliente para hormigón armado"

Norma Chilena Oficial NCh 209.OF.71 "Acero-Planchas gruesas para usos Generales de construcción mecanica".

Norma Chilena Oficial NCh 212 "Acero-Planchas delgadas laminadas en caliente para usos Generales.

Norma Chilena Oficial NCh 217 OF.68 "Acero-Planchas delgadas para usos Estructurales.

Norma Chilena Oficial NCh 218 and 219 "Mallas de Alta resistencia para hormigón armado"

¹⁷ European Southern Observatory, Construction of the ESO Atacama Pathfinder Experiment, Radio Telescope Antenna Foundation, Tender document, Doc.: APEX-TDo-ESO-xxxx-xxxx, Issue : 1, Date: September 26, 2002.

Norma Chilena Oficial NCh 434.Of 69 " Barras de Acero de alta resistencia en obras de Hormigón Armado"

A los participantes de la licitación, se les solicita¹⁸:

“For products specified in accordance with ASTM, Chilean standard or other U.S. Standards, BS, DIN, ISO, VDE, IEC, CENELEC and Eurocodes or similar association standards, upon request, the Contractor shall provide an acceptable affidavit by independent testing laboratory, or other source approved by ESO, certifying that the product furnished for this Project complies with the particular standard specifications. Where necessary, requested or specified, supporting test data shall be submitted to substantiate compliance. The manufacturer is subject to ESO's acceptance.”

De acuerdo a lo señalado por empresas chilenas constructoras que han trabajado para los observatorios, es común que para los trabajos de infraestructura en Chile el mandante imponga un conjunto de reglas combinando las normas chilenas con las normas europeas o norteamericanas.

Las empresas contratistas deben entonces trabajar en la perspectiva del “peor caso” o de cumplimiento de la norma más exigente de entre ellas.

Adicionalmente, los contratistas deben considerar aspectos particulares como el diseño sísmico, aunque no estuviera explicitado en las bases de los llamados a licitación.

3.3.4 Servicios especializados de mantención, reparaciones y gestión de datos

En la actualidad, la mantención preventiva y predictiva de instrumentos y espejos, reparación, servicios de meteorología, calibración, actualización de Software, insumos para criogenia, fabricación de partes y piezas especiales, son provistos en dos modalidades:

- a. Los dispositivos e instrumentos son enviados al fabricante para el test o reparaciones. Generalmente el fabricante tiene las facilidades de test y reparación en los países de origen de los observatorios.

¹⁸ Idem.

- b. Para reparaciones y mantenimiento de rutina, los observatorios prefieren contratar profesionales que se integran a la planta local del observatorio. Esto es justificado por la alta especificidad de los instrumentos y componentes de alta tecnología.

Esto mismo es actualmente válido para el almacenamiento y la gestión de datos astronómicos, si bien los centros de datos pueden estar físicamente localizados en los países de origen de los observatorios.

Esta situación podría evolucionar hacia un escenario distinto en la medida que en los nuevos proyectos, la generación de datos es de tal volumen que se requieren de enlaces de datos de alta capacidad para la transmisión de la información y Data Centers para su almacenamiento. En este marco, existe una necesidad creciente de contar con un enlace dedicado de alta capacidad, ya no tan solo para facilitar un modelo de operación y la transferencia de los datos sino que también para contar en tiempo real con ingenieros expertos que por tiempo y costo no pueden hacer un diagnóstico en el mismo sitio donde se encuentra el telescopio, lo que con un enlace adecuado permitiría ahorrar tiempo y dinero.

Hay que distinguir que este tipo de telescopios tienen dos tipos de necesidades en materia de conectividad, una para el área administrativa (servicios básicos, acceso a correo, sitios web, etc.) lo que puede ser resuelto con algún mecanismo estándar pero, por otro lado, para el área científica se requiere una conectividad diferente con grandes capacidades (sobre los Giga bit por segundo) y dinámicas, es decir, que permitan experimentación de manera de ajustarse a las necesidades, cambios tecnológicos que van implementando los observatorios sobre todo en materia de transferencia de datos. Un ejemplo de esto serán el LSST y ALMA. El primero, además de las grandes capacidades de transferencia, requerirá el diseño de un mecanismo eficiente de transferencia de información, distinto a lo que se usa convencionalmente. En ALMA sucede algo similar al requerir a futuro una optimización en la transferencia de la información hacia los repositorios en los distintos sitios. En este sentido las redes académicas juegan un rol relevante y es el modo en que los observatorios en los otros países han resuelto sus necesidades de conectividad para el ámbito científico.

En lo que respecta a los servicios de tecnologías de la información relacionados con factores de menor criticidad¹⁹, es decir computadores de escritorio, servidores, páginas Web, servidores de correo electrónico, bases de datos de administración, software de administración, existen normas especiales que normalizan tanto el software como los niveles de servicios.

En el caso de la ESO, esta práctica se ha ido haciendo más sistemática con los años. Un estudio²⁰ cita la declaración de uno de los responsables de la ESO en el sentido de que muchos de los servicios se han contratado sobre una base de confianza más que de acuerdos formales.

Este mismo informe propone una estructura de SLA que es presentada en la información de soporte.

El servicio de energía eléctrica puede significar un desafío en cuanto se requiere de generación propia o del recurso a energías renovables.

Como se ha señalado, también la transmisión de datos por redes de alta capacidad comienza a ser un servicio diferenciado.

3.3.5 Bienes y servicios no diferenciados.

Por último, existe la necesidad de los observatorios de contar con servicios comunes a toda empresa y/o que comparte las condiciones de los proyectos mineros en el norte de Chile.

A esta categoría pertenecen los suministros generales tales como energía eléctrica, telefonía, internet, agua, servicios de limpieza, mantención no especializada (gasfitería, aire acondicionado, carpintería, mantención eléctrica). También los servicios de transporte, alojamiento y alimentación.

¹⁹ Por contraposición al software de control de telescopios, control de instrumentos, óptica adaptativa, movimiento del domo, cuya falla deja fuera de funcionamiento a todo el observatorio.

²⁰ STUDY of ESO's IT INFRASTRUCTURE & SERVICE REQUIREMENTS, TEKOM Industrielle Systemtechnik GmbH

Para el presente estudio, los requerimientos de estos servicios no diferenciados no constituyen un tópico de interés en atención a que:

- Existe en Chile un mercado competitivo de estos servicios.
- No existen en Chile fallas de mercado asociadas a estos servicios.
- Las calidades ofrecidas por las empresas están al menos al nivel de las necesidades de los observatorios.
- Los procedimientos de licitación, evaluación y adjudicación por parte de los observatorios están establecidos y son rigurosos.
- Al no existir una diferenciación de estos servicios respecto de otros clientes como por ejemplo las empresas mineras, el lograr contratos con los observatorios no tiene externalidades tecnológicas.

3.3.6 Normas de aplicación general utilizadas por los observatorios

La ESO y NRAO definen como aplicables normas IEC, MIL, ETS, EN.

La siguiente lista detalla algunas de las normas que se aplican en los proyectos y adquisiciones de los observatorios se entrega como referencia y no es exhaustiva.

Normas aplicables por NRAO / AURA

- IEC 61000 Electromagnetic compatibility (EMC) (the entire series as applicable)
- MIL-STD-461E Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment
- IEC 61204-3 Low-voltage power supplies, d.c. output – Part 3: Electromagnetic Compatibility
- IEC 61326-1 Electrical equipment for measurement, control and laboratory use – EMC requirements
- IEC 61543 Residual current-operated protective devices (RCDs) for household and similar use - Electromagnetic compatibility
- IEC 61547 Equipment for general lighting purposes - EMC immunity requirements
- IEC 61587-3 Mechanical structures for electronic equipment – Electromagnetic shielding performance tests for cabinets, racks, subracks
- IEC 61800-3 Adjustable speed electrical power drive systems - EMC product standard including specific test methods
- IEC 62040-2 Uninterruptible power systems – EMC requirements
- ETS 300 329 Radio Equipment and Systems (RES); EMC for Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT) equipment

- ETS 300 447 Radio Equipment and Systems (RES); EMC standard for VHF FM broadcasting transmitters
- ETS 300 682 Radio Equipment and Systems (RES); EMC standard for On-Site Paging Equipment

Por su parte, la ESO aplica principalmente las normas ISO y normas EN:

- ISO 12100-1. 2003-1 I-OI.
- ISO 12100-2, 2003-1 1-01.
- EN 954-1, 1996-07-II . General Principles for design.
- EN 1050, 1996-08-22 Principles of Risk Assessment,
- ISO/IEC 15288: 2002. Systems engineering -- System life cycle processes
- MIL-STD-882D. 2000-02-10. Standard Practice for System Safety.
- EN ISO 11688
- EN ISO 11690
- EN ISO 15667
- Low voltage directive 72/23/EEC
- EN 60204-1
- EN 563
- EN 1299
- EN 12100 1
- EN 12100-2
- EN 294
- EN 349
- EN 811
- EN 982
- EN 983
- EN 953
- EN 999
- EN 1005-3
- EN 574
- EN 1760
- EN 61496

Ejemplos de normas aplicables al desarrollo de software

- IEEE 1228-1994 Software Safety Plans
- Underwriters Laboratories Inc. Standard for Safety 1998 Standard for Software in Programmable
- ISO/IEC 15288:2008 System life cycle processes
- C Coding Standards, UK Astronomy Technology Centre
- IEEE Std 829-1998, IEEE Standard for Software Test Documentation
- IEEE 1012-2004 AD12 Standard for Software Verification and Validation
- ISO/IEC 12207:2008 AD12 Software life cycle processes

Ejemplos de normas aplicables al desarrollo con productos láser

- IEC 60825-1, Ed. 1.2 Safety of laser products – Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide
- AD19 Safety of laser products – Part 4: Laser Guards IEC 60825-4, Ed. 1.2
- AD20 Safety of laser products – Part 5: Manufacturer's checklist for IEC 60825-1 IEC/TR 60825-5, Ed. 2.0
- AD21 Safety of laser products – Part 5: Manufacturer's checklist for IEC 60825-1 IEC/TR 60825-5, Ed. 2.0

Ejemplos de normas aplicables a la calidad del suministro eléctrico (ALMA)

- ALMA-80.05.00.00-001-C-SPE Version: C Status: Released 2003-12-15
- European Standard EN 50160 "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems", November 1999.
- IEC 60050-161 International Electrotechnical Vocabulary
- European Standard EN 50160 "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems", November 1999.

Ejemplos de normas de seguridad

- National Electric Manufacturers Association 250-1997 Enclosures for Electrical Equipment (1000 Volts Maximum)
- National Fire Protection Association (NFPA) NFPA 70, 2008 edition National Electric Code S
- Underwriters Laboratories Inc. Standard for Safety 94 Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances

Normas de compatibilidad electromagnética

- CENELEC EN 61000-6-1:2001 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-1: Generic standards – Immunity for residential, commercial and light-industrial environments
- Department of Defense MIL-STD-464A Electromagnetic Environmental Effects, Requirements for Systems
- Department of Defense MIL-STD-810F Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests
- FCC Title 47 CFR Part 15 Radio Frequency Devices
- EN 300 386-2 Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Telecommunication network equipment; EMC requirements; Part 2: Product family standard
- CISPR 11 Industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment - Electromagnetic disturbance characteristics - Limits and methods of measurement
- CISPR 22 Information technology equipment - Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement
- Serie MIL-F-3922/ Waveguide Flanges for ALMA Instrumentation

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Normas eléctricas

- TIA/EIA TIA/EIA-568-B Commercial Building Telecommunications Cabling Standards
- TIA TIA-485 Electrical Characteristics of Generators and Receivers for use in Balanced Digital Multipoint Systems
- IEC 60309 Plugs, socket-outlets and couplers for industrial purposes
- IEC 60083 Plugs and socket-outlets for domestic and similar general use standardized in member countries of IEC
- IEC 60320 Appliance couplers for household and similar general purposes
- IEC 60050 International Electrotechnical Vocabulary
- IEC 60529 Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)
- IEC 61140 Protection against electric shock – Common aspects for installation and equipment
- IEEE 802.3U revision 95 Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method & Physical Layer Specifications: Mac Parameters, Physical Layer, Medium Attachment Units and Repeater for 100 Mb/S Operation

3.3.7 Ejemplo de estructura de un Service Level Agreement para contratos de servicios de un observatorio

La Información de soporte entrega un ejemplo de contenido de un SLA

4 INDUSTRIA: ACTORES NACIONALES E INTERNACIONALES

4.1 MUESTRA DE EMPRESAS PROVEEDORAS DE LA ASTRONOMÍA A NIVEL MUNDIAL.

La cantidad de empresas que han realizado al menos una vez un trabajo relacionado con la astronomía es grande, por lo que se ha seleccionado una muestra de las principales empresas, con énfasis en las que están relacionadas con los últimos grandes proyectos de astronomía en el mundo.

La tabla siguiente presenta un resumen de las empresas identificadas. En anexo se entregan los datos principales de ellas en formato de fichas.

HITECH		
Ámbito	Nombre de la empresa	comentarios
Interferometría	4D Technology Corp.	
Óptica Adaptativa	ALPAO	Spin-off de la empresa Grenoble (Univerisidad Joseph Fourier) y Floralis
	CSEM	Posee acuerdos de colaboración con industrias como BASF y también con centro de investigación y universidades como: Alpict, MCCS, Swissmem, EUCEMAN entre otros
	Canon Inc.	sedes en prácticamente todos los países
Óptica Activa	Sagem	Pertenece al grupo Safran
Filtros Ópticos	Asahi Spectra USA Inc.	
Componentes Mecánicos	AMOS	
	ASTELCTO Systems GmbH	
	ETEL S.A	
Correlador	Fujitsu	
Construcción Espejos	Hextek	No Aplica
	Schott	
Detectores/ receptores de radiofrecuencia	e2v technologies	E2v technologies (uk) ltd, e2v ltd, e2v sas, e2v scientific instruments, e2v semiconductors, e2v aerospace and defense inc., e2v asia pacific.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

HI-TECH		
Ámbito	Nombre de la empresa	comentarios
<u>Camaras/sensores/ espectrografos opticos</u>	Apogee Instruments Inc.	
	ASTELCO Systems GmbH	
	e2v technologies	.
	First Light Imaging	Compañía derivada de los centros de investigación más grandes en Francia como laboratoire d'Astrophysique de Marseille, Laboratoire d'Astrophysique de l'Observatoire de Grenoble y Observatoire de Haute-Provence
	General Dynamics SATCOM Technologies	Vertex Antennentechnik GmbH.
	Astronomical Research Cameras Inc	
	Nikon	
	Blue Line Engineering	
	Fogale Nanotech	
<u>Diseño y/o Construcción telescopios/antenas y componentes estructurales</u>	Vertex Antennentechnik GmbH	Division de General Dynamics SATCOM Technologies
	AMOS	
	ASTELCO Systems GmbH	
	EOS Technologies	EOS-AUS
	General Dynamics SATCOM Technologies	
	AEM Consortium (Filial en Chile MT-Mecatronica Ltda.)	Thales Alenia Space, Thales Alenia Space France, European Industrial Engiennering S.r.L, MT-Mechatronics
	M3 Engineering	
	Mitsubishi Electric Corp.	Parte de Mitsubishi Global.
	AMEC	
<u>Fotonica</u>	Toptica Photonics	
	Teraxion Inc.	
<u>Software</u>	Observatory Sciences Ltd.	
	EOS Technologies Inc.	EOS-AUS
	ASTELCO Systems GmbH.	
<u>Encoders</u>	Heidenhein	
<u>Gratings</u>	Centre Spatial de Liège	Grupo de investigación de la Université de Liegè
	Richardson Gratings	Parte de Newport Corp.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

SISTEMAS Y SERVICIOS		
<u>Criogenicos</u>	ColdEdge Technologies	Posee acuerdos de colaboración con diversas empresas como Valley Research, AVACO, Quantum Design, Hostirad, VALTEX-ST
	Cryoconnect	Division de Tekdata Interconnections Ltd.
<u>Fibra Optica</u>	CeramOptec Industries Inc.	
	Le Verre Fluoré	
<u>Limpieza y/o Recubrimiento de espejos</u>	Dynavac	
	Evaporated Metal Films Corp.	
	Australian Centre for Precision Optics	Forma parte de Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
	SESO	
	IRSA Lackfabrik	
<u>Fabricación Domos o infraestructura de subsistemas</u>	Triodetic	
	CST Industries	Temcor, Conservatek
	Stutzki Engineering	

4.2 EMPRESAS INSTALADAS EN CHILE QUE PROVEEN SERVICIOS A LOS CENTROS ASTRONÓMICOS

Empresas chilenas han prestado servicios, desarrollo de proyectos, fabricación o construcción a los observatorios astronómicos instalados en Chile. La tabla siguiente resume las empresas que han sido identificadas. En anexo se entrega mayor información acerca de cada una de ellas.

Ámbito de especialidad	Empresa Privada
Fabricación circuitos electrónicos, Fibra óptica	AXYS S.A
Sistemas Eléctricos	Gismac
Automatización de Procesos	ASINPRO
Integración de sistemas y obras civiles especializadas	Arcadis
	Ocegtel S.A
	Conpax
	DCS
Construcción Sitio/Rutas	Constructora Agua Santa S.A
	Consortio Vial y Vives
Recubrimiento y aislantes térmicos	CYM San Pascual S.A
Servicios de operación	AstroNorte

Ámbito de especialidad	Grupo académico
Interferometría	Centro de Óptica y Fotónica Universidad de Concepción
Óptica Adaptativa	Centro de AstroIngeniería Pontificia Universidad Católica de Chile
Detectores/receptores de radiofrecuencia	RadioAstronomical Instrumentation Group Universidad de Chile
Astroinformática	Depto. Informática UTFSM CMM (Universidad de Chile)
Meteorología	Astrometeorología U. de Valparaiso.
Redes Avanzadas.	REUNA

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

4.3 IDENTIFICACIÓN DE UNA MUESTRA DE EMPRESAS NACIONALES

Se realizó una encuesta que fue enviada a todos los asociados de la AIE (Asociación de la Industria eléctrica y electrónica), de la ACTI (Asociación Chilena de Tecnologías de la Información) y de la GECHS (Grupo de empresas chilenas de software). Adicionalmente, se envió dicha encuesta a empresas que no pertenecen a estas asociaciones y que integran una base de datos de empresas chilenas que fue elaborada en el marco del presente estudio.

Se recibieron solamente 15 respuestas de empresas que manifestaron interés en participar en proyectos para los observatorios y que cuentan con capacidades de ingeniería o que comercializan insumos tecnológicos.

La información entregada por esas empresas se entrega en anexo.

Empresa	GIRO PRINCIPAL
AXYS	Desarrollo de proyectos de Ingeniería, diseño y fabricación de equipos industriales, Fibra Óptica
CONTROL & LOGIC	Ingeniería en Automatización y Control
DESA	Diseño, desarrollo y comercialización de sistemas electrónicos y computacionales
DMH INGENIEROS	Ingeniería, Electricidad industrial, Automatización de procesos, Desarrollo de líneas de producción, Consultoría
IMPORTADORA POIROT S.A.	Importación de herramientas y equipos para la reparación y ensamblaje de circuitos impresos electrónicos.
KONCEPT Ltda	Consultoría de negocios en innovación y tecnología, diseño funcional de productos.
LEYTON ALVAREZ	Venta, Desarrollo y/o Fabricación Mecánica, Infraestructura y obras civiles
MEC. IND. MJM S.A	Metal mecanico
NECTIA S.A	Soluciones TI, Desarrollo de Software e integración de Sistemas
NET SERVICE & CONSULTING LTDA	Servicios y consultoría en áreas de tecnologías de información y comunicaciones (TIC), climatización y electricidad
RIEGEL E.I.R.L.	Automatización y Control Industrial
SCHÄDLER Y CÍA. LTDA	Importación y comercialización de componentes electrónicos para la industria
Sistemas Criogénicos	DICTUC - Sistemas criogénicos para astronomía
SOLSIS LTDA	Desarrollo y venta de equipos de control
TECNOCAL	Desarrollo de soluciones electrónicas a la medida

4.4 CASOS DE TRABAJOS CON LOS OBSERVATORIOS.

AXYS S.A

Descripción de la empresa

AXYS S.A. es una empresa dedicada a proyectos de ingeniería, integración de sistemas y servicios de diseño y manufactura electrónica, que ofrece soluciones a sectores de telecomunicaciones, transporte, industria y defensa.

Esta empresa aborda proyectos en las siguientes áreas tecnológicas:

- Procesamiento, transmisión y distribución de datos, video y voz, sobre diferentes tecnologías de redes de comunicaciones - Satélite, Wireless, Fibra Óptica y Banda Ancha;
- Automatización de Procesos, Instrumentación Industrial y Telemetría;
- Diseño y fabricación de equipos electrónicos para aplicaciones ferroviarias en trenes y metros.

La empresa está estructurada en dos divisiones operacionales:

DIVISIÓN INGENIERÍA Y PROYECTOS, focalizada en proyectos de ingeniería, integración de sistemas, desarrollo de tecnologías y proyectos de infraestructura.

Entre los servicios de esta división se cuenta con:

- Diseño y desarrollo proyectos de ingeniería
- Desarrollo proyectos de integración tecnológica
- Estudios de ingeniería, consultoría y capacitación
- Reingeniería de sistemas
- Montaje y puesta en marcha de proyectos
- Diseño y fabricación de sistemas electrónicos.

DIVISIÓN INDUSTRIA ELECTRÓNICA PROTONIC, que provee servicios de diseño, desarrollo y fabricación de sistemas, módulos y productos electrónicos de tipo industrial (diseño electrónico, fabricación de circuitos impresos (PCB), montaje y pruebas), destinado al mercado nacional e internacional.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

En esta área se aborda:

- Sistemas de comunicaciones y radiocomunicaciones
- Sistemas de control automatizados
- Sistemas de comunicaciones por fibra óptica
- Sistemas de televisión
- Sistemas energía solar
- Sistemas de telemetría
- Sistemas de iluminación de estado sólido de alta eficiencia.

Ambas divisiones operan en forma integrada permitiéndole una mejor gestión de costos y tener flexibilidad en las soluciones técnicas.

Entre los clientes a los que ha prestado servicios la empresa se encuentran:

- Telefónica CTC Chile
- Metrogas
- Empresa de Transporte de Pasajeros de Santiago Metro S.A.
- VTR
- TV Red S.A. (Punta Arenas)
- Manquehue Net S.A.
- Megavisión
- SubTV (Metro TV)
- Codelco
- Armada de Chile
- Fuerza Aérea de Chile
- Carabineros de Chile
- European Southern Observatory (ESO)

Trabajos para los Observatorios:

- **ALMA (NRAO)** integración en Chile de los racks de electrónica para los 60 radiotelescopios del proyecto ALMA (San Pedro de Atacama).
- Proceso de pruebas y mediciones electrónicas de los Radiotelescopios ALMA en planta AXYS.
- **ALMA-ESO** (2006) estudio y evaluación del comportamiento de la fibra óptica en grandes alturas (5.500 metros sobre el nivel del mar)
- **ALMA** (2008) sistemas de fibra óptica para los primeros radiotelescopios.
- Instalación de sistemas de distribución y terminación de fibra óptica en el A.O.S (Array Operations Facilities) a 5.050 metros de altura.
- **ALMA** (2009) Entrenamiento y capacitación en tecnologías de fibra óptica para 28 Ingenieros de ALMA.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

- **ALMA** (2009) Diseño de ingeniería para los sistemas de acoplamiento por fibra óptica para los Pad de fundación de antenas de radiotelescopios, instalación y comprobación en los primeros pad
- **ESO** (2010) desarrollo de ingeniería y operación de sistemas de acceso de comunicaciones por fibra óptica del telescopio European Extremely Large Telescope (E-ELT) instalado en el cerro Armazones, Región de Antofagasta (Contrato de operación por 10 años con ESO y Astronomisches Institut Ruhr-Universität Bochum-Alemania) El proyecto considera los sistemas de comunicaciones desde Cerro Armazones hacia el Observatorio Paranal (20Km) y desde Observatorio Paranal hasta la ruta 5 Norte (80Km), donde se interconecta con los sistemas de fibra óptica existentes en la zona norte del país para el acceso desde Santiago y desde Europa, y como parte del proyecto global de ESO para conectividad denominado EVALSO (Enabling Virtual Access to Latin-America Southern Observatories). El proyecto EVALSO busca permitir el acceso virtual a los observatorios de América del Sur.

Desafíos tecnológicos

Si bien todos los trabajos para los observatorios relacionados con la electrónica y las comunicaciones comportan un nivel de especialización diferenciado, dos de los trabajos de Axys han significado un trabajo de tecnología y de calidad competitivo a nivel mundial.

El primero de ellos, es la integración en Chile de los racks de electrónica para los 60 radiotelescopios del proyecto ALMA.

Los sistemas del Back End de ALMA entregan al correlador instalado en el Edificio Técnico del AOS (Sitio de Operaciones del Conjunto) las señales generadas por las unidades del Front End instaladas en cada antena.

Adicionalmente, el Back End tiene como tarea transmitir la señal recibida por las antenas al computador central (correlator). Adicionalmente, el backend debe enviar a todos los componentes un pulso de referencia generado por el reloj atómico que se encuentra en el edificio central. Esta referencia es básica para la coordinación del movimiento de las antenas.

También, el backend envía una señal láser a todas las antenas para monitorear continuamente la longitud de las fibras ópticas, ya que éstas se contraen o expanden debido a las variaciones de temperatura en el sitio. Estas variaciones deben ser corregidas para mantener la sincronización del sistema.

Los racks una vez fabricados e integrados, son sometidos a rigurosos test de funcionamiento antes de ser conectados a las antenas de ALMA.

Un segundo trabajo de Axys que significa un aporte a la ingeniería, es el estudio y evaluación del comportamiento de la fibra óptica en grandes alturas (5.500 metros sobre el nivel del mar).

Los estándares de la industria para las pérdidas por empalme de fibras ópticas están establecidos para condiciones a nivel del mar. Antes del trabajo de Axys, no existían pruebas reales de trabajo con fibra óptica a esa altura sobre el nivel del mar²¹.

Lecciones aprendidas

El trabajo de Axys se origina en una licitación en que compitieron empresas de Japón, Taiwán, Alemania, Estados Unidos y Chile.

Los factores que fueron determinantes para que Axys lograr ganar esa licitación, fueron:

- a. Los estándares de calidad que emplea la empresa en todos sus trabajos, tanto nacionales como internacionales.
- b. El equipo profesional de la empresa.
- c. Los procesos e instalaciones, sujetos a los estándares internacionales.
- d. Un currículo de trabajos en el área, que entrega confianza a los contratantes.

²¹ Fibre splicing at 5 000 m: Experience from the APEX project, which also operates at Llano de Chajnantor, suggests that the harsh operating environment (dust, strong wind, extreme temperatures and low air density) might prevent any contractor from reliably meeting the 0.15 dB splice loss (at the sea level) assumed as a standard in the industry and as a baseline for the optical budgets used in ALMA. As a matter of fact, no splicing equipment existed that was rated for that altitude. Alain Baudry, Fabio Biancat Marchet, Herve Kurlandcyk, Silvio Rossi, **“The ALMA Back-End”**, The Messenger 125 – September 2006



REUNA

Descripción de la institución

REUNA es la Corporación Red Universitaria Nacional, creada en 1986 como organización cooperativa de interconexión universitaria, una iniciativa de colaboración impulsada por instituciones de investigación y educación superior. Está interconectada globalmente con las Redes Académicas Internacionales. Provee servicios avanzados de comunicación y conectividad nacional e internacional.

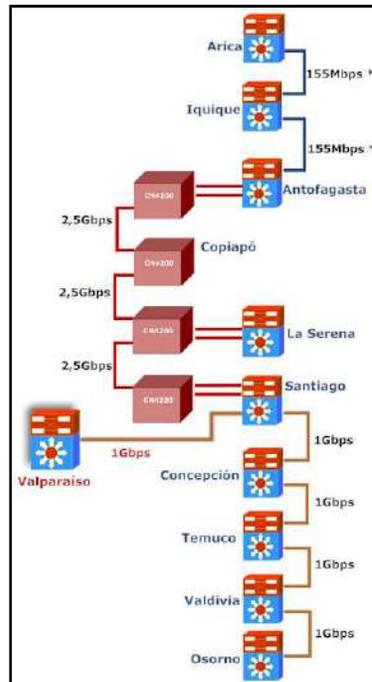
En 1991, se constituye como corporación de derecho privado sin fines de lucro. El 2 de enero de 1992, gracias a la autorización de la National Science Foundation (NSF) – Estados Unidos- y al aporte de CONICYT, Fundación Andes y la Organización de Estados Americanos (OEA), REUNA conecta Chile a Internet, a través de la red NSFNet.

En 1998, luego de vender el negocio de conectividad a la empresa CTC Internet S.A con el fin de satisfacer necesidades de innovación y conexión nacional e internacional crea REUNA2, una red de banda ancha que conecta a todas las instituciones miembros de la Corporación, desde Arica hasta Osorno a 155 Mbps, convirtiéndose en la primera Red de Alta Velocidad de América Latina.

En noviembre de 2006, se implementa y despliega G-REUNA, red que supera a REUNA2 gracias al aumento y la mejora de las capacidades en la última milla de las conexiones a la troncal nacional, lo que posibilita a la Corporación, prestar un mejor servicio a las instituciones que la integran.

REUNA, tiene cobertura de Arica a Osorno y está compuesta por 11 nodos troncales, ubicados en las principales ciudades del país y 18 nodos de acceso. Las capacidades actuales de la red de REUNA están en el rango que va desde los 2,5 Gbps hasta 1 Gbps y cada institución socia conectada a la red lo hace vía un enlace de fibra mediante protocolo Giga Ethernet, es decir con una capacidad de última milla de 1 Gbps.

Diagrama de la Red Troncal de REUNA:



Gracias al desarrollo regional liderado por RedCLARA (Cooperación Latinoamericana de Redes Avanzadas) que interconecta a las redes académicas avanzadas nacionales de Latinoamérica y a éstas con las redes de Europa (GÉANT2), Estados Unidos (Internet2), Asia (APAN) y el resto del mundo, científicos, académicos e investigadores de la región, tienen a su disposición una infraestructura que les permite colaborar efectivamente con la comunidad científica global.

Trabajos para los Observatorios

REUNA desarrolló el proyecto EVALSO (Enabling Virtual Access to Latin-American Southern Observatories).

Se trata de un proyecto conjunto con la Università di Trieste, European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere, Consortium GARR, Nederlandse Onderzoekschool voor Astronomie, INAF – Osservatorio Astronomico di Trieste, Queen Mary University of London, Cooperación Latino Americana de Redes Avanzadas (CLARA), Corporación REUNA y Astronomisches Institut Ruhr-Universität Bochum.

Su objetivo fue conectar a los observatorios astronómicos de Paranal y Cerro Armazones con Europa y la comunidad académica nacional, mediante una red física de alta

velocidad. EVALSO extendió fibra óptica a través de 100 kilómetros del Desierto de Atacama y para completar la conectividad desde Antofagasta a Santiago se obtuvo un enlace basado en una longitud de onda que actualmente está alumbrada a 10 Gbps. Cabe destacar que esta infraestructura es de uso compartido entre los socios del proyecto. Además, a fin de completar la ecuación y que la ESO estuviera conectada a su sede central en Munich, se utiliza infraestructura ya existente de la red digital académica Latinoamericana.

El proyecto busca permitir el acceso virtual a los observatorios de América del Sur. Las instalaciones experimentales de nivel mundial se ubican habitualmente en sitios remotos, lo que hace que la explotación de ellos sea social y económicamente difícil. La comunidad de investigación europea depende de dichas instalaciones para mantener su rol y aquí es donde las tecnologías de redes avanzadas pueden jugar un rol preponderante. Este proyecto empleará estándares existentes cada vez que sea aplicable.

Desafíos tecnológicos

Los observatorios generan una gran cantidad de datos cuya gestión se hace cada día más compleja

Por ejemplo, los telescopios del observatorio Paranal producen más de 100 TBytes de información por noche, lo que equivale a más de 20 DVDs de archivos comprimidos. Los observatorios, al encontrarse aislados de la ciudad, no tenían acceso a las redes de alta capacidad, por lo que estaban obligados a depender de una conexión de microondas para enviar información científica a una estación situada cerca de Antofagasta o bien enviar por correo aéreo a la sede central en Alemania los discos con el material grabado, lo que ocasionaba una espera de días o incluso semanas antes de que las observaciones pudieran ser analizadas.

Las necesidades de transmisión y de almacenamiento de datos están resumidas en las tablas siguientes:

Telescopio	Tamaño	Observatorio	TB/día
VISTA	4.0m	Paranal	1.4
ALMA	66x12m	Chajnantor	0.5
DES/DECam	4.0m	CTIO	0.4
LSST	8m	Pachón	30

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Telescopio	Almacenamiento de Datos
VLТ	20 TB/año
LSST	1000 TB/año ²²

Los volúmenes de datos generados seguirán creciendo, a la par que lo hacen los telescopios que se hacen cada vez más grandes y complejos, generando numerosas dificultades para los constructores, operadores y, finalmente, para los usuarios. Por ejemplo, si se consideran las proyecciones de algunos de los telescopios de Survey, como el LSST, que en sus observaciones recolectaría del orden de los 18 TB de datos por noche, se necesitará un ancho de banda desde los instrumentos al repositorio de los datos (archive) por sobre los 40 Gbps, enlace que adicionalmente debe contar con una disponibilidad altísima dado que los datos de una noche deben ser transferidos en su totalidad antes de la noche siguiente, para que en ella sea posible recopilar nueva información. Si a este requerimiento se suma la necesidad de los otros telescopios de Survey así como los tradicionales, las necesidades de anchos de banda se incrementan sustancialmente.

Lecciones aprendidas

REUNA estaba abierta a la posibilidad de que ESO se integrara a su red nacional y que luego a través de RedCLARA obtuviera su conexión con el resto del mundo, especialmente Europa. Así se iniciaron las conversaciones entre Sandra Jaque, Gerente de Tecnología y Operaciones, de REUNA, Florencio Utreras, Director Ejecutivo de RedCLARA, Giorgio Filippi de ESO y Fernando Liello, académico de la Università degli Studi di Trieste (Italia), quien había impulsado el desarrollo de importantes infraestructuras, como el Observatorio de Argentina (Pierre Auger), financiado a través del FP7. Este grupo estaba en conocimiento de que existía la posibilidad de financiar la construcción de redes o e-infraestructuras a través de fondos europeos, así que comenzaron a armar la propuesta y sumar aliados.

- a. REUNA junto con la ESO identificaron un problema de interés creciente para los observatorios, cuya solución tiene un impacto, potencial en otras áreas académicas.

²² Equivalente a 1 Petabyte, lo que significa 2x LHC (Large Hadron Collider)

- b. Previo a la formulación del proyecto, existían contactos de trabajo entre las instituciones que luego formaron parte del proyecto. La existencia de estas redes fue un factor de alta importancia para la formulación del proyecto.
- c. La valoración total del proyecto alcanza los 4,3 millones de euros. Un porcentaje importante del proyecto, 1,7 millones de euros, fue financiado por el Séptimo Programa Marco de la Comisión Europea.
- d. El establecimiento de una red con instituciones académicas europeas permitió una postulación ganadora al FP7.
- e. La experiencia de REUNA en gestión de proyectos de conectividad resulta determinante en la formulación, ejecución y gestión del proyecto.

ARCADIS – GEOTÉCNICA CONSULTORES

Descripción de la empresa

Si bien ARCADIS es una empresa internacional dedicada a la ingeniería y consultoría, los orígenes de los trabajos para los observatorios se remontan a la empresa chilena *Geotécnica Consultores*, fundada en 1981 y con amplia experiencia en Chile y otros países de América Latina.

Geotécnica fue adquirida en 1997 por ARCADIS, empresa fundada en el 1888 y que está presente en 15 países ejecutando proyectos de infraestructura, medio ambiente y servicios mineros de mediana y gran envergadura. Cuenta con más de 16,000 empleados a nivel mundial y con un ingreso bruto mayor a 2 mil millones de euros.

Como Geotécnica Consultores, la empresa tuvo una gran actividad para la minería, ejecutando evaluación geomecánica de interfases de materiales granulares, estudios geotécnicos de estabilidad de taludes; estudios hidrológicos y de manejo de aguas, caracterización geotécnica de relaves, entre otros.

Como ARCADIS en Chile, tiene como mercado los sectores Minería, Energía, Transporte y Obras Públicas, Forestal e Industrial en general.

Su planta de ingenieros es marcadamente chilena.

Trabajos para los Observatorios

- Arquitectura e Ingeniería de Detalles para las Instalaciones de Apoyo del Gran Telescopio de Rastreo Sinóptico (LSST)
- Proyecto y asesoría en licitación y construcción excavación en roca Cerro Pachón, proyecto LSST, para AURA INC., 2009

El proyecto consistió en clasificar geológica y geomecánicamente el macizo rocoso donde se emplazarán las obras del futuro Telescopio LSST y, con estos antecedentes, definir los métodos de excavación más apropiados que permitieran garantizar el mínimo daño posible a la superficie final excavada.

También se analizaron las prospecciones geotécnicas realizadas y en base a estos antecedentes y a visitas a terreno realizadas por geólogos y geomecánicos de Arcadis, se realizó una caracterización geológica y una clasificación geomecánica del macizo rocoso.

Finalmente se elaboraron los planos de cortes y rellenos para las plataformas y caminos, especificaciones técnicas y documentos de licitación.

Servicios Incluidos:

- Ingeniería de detalles
 - Bases técnicas de licitación,
 - Apoyo a la Declaración de Impacto Ambiental
 - Visitas durante el período de los trabajos de excavación.
 - Caracterización geológica.
 - Clasificación geomecánica.
 - Proposición de métodos de excavación.
 - Evaluación de costos.
- Características Geológico-Geotécnicas preliminares Área Cerro Tolar, para AURA INC., 2003

ARCADIS GEOTECNICA (AG) realizó el estudio geológico en el Cerro Tolar, el cual fue complementado con un análisis de las características geotécnicas de la misma zona, también de carácter preliminar. Se incluyó, además, un programa de exploraciones o prospecciones geotécnicas que deberían ejecutarse en las etapas posteriores de la ingeniería de este proyecto.

Los objetivos del trabajo fueron:

- Determinar, mediante inspección visual, la presencia y características de las unidades de rocas y de suelos en la superficie del terreno del Cerro Tolar.
- En caso que no existieran rocas en la superficie del terreno, debería estimarse su profundidad y características probables de las mismas.

- Elaboración de informe con las observaciones de terreno, incluyendo un plan preliminar de exploraciones o prospecciones geotécnicas.
- Telescopio SOAR 4,2 m edificio de apoyo y cúpula Cerro Pachón, para AURA, Diciembre 1998 a Abril 2001

ARCADIS Geotecnica desarrolló los servicios de ingeniería y arquitectura consistentes en analizar y aprobar los planos confeccionados por la empresa “M-3 Engineering and Tchnology Corp.” que se emplearon en la construcción del Edificio del Telescopio SOAR 4.2M, en cerro Pachón.

El servicio incluyó análisis servicios de todos los sistemas comprendidos en las especialidades de Geotécnica, Estructuras, Mecánica y Eléctricas.

Adicionalmente a lo anterior se incluyó el apoyo en la interpretación de documentos, especificaciones de materiales, métodos constructivos de tal manera que estuvieran dentro de los estándares, requisitos de seguridad, códigos de construcción y/o de la legislación Chilena vigente. El servicio de asesoría se concretó en recomendaciones, proposiciones, informes de evaluación y asistencia al Gerente del Proyecto.

Servicios Incluidos:

- Evaluación excavación en Roca – Capacidad de Soporte – Recomendaciones.
- Revisión de la arquitectura e ingeniería desarrollada por M- 3. Proposición de modificaciones al proyecto para adaptar al uso de materiales nacionales.
- Preparación de documentos de licitación
- Apoyo en licitación de obras. Revisión propuesta y recomendaciones de adjudicación.
- Visitas periódicas a la faena durante la Construcción.

Desafíos tecnológicos

Si bien algunos de los trabajos realizados por Arcadis para los observatorios no tienen gran diferenciación con los trabajos para las empresas mineras, el proyecto para el LSST comporta desafíos de ingeniería que son específicos para la astronomía.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

El proyecto “Arquitectura e Ingeniería de Detalles para las Instalaciones de Apoyo del Gran Telescopio de Rastreo Sinóptico (LSST)” debía considerar aspectos estructurales, aerodinámicos y térmicos cuyo comportamiento resulta crítico para el correcto funcionamiento de los instrumentos científicos.

En efecto, las características del LSST lo hacen sensible a las vibraciones y a los gradientes de temperatura.

Las vibraciones son generadas o amplificadas por las estructuras metálicas y de concreto los edificios en que se alberga el telescopio o que están en su cercanía. Los gradientes de temperatura son afectados tanto por los vientos que circundan las instalaciones como por las características de aislamiento térmico interno y el diseño de las instalaciones de aire acondicionado.

El trabajo de los ingenieros de Arcadis ha tenido por tanto los siguientes desafíos:

Aspectos Estructurales: Diseño de estructura de columnas y muros de hormigón dentro de un revestimiento de paneles metálicas. Pedestal de Hormigón Armado para Apoyar al Telescopio. Rigidez Crítica. Diseño Sísmico.

Aspectos Aerodinámicos: Cúpula cilíndrica con ventilación máxima. Bandas de paneles captan flujo de aire hacia arriba y lo canalizan alrededor del edificio. Ventanas y aperturas para ventilación en el espacio entre paneles.

Un aporte esencial de la ingeniería fue el diseño de un perfil del edificio que minimiza los bordes que inducirían turbulencia, causa de enfriamiento irregular que afectaría el perfil del gradiente térmico. Por ello el diseño de la cúpula fue determinado por un modelo computacional de dinámica de fluidos y estudios de ingeniería, realizándose varias simulaciones aerodinámicas (*CFD*) de los nuevos elementos del edificio.

Aspectos térmicos: se estudió y se diseñó el sistema de Aire Acondicionado Activo dentro de la Cúpula.

Para el Edificio de Servicio, se estudió y se diseñó el control de particulados.



Lecciones aprendidas

Arcadis fue invitada a participar en una licitación cerrada, en que compitió con 8 empresas de Estados Unidos y de Chile.

Para ganar esa licitación, fue determinante su experiencia previa, que comenzó de manera paulatina, siendo su experiencia en el proyecto SOAR, en que fueron contraparte local de una empresa norteamericana, un caso relevante.

La ingeniería conceptual había sido realizada por los ingenieros del LSST. Los ingenieros chilenos hicieron una propuesta de ingeniería básica que cambiaba el aspecto exterior del edificio al incorporar las consideraciones aerodinámicas.

Las principales lecciones son:

- a. La entrada de la empresa a los proyectos de astronomía fue paulatina. Comenzaron como contraparte o haciendo estudios no diferenciados para luego abordar el diseño de ingeniería.
- b. La empresa pudo posicionarse en un nicho hasta ese momento ocupado solamente por empresas norteamericanas, gracias a dos factores que son en primer lugar su experiencia y su equipo de ingenieros y en segundo lugar la capacidad de hacer una oferta de calidad y de precio competitivo.
- c. No obstante su experiencia previa en proyectos de astronomía, fue necesario para los ingenieros aprender nuevos aspectos del negocio específico de la astronomía.
- d. Para el trabajo, fue necesario cumplir tanto las normas chilenas como las norteamericanas, eligiendo el caso más desfavorable entre ambas. Eso implica un aprendizaje de “cómo se hace” a nivel internacional.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

5 CAPITAL HUMANO EN CHILE PARA TECNOLOGÍAS E INDUSTRIA LIGADAS A LA ASTRONOMÍA

Se ha señalado en secciones anteriores que las tecnologías, sistemas, productos y servicios que pertenecen al ecosistema de la astronomía son heterogéneos en su nivel tecnológico y en su diferenciación respecto de otras áreas productivas.

Tanto para el análisis del capital humano como para el análisis de las falencias, se ha considerado necesario recurrir a esa distinción de tres niveles:

- a. Desarrollo de tecnologías de frontera
- b. Proyectos y servicios de alta exigencia en base a tecnologías consolidadas.
- c. Proyectos, bienes y servicios no diferenciados

En el concepto de capital humano, tradicionalmente se incluyen varios componentes cuya característica es la capacidad de generar valor tanto tangible como intangible, garantizar la creación y mantención de la ventaja competitiva así como la eficiencia en la identificación de las oportunidades¹.

Es este estudio, se ha explicitado el capital intelectual, el capital de redes y el capital de confianza.

El capital intelectual se define como los conocimientos y habilidades profesionales y académicas adquiridas por las personas en su formación y experiencia laboral, incluyendo grados académicos.

El Capital de Redes se refiere a las vinculaciones formales e informales de personas y equipos de trabajo con sus pares extra organización, que puede incluir el conocimiento personal de investigadores internacionales del mismo campo de actividad, conocimiento

¹ Nick Bontis, Chun Wei Choo, "The Strategic Management of Intellectual Capital and Organizational Knowledge", Oxford University Press, New York. 2002.

personal de ejecutivos de grandes o medianas empresas. En lo formal, incluye la participación activa en reuniones, organizaciones y asociaciones de empresas o académicas.

Por último, el Capital de Confianza (trust capital) se refiere a la existencia de confianza mutua en las relaciones con sus pares, clientes y proveedores, ejecutivos de otras organizaciones.

5.1 CAPITAL HUMANO EN ASTRONOMÍA

Los caminos típicos seguidos en investigación en la explotación científica de grandes estudios del cielo (*surveys*) son la construcción de las muestras estadísticas de objetos o poblaciones de interés (p.ej., galaxias normales, cuásares, etc.) y su estudio (p.ej., probar su evolución, estructura a gran escala, etc.), o la selección de objetivos interesantes (p.ej., galaxias peculiares, cuásares distantes, enanas marrones, supernova, etc.) para observaciones de seguimiento. El potencial científico de esos estudios es realizado enormemente por conjuntos de datos federados (p.ej., combinando *surveys* del cielo óptico, infrarrojo y radio), que a menudo revelan rasgos importantes y poblaciones de objetos no distinguibles fácilmente en cualquiera de los conjuntos de datos tomados separadamente. Por ejemplo, un proyecto de datos habilitados por VO (*Virtual Observatory*) típico sería un *clustering* completo y un análisis de correlación de catálogos de fuentes combinados, usando una federación de datos multilongitud de onda de varios *surveys* astronómicos principales, desde radio, pasando por infrarrojo, óptico, UV, hasta rayos X, o incluso rayos γ . Las federaciones de datos de catálogos de fuentes de estos *surveys* resulta generalmente en un espacio de parámetros de $\sim 10^8 - 10^9$ vectores de datos en $\sim 10^2 - 10^3$ dimensiones. Las herramientas y algoritmos existentes no escalan bien a tales conjuntos de datos hiperdimensionales, entonces se debe ensamblar, probar, mejorar, y desplegar las herramientas de minería de datos (*Data Mining*), estadística, y de visualización necesarias para la exploración. Simultáneamente, se debe desarrollar la

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

infraestructura computacional y de red necesaria y la expertise para desarrollar, implementar, y utilizar estas herramientas.

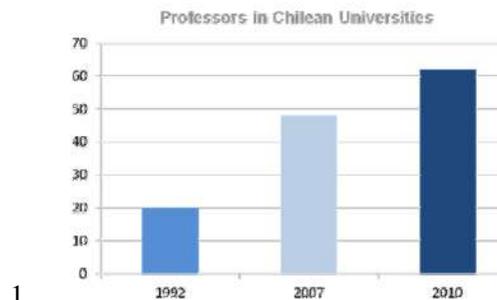
Las líneas propias de la astronomía se resumen en las siguientes:

Planetas extra-solares, enanas marrón/blancas, formación de estrellas/ISM, estructura Galáctica, poblaciones estelares (Vía Láctea y galaxias satélites), AGN, dinámica de los agujeros negros, supernovas, IGM, estructura a gran escala y cosmología, instrumentación astronómica (radio).

Las capacidades de Astronomía en Chile están concentradas en las Universidades locales contando a la vez con amplias redes mundiales.

En el área de investigación astronómica, actualmente, son 8 las universidades chilenas que tienen programas de pregrado y/o postgrado en astronomía. Estas son: U. de Chile, Pontificia U. Católica de Chile, U. de Concepción, U. de La Serena, U. Católica del Norte, U. de Valparaíso, U. de Tarapacá, y U. Andrés Bello.

En los últimos años se ha experimentado un incremento en el número de astrónomos en las universidades chilenas (Figura n°5.1.).



1.

Figura n° 5.1: Número de profesores de astronomía en universidades chilenas.

Las líneas de investigación que se desarrollan en Chile se resumen en las siguientes:

1. El nacimiento y la evolución de las estructuras en el Universo, L. Infante (PUC).
2. Poblaciones estelares en el Universo local, D. Geisler (U. Concepción).
3. La escala de distancias extragalácticas, W. Gieren (U. Concepción).

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

4. Formación de estrellas, G. Garay (UCH).
5. Planetas extrasolares y enanas marrones, D. Minniti (PUC).
6. Supernovas y Energía Oscura, M. Hamuy (UCH).

De acuerdo a la tabla presentada a continuación, los resultados de la astronomía chilena, medidos en términos de publicaciones ISI, ubican al país en el lugar 11 mundial, mientras que en términos de citas por paper Chile se ubica en el 5° lugar mundial.

Research outputs in space science (inc. astronomy) 1999–2009

Country	Papers	Citations	Citns / paper
USA	53 561	961 779	17.96
UK (not NI)	18 288	330 311	18.06
Germany	16 905	279 586	16.54
England	15 376	270 290	17.58
France	13 519	187 830	13.89
Italy	11 485	172 642	15.03
Japan	8423	107 886	12.81
Canada	5469	102 326	18.71
Netherlands	5604	100 220	17.88
Spain	6709	88 979	13.26
Australia	4786	83 264	17.40
Chile	3188	57 732	18.11
Scotland	2219	48 429	21.82
Switzerland	2821	46 973	16.65
Poland	2563	32 362	12.63
Sweden	2065	30 374	14.71
Israel	1510	29 335	19.43
Denmark	1448	26 156	18.06
Hungary	761	16 925	22.24
Portugal	780	13 258	17.00
Wales	693	11 592	16.73

Fuente: ISI Thompson via Sciencewatch.com.

Citado por Andy Fabian, Presidential address, "The impact of astronomy" RAS A&G meeting, 12 Feb 2010.

"Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile"

5.2 CAPITAL HUMANO EN ASTROINGENIERÍA

Específicamente en lo que respecta a astroingeniería y astroinformática, se han identificado con un criterio amplio, seis grupos en el país:

1. **Pontificia Universidad Católica de Chile:** Centro de astro-ingeniería AIUC.
2. **Universidad de Chile:** Laboratorio de ondas milimétricas (Departamento de Astronomía, Observatorio Astronómico Nacional Cerro Calán, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas).
3. **Universidad Técnica Federico Santa María:** UTFSM Computer Systems Research Group (CSRG), Departamento de informática.
4. **Universidad de Concepción:** Laboratorio de Radioastronomía y Centro de óptica y fotónica.
5. **Universidad de Chile:** Laboratorio de Astroinformática del Centro de Modelamiento Matemático (CMM).
6. **Universidad de Valparaíso:** Grupo de astrometereología).

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

A la fecha del presente informe, el capital humano en esos grupos se detalla en las tablas a continuación:

		Por Grado Académico				
	Universidad	Doctores	Postdoc	M.Sc.	Licenciados	otros
1	Centro de astro-ingeniería AIUC Pontificia Universidad Católica de Chile	20	16		3	
2	Laboratorio de ondas milimétricas Universidad de Chile	2	1		4	2
3	UTFSM Computer Systems Research Group Universidad Técnica Federico Santa María	2		1		5
4	Centro de óptica y fotónica Universidad de Concepción	6	1			
5	Laboratorio de Astroinformática CMM	4				3
6	Grupo de astro meteorología Universidad de Valparaíso	4			1	

		Por Especialidad			
	Universidad	Ingenieros	Físico	Meteorólogo	S/ información
1	Centro de astro-ingeniería AIUC Pontificia Universidad Católica de Chile				39
2	Laboratorio de ondas milimétricas Universidad de Chile	6	2		1
3	UTFSM Computer Systems Research Group Universidad Técnica Federico Santa María	2			6
4	Centro de óptica y fotónica Universidad de Concepción	6			1
5	Laboratorio de Astroinformática CMM	6	1		
6	Grupo de astro meteorología Universidad de Valparaíso		1	4	

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

	Universidad	Estudiantes			
		Doctorado	Magister	Tesistas de grado	Licenciados
1	Centro de astro-ingeniería AIUC Pontificia Universidad Católica de Chile	2	2	38	3
2	Laboratorio de ondas milimétricas Universidad de Chile	2		2	
3	UTFSM Computer Systems Research Group Universidad Técnica Federico Santa María			4	36
4	Centro de óptica y fotónica Universidad de Concepción	4	8		11
5	Laboratorio de Astroinformática CMM	1		2	
6	Grupo de astro meteorología Universidad de Valparaíso			5	

5.2.1 Laboratorio de ondas milimétricas Universidad de Chile

Descripción

El Laboratorio de ondas milimétricas, creado en el 2004, es parte del Departamento de Astronomía, Observatorio Astronómico Nacional Cerro Calán, de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

Trabaja en colaboración con el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la misma universidad, laboratorio de fotónica.

El Laboratorio de ondas milimétricas se enfoca en el diseño y construcción de avanzados receptores de ondas milimétricas, componentes de front-end y espectrómetros digitales.

El departamento desarrolla proyectos de tecnología para receptores de la Banda 1 de ALMA. Incluye la construcción de un prototipo de cartridge de receptor banda 1 de ALMA; colaboración en la pre-producción de 6 unidades. Colaboración para la Banda 5, y para el upgrade de la Banda 9.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

El laboratorio mantiene actualizado y operacional el telescopio de 1.2 m 115 GHz en el Cerro Calán.

Equipamiento

Equipos para mediciones de ondas milimétricas, en alto vacío, baja temperatura, herramientas de alta precisión.

- Cartridge Test Cryostat de ALMA,
- Compresor Sumitomo y un dispositivo criostático.
- Máquina CNC KERN, precisión de 1 μm (una micra)
- 50 GHz Vector Network Analyzer;
- Instalación para medidas de radiación electromagnética;
- Bombas de alto vacío
- Scalar Network Analyzer;
- Medidor de potencia de 50 GHz
- MXG Signal Generator (3 GHz);
- Detector de fugas de helio
- Mm-wave Source Module (20 – 40 GHz);
- Analog Signal Generator (20 GHz);
- Frequency Counter (20 GHz),
- Power Meter (75 GHz- THz)
- GPS Time and Frequency Receiver.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Capital de Redes

El laboratorio desarrolla una colaboración tanto con observatorios como con redes académicas internacionales.

Asociados tecnológicos:

CalTech-JPL, US;

University of Cologne, Germany;

Herberzg Institute for Radio Astronomy (HIA, Canada);

Group for Advanced Receiver Development (GARD),

Chalmers University, Sweden;

STFC Rutherford Appleton Laboratory (RAL, UK);

Netherlands Institute for Space Research (NOVA/SRON).

Colaboración con:

Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics (ASIAA, Taiwan);

University of Manchester (UK);

Yebes Astronomy Center, Spain.

Proyectos para la construcción de componentes de receptores milimétricos y submilimétricos.

5.2.2 Centro de astro-ingeniería AIUC - Pontificia Universidad Católica de Chile

Descripción

Las Actividades de astroingeniería en la PUC se desarrollan en conjunto entre el Departamento de Ingeniería Eléctrica y el Centro de Astro-Ingeniería AIUC, en el cual participan también los Departamentos de Computación y de Física.

En el AIUC, las áreas de investigación son:

1. High Resolution Optical And NIR Echelle Spectrographs for astrophysical research.
2. Planet Finding (Jordán, Suc, et al.) AIUC is part of Hat---South, a Network Of 6 identical, fully automated Wide Field telescopes, located at 3 Sites (Chile, Australia, Namibia)
3. Fiber Optics for Astronomy
4. Adaptive Optics --- Wide---field Adaptive Optics (Multi---Object Adaptive Optics; Multi---Conjugate Adaptive Optics) --- Beam shaping for Laser Guide Stars --- Cn2 characterization
5. Astronomical "Site Testing", (sub)mm, radio and optical
6. Telescopes performance evaluation:
 - a. Cosmic Microwave Background (Dunner & Cactus group):
 - b. ACT (145, 220 and 280 MHz) in El Toco
 - c. AIUC team; testing and characterizing main reflecting surfaces and contributing to ACTpol
7. High Performance Computing, numerical simulations and astronomical database management

"Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile"

8. Design and fabrication of cryogenic cameras for astronomical instruments, running scientific CCDs and NIR detectors

Adicionalmente, el Departamento de Ingeniería Eléctrica tiene experiencia en las siguientes áreas que tienen relación directa con las tecnologías de astronomías:

Instrumentación Avanzada en Industria y Medicina

- Spectrometers for on--line sensors (Wood industry, Winemaking, Copper Mining)
- Magnetic Resonance Imaging (Wood industry, 3D Fourier algorithms)
- Visual sensors, visible & infrared (Wood, Ophthalmology)

Defensa

- Radar signal processing
- Tracking systems
- Servo systems for mount positioning and pointing

Equipamiento

- Espejo deformable MEMS de Boston Micromachines, de 140 actuadores.
- Shack-Hartmann WFS (hasta 16x16 subaperturas),
- Phasescreens para simulación de turbulencia,
- Detectores de cercano infrarrojo NICMOS,
- Criostatos de nitrógeno líquido,
- Mesas ópticas,
- Campana limpio de flujo laminar para instalación de los detectores,

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Capital de Redes

El laboratorio desarrolla una colaboración tanto con observatorios como con redes académicas internacionales.

Proyectos conjuntos:

- University of Durham, UK: el trabajo se desarrolla en tres áreas:
 - 1) tomographic reconstruction for multiobject adaptive optics
 - 2) pre conceptual design of an instrument for ESO;
 - 3) new instruments for turbulence profiling for ELT scales.
- Gemini Observatory: el trabajo se desarrolla en dos áreas relacionadas con el Multi-conjugate Adaptive Optics instrument en Gemini South,
 - 1) Using the laser beacons to implement SLODAR techniques for Cn2 characterization and
 - 2) Vibration mitigation for the instrument.
- CfA, Harvard: miembro del G-Clef instrument. El grupo de la PUC está encargado del diseño y construcción de dos planos focales criogénicos para el instrumento y el Exposure Time Calculator.
- SIMPLE, E-ELT instrumentation: forma parte del consorcio con grupos de Italia (INAF), Alemania (TIS) y Suecia (Uppsala)
- ACT Telescopio submm El Toco, junto con Princeton, Rutgers, Penn State, BC Universities.
- MOONS: Spectrograph MOS NIR para el VLT, international consortium
- VALTEC: Telescope 0.5m
- ESO: caracterización y uso de fibras ópticas en instrumentos astronómicos.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

- INAF: trabajo en la fase A del estudio de SIMPLE, espectrógrafo de alta resolución en el cercano infrarrojo para el E---ELT.
- Universidad de Oviedo (España): algoritmo novel para tomografía en adaptadores ópticos (junto con Durham)
- Gemini sur; óptica adaptativa, caracterización atmosférica desde datos de Óptica Adaptativa, caracterización y mitigación de vibración.

5.2.3 Computer Systems Research Group (CSRG), Departamento de informática, Universidad Técnica Federico Santa María

Descripción

El CSRG tiene como objetivo aprender acerca de sistemas computacionales reales, complejos y distribuidos, trabajando lado a lado con proyectos de clase mundial, obteniendo conocimiento invaluable acerca de tecnologías de software. Fue iniciado en colaboración con ESO (European Southern Observatory)

El grupo ALMA-UTFSM fue creado como un equipo de investigación en sistemas distribuidos en aplicaciones astronómicas y no astronómicas en el año 2004.

La elección de la plataforma de desarrollo ALMA Common Software framework (ACS) proviene de la experiencia adquirida durante algunas prácticas realizadas en observatorios ESO.

El CSRG se ha integrado al desarrollo de tecnologías más complejas, como tópicos en Inteligencia Artificial, Generación de código. Hoy en día, ALMA-UTFSM es parte del Computer Systems Research Group y está involucrado en variadas contribuciones a ACS como el desarrollo de un sistema de control flexible de telescopio (gTCS).

Los principales proyectos son:

- SWAT: SoftWare development, Analysis and Testing
- GSME Generic State Machine Engine
- RAES Repackaging ACS for Embedded Systems
- APS AstronomicalProposalScheduler

Más información sobre el trabajo de este grupo se encuentra en la información de soporte.

Equipamiento

- Telescopio de aficionado Celestron NexStar 4 SE 4.0"/102m para la prueba del sistema de control, Meade Autostar Suite Planetary Imager (LPI).
- Equipamiento computacional.

Capital de Redes: El laboratorio desarrolla una colaboración tanto con observatorios como con redes académicas internacionales.

5.2.4 Laboratorio de Radioastronomía – Centro de óptica y fotónica - Universidad de Concepción

Descripción

El Departamento tiene un programa de construcción de radiómetros compactos y potentes que miden con precisión el contenido de vapor de agua en la atmósfera por encima del sitio de su emplazamiento, al igual que la variación vertical de la temperatura en la atmósfera.

Se realizan trabajos junto con el Departamento de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Concepción.

El desarrollo del Laboratorio de Radioastronomía ha abierto también una ventana para la interacción inter-disciplinaria con la Meteorología y Geofísica.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Áreas de investigación y desarrollo:

- Millimeter-VLBI: con el MIT, Haystack y un equipo internacional, colaboran en un proyecto del NSF Major Research Instrumentation (MRI) para instalar un backend millimeter VLBI en el radiotelescopio ALMA.
- Radiómetros 183GHz: se realizó un completo reacondicionamiento de dos radiómetros vapor de agua de 183GHz para ALMA. Ambos están instalados en el área de Chajnantor.
- Desarrollo de Radiómetros en colaboración con el Departamento de Ingeniería de la U. de Chile, desarrollan radiómetros para medir el contenido de vapor de agua y los perfiles de temperatura de la atmósfera (22 a 183GHz).

El Centro de Óptica y Fotónica de la Universidad de Concepción realiza trabajos relacionados con astroingeniería en colaboración con el Laboratorio de Radioastronomía.

El Centro de Óptica y Fotónica reúne a un grupo de físicos e ingenieros, ligados a la Óptica e Información Cuántica, Opto-electrónica, Caracterización No Destructiva de Materiales, Óptica No Lineal y Tecnologías de Teledetección Satelital.

Equipamiento:

Radioastronomía:

- Radiómetro de vapor de agua de 183GHz , facilitados por ALMA.
- ROACH board con 2GS/s ADC y FPGA Xilinx 5.
- Receptor integrado Vubiq de 50-60GHz
- Osciloscopios y generadores de señales hasta 100MHz
- Generadores de señales y analizadores hasta 40GHz

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Espectroscopia:

- Espectrofotómetro USB2000, HR2000
- Espectrómetro de alta velocidad NIR512
- Espectrómetro regulador de temperatura.

Sistema de Imagen Infrarroja y hiperespectrales:

- Cámara CEDIP (bolómetro),
- Cámara hiperespectral PFH,
- Cámara hiperespectral XEVA-NIR;
- Cámara monocromática enfriado Retiga;
- VariSpect (CRI) de cristal líquido de filtro sincronizable;

Fibra Optica:

- Reflectómetro de dominio de Tiempo óptico,
- Fusion splicer

Capital de Redes

- Colaboración en el NSF MRI grant con MIT, Haystack para desarrollar un Beamformer para ALMA e instalar un VLBI backend.
- Colaboración con CCAT, APEX, PolarBear, QUIET: caracterización del sitio y soporte de calibración con radiómetros.
- Universidad de nuevo México: intercambio académico
- Departamento de astronomía, Caltech: intercambio académico,
- Departamento Aeroespacial, Universidad de Liege intercambio académico
- Agencia federal para cartografía y Geodesia (Alemania): intercambio académico,

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

- Universidad Católica de Río: intercambio académico.
- U. De Chile: desarrollo de radiómetro;
- PUC: integración de cámaras de cielo y estación del tiempo en radiometría para pruebas de sitio integradas.

5.2.5 Laboratorio de Astroinformática CMM

Descripción

El objetivo del laboratorio de astroinformática en el CMM, es el desarrollo de herramientas y capacidades humanas que apoyen el desarrollo de la astronomía actual. No hay duda de que parte de la astronomía se está convirtiendo en una ciencia de grandes volúmenes de datos, y el estudio y comprensión de estos datos requiere del desarrollo de nuevas ideas en: modelamiento matemático, minería de datos, estadísticas, procesamiento de imágenes, visualización de datos multidimensionales, almacenamiento y procesamiento de datos, entre otros. En el CMM se encuentra un grupo de matemáticos de clase mundial, con altas tasas de productividad e interés demostrado en aplicaciones en otras ciencias y la industria entre otros. Un cuerpo científico e ingenieros bien entrenados que trabajan con gran profesionalidad en los distintos laboratorios del CMM. En la actualidad, el laboratorio de astroinformática está trabajando en detección y clasificación automatizada de objetos astronómicos, análisis y clasificación de eventos transitorios, reconstrucción de imágenes interferométricas, y manejo y modelamiento de datos astronómicos. Todos estos proyectos están siendo desarrollados en colaboración con astrónomos de Chile y de otras universidades en el extranjero (Harvard, Caltech, U. Michigan, Georgia Tech, U. de Washington, U. de Nápoles). También se firmará un convenio de colaboración con la Universidad de Harvard.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Equipamiento:

HPC cluster (600 núcleos, con planes de extensión a 2000 núcleos)

Capital de Redes

- Visitas de profesores e investigadores extranjeros
- Proyectos conjuntos de co-investigación
- Programas de pasantías
- Colaboración con LSST y ALMA

5.2.6 Grupo de Astrometeorología Universidad de Valparaíso**Descripción**

El grupo de AstroMeteorología aplica las técnicas de la meteorología a escalas macro y micro a las operaciones de los observatorios en Chile.

De acuerdo a la información en su página Web², los proyectos desarrollados son:

El año 2006 se realizó un proyecto de investigación con ESO (European Southern Observatory) llamado “Análisis de condiciones meteorológicas sobre Macón ocupando el sistema de modelamiento MM5”.

El año 2007 se ganó un proyecto con GEMINI SUR que se tituló “Implementación de una herramienta de pronóstico meteorológico para GEMINI SUR”.

El año 2008 se ganó un proyecto por dos años con ESO (European Southern Observatory) que se titula “Estudio de Vapor de Agua Precipitable (PWV) en el Llano de Chajnantor”.

² <http://www.dfa.uv.cl/astrometeorologia/projects.html>

El año 2010 se ganó un proyecto por dos años, que se titula “Implementación del modelo meteorológico mesoescalar WRF para el Observatorio Paranal de ESO”.

Equipamiento:

Grupo Computacional de 24 procesadores Intel Xeon Quad Core con 128 GB de RAM en 12 nodos

Capital de Redes

Entrega servicios astrometeorológicos para ESO y TMT:

5.2.7 El capital de confianza de los grupos de astroingeniería en Chile

El capital humano identificado en los grupos académicos posee los siguientes indicadores de calidad:

- Alta motivación de los académicos y estudiantes que influye en la dedicación al trabajo de investigación y desarrollo.
- Académicos con publicaciones ISI y doctorados en universidades de prestigio.
- Integración a redes académicas internacionales.
- Relaciones con los observatorios nacionales

Existe un capital de confianza que ha sido construido sobre la base de varios elementos:

- a. Académicos chilenos o extranjeros trabajando hoy en Chile, que han realizado sus trabajos de postgrado (PhD principalmente) en Universidades extranjeras con grupos de excelencia en astroingeniería.
- b. Profesionales egresados de universidades chilenas que trabajan o han trabajado en observatorios internacionales instalados en Chile, a entera satisfacción de los observatorios.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

- c. Trabajos de investigación y desarrollo en colaboración con grupos internacionales, en los cuales el aporte de los grupos chilenos ha sido significativo.
- d. Una colaboración permanente de los grupos académicos con los observatorios.

Se estima sin embargo que es necesario avanzar en esta línea, para lo cual un mayor protagonismo de los grupos chilenos en el desarrollo de astroingeniería es indispensable.

Una mayor participación requiere necesariamente de la construcción de un “track record” en tecnologías de frontera, para lo cual el apoyo gubernamental chileno es decisivo.

Respecto de la disponibilidad del capital humano, directores de los departamentos de astroingeniería mencionan dificultades para mantener equipos de investigadores estables, principalmente por falta de recursos económicos para salarios.

Por otra parte, la colaboración continua y formal entre los diferentes grupos de trabajo en astroingeniería, así como de éstos con los astrónomos, tiene aún un amplio espacio de crecimiento y mejoramiento.

5.2.8 Capital humano para los proyectos y servicios de alta exigencia en base a tecnologías consolidadas.

Estos proyectos y servicios son prestados por empresas privadas, si bien existe un importante porcentaje de la actividad de mantención, calibración y actualización de los instrumentos astronómicos que se lleva a cabo con personal interno de los observatorios.

Los requerimientos de capital humano son fundamentalmente respecto de ingenieros y técnicos especializados. Actualmente existe una formación en las universidades chilenas que cubre casi todos los campos de especialidad.

Por parte de los observatorios, se estima que existen hoy día en Chile profesionales de calidad en las áreas de software, eléctrica, electrónica y mecánica. Se señala la falta de profesionales en las áreas de óptica.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

De esta manera, los observatorios han ido por una parte contratando de manera interna profesionales chilenos para las labores de mantención especializada y para el upgrade de los sistemas y por otra parte han ido confiando progresivamente en las empresas chilenas para realizar proyectos y servicios en base a tecnologías consolidadas.

Respecto de las empresas chilenas, si se toman en consideración solamente las empresas de ingeniería que respondieron la encuesta sobre interés en participar en proyectos ligados a la astronomía, ellas totalizan 120 ingenieros y 182 técnicos. Indican sin embargo la necesidad de formación y entrenamiento rápidos para adecuar su trabajo a los requerimientos de los observatorios.

5.2.9 Capital humano para proyectos, bienes y servicios no diferenciados

Estos requerimientos de proyectos, bienes y servicios no diferenciados, son casi en su totalidad provistos por empresas que a la vez prestan los mismos servicios a la gran minería del cobre en el Norte de Chile.

Dado su bajo nivel de diferenciación, no existen observaciones particulares respecto a la calidad del capital humano básico. Este nivel se encuentra por tanto sin requerimientos particulares en el corto y mediano plazo.

El único factor de atención podría ser la competencia de las grandes empresas mineras que significara un aumento de los salarios. Para los observatorios, esto constituiría una carga adicional en su presupuesto de operación.

6 ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO DE UN ECOSISTEMA IMPULSADO POR LA ASTRONOMÍA

6.1 TRABAS Y FALENCIAS.

6.1.1 En el ámbito del desarrollo de tecnologías de frontera

Estos desarrollos poseen características especiales, las cuales implican trabas y falencias, algunas de ellas comunes a la gran mayoría de países y otras específicas para países como Chile.

- a. Los desarrollos de frontera poseen una alta incertidumbre tanto en la factibilidad de obtener las prestaciones requeridas como en los plazos y costos de los desarrollos.
- b. Los altos costos involucrados llevan a que los países europeos, así como Australia, Israel, Brasil, aborden los proyectos de manera asociada o coordinada con otros países.
- c. Lo anterior también es válido en lo que se refiere a capacidades tecnológicas de excelencia, que suelen estar repartidas en distintos países.
- d. Los beneficios económicos en cuanto su impacto en otras áreas productivas son difíciles de evaluar de manera cuantitativa.
- e. Se trata de proyectos únicos.

Las principales falencias identificadas son:

- a. (General) Para todo grupo que quiera hacer desarrollos en astroingeniería, existe la necesidad de un proceso previo de realización de desarrollos prototipos (construcción de un track record), frecuentemente “sin cliente”, para validarse en las redes internacionales y ser aceptado como socio tecnológico. Esto implica la necesidad de contar con financiamiento cuyo retorno es fundamentalmente la obtención de una “carta de presentación” de las capacidades que tiene la entidad para desarrollar tecnologías de frontera, capacidad hecha tangible en sistemas o dispositivos verificables.
- b. (Particular para Chile) Lo anterior es crítico en Chile dado que gran parte de los instrumentos de fomento exigen como resultado de los proyectos la obtención de productos cercanos al mercado. Los desarrollos de astroingeniería pueden dar lugar a tecnologías cuya aplicación comercial debe ser desarrollada posteriormente.
- c. (General) Los clientes son pocos y las instancias de decisión están concentradas en el primer mundo.
- d. (Particular para Chile) En las circunstancias de que Chile entrega terrenos y facilidades administrativas a cambio de tiempo de observación, los actores nacionales no-astrónomos (ingeniería y empresas) están en segundo plano frente a sus pares de los países que ponen recursos económicos y que por ende tienen prioridad en los contratos.
- e. (General) El carácter único de los desarrollos dificulta la continuidad de los equipos de trabajo. En efecto, la demanda por parte de los observatorios no es periódica y es incierta.
- f. (Particular para Chile) Se observan carencias en la colaboración entre los grupos de astroingeniería y de éstos con los astrónomos.

- g. (Particular para Chile) No existe aún en Chile una red industrial tecnológica amplia con capacidad para ser receptor de las tecnologías desarrolladas.
- h. (Particular para Chile) No existe aún en Chile un ecosistema tecnológico que apoye y complemente las líneas de investigación en astroingeniería. Se observan carencias en metrología, certificación, acceso a componentes. No obstante, este problema está siendo superado gracias a acuerdos de colaboración entre los grupos chilenos y grupos europeos o norteamericanos.
- i. (Particular para Chile) Se observan debilidades en la capacidad y habilidad para la gestión de proyectos complejos. Esto es válido para muchas de las áreas productivas y puede ser un problema en el momento de enfrentar proyectos de mayor envergadura en el área de la astroingeniería.
- j. (Particular para Chile) Incursionar en áreas más avanzadas como detectores, microtecnologías, implican inversiones iniciales del orden de las decenas y de los cientos de millones de dólares.
- k. El sistema en Chile está fragmentado, en sus instituciones de apoyo a ciencia y desarrollo así como en la articulación entre academia e industria.

En síntesis, las falencias son primordialmente de financiamiento y de tejido industrial nacional. La integración a redes de colaboración internacionales se ha desarrollado en los últimos años, si bien es posible desarrollar más aún esta integración.

6.1.2 En el ámbito de proyectos y servicios de alta exigencia en base a tecnologías consolidadas.

Este nivel también es afectado por el carácter único de los proyectos de desarrollo o de integración de sistemas.

Las empresas que han participado en este nivel declaran que los márgenes de ganancia son menores que en el caso de proyectos análogos para el sector minero y que la continuidad es casi inexistente. No obstante, declaran emprender estos proyectos por motivos de la imagen de excelencia que otorga el ser un proveedor fiable de los observatorios.

El carácter único de los proyectos hace complejo para las empresas formar y mantener un grupo humano especializado. Solamente en las empresas de menor tamaño, en las cuales los socios son a la vez ingenieros con experiencia tecnológica, son capaces de mantener una capacidad que es requerida ocasionalmente.

En este nivel es también importante el “track record”. Las empresas chilenas que han logrado trabajos en este nivel declaran haber comenzado como auxiliares de empresas norteamericanas o europeas que han necesitado un socio con presencia y experiencia local. Asimismo, los trabajos abordados han sido realizados en coordinación con empresas norteamericanas o europeas, si bien cada vez más las empresas chilenas han ido asumiendo mayores responsabilidades.

Las principales falencias a las que hay que poner atención son:

- a. La debilidad del tejido industrial chileno en el área tecnológica
- b. La debilidad del ecosistema tecnológico chileno respecto de entidades con capacidad de transferencia de tecnología hacia las empresas, metrología, etc.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

- c. La dificultad financiera para abordar proyectos con un relativo nivel de incertidumbre.
- d. El acceso a la información acerca de contratos cuyos montos son menores a los que los observatorios publican para licitar.
- e. La falta de track record para competir por contratos con empresas del primer mundo.
- f. No existe un ecosistema tecnológico que trabaje con tecnologías aplicables a la astronomía.

6.1.3 En el ámbito de proyectos, bienes y servicios no diferenciados

De acuerdo a lo identificado en este estudio, los requerimientos de estos servicios no diferenciados no constituyen un tópico de interés en atención a que:

- a. Existe en Chile un mercado competitivo de estos servicios.
- b. No existen en Chile fallas de mercado asociadas a estos servicios.
- c. Las calidades ofrecidas por las empresas están al menos al nivel de las necesidades de los observatorios.
- d. Los procedimientos de licitación, evaluación y adjudicación por parte de los observatorios están establecidos y son rigurosos.

6.2 DIFERENTES MODELOS A NIVEL MUNDIAL DE APOYO AL DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA ASTRONOMÍA

Los modelos existentes presentan grandes diferencias entre ellos y a la vez están en constante revisión.

Los distintos componentes de los modelos son, de manera sintética:

- Estructuras de coordinación nacional o internacional de carácter público
- Estructuras de coordinación nacional o internacional de carácter académico.
- Agencias de financiamiento
- Programas focalizados en astronomía o astroingeniería.
- Centros Tecnológicos Especializados
- Empresas de Base Tecnológica
- Entidades de transferencia

6.2.1 En el ámbito de Tecnologías de Frontera

a. Modelos Concentrados

Existen modelos simples, como los de Inglaterra y Holanda, en que la investigación se realiza casi exclusivamente en las Universidades (con pequeñas excepciones) y las agencias están centralizadas (PPARC en Inglaterra y NWO en Holanda).

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

b. Modelos de múltiples actores

Existen en el otro extremo modelos muy complejos como es el caso de Estados Unidos y Francia, en que los financiamientos son múltiples, incluyendo un porcentaje importante de donaciones privadas como en el caso de los Estados Unidos. Las agencias y centros tecnológicos especializados son numerosos.

La mayor parte de los países del primer mundo establecen roadmaps con horizontes de mediano plazo para el desarrollo de la astronomía.

El estímulo al ecosistema presenta los siguientes modelos:

Programas específicamente dirigidos a desarrollar la tecnología asociada a la astronomía:

- Creación de “incubadoras de instrumentación”
- Transferencia de tecnologías a PYMES para el desarrollo de nuevos instrumentos o componentes para astronomía
- Programas de mediano plazo de financiamiento de grupos universitarios, centros disciplinarios y PYMES.
- Transferencia de tecnología a un espectro amplio de empresas con el propósito de impactar en amplias áreas de la economía³

³ “ESO is heavily involved in many aspects of cutting edge technology development in fields such as active optics, fibre lasers, Virtual Observatories, dynamic scheduling software, instrument interfaces, data archiving/mining, and automated data reduction pipelines. ESO actively promotes technology transfer into the broader economy and there are many examples of ESO developments that have been taken over by a manufacturer or produced commercially for a wider market including liquid nitrogen cryostats for charge-coupled devices (CCDs), flexible mirrors and infra-red detectors. For instance, producing the giant mirrors blanks for the VLT gave European industry global leadership in the manufacturing and polishing of large optical mirrors”. The Case for Irish Membership of the European Southern Observatory, Prepared by the Institute of Physics in Ireland, April 2009.

Desarrollo de la tecnología asociada a la astronomía dentro de programas y fondos dirigidos al desarrollo tecnológico en todas las áreas:

- Programas de valorización de la investigación
- Programas de transferencia tecnológica desde universidades y centros disciplinarios hacia empresas de base tecnológica
- Programas de fomento a la colaboración entre universidades y centros disciplinarios con empresas de base tecnológica

6.2.2 En el ámbito de Aplicaciones de alta exigencia en base a tecnologías consolidadas.

Los modelos comprenden:

- Oficiales de enlace (liaison officer) entre un organismo astronómico y los países miembros.
- Capacitación de PYMES
- Promoción de la formación de consorcios con participación de empresas privadas.

6.2.3 Ejemplos de Modelos en el mundo: Reino Unido, Brasil, España.

6.2.3.1 Entidades de apoyo a la Astronomía

En este punto se resumen las principales líneas de apoyo a la astronomía en tres países.

En la sección de Información de Soporte se entrega mayor detalle al respecto.

REINO UNIDO

El Programa de Astronomía de la *Science and Technology Facilities Council* (STFC, <http://www.stfc.ac.uk/>) del Reino Unido ofrece apoyo a una amplia gama de servicios, a grupos de investigación y particulares con el fin de investigar en astronomía.

Las actividades del Programa STFC se encapsulan en temas de Astronomía, Ciencias del Espacio, Oportunidades de financiamiento, contactos y recursos varios.

Las oportunidades de financiamiento incluyen ayudas a la investigación, becas, becas para estudiantes, tiempo de telescopio y otras oportunidades de financiamiento.

Agencia Espacial del Reino Unido (UK Space Agency): Desde abril de 2010, la Agencia Espacial del Reino Unido tiene la responsabilidad sobre el desarrollo y ejecución del programa de ciencia espacial en el Reino Unido. Los astrónomos utilizan una variedad de instrumentos para abordar preguntas claves, y muchos de ellos necesitan tener acceso tanto a las instalaciones terrestres como espaciales para disponer de capacidades específicas.

BRASIL

En Brasil, la astronomía muestra una gran diversidad que los propios astrónomos desean mantener, justificado en que en una disciplina de ciencia básica no conviene adoptar medidas para dirigir determinado rumbo de la investigación. La mayor parte de las propuestas de infra-estructura astronómica que se tiene planificada desarrollar en Brasil, necesitan de una cantidad elevada de recursos para su realización, aún sin encontrarse en una fase de planificación y detalle suficiente para una evaluación consistente.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

ESPAÑA

La Astronomía en España es una disciplina claramente en auge, con un marcado crecimiento tanto en instalaciones y personal como en producción científica. La comunidad astronómica española tiene acceso a una impresionante batería de grandes instalaciones astronómicas, de las que se puede encontrar una lista detallada en el portal web de la Red de Infraestructuras de Astronomía (<http://www.riastronomia.es/>).

Según el estudio realizado por ASTRONET, la red europea de agencias financiadoras de la Astronomía (<http://www.astronet-eu.org/>), el papel de la Astronomía española en el ámbito mundial es cada vez más relevante.

En España se encuentran actualmente unos 500 astrónomos (incluyendo doctorandos). De ellos, 350 doctores realizando su propia investigación. El ritmo de crecimiento es alto, alrededor de 25 nuevos doctores por año. España tiene una relación de 12 astrónomos por millón de habitantes. Aproximadamente la mitad se encuentran en las universidades y los demás en Organismos Públicos de Investigación. Los grupos de investigación están muy distribuidos, llevándose a cabo investigación en Astronomía en al menos un total de 30 diferentes lugares. Todavía el número de técnicos dedicados a investigación astronómica es pequeño, unos 150.

En España cada vez hay más becas de doctorado, de manera que en los últimos años se ha alcanzado un número de becas ofertado que ya alcanza a una fracción importante de los interesados.

España no cuenta con un Plan específico en Astronomía, como en el caso de Brasil, pero le da prioridad a través de su Plan Nacional de I+D+i.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

6.2.3.2 Entidades para Astroingeniería

Uno de los modelos para apoyar el desarrollo de la Astroingeniería corresponde a la creación de Consorcios, Centros de Desarrollo Tecnológico o un ente que agrupe un conjunto de universidades, empresas, institutos y la industria asociada. A continuación se describe la experiencia internacional en este aspecto.

ASTRONET

ASTRONET fue creado por un grupo de agencias de financiamiento europeo a fin de establecer un mecanismo de planificación estratégica para todos en la astronomía europea. Cubre el dominio astronómico completo, desde el Sol y Sistema Solar a los límites del universo observable, desde la radioastronomía hasta rayos gamma y partículas, en tierra como en el espacio, también teoría y computación, difusión, capacitación y contratación de los recursos humanos vitales. Y sobre todo, ASTRONET tiene como objetivo involucrar a todas las comunidades astronómicas y organismos de financiamiento pertinentes de Europa.

ASTRONET ha sido apoyada por la CE desde 2005 como ERA-Net (European Research Area). A partir de enero de 2011, se financia como una ERA-Net de la CE a un nivel de 1,6 M bajo la iniciativa del 7 ° PM «Integración y fortalecimiento de ERA» con una duración de 48 meses. A pesar de los enormes desafíos de establecer un plan tan amplio, ASTRONET alcanzó ese objetivo al publicar su Hoja de Ruta (Roadmap) de Infraestructura en noviembre de 2008. ASTRONET entra ahora en su etapa de implementación de coordinar e integrar los recursos europeos en el campo.

Los objetivos son:

- Establecer un mecanismo permanente de planificación y coordinación en la astronomía europea;
- Dar seguimiento y aplicar la Hoja de Ruta, garantizando la construcción de nuevas instalaciones que se necesitan para mantener a Europa en la vanguardia del

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

conocimiento científico y, al mismo tiempo optimizar los programas existentes en términos científicos, así como financieros;

- Reducir las brechas científicas y en particular tecnológicas entre los países europeos;
- Establecer una base de datos actualizada regularmente con información clave sobre los recursos financieros y humanos disponibles para la astronomía en todos los países europeos, así como la estructura y la gobernanza de la investigación astronómica en cada país.

El consorcio ASTRONET tiene 11 participantes, 21 asociados y 2 miembros del Forum.

REINO UNIDO.

CEPSAR.

El *Centre for Earth, Planetary, Space and Astronomical Research* (CEPSAR, <http://www8.open.ac.uk/cepsar/>) es un centro interdisciplinario de investigación de la *Open University* que reúne investigadores de clase mundial de dos departamentos: “Ciencias Físicas”, y “Tierra, Medioambiente y Ecosistemas”.

La investigación en CEPSAR se focaliza en los orígenes, sistemas y procedimientos con respecto a la evolución y la química de los materiales que forman las estrellas y los cuerpos planetarios, los procesos y los sistemas naturales que conforman el entorno de nuestra tierra habitable ahora y en el pasado, y las propiedades esenciales de un sistema Solar que permite que la vida se desarrolle en uno de sus planetas.

CEPSAR tiene desde hace tiempo una reputación internacional en investigaciones pioneras. Siendo lo más destacado el paquete científico de superficie de la sonda Huygens que proporcionó la primera caracterización de la superficie de Titán, el descubrimiento que una deposición de nitrógeno crónico de bajo nivel a largo plazo reduce de forma significativa la biodiversidad vegetal en los pastizales (un top 10 ‘breakthrough’ en *Science*) y el descubrimiento del primer super cúmulo de estrellas en la galaxia Westerlund-1.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Este centro ha recibido desde 2001 aportes externos para desarrollar su investigación por un monto superior a los £55 millones de libras esterlinas provenientes de diversos auspiciadores y fondos, tales como:

- *Science and Technology Facilities Council* (STFC, <http://www.stfc.ac.uk/>),
- *Natural Environment Research Council* (NERC, <http://www.nerc.ac.uk/>),
- *European Space Agency* (ESA, <http://www.esa.int/esaCP/index.html>),
- *Engineering and Physical Sciences Research Council* (EPSRC, <http://www.epsrc.ac.uk/about/Pages/default.aspx>), etc.

The UK Astronomy Technology Centre (UK ATC)

El Centro de Tecnología Astronómica del Reino Unido (UK ATC) es un centro británico para la tecnología astronómica. El centro diseña y construye instrumentos para muchos telescopios grandes del mundo. También planifica y gestiona las colaboraciones internacionales del Reino Unido y sus científicos para llevar a cabo la investigación observacional y teórica en cuestiones como el origen de los planetas y las galaxias.

El centro UK ATC cuenta con una trayectoria líder en el mundo en sistemas de instrumentación de primer nivel. Los avances en la astronomía de observación son muy exigentes y cualquier propuesta de una instalación nueva es casi seguro que es un proyecto aislado que debe ser entre cientos, si no miles, de veces mejor que todos sus predecesores, si es que se financiará. Entonces es esencial contar con personas innovadoras, creativas, que estén actualizadas en las novedades de su campo. Igualmente, la experiencia es necesaria para convertir las ideas nuevas en soluciones fiables y rentables.

Los proyectos nuevos se inspiran en la necesidad científica de detectar objetos más tenues y más distantes, y mejorar la comprensión de los objetos más brillantes a través de imágenes, la espectroscopia y polarimetría. La expertise del personal incluye óptica y diseño óptico, diseño mecánico y mecanizado, diseño electrónico y fabricación, control computacional en tiempo real y captura y análisis de datos.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

El Centro ATC proporciona soluciones nuevas de diseño a través del trabajo en los grandes proyectos que actualmente incluyen:

- Un instrumento clave, SCUBA-2 (arreglo de Bolómetro submilimétrico de uso común de segunda generación) para el Telescopio *James Clerk Maxwell*.
- Un instrumento de infrarrojo medio (MIRI) para el Telescopio Espacial *James Webb*.
- El telescopio VISTA y la cámara de infrarrojos.
- Un espectrógrafo multi-objetivos (KMOS) para el VLT de ESO en Chile

El Centro ATC también está involucrado en el diseño del próximo gran telescopio de Europa y participa en los estudios de diseño del E ELT.

La investigación que realiza el centro ATC cubre un amplio rango de temas de astronomía, que son perfectas para explotar instrumentos en el estado del arte en construcción, o ya liberados por el centro ATC a los telescopios de todo el mundo.

El Centro ATC en Reino Unido mantiene fuertes vínculos y conexiones con organizaciones externas - a nivel local y global, en la academia y la industria, dentro de la comunidad de la astronomía y fuera de ella. Sus clientes incluyen:

- European Southern Observatory (ESO)
- Gemini Observatories (North & South)
- European Space Agency (ESA)
- Joint Astronomy Centre (JAC)
- National Aeronautics and Space Administration (NASA)

BRASIL

El esfuerzo astronómico brasileño es canalizado en la actualidad por las siguientes instituciones representativas de distinto nivel y objetivos:

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

- Agencia Espacial Brasileira - AEB
- Astronomia na Web
- Astronomia no Zênite
- Cosmobrain Astronomia e Astrofísica
- Departamento de Astronomia (Instituto de Física-IF da UFRGS)
- Fundação Planetário da Cidade do Rio de Janeiro - IplanRIO
- Grupo de Estudos de Astronomia - GEA
- Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas IAG, USP
- União Brasileira de Astronomía (UBA)
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE
- ITA – Dpto. de Astronomía – São Jose Dos Campos – SP.
- Laboratório Nacional de Astrofísica LNA – Itajubá – MG
- Museu de Astronomia e Ciências Afins MAST
- Observatório Astronômico Antares Universidade Estadual de Feira de Santana
- Observatorio Astronômico do Colegio Estadual do Paraná – Curitiba - OACEP
- Observatório Astronômico Frei Rosário Universidade Federal de Minas Gerais
- Observatório Nacional - ON
- Portal do Astrónomo
- Sociedade Astronômica Brasileira.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

6.3 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO LIGADOS A LA ASTRONOMÍA A NIVEL MUNDIAL.

De acuerdo a la experiencia mundial, la astronomía tiene pocos impactos directos y éstos se consiguen en periodos de tiempo muy largos. Sus resultados no son apropiables comercialmente ni por patentes de invención ni por otros mecanismos.

Distinto es el caso de la astroingeniería y de la astroinformática, cuyos resultados han demostrado generar a corto o a mediano término aplicaciones en medicina, comunicaciones, industria, que no habría sido posible desarrollar sin el estímulo de la astronomía.

La mayoría de los países apuestan a impactos tecnológicos de envergadura y, a diferencia de la investigación básica en astronomía, el patentamiento es generalmente posible.

6.3.1 Proyección de la astroingeniería en el mundo

Todos los países desarrollados que cuentan con capacidades en astronomía definen sus prioridades de líneas de investigación y desarrollo según dos criterios complementarios:

- a. Las necesidades de la comunidad científica de astrónomos en términos de las grandes interrogantes y los instrumentos necesarios para el estudio del cosmos
- b. Los impactos esperados del uso dual de la tecnología que debe ser desarrollada para la astronomía.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

6.3.1.1 OECD

Un informe de la OECD⁴ indica las áreas que benefician a la astronomía: “the continued advances in computer technology will be of immense value to all astronomy projects, particularly those that depend heavily on electronics and computing such as large arrays of detectors and the Virtual Observatory projects. Advances in optical communication and data compression are also likely to have spin-off benefits to astronomy. However, certain specific requirements for the next generation of astronomical facilities are such that astronomers will be less able to rely on technological progress in other fields. For example, the bandwidth requirements for phased arrays in radio astronomy considerably exceed military requirements, as do the size requirements for the next generation of astronomical infrared detectors. Astronomy is already funding this R&D directly. A similar situation has existed for optical CCDs for a number of years” (El subrayado es nuestro).

“Key Areas for Investment” (OECD)

Facility	Technology	Comment
Large optical and infrared telescopes	Adaptive Optics	Including lasers
	Segment manufacture	
	Large structures	
	Instrumentation	Including detectors, large filters, multiplexing systems
Large radio arrays	Beam-forming in phased arrays	
	Antenna design	Low cost, high reliability
	Instrumentation and signal transport	
Multi-satellite space missions	Formation flying	

FUENTE: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Global Science Forum, **Workshops on Future Large-Scale Projects and Programmes in Astronomy and Astrophysics**, December 2003 / April 2004, Final Report

⁴ Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Global Science Forum, **Workshops on Future Large-Scale Projects and Programmes in Astronomy and Astrophysics**, December 2003 / April 2004, Final Report

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

6.3.1.2 FRANCIA

En Francia, las perceptivas a 5 años que fueron identificadas⁵ son:

- Interferometría óptica-infrarroja :
- Radioastronomía de baja frecuencia :
- Observatorio Virtual :
- Simulación numérica :

Una descripción con más detalle se encuentra en la siguiente tabla

Campos tecnológicos	Sistemas o sub sistemas
«Óptica» (visible, IR, UV)	VLT2, telescopios Robotizados, Interferometría Diseños opto-mecánicos: robots multi-objetos, slicers
	Óptica adaptativa: multi-conjugada, micro-opto-mecánica, control
	Detectores: TG CCD bajo ruido, « solar blind »
	Enlaces ópticos : Telemetría laser
«Radio» (m- μ m)	ALMA (1&2) Planck/Herschel
	Matrices de bolómetros : caracterización y entorno
	Componentes QO y NL : multi-jonctions, matrices de detectores
	Auto-correlador et muestreo numérico
«Física fundamental»	Óptica de control
	Bolómetros multifunción para la materia oscura no barionica
«Logiciels»	Observatorio Virtual, interoperabilidad y data mining
	Compresión, corrección y reconstrucción de imágenes
	Logiciales para simular, concebir, controlar sistemas complejos

FUENTE: Centre National de la Recherche Scientifique, ASTRONOMIE ASTROPHYSIQUE, *Colloque de la Colle sur Loup 17-20 mars 2003*.

⁵ CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE, ASTRONOMIE ASTROPHYSIQUE, *Colloque de la Colle sur Loup 17-20 mars 2003*

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

6.3.1.3 SUIZA

Las líneas prioritarias en Suiza han sido definidas por el Roadmap⁶ de manera que los institutos y empresas suizas provean expertise en las tecnologías claves:

- 1) Adaptive optics,
- 2) Advanced optical components,
- 3) Detector technology over a wide wavelength range,
- 4) Metrology combined with nanotechnology,
- 5) Low-power radiation-hard electronics,
- 6) cryogenics systems, and
- 7) Precision mechanics.

Una mención especial tienen las tecnologías de la información en el Roadmap suizo:

“Swiss astrophysicists will advance the state of the art commodity supercomputers to meet their computing needs. The UniZH is currently building a storage system which is the only one in the world with both failover NFS and information lifecycle management. Investments at a national level need to balance money put into large commercial systems and the cheaper commodity clusters

6.3.1.4 CANADA

El documento “Canadian Astronomical Society, **Unveiling the Cosmos, 0A Vision for Canadian Astronomy. Report of the Long Range Plan 2010 Panel c 2011**” (CASCA), presenta un resumen muy completo que indica las tecnologías estratégicas y sus posibles aplicaciones.

⁶ Roadmap for Astronomy in Switzerland , 2007–2016

Strategic HIA technologies	
Optical Technologies	Possible Applications
Aspheric optical components	Advanced optical systems for a broad range of applications
Optical coatings	Optical systems of all kinds
Visible light and infrared detectors	Extremely sensitive imaging detectors
Adaptive optics	Ophthalmology, remote sensing, any application involving poor seeing conditions
Control systems	Very wide application to all kinds of problems
Space-qualified hardware development	Space programs in the widest sense
Structures and enclosures for large optical telescopes: applications	Large and expanding international astronomy markets
Radio Technologies (e.g., ALMA & SKA)	Possible Applications
Control of flexible structures	Robotics
Low-cost innovative actuator design	Many applications possible
High-performance array antennas	Telecommunications satellite antennas
Tethered robotic vehicle controls	Under-sea vehicles, stabilized airborne platforms
Precision photogrammetry and advanced metrology for large structures	Fabrication and precision measurement of extremely large structures and machinery, precision machine control
High-precision GPS-based geomatics	Precision surveying
Cryogenics	Low-cost cryocoolers for mass application in computers and telecommunications, High-performance cryogenics for semiconductor industry and scientific research equipment
High-temperature superconducting technologies	Telecommunications filters and satellite components
Precision structural design	Other astronomy facilities, antenna design, satellite antennas
Carbon fibre and other advanced materials	Many applications, including ultra stable structures, satellites
Generation of high power at hundreds of GHz	Telecommunications, research equipment
Semiconductor material processing	Semiconductor industry, high-performance sensors
GHz digital device design	Computing and digital systems at the high speed frontier, signal processing, telecommunications
High performance digital filters	Telecommunications, signal processing
Data Processing Technologies	Possible Applications
Techniques of large databases of images and other information applications	Libraries, statistical data, all kinds of scientific, medical, environmental, financial and technical data, relational and other database expertise, Internet access to databases, development of archives (especially for remote retrieval), multimedia archives, permanent storage management software, pipeline processing
Image processing techniques	Engineering, medical imaging
Parallel processing technologies	All kinds of computationally intensive data problems, parallel compiler technology

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

6.4 ÁREAS CON POTENCIAL IMPACTO NACIONAL

6.4.1 Líneas con potencial de desarrollo en Chile

Para la selección de las líneas con mayor potencial de desarrollo que son factibles de desarrollar en Chile, se han considerado tres criterios:

- a. Líneas que en el contexto mundial son consideradas prioritarias por los principales países desarrollados y se estimula su desarrollo.
- b. Líneas para las cuales existen en Chile grupos académicos con alguna experiencia y capacidad en el tema.
- c. Líneas que desarrollan tecnologías de frontera para la astronomía pero que tienen posibles aplicaciones en otras áreas como la medicina, la industria, la minería, las comunicaciones.

De esta manera, se propone la siguiente lista de líneas con potencial de desarrollo y con potencial de impacto, abordables en Chile:

Dada la complejidad técnica de estas líneas, se ha optado por presentar en este punto las líneas solamente en una tabla de resumen.

La información más técnica y detallada se encuentra en la sección de “Información de Soporte” para la profundización de estas líneas.

Línea de investigación	Posibles aplicaciones en otras áreas
Detectores ópticos	Medicina, seguridad, industria, minería
Óptica Adaptativa	Oftalmología, percepción remota, imágenes médicas.
Sistemas de Control	Industria, minería, medicina robótica
Antenas y receptores - hiperfrecuencias	Comunicaciones, detección, sensores industriales
Criogenia	Computación de alto rendimiento, comunicaciones
Diseño de dispositivos de alta frecuencia	Computación, sistemas digitales, telecomunicaciones, procesamiento de señales
Técnicas para manejo de grandes bases de datos	Datos médicos, datos industriales, grandes volúmenes de datos generados por la proliferación de sensores MEMS
Técnicas de procesamiento de imágenes	Ingeniería, medicina, recursos naturales.
Tecnologías de procesamiento paralelo.	Manejo de datos, procesamiento de señales, cálculo meteorológicos, sísmicos.
Infraestructura	Posibles aplicaciones en otras áreas
Almacenamiento de datos,	Todo tipo de data center de alta seguridad.
Transmisión de datos	Conectividad de centros urbanos, zonas aisladas que se integran a las redes con impacto marginal sobre éstas.

6.4.2 Condiciones para insertarse estas áreas.

Expertos de las Naciones Unidas y de la *National Science Foundation* (NSF, EE.UU.) consideran a la astronomía como una de las ciencias que ha alcanzado un mayor nivel en Chile, comparable al de países desarrollados. Debido a estas características, Chile es el país que posee mayor concentración instrumental para fines astronómicos en el mundo. De hecho, el año 2018 albergará casi el 70% de la capacidad de observación astronómica mundial posicionándose como una potencia mundial en actividad astronómica.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Chile tiene la oportunidad de transformarse en la “Capital astronómica del mundo” a partir de los siguientes supuestos:

- Instalación de infraestructura astronómica de clase mundial.
- Desarrollo de la Astronomía chilena, para convertirse en ciencia de clase mundial.
- Creación de capacidad tecnológica y competencias.
- Desarrollo de servicios de apoyo y tecnología para observatorios.
- Desarrollar instrumentos astronómicos.
- Participación en proyectos de astronomía de clase mundial a establecerse en Chile (ingeniería y otras áreas).
- Utilización de los proyectos astronómicos como guías para el desarrollo tecnológico.
- Creación de Parques Astronómicos.
- Protección efectiva de la contaminación luminosa en los sitios de observación.

Para aprovechar estas áreas se requiere de:

- Programas temáticos de largo plazo que apoyen la formación de capital humano y financiamiento que asegure su estabilidad en los centros y universidades.
- Actualizar y mejorar la infraestructura en astroingeniería
- Instrumentos para incubar desarrollo de instrumentación astronómica
- Instrumentos para fomentar el desarrollo de sistemas y dispositivos “de validación de proveedores” (fomento del “track record”)
- Financiamiento para el acceso a instalaciones de laboratorios y centros internacionales para integración y pruebas de prototipos, cuando la infraestructura no exista en Chile.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

- Fomentar los proyectos conjuntos entre los diversos grupos chilenos de investigación en astroingeniería y astronomía.
- Establecimiento de acuerdos al más alto nivel con gobiernos y observatorios para obtener información temprana de necesidades y adquisiciones. Establecer en Chile una Liaison Office.
- Establecimiento de acuerdos al más alto nivel con gobiernos y observatorios así como financiamiento para la transferencia de tecnología a universidades y empresas de base tecnológica en Chile.

7 ESTIMACIÓN DE IMPACTO ECONÓMICO

7.1 PRESENTACIÓN

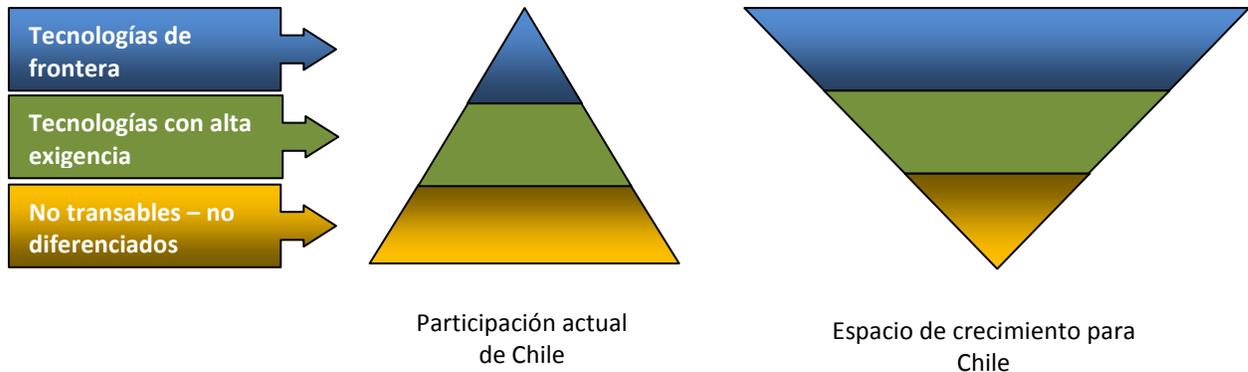
Se ha señalado anteriormente que los requerimientos de los observatorios son posibles de agrupar en tres grandes categorías, según el nivel de diferenciación respecto de las demandas de otros sectores productivos como es el caso de la gran minería del cobre en el norte de Chile. En primer lugar, se distinguen las “tecnologías de frontera”, “well beyond the state-of-art”, altamente específicas para astronomía y altamente diferenciadas respecto de otras tecnologías, como los detectores, gratings, receptores de radioastronomía, espejos. En segundo lugar, se distinguen las “tecnologías con alta exigencia” que son tecnologías ya probadas en varios sectores productivos, pero que para su uso en astronomía deben responder a exigencias de calidad y de funcionalidad especiales. Esta categoría abarca desde ensamblar fibras ópticas en alturas de miles de metros sobre el nivel del mar, circuitos electrónicos de muy bajo ruido, hasta el cambio de un actuador de un espejo. Por último, se encuentra la categoría de “no transables”⁷ y de commodities, que no presentan ninguna diferenciación con aquellos bienes y servicios que son demandados por otras áreas productivas, como por ejemplo la minería. A esta categoría pertenecen por ejemplo, agua potable, carreteras, servicios de mantención y alimentación. También, para el análisis, se consideran en este nivel bienes importados que se adquieren “off the shelf” como computadores de escritorio, teléfonos de oficina.

⁷ No transables son los “bienes y servicios que sólo se pueden consumir dentro de la economía en que se producen y no se importan ni exportan” INE, Revista Estadística & Economía N° 6.

Cada una de estas tres categorías, presenta un potencial de creciente para los próximos años.

Se estima que el mayor potencial de crecimiento está en el nivel más alto, el de tecnologías de frontera.

POTENCIAL DE CRECIMIENTO DE LAS OPORTUNIDADES DE MERCADO



Por su naturaleza, los bienes y servicios no transables demandados por los observatorios son en un 100% provistos por empresas chilenas o por filiales chilenas de empresas extranjeras, en proyectos y servicios tales como construcción de obras civiles, alimentación, transporte.

Por esta característica, el espacio de crecimiento para esta demanda tiene un potencial de crecimiento acotado, que es función de los nuevos proyectos anunciados o ya en construcción, lo que de todas maneras podría implicar en el mediano plazo al menos duplicar el monto de la demanda actual, especialmente durante la etapa de operación de los observatorios.

Respecto del nivel intermedio, que se refiere a los proyectos que integran y configuran tecnologías consolidadas pero que tienen exigencias particulares desde la astronomía, actualmente la participación de empresas chilenas puede ser considerada insuficiente, si bien existen casos de participación cuyos resultados son demostrativos de los grandes beneficios que se pueden lograr no solamente en términos de facturación sino también en términos de experiencia e imagen. El estudio ha identificado un potencial de crecimiento

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

de alto interés en la medida en que proyectos y servicios que hoy se llevan a cabo en los países miembros de los consorcios astronómicos, puedan ser asignados a empresas chilenas.

OPORTUNIDADES PARA LA INDUSTRIA, LA ACADEMIA Y LA INVESTIGACIÓN EN CHILE A PARTIR DE LOS GRANDES OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS

1. Existe un espacio de oportunidades para que empresas chilenas y grupos académicos participen en la construcción, en la operación y en el upgrade de los observatorios internacionales instalados o por instalarse en Chile, como proveedores de mediana tecnología.
2. Más allá de ello, en Chile se está presentado una oportunidad única de desarrollar nuevos negocios tecnológicos internacionales, a partir de la presencia de los observatorios astronómicos establecidos, en proyecto o en construcción. La ventaja proviene de la presencia local de un cliente de clase mundial que no solamente es usuario de alta tecnología, sino también productor, articulador y promotor de ésta.
3. Bajo las condiciones adecuadas, es factible el desarrollo de emprendimientos locales de alta tecnología para mercados mundiales, que tengan su punto de partida en la astroingeniería pero que extiendan su aplicación otras áreas tales como salud, minería, comunicaciones.
4. Bajo las condiciones adecuadas, es factible que una importante fracción de los proyectos de mediana tecnología que hoy son realizados por empresas extranjeras para los centros astronómicos instalados en Chile, sean realizados por empresas locales. Este desplazamiento de la oferta, de acuerdo a la experiencia de empresarios locales, tiene sus mayores beneficios en que las empresas locales asumen una metodología de trabajo de clase mundial que les otorga una carta de presentación que permite la expansión hacia mercados globales.
5. Bajo las condiciones adecuadas, el esfuerzo de las políticas públicas chilenas de fomento al emprendimiento e innovación puede llegar a tener altos multiplicadores debido a la factibilidad de apalancamiento de recursos tanto privados como de agencias extranjeras, a la alta eficiencia esperable en la transferencia tecnológica y a los mecanismos para la internacionalización de empresas locales de base tecnológica.
6. Estas oportunidades necesitan ser construidas, y es factible lograrlo en una colaboración público-privada chilena e internacional.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Como resultado del presente estudio, se destaca que aquello que resulta enormemente interesante en términos de oportunidades está en el nivel de tecnologías de frontera, en donde el espacio de crecimiento en términos de retorno económico es de al menos un orden de magnitud superior al nivel intermedio.

7.2 METODOLOGÍA DE CUANTIFICACIÓN ECONÓMICA DEL IMPACTO

El análisis y la estimación cuantitativa de los impactos de la astronomía y de la investigación científica en general son de gran complejidad, tanto por la alta incertidumbre que tienen los resultados proyectados y sus aplicaciones, como por la asimetría de información entre los involucrados en estos análisis.

De una manera sintética, es posible distinguir dos orientaciones metodológicas para cuantificar el impacto.

- La primera de ellas se basa en un modelo de la estructura de la cadena de suministros. De acuerdo a la manera en que se encadenan los insumos y los productos en la economía, se realiza la estimación del impacto de las actividades de I+D (recursos humanos, instalaciones, infraestructura, equipamiento, suministros) en el crecimiento que es inducido en otras actividades productivas. Esta metodología tiene su expresión más sistemática en la construcción de las matrices insumo – producto (input – output matrix) basadas en las cuentas nacionales de un país o de una gran región.
- La segunda orientación se basa en el concepto de “tecnologías de uso dual” (dual use technology), concepto que ha sido desarrollado primeramente desde el mundo del desarrollo tecnológico aplicado a la defensa y que luego fue ampliado a otros campos del desarrollo de tecnologías de frontera. Esta metodología se funda en que el desarrollo de tecnología de punta en un sector específico pero enormemente exigente en cuanto a calidad y prestaciones, entrega como resultado nuevas tecnologías que pueden ser utilizadas en nuevas aplicaciones en

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

amplios sectores productivos tales como la medicina, la industria, las comunicaciones. En esta perspectiva, ese análisis busca determinar la relación entre los recursos invertidos en la investigación versus el volumen de negocios que se generan posteriormente mediante spin-off de clase mundial o mediante transferencias de tecnologías hacia el tejido industrial establecido.

En las dos secciones siguientes, el análisis empleará estas dos metodologías complementarias.

7.3 OPORTUNIDADES DERIVADAS DEL USO DUAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE FRONTERA EN ASTROINGENIERÍA

En esta sección se discute el impacto probable que tendría el desarrollar en Chile la astroingeniería, incluyendo la astroinformática.

La hipótesis es que el impacto cuantitativamente más importante resultaría de la aplicación de tecnologías de la astroingeniería en áreas distintas de la astronomía, mediante la creación de spin-off tecnológicos.

En primer lugar, se describen casos de spin-off de la astroingeniería en el mundo, experiencia que se podría replicar en Chile bajo las condiciones adecuadas.

En segundo lugar, se resumen las dificultades - mundialmente reconocidas - que se presentan para llevar a cabo una estimación ex ante de los beneficios económicos de los programas de fomento al desarrollo de la tecnología.

En tercer lugar, a modo de ilustración, se presentan tres escenarios de cuantificación de los impactos económicos.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

FACTIBILIDAD DE DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS DE FRONTERA

1. La astronomía y en especial la astroingeniería, involucran el desarrollo de tecnologías de frontera que posteriormente resultan en aplicaciones para otros sectores tales como la medicina, las comunicaciones, la industria
2. Los países que han desarrollado tecnologías de frontera en astronomía y astroingeniería han creado innovaciones y emprendimientos que han penetrado mercados mundiales. Se trata de nuevos negocios de alto valor agregado, intensivos en conocimiento.
3. En la hipótesis de desarrollo de negocios a partir de las líneas de astroingeniería que ya están presentes en Chile, se estima que los recursos invertidos por el Estado chileno podrían generar retornos en términos de exportaciones y de apalancamiento de financiamiento extranjero, en una relación de 50 a 70 veces.

7.3.1 Ejemplos de casos en la experiencia internacional

Existe en el mundo un significativo número de casos de empresas cuyo origen está en desarrollos de tecnologías para la astronomía y que luego han sido aplicadas a otros sectores productivos.

La lista presentada a continuación presenta algunos de los casos más representativos. En la medida en que la información está disponible, se entrega una indicación de la facturación o del valor de la empresa.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

A. Altium Limited (antes Protel)

Empresa australiana. Nace de la electrónica desarrollada para la astronomía de rayos X. Desarrolló en 1991 la primera herramienta para diseño de circuitos electrónicos basada en Windows. Altium emplea cerca de 270 personas y genera ingresos por cerca de 47 millones de dólares australianos (2003).

B. Radiata

Empresa australiana creada para comercializar sistemas de LAN (Local Area Network) inalámbricos. Fue adquirida por Cisco Systems por 600 millones de dólares. Los inventores de la tecnología provienen de la radio astronomía. El sistema LAN que comercializaron se basa en el desarrollo de un chip para "Fast Fourier Transform" en el CSIRO, que fue desarrollado para procesar los componentes de frecuencia de señales de radio-astronomía.

C. Electro Optics Systems (EOS)

Empresa australiana especializada en el diseño y producción de tecnologías laser, aplicadas a los mercados aeroespacial y defensa. Además fabrica telescopios de tamaño mediano y está desarrollando óptica adaptativa.

D. Auspace

Empresa australiana especializada en instrumentos electro-ópticos, comunicaciones por satélite y sistemas espaciales. Es un spin-off del Mt. Stromlo Observatory (1983).

Hoy proporciona instrumentos a las instalaciones terrestres y espaciales. Ha provisto el hardware para dos satélites europeos de percepción remota. Integró el satélite FedSat en sus instalaciones de Canberra.

E. Imagine Eyes

Empresa francesa. Utiliza la tecnología de óptica adaptativa desarrollada para astronomía. Esta tecnología es aplicada en dispositivos oftalmológicos para adquirir imágenes de la retina a un nivel celular, para diagnósticos de refracción y para

"Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile"

investigación oftalmológica en general. Fue fundada en 2003 por especialistas en fotónica y oftalmología. Sus ventas se sitúan en 2 millones de dólares y sus tasas de crecimiento anual son del orden del 35%.

F. Matrox

Empresa canadiense, creada por dos estudiantes de la École Polytechnique en 1979, para producir tarjetas electrónicas para almacenar imágenes numéricas en el Observatorio Mont Mégantic (OMM). Hoy día exportan alrededor de 200 Millones de dólares anuales.

G. Micralyne Inc

Empresa canadiense, anteriormente Alberta Microelectronic Corporation, nace del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación de la Universidad de Alberta. Comenzó con el desarrollo de módulos prototipos de antena - receptor usando la tecnología SIS (superconducting-insulator-superconducting) para astronomía.

Hoy, Micralyne desarrolla y fabrica actuadores, sensores, y estructuras mecánicas 3D. Provee servicios de fabricación de MEMS (micro-electromechanical systems) que incluyen dispositivos ópticos MEMS, micro fluidos y sensores MEMS. Tiene como mercados las telecomunicaciones, energía, automóvil, aeroespacial y defensa. Tuvo ingresos por 30.6 millones de dólares canadienses el 2009, un aumento de 35% respecto del año anterior

H. Blackford Analysis

Empresa británica, nace de la astrofísica⁸ y hoy desarrolla y comercializa algoritmos avanzados para el análisis en tiempo real de datos. Sus productos se aplican en imágenes médicas, aplicaciones de defensa, industrias del petróleo.

⁸ "Blackford Analysis' competitive edge is the result of it commercialising its extensive expertise in astrophysics." "Professor Alan Heavens of Edinburgh University set out to determine the age of stars in distant galaxies and devised a mathematical algorithm that compresses huge datasets while keeping all the information needed to solve a problem, a much faster way of making calculations than traditional

I. Softimage

Empresa canadiense, creada por dos investigadores del Observatorio Mont Mégantic que desarrollaron un sistema para visualizar imágenes astronómicas. La empresa se posicionó mundialmente en la producción de contenidos visuales profesionales, con herramientas para crear animación 3-D y 2-D.

J. Stellar Optics Research International Corporation

Empresa canadiense, spinoff de la York University, comercializa productos y servicios en los mercados de óptica y fotónica.

K. Zeeko

Empresa británica, spinoff del University College London. Se especializa en máquinas pulidoras de precisión y metrología para dispositivos de hasta 2.5 mts. Emplea 43 personas. Sus ingresos en el 2009 fueron de £3.0 Millones y de £4.0 Millones el 2010.

7.3.2 Limitaciones para la estimación del impacto económico de las aplicaciones duales

Para el caso de Chile, en que las aplicaciones duales de tecnologías desarrolladas para astronomía son todavía solamente una posibilidad, la manera de realizar un acercamiento

techniques. "It was pure scientific inquiry" he says, "We wanted to find a better way to solve a particular problem. It was only when we had invented a technique that was fast and accurate that I realised there could be a number of commercial applications outside astronomy or cosmology, and which could have some societal benefit." Professor Heavens realised that the technology could be used to speed up analyses of 3D brain imaging by MRI scanners." Innovation and Research Strategy for Growth, Presented to Parliament by the Secretary of State for Business, Innovation and Skills, by Command of Her Majesty, December 2011

"Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile"

cuantitativo al impacto esperado consiste en aplicar y adaptar los análisis que ya han sido realizados en países en donde estos negocios exhiben casos de éxito

Sin embargo, en los países que tienen desarrollo en astronomía y en astroingeniería, las evaluaciones cuantitativas del impacto de dicha actividad son escasas y no son periódicas.

En el Reino Unido, Andy Fabian, past president de la Royal Astronomical Society, declara el fracaso de un intento por medir el impacto de la investigación⁹.

Por su parte, un estudio del SPRU¹⁰ sintetiza las dificultades para medir los impactos económicos de la ciencia:

“The consensus in the economics literature is that measuring the economic impacts of science and innovation is highly problematic, due to the following issues:

- The time taken from an increase in R&D spend to an increase in welfare can be variable and lengthy.
- The *global nature of science and innovation* makes it particularly difficult to attribute domestic economic impacts to domestic science and innovation investment and policies.
- The *research base having direct as well as indirect effects on economic impact* also

⁹ Andy Fabian, **The impact of astronomy**, Royal Astronomical Society

Can we measure impact? The RAS has tried to consider economic impact seriously and we combined with the Institute of Physics to see if we could measure it. We wanted to connect a decision to put a pound into astronomy research with the pounds that later appear elsewhere as a result. We planned 12 case studies, starting with a pilot study of three, and commissioned a company, Oxford Economics, to carry it out. They attempted to trace three important technologies back to the underpinning scientific knowledge. As a result of the pilot study we have concluded that we can't do it. More than that, we don't think it is do-able; Oxford Economics doesn't think it is do-able, either. So we're not continuing with the study.

¹⁰ Science and Innovation Investment Framework 2004-14, Economic Impacts of Investment in Research & Innovation, July 2007, URN 07/1146

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

complicates the attribution of impacts to inputs of the research base.

For the reasons outlined above, it is highly difficult to attribute **overall economic impacts** (*aggregate effects on economic growth and improvements to welfare*) to the effects of a particular policy or investment.”

En la literatura, el esfuerzo más reciente y focalizado para la estimación del impacto de las astronomía, es el estudio realizado en Canadá “Estimation of the Economic Impacts of Canadian Astronomy, Prepared for The National Research Council, by The ARA Group (A Division of KPMG Consulting LP)”. Este estudio considera diversos tipos de impacto entre los que incluyen la capacitación de los recursos humanos.

En base a dicho estudio, la Canadian Astronomical Society declara que la inversión en I+D en astronomía puede tener multiplicadores de retornos para la industria de 10 veces lo invertido por el gobierno:

“Economic Potential of the Long Range Plan: is the "spinoff" stimulus to a wide range of high-technology businesses, generated as the new concepts in each project find their way into many other technological avenues across Canada. The leverage factors in this area are considerably harder to predict and to document. They depend more sensitively on the entrepreneurship of the high technology community within Canada in a more general sense, as well as on the ability of NRC/HIA to find and make the right connections for applications in industry.

But the examples discussed above suggest to us (again, conservatively) that 10-to-1 ratios in the creation of wealth are not unrealistic¹¹”

¹¹ Canadian Astronomical Society, Unveiling the Cosmos: A Vision for Canadian Astronomy 2010-2020, Report of the Long Range Plan 2010 Panel

Por su parte, la ESO cita un estudio acerca de los beneficios secundarios para las empresas proveedoras del CERN el año 2003, en proyectos intensivos en tecnología:

38 % de las empresas que respondieron desarrollaron nuevos productos como resultado directo del contrato original.

13 % comenzaron nuevos equipos de I+D.

14 % crearon una nueva unidad de negocios.

17 % abrieron un nuevo mercado.

42% incrementaron su presencia internacional.

44 % indicaron un aprendizaje tecnológico.

36 % indicaron un aprendizaje de mercado.

En síntesis, si bien el impacto económico de la investigación y desarrollo en astronomía es muy complejo de medir ex post y más aún complejo de estimar ex ante, en la medida en que el análisis sea restringido a casos de negocios derivados de la astronomía ignorando los impactos económicos de largo plazo, los impactos en capacidades de investigación y desarrollo, los impactos en capital humano, es posible una estimación indicativa si bien los márgenes de incertidumbre son por naturaleza muy elevados.

Por consiguiente, en el presente estudio, la estimación del impacto se limita al área de la astroingeniería, cuya cercanía al mercado es mayor que para la astronomía pura y para los fines de la cuantificación toma en cuenta solamente los probables spin-off directos.

No se contabilizan por tanto los beneficios en términos de aumento del capital de conocimiento en el país, los impactos sociales en Chile ni aquellas aplicaciones tecnológicas derivadas de la astronomía cuyos efectos se producen en el largo plazo.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

7.3.3 Hipótesis de cuantificación del impacto en Chile de las tecnologías de uso dual

La aplicación del análisis al caso chileno se apoya en las hipótesis de tres escenarios en que, a partir de las principales líneas identificadas en Chile, se crean y desarrollan empresas de base tecnológica proyectadas a los mercados mundiales.

La cuantificación presentada a continuación se basa en un escenario hipotético que no tiene carácter predictivo.

El espíritu es ilustrar los beneficios que se podrían lograr en Chile si se replicaran experiencias de éxito logradas en otros países como Canadá o Australia.

Las cifras se construyen con hipótesis basadas en esas experiencias, pero el margen de incertidumbre es tal que la realización práctica seguramente diferirá de la estimación.

Las hipótesis de líneas de trabajo, de número de empresas y de facturación, si bien están basadas en experiencias exitosas externas, tienen como principal utilidad ayudar a la construcción de políticas, de objetivos y de indicadores de éxito de las políticas.

**POTENCIALIDADES DE USO DUAL
DE ASTROINGENIERÍA E INFRAESTRUCTURA EN CHILE**

Línea de investigación	Posibles aplicaciones en otras áreas
Detectores ópticos	Medicina, seguridad, industria, minería
Óptica Adaptativa	Oftalmología, percepción remota, imágenes médicas.
Sistemas de Control	Industria, minería, medicina robótica
Antenas y receptores - hiperfrecuencias	Comunicaciones, detección, sensores industriales
Criogenia	Computación de alto rendimiento, comunicaciones
Diseño de dispositivos de alta frecuencia	Computación, sistemas digitales, telecomunicaciones, procesamiento de señales
Técnicas para manejo de grandes bases de datos	Datos médicos, datos industriales, grandes volúmenes de datos generados por la proliferación de sensores MEMS
Técnicas de procesamiento de imágenes	Ingeniería, medicina, recursos naturales.
Tecnologías de procesamiento paralelo.	Manejo de datos, procesamiento de señales, cálculo meteorológicos, sísmicos.
Desarrollo de Infraestructura	Posibles aplicaciones en otras áreas
Almacenamiento de datos,	Todo tipo de data center de alta seguridad.
Transmisión de datos	Conectividad de centros urbanos, zonas aisladas que se integran a las redes con impacto marginal sobre éstas.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

7.3.3.1 Variables para la estimación

La estimación cuantitativa del impacto en Chile requiere suposiciones acerca del valor de al menos cuatro variables:

I. Variable Uno: Número de empresas exitosas

Para esta estimación el único dato actual es el número de líneas de I+D de astroingeniería que se desarrollan en Chile y que son consideradas en el contexto mundial como prioritarias.

La tabla en la página anterior, “Potencialidades de uso dual de astroingeniería e infraestructura en Chile” indica 11 líneas que cumplen con los requisitos de ser de interés mundial y de estar siendo desarrolladas o comenzando a ser desarrolladas en Chile.

Se estima que en Chile al menos cuatro o cinco líneas (por ejemplo óptica adaptativa, antenas y receptores en hiperfrecuencias, procesamiento paralelo y grandes bases de datos, electrónica) están en un nivel de avance tal que puede dar lugar con alta probabilidad a spinoff que impacten en otras áreas productivas.

A partir de esta base, se estima que del orden de 12 pequeñas empresas intensivas en conocimiento podrían desarrollarse y consolidarse en los próximos años.

En un escenario pesimista, se estima que solamente dos empresas serían exitosas y en un escenario optimista se estima la creación de una empresa de muy alto crecimiento y de alta facturación.

II. Variable Dos: Distribución de probabilidad de la facturación anual de cada empresa

Para esta variable solamente se cuenta con la información de casos de éxito de otros países.

Existen casos, citados anteriormente, de empresas como Radiata en Australia, vendida a Cisco en 600 millones de dólares o el caso de Matrox en Canadá cuyas exportaciones anuales alcanzan los 200 millones de dólares.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

En un nivel intermedio de facturación se encuentran los ejemplos de la Canadiense Micralyne, con unos 30 millones de dólares canadienses anuales y la australiana Altium con ventas anuales de 47 millones de dólares australianos

Por último, se registra información de empresas como la francesa Imagine Eyes cuyas ventas están en el orden de los 2 millones de dólares anuales.

La probabilidad de lograr una empresa que facture 200 millones de dólares anuales se considera solamente en el escenario más optimista.

Para el escenario intermedio, se ha construido la hipótesis para Chile que de doce empresas, 8 facturen inicialmente del orden de los 2 millones de dólares anuales con una tasa de crecimiento del 6%, 3 empresas facturen inicialmente 2 millones de dólares anuales con una tasa de crecimiento del 30%, y una empresa facture a partir del sexto año 55 millones de dólares anuales.

En el escenario pesimista, se estima que solamente dos empresas resultan exitosas con facturaciones bajas y una tasa de crecimiento del 6%.

No se consideran los factores de crecimiento de cada empresa individual, ni se incluyen tasas de descuento.

III. Variable Tres: Porcentaje de la facturación que impacta en la economía de Chile

El cálculo del impacto en el producto interno debe descontar los componentes importados y los gastos de comercialización internacionales.

Al tratarse de empresas intensivas en conocimiento, el valor agregado es primordialmente la propiedad intelectual de los desarrollos. En el caso de sistemas e instrumentos, se estima que el costo de los insumos importados se sitúa entre el 10% para producciones de bajos volúmenes y el 40% para grandes volúmenes¹².

¹² El valor de 40% de costos de insumos está basado en estimaciones de costo vs precio de venta del iPhone.

Dado que cada caso es particular y desconocido a priori, se toma como hipótesis que los insumos importados y los gastos internacionales alcanzan un 40% de la facturación. Esta cifra se basa en el margen bruto de cerca del 50% para las pymes canadienses que fabrican equipos médicos¹³. Se supone para el caso chileno un margen semejante y que, de los costos, un 80% lo constituyen los insumos importados y los gastos internacionales.

Por otra parte, para las empresas que desarrollan software, los insumos importados son marginales por lo que suponer una media de 80% de margen bruto es razonable.

A la facturación, se agrega el apalancamiento de capital de riesgo internacional de unos 3 millones de dólares¹⁴ para empresas de bajo crecimiento, 8 millones de dólares para empresas de mediano crecimiento y 20 millones de dólares¹⁵ para empresas de alto crecimiento.

IV. Variable Cuatro: Monto del subsidio del Estado Chileno que tiene relación causal con el impacto producido

Se ha supuesto en el escenario intermedio que el Estado aporta subsidios por un total de 10 millones de dólares en el escenario intermedio, lo que corresponde a un monto del orden de lo que Corfo aporta para la atracción de centros de excelencia internacionales.

En el escenario bajo, se supone el mismo monto mientras que en el escenario más optimista se supone un aporte del Estado de 20 millones de dólares.

¹³ "The gross margin for the Medical Equipment and Supplies Manufacturing industry group was 55.2% in 2008" Canadian Industry Statistics (CIS), **SME** Benchmarking, Medical Equipment and Supplies Manufacturing (NAICS 3391).

¹⁴ Monto típico de la inversión en una empresa por parte de fondos de capital de riesgo.

¹⁵ Monto típico de un capital "mezzanine" o de una IPO de bajo monto.

7.3.3.2 Impacto en un escenario intermedio

Estimación del número de empresas

En un escenario intermedio, en que los recursos invertidos por el Estado chileno sean del orden de los 10 millones de dólares, se estima probable la creación de unas 12 empresas exitosas.

Estimación de la facturación

La estimación de facturación para el escenario chileno se basa en las experiencias extranjeras de emprendimientos tecnológicos “duros”. No se considera como un referente las empresas “punto com” ya que su dinámica es muy diferente del caso de la astroingeniería.

Las hipótesis empleadas para el cálculo se resumen en la siguiente tabla:

Tipo de empresa	Número de empresas exitosas	Facturación inicial (Millones de dólares)	Tasa de crecimiento anual
Empresas de bajo crecimiento	8	2	6%
Empresas de mediano crecimiento	3	2	30%
Empresas de alto crecimiento	1	4	45% (con tope de 55 MM USD)

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Se ha considerado también, para cuantificar el apalancamiento de financiamiento, que típicamente los aportes de capital de riesgo para emprendimientos tecnológicos se sitúan en el orden de los 3 millones de dólares para empresas de bajo crecimiento, 8 millones de dólares para empresas de mediano crecimiento y 20 millones de dólares para empresas de alto crecimiento.

Caso	Número de empresas exitosas	Facturación total en 10 años (Millones de dólares)	Apalancamiento de capital de riesgo internacional por empresa (Millones de dólares)	Apalancamiento de capital de riesgo internacional total (Millones de dólares)
Empresas de bajo crecimiento	8	211	3	24
Empresas de mediano crecimiento	3	256	8	24
Empresas de alto crecimiento	1	330	20	20
TOTAL	12	797		68

Estimación del retorno del subsidio

El efecto producido por el fomento del Gobierno se estima en términos de la actividad económica generada.

No se consideran los gastos de marketing, ni de escalamiento, ni costos de operación, en la hipótesis de que estos gastos o inversiones son aportados por privados. El efecto del subsidio es por tanto, gatillar un proceso que de otra manera no ocurriría e incluye la facturación y el apalancamiento de recursos durante el ciclo de vida de la empresa.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Cálculo del Retorno del subsidio estatal:

$$\text{Retorno} = \frac{\text{E(fact)} + \text{E(capital)}}{\text{Subsidio}}$$

En dónde:

E(fact) = Esperanza de facturación en 10 años menos insumos importados y gastos internacionales.

E(capital) = Esperanza de apalancamiento de capitales de riesgo internacionales (se consideran ingresos para el país).

Subsidio = subsidio del gobierno en el periodo considerado.

Asumiendo para E(fact) un valor de 797 millones de dólares en 10 años con un margen bruto de 80%, para E(capital) un valor de 68 millones de dólares y para el subsidio un valor de 10 millones de dólares, el retorno estimado tendría un multiplicador de un valor cercano a 70. Este valor supone que una parte de los recursos pecuniarios y no pecuniarios necesarios para la internacionalización son apalancados en el extranjero y que el subsidio de Chile tiene su efecto de gatillo sobre el proceso completo.

Si para el mismo logro, el subsidio fuera de 15 millones de dólares, el retorno se situaría cercano a un factor de 50.

7.3.3.3 Impacto en un escenario bajo

Si solamente se crearan dos empresas exitosas, con una facturación inicial de 2 millones de dólares y una tasa de crecimiento de 6% anual, manteniendo las otras variables en los mismos valores que en el caso intermedio, el retorno esperado para el Estado se situaría en 4,8 dólares por cada dólar de subsidio.

7.3.3.4 Impacto en un escenario alto

Si se crearan 12 empresas exitosas, una de las cuales alcanzara una facturación de 200 millones de dólares anuales desde el sexto año, manteniendo las otras variables en los mismos valores que en el caso intermedio, el retorno esperado para el Estado se situaría en más de 140 dólares por cada dólar de subsidio.

7.4 ESTIMACIÓN DEL IMPACTO EN LA CADENA DE SUMINISTRO NACIONAL

Una segunda categoría de impacto proviene de la demanda y oferta inducidas en la cadena de suministros nacional.

Los requerimientos de los observatorios en términos de bienes, servicios y tecnología han sido ya descritos en secciones anteriores, por lo que se suponen conocidos.

En este capítulo, la pregunta es acerca de la cuantificación de los beneficios esperados en la cadena productiva.

Este análisis ofrece tres niveles de estimación:

- a) La facturación bruta de las empresas nacionales que prestan servicios o que participan en la construcción de los grandes observatorios en Chile.
- b) El efecto multiplicador en la cadena productiva.
- c) Los activos intangibles que las empresas pueden obtener de su participación en proyectos y servicios para los grandes observatorios.

7.4.1 Volumen del mercado en términos de facturación bruta.

El presupuesto de operación de los grandes observatorios en Chile tiene como componente principal la planilla de empleados, chilenos y extranjeros.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Las labores de mantención, reparación y upgrade de los instrumentos científicos y de los espejos o antenas son asumidas hoy casi en un 100% por personal interno de los observatorios.

Los subcontratos a empresas chilenas son en la actualidad primordialmente para labores lejanas al “core” de los observatorios. Estos subcontratos abarcan desde ingeniería civil hasta jardinería.

Se estima que aproximadamente entre un 20% y un 30% del gasto operacional anual se ocupa en este tipo de subcontratos.

Existe un espacio para que empresas chilenas aumenten esta participación, en dos sentidos:

- a) Desplazamiento de labores que hoy realizan en forma remota empresas extranjeras, hacia empresas chilenas de ingeniería.
- b) Externalización de labores de mantención y de reparación más cercanas al “core” de los observatorios.

De acuerdo a la información actual, este espacio podría ser del orden de un 10% del gasto de operación anual.

Según las proyecciones, de los cerca de 200 millones de dólares anuales de los gastos de operación anual proyectados, la facturación de empresas chilenas de servicios no diferenciados podría alcanzar los 50 millones de dólares anuales y los servicios de ingeniería de nivel intermedio podrían llegar a los 20 millones de dólares anuales.

7.4.2 Impacto en la cadena productiva.

La demanda de bienes y servicios de los observatorios tiene un impacto más allá de la facturación bruta de las empresas que prestan directamente los servicios o que entregan sus productos.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Sin embargo, la estimación de este nivel de impacto no es posible cuantificar de manera precisa.

En efecto, la manera más aceptada de cuantificar este impacto es mediante las matrices de insumo / producto o matrices de Leontief, cuya elaboración se realiza en base a las cuentas nacionales del Banco Central.

En el Banco Central de Chile, el concepto de “matriz insumo producto” ha sido reemplazado por “Compilación de Referencia”, manteniendo la base teórica. En dicha compilación, el sector de la astronomía no aparece desagregado.

No obstante, en los encadenamientos hacia atrás (backward linkages) es posible en una primera aproximación asimilar el impacto de este encadenamiento al que tiene la minería en la misma región geográfica, en consideración a que en el nivel de menos diferenciación la astronomía demanda los mismos servicios (y generalmente a las mismas empresas) que la minería. Asimismo, el nivel de salarios es igual o superior en promedio a los que se encuentra en la minería.

Un estudio de Cieplan sitúa los valores de los multiplicadores de empleo de la minería privada en 4.1 y en 6.71; este último valor considera las transacciones entre sectores y el efecto del incremento en el pago de salarios. “Esto implica que cuando se contrata un trabajador en el sector minero moderno se contrata en el resto de la economía 3,1 trabajadores adicionales”¹⁶. Los multiplicadores de producto del sector minero se sitúan en valores del orden de 1,5.

En atención a que el gasto de operación de los observatorios se compone en un 70% ó 80% de gasto en salarios y considerando que este salario no se gasta entero en la región, se puede estimar que el multiplicador “hacia atrás” del gasto de los observatorios es del

¹⁶ Patricio Aroca, Ph.D, *Matriz Insumo Producto y Encadenamientos Productivos: Impacto de la minería en la Segunda Región*. Cieplan.

orden de 3, siempre en la hipótesis de una semejanza de comportamiento de la astronomía con la minería en términos de impacto en la cadena productiva.

En lo que respecta a los encadenamientos hacia adelante (forward linkages), dado que la astronomía en Chile no produce ni bienes ni servicios que sean insumos para otros sectores, se ha identificado como el encadenamiento clave el incremento del turismo en la región y en el país, que se produce gracias a la presencia de los grandes observatorios.

La estimación del beneficio del turismo, por su carácter, tiene autonomía propia respecto del análisis de este informe. Por esta razón se ha decidido incluirlo como un elemento aparte y se entrega en anexo.

7.4.3 Activos intangibles para las empresas a partir de su participación en proyectos y servicios para los grandes observatorios.

Por último, es importante evaluar el impacto de que actividades hoy desarrolladas por personal interno de los observatorios sea traspasada a empresas chilenas externas.

Se podría argumentar que desde el punto de vista de la facturación se verificaría solamente un efecto de desplazamiento, ya que los observatorios contratarían los servicios a empresas externas en la medida en que ello no incremente sus gastos operacionales. Por tanto, el flujo de divisas hacia Chile se mantendría igual o incluso disminuiría levemente ya que el aumento de la facturación de empresas externas sería acompañado con una reducción en los montos de salarios del personal interno de los observatorios. En este razonamiento, no habría adicionalidad desde el punto de vista del país.

Sin embargo, en este escenario, para los empresarios chilenos existen beneficios no tangibles que se concretan por dos caminos complementarios:

- a) Las empresas locales asumen una metodología de trabajo de clase mundial, siendo los contratos frecuentemente firmados según las normas y legislaciones de Estados Unidos o Europa. Un correcto desempeño los habilita como “proveedores

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

confiables” de los observatorios en Chile y en el mundo.

- b) Realizar trabajos de en tecnologías de nivel intermedio (tecnologías consolidadas pero que tienen exigencias particulares desde la astronomía) es una carta de presentación a clientes de otras áreas productivas en el mundo, que facilita la obtención de nuevos contratos en nuevos mercados.

Estos beneficios intangibles se verificarían en empresas chilenas de base tecnológica. Para una empresa de transporte o de gasfitería, no es claro que trabajar para un observatorio aumente su prestigio más de lo que puede hacerlo trabajar para una gran empresa de la minería del cobre.

La cuantificación de estos beneficios no es posible a priori. Sin embargo, la experiencia internacional¹⁷ indica un factor entre 2 y 10 adicional por el efecto de los nuevos contratos que las empresas obtendrían como consecuencia directa de tener en su cartera de clientes a los observatorios internacionales.

A modo de ejemplo, la empresa canadiense AGRA-Coast; realiza ventas de 175 millones de dólares basada en las oportunidades creadas por la astronomía. Esta empresa se convirtió en líder mundial en la construcción de enclosures de telescopios y ha incursionado en áreas alejadas de la astronomía como son los parques de diversiones.

También en Canadá, la empresa DSMA Atcon Ltd., en los años 60 invirtió 25.000 dólares en el diseño de un telescopio óptico de 4 metros. Esto le permitió ganar licitaciones para proyectos en Italia, Alemania y Australia. El factor de apalancamiento (leverage) de su inversión inicial en astronomía ha sido estimado por la empresa en 40 a 1.

¹⁷ “Estimation of the Economic Impacts of Canadian Astronomy”, Prepared for The National Research Council, by The ARA Group (A Division of KPMG Consulting LP)

7.4.4 Resumen: hipótesis de tamaño del mercado

Nivel	Facturación actual	Facturación potencial en astronomía	Facturación potencial en otros mercados (minería, medicina, comunicaciones)	Multiplicador de impacto
Tecnologías de frontera	Algunos miles de dólares	Por determinar caso a caso	En un escenario intermedio, 700 millones de dólares en 10 años.	50 a 70 veces el aporte inicial del gobierno
Tecnología intermedia	5 - 6 millones de dólares	20 millones de dólares anuales	40 – 200 millones de dólares anuales	2 a 10 veces la facturación en astronomía, de acuerdo experiencias internacionales
Contratos de bienes y servicios no diferenciados	12 a 15 millones de dólares	50 millones de dólares anuales	Estos negocios no se originan en la astronomía	3 veces la facturación en astronomía (*).

(*) En la hipótesis de que el impacto en la cadena productiva es igual al impacto de la minería privada

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

8 CREACIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS DE APOYO PARA EL DESARROLLO DE LA ASTRONOMÍA EN CHILE.

Las propuestas de políticas han sido divididas en dos partes.

Esta primera parte, “políticas públicas de apoyo para el desarrollo de la astronomía en Chile”, contiene las recomendaciones de carácter más general.

La segunda parte, “políticas para el desarrollo de las áreas de oportunidad”, toma algunas de las recomendaciones más generales entregadas en esta parte y se enfoca en las líneas de astroingeniería y astroinformática.

OBJETIVO 1: Fomentar la creación y desarrollo de negocios de base tecnológica a partir las oportunidades y externalidades que se generan en Chile por la presencia de observatorios internacionales.

Fundamentación:

La presencia de los observatorios internaciones en Chile ofrece oportunidades únicas para el desarrollo de ciencia y tecnología en Chile.

Estos observatorios pertenecen a la categoría de “big science”¹⁸ para la cual las tecnologías de frontera y los desafíos multidisciplinarios son su esencia.

Como se ha fundamentado anteriormente en este estudio, esta presencia contiene un potencial de gran valor que va más allá del tiempo de observación que se entrega a los astrónomos nacionales.

¹⁸ “The crucial feature that distinguishes Big Science from Little Science is the concentration of resources on a few major research facilities, with new equipment generally demanding significant R and D at the frontiers of technology”. Ben R Martin and John Irvine, SPIN-OFF FROM BASIC SCIENCE: THE CASE OF RADIOASTRONOMY Phbs Techno1 , Vol I. 1981 Printed in Great Britain

Su presencia puede ser un catalizador la creación de nuevas empresas de base tecnológica que exploten el uso dual de las tecnologías de la astroingeniería y astroinformática. Asimismo, es factible aumentar la participación de empresas ya existentes en los proyectos de tecnologías intermedias y desarrollar oportunidades de negocio desde esa base.

Recomendaciones:

- REC_1. Superar las asimetrías de información que hoy existen entre los proyectos astronómicos por una parte y las empresas y grupos académicos locales por otra parte, mediante la creación de una oficina de enlace en Chile, con funciones similares a las que tienen las oficinas de enlace europeas entre los países y la ESO.
- REC_2. Crear programas focalizados de fomento al desarrollo de ciencia aplicada en astroingeniería y astroinformática que privilegien proyectos de mediano plazo, que desarrollen tecnologías de frontera con probabilidad de uso dual, de preferencia apalancando recursos internacionales.
- REC_3. Fomentar la creación de entidades con capacidades de investigación aplicada y de gestión de proyectos complejos, como se detalla en la sección siguiente.
- REC_4. Generar competencias específicas a nivel nacional utilizando la fusión de temáticas entre ingeniería y ciencia astronómica, que sea abordado como un programa integrado que permita formar alianzas entre observatorios e instituciones de educación superior. Crear en conjunto programas de magister o de pasantías de estudiantes y profesores en los centros de investigación astronómica, de astroingeniería y astroinformática.
- REC_5. Negociar con los observatorios para facilitar y propiciar un espacio en torno a ellos en el cual sea posible la instalación de centros de investigación u observatorios más pequeños y de una industria tecnológica local, de tal forma que se puedan aprovechar de mejor forma los servicios ya instalados de

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

energía, telecomunicaciones e infraestructura general, entre otros.

- REC_6. Evaluar las materias que forman parte de negociación entre el Gobierno chileno y los observatorios que desean instalarse en Chile. Discutir si la solicitud de 10% de tiempo de observación para astrónomos nacionales, que sin duda ha permitido posicionar la astronomía chilena a nivel mundial, puede ser complementada con solicitud de transferencia de tecnología y/o acceso a programas norteamericanos y europeos para empresas y organizaciones chilenas de base tecnológica.
- REC_7. Evaluar la creación de un paquete de herramientas de apoyo para las empresas de base tecnológica o de ingeniería que quieran convertirse en proveedores de los observatorios. Estos paquetes podrían incluir capacitación, certificación, apoyo en la gestión de proyectos complejos, facilidad de boletas de garantía, seguros para minimizar el riesgo.
- REC_8. Promover una mayor integración entre los centros de I+D, buscando una articulación tanto en lo que se refiere a la infraestructura de laboratorio, compartiéndolos, como a la disponibilidad y variedad de personal calificado.

OBJETIVO 2: Desarrollar y posicionar una imagen internacional de Chile como actor en la astronomía mundial.

Fundamentación:

Una imagen país positiva en términos de capacidades tecnológicas tiene un beneficio que impacta en todos los sectores exportadores, al transmitir una imagen de calidad y de “un país que hace las cosas bien”. Es factible una estrategia, que se coordina con los esfuerzos científicos y tecnológicos, que posicione la imagen de Chile desde un “país con cielos limpios” a un “país que desarrolla ciencia y tecnología de nivel mundial”.

Una imagen de esta naturaleza también resulta un incentivo interno para la innovación y el aumento de la calidad de los productos y servicios nacionales.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

Recomendaciones:

- REC_9. Realizar un trabajo de difusión internacional, en un esfuerzo coordinado público – privado, acerca de los logros de la academia y de la industria chilenas en los trabajos con y para los observatorios. Difundir con ejemplos de casos de éxito la imagen de que existen en Chile capacidades para el desarrollo de la ciencia y la tecnología, de primer nivel.
- REC_10. Aumentar la participación de Chile en las asociaciones astronómicas internacionales y en congresos internacionales de tecnologías asociadas o derivadas de la astronomía.
- REC_11. Establecer acuerdos internacionales a nivel de gobiernos para la cooperación en materias de ciencia y tecnología relacionadas con la astronomía y la astroingeniería.

OBJETIVO 3: Difundir la astronomía en todo Chile y crear una cultura astronómica nacional.

Fundamentación:

La astronomía es hoy en día una fuente de gran interés para el público en general por su objetivo de responder a preguntas fundamentales sobre el universo y nuestro lugar en él.

Esto es una oportunidad para que una parte importante del país pueda motivarse por la ciencia y la tecnología.

El objetivo es crear una identificación de los ciudadanos con el desarrollo de esta ciencia en Chile, ya que contamos con cielos privilegiados en el norte del país para las observaciones astronómicas. En este sentido, las actividades de difusión son fundamentales para transmitir el valor del desarrollo de la Astronomía para Chile y mostrar resultados concretos del progreso científico nacional. De este modo existe una gran oportunidad al difundir el desarrollo de la astronomía, y que la comunidad se apropie de

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

este tema y de las oportunidades asociadas, sintiéndose identificadas y transformando esta ciencia como Patrimonio Nacional, que Chile sea reconocido a nivel mundial, así como hoy ocurre con la industria minera y la industria vitivinícola, por la infraestructura e investigación en Astronomía.

En particular, a nivel de enseñanza básica y enseñanza media, una difusión de la astronomía y sus tecnologías asociadas puede resultar en una gran motivación de alumnos y profesores por las matemáticas, física, química e incluso biología.

El acceso a Internet y la posibilidad de crear observatorios virtuales para el nivel de enseñanza media, pueden estimular y reforzar la enseñanza de ciencias para todo Chile.

Recomendaciones:

REC_12. Crear políticas públicas que apunten a permitir una mayor información a la comunidad acerca de las actividades astronómicas realizadas en el país.

REC_13. Fomentar que las personas puedan acceder fácilmente a documentación pública en el ámbito de la astronomía, como por ejemplo, observaciones que se encuentren publicadas y que puedan ser utilizadas por un docente para dictar una clase.

REC_14. Crear un observatorio virtual de nivel enseñanza media, con datos reales de los observatorios, al que puedan acceder todos los estudiantes de Chile. Este observatorio debería contar con profesores en línea para que, desde los centros urbanos, puedan apoyar y guiar a los estudiantes. Esta iniciativa puede ser complementada con la creación de redes de interés nacionales e internacionales, en las que incluso desde escuelas rurales los estudiantes puedan participar en discusiones por videoconferencia.

REC_15. Utilizar la astronomía como un medio de motivación para que los alumnos y profesores de toda escuela o colegio de Chile despierten interés por matemáticas, física, química y otras materias. Desarrollar herramientas de educación a distancia para que los alumnos motivados puedan profundizar y

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

desarrollar habilidades guiados por profesores especialistas.

REC_16. Crear una “escuela de invierno” o “escuela de verano” de astronomía, posiblemente en la modalidad itinerante, que organice eventos diferenciados para estudiantes, padres, tercera edad, con profesores reconocidos. Estos eventos pueden estar abiertos a personas de todo Chile y también a extranjeros.

REC_17. Promover iniciativas de turismo astronómico.

OBJETIVO 4: Consolidar una infraestructura de comunicaciones, almacenamiento y tratamiento de datos basada en la astronomía.

Fundamentación:

La gran cantidad de datos generada por los observatorios, que en el futuro crecerá de manera exponencial, necesita una nueva infraestructura para transmitir, almacenar y procesar los datos generados.

Esto abre la oportunidad para que en Chile se desarrolle la conectividad entre los centros de investigación, universidades e instituciones astronómicas y fomentar la colaboración entre ellos creando sinergias para el desarrollo de la Astronomía.

También es posible pensar en alinear las necesidades de conectividad universal con la necesidad específica de redes de alta velocidad para uso de los observatorios.

Recomendaciones:

REC_18. Articular con los observatorios que su diseño de red contemple la interconexión con entidades nacionales.

REC_19. Articular con los observatorios que su diseño de red contemple tramos comunes para dar conectividad a comunidades rurales cercanas a los observatorios.

REC_20. Fomentar la creación de Data Centers nacionales que sean sustentables con servicios a la astronomía y que puedan extender sus servicios a otras áreas productivas y a otros países.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

9 POLÍTICAS ESPECÍFICAS PARA EL DESARROLLO DE LAS ÁREAS DE OPORTUNIDAD EN ASTROINGENIERÍA

9.1 ESTRATEGIA DE FOMENTO A NEGOCIOS TECNOLÓGICOS BASADOS EN USO DUAL DE ASTROINGENIERÍA

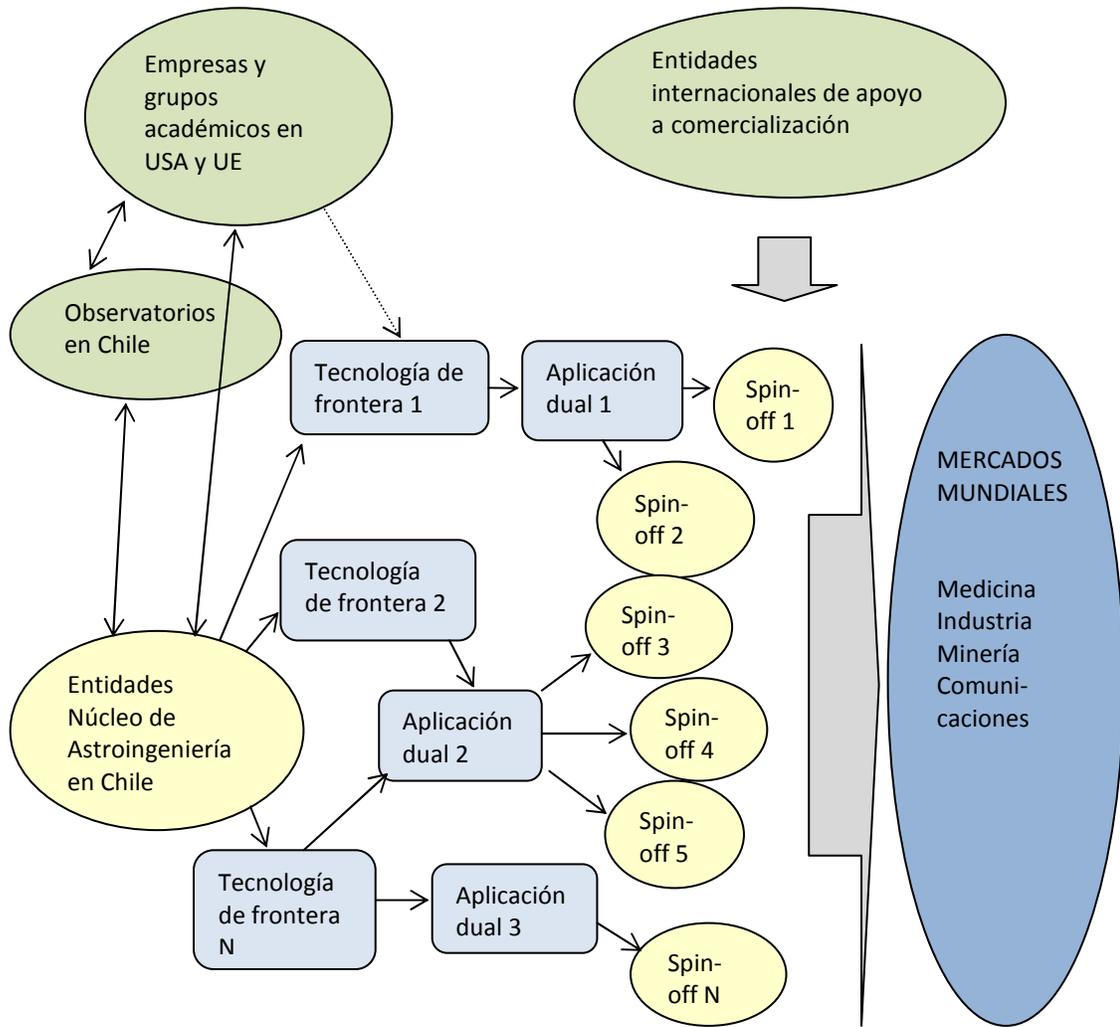
Para la creación de negocios en base a tecnologías de astroingeniería, se requiere resolver los siguientes elementos críticos:

1. Acceso a la información directa acerca de los requerimientos futuros de uno o varios observatorios, para la identificación de los sistemas o dispositivos que necesitan de tecnologías de frontera.
2. Una capacidad instalada residente en una entidad “núcleo”, por ejemplo un Consorcio Tecnológico o un Centro de Excelencia, que garantiza una alta probabilidad de obtener el resultado
3. Una “cartera de trabajos” (track record) de productos o proyectos en el área de la astroingeniería, que permite una relación de confianza con el observatorio o con sus proveedores directos.
4. Una vez desarrollada la tecnología, un entorno de innovación que fomenta la expansión hacia mercados mundiales, aplicando la tecnología en soluciones para otros sectores productivos.
5. Una fuerte integración entre redes académicas e industriales.
6. Un entorno de apoyo a la construcción de prototipos, al patentamiento, al levantamiento de capital y al marketing internacional.

“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

La factibilidad de reproducir en Chile experiencias exitosas implica por tanto una estrategia compuesta por al menos los siguientes elementos:

1. Desarrollo y/o fortalecimiento de una o varias "entidades núcleo" en el mundo de empresas chilenas de base tecnológica y en el mundo académico.
2. Fomento al desarrollo de soluciones de tecnologías de frontera, en colaboración con los centros astronómicos instalados en Chile así como con grupos y centros de astroingeniería ubicados en los países miembros de los consorcios astronómicos instalados en Chile.
3. Estímulo a la apropiación y al uso dual de las tecnologías desarrolladas para astronomía.
4. Convenios a nivel gubernamental para facilitar el acceso de empresas y de emprendimientos chilenos a las herramientas de apoyo a la comercialización internacional.



“Estudio capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile”

9.2 RECOMENDACIONES

Nuevas entidades

REC_21. Crear concursos de Consorcios Tecnológicos en Astroingeniería, que contemplen I+D en su core business. Se recomienda que estos consorcios tengan un horizonte de mediano plazo coherente con los plazos necesarios para que las tecnologías de frontera lleguen al mercado. Se recomienda también que estos Consorcios deben tener la capacidad de articular distintos actores empresariales chilenos, impulsar la colaboración entre grupos académicos y establecer alianzas con entidades en Europa y en Estados Unidos.

REC_22. Impulsar una incubadora de astroingeniería, con la participación activa de los observatorios norteamericanos y europeos. Se recomienda que esta incubadora tenga una apertura amplia a todas las Universidades y a todas las empresas de base tecnológica. Uno de sus principales objetivos debería ser entregar el espacio para que nuevos emprendimientos puedan construir una “cartera de trabajos” (track record) de productos o proyectos en el área de la astronomía.

Convenios y acuerdos Internacionales

REC_23. Establecer convenios con los observatorios instalados en Chile para que exista un flujo permanente de profesionales entre los consorcios, incubadoras y observatorios. Estos convenios deberían reducir las asimetrías de información y construir un “capital de confianza” que se traduzca en logros tecnológicos para los profesionales chilenos.

REC_24. Establecer convenios con los observatorios instalados en Chile para que

empresas, emprendimientos y grupos académicos chilenos tengan acceso a los instrumentos de fomento que existen en Europa y de Estados Unidos para apoyar la comercialización de tecnologías.¹⁹.

REC_25. Establecer convenios para que empresas y emprendimientos chilenos puedan beneficiarse de la política para las pequeñas y medianas empresas de la ESA (European Space Agency), específicamente la SME Policy Office²⁰

REC_26. Fomentar desde los más altos niveles la asociatividad entre empresas chilenas y grupos universitarios chilenos con Centros de Astroingeniería tales como el Astronomy Technology Centre (ATC) en Reino Unido, SRON en Holanda, CSIRO en Australia.

Líneas de fomento público en Chile

REC_27. Establecer líneas de apoyo a proyectos de innovación tecnológica que consideren en la evaluación criterios de mediano y largo plazo con incertidumbre de mercado.

REC_28. Establecer una instancia de apoyo, coordinada con socios europeos y norteamericanos, para promover el patentamiento y el uso dual de tecnología desarrollada para astroingeniería.

REC_29. Establecer instancias que permitan a empresas Chilenas la transferencia y uso de alta tecnología desarrollada para Astronomía a otros sectores de la economía nacional, tales como minería y agricultura.

¹⁹ Ver ejemplos de entidades en la “Información de Soporte”.

²⁰ The SME Policy Office has put in place a number of measures to reinforce the technical capabilities and sustainability of high technology SMEs in order to facilitate their involvement in ESA activities. Encouraging SME involvement in ESA activities. Technical support to SMEs. Enhanced opportunities for business partnership and networking

Evaluating Potential Spectral Impacts of Various Artificial Lights on Melatonin Suppression, Photosynthesis, and Star Visibility

Martin Aubé^{1*}, Johanne Roby², Miroslav Kocifaj³

1 Département de physique, Cégep de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, **2** Département de chimie, Cégep de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, **3** Astronomical Institute, Slovak Academy of Sciences, Dúbravská 9, Bratislava, Slovak Republic

Abstract

Artificial light at night can be harmful to the environment, and interferes with fauna and flora, star visibility, and human health. To estimate the relative impact of a lighting device, its radiant power, angular photometry and detailed spectral power distribution have to be considered. In this paper we focus on the spectral power distribution. While specific spectral characteristics can be considered harmful during the night, they can be considered advantageous during the day. As an example, while blue-rich Metal Halide lamps can be problematic for human health, star visibility and vegetation photosynthesis during the night, they can be highly appropriate during the day for plant growth and light therapy. In this paper we propose three new indices to characterize lamp spectra. These indices have been designed to allow a quick estimation of the potential impact of a lamp spectrum on melatonin suppression, photosynthesis, and star visibility. We used these new indices to compare various lighting technologies objectively. We also considered the transformation of such indices according to the propagation of light into the atmosphere as a function of distance to the observer. Among other results, we found that low pressure sodium, phosphor-converted amber light emitting diodes (LED) and LED 2700 K lamps filtered with the new Ledtech's *Equilib* filter showed a lower or equivalent potential impact on melatonin suppression and star visibility in comparison to high pressure sodium lamps. Low pressure sodium, LED 5000 K-filtered and LED 2700 K-filtered lamps had a lower impact on photosynthesis than did high pressure sodium lamps. Finally, we propose these indices as new standards for the lighting industry to be used in characterizing their lighting technologies. We hope that their use will favor the design of new environmentally and health-friendly lighting technologies.

Citation: Aubé M, Roby J, Kocifaj M (2013) Evaluating Potential Spectral Impacts of Various Artificial Lights on Melatonin Suppression, Photosynthesis, and Star Visibility. PLoS ONE 8(7): e67798. doi:10.1371/journal.pone.0067798

Editor: Shin Yamazaki, University of Texas Southwestern Medical Center, United States of America

Received: January 18, 2013; **Accepted:** May 22, 2013; **Published:** July 5, 2013

Copyright: © 2013 Aubé et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Funding: This work was supported by Fond de recherche du Québec - Nature et Technologie (FRQNT) Programme pour le dégage ment d'enseignement des chercheurs de collège Regroupements stratégiques (<http://www.fqrnt.gouv.qc.ca/>) and Cégep de Sherbrooke - CERTEE (<http://cegepsherbrooke.qc.ca>). This work was partially supported by the Slovak National Grant Agency VEGA (grant No. 2/0002/12). This work was also partially supported by the Programme de soutien aux chercheurs et aux chercheuses du collégial from ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche, de la Science et de la Technologie, Québec. The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

Competing Interests: The authors have declared that no competing interests exist.

* E-mail: martin.aube@cegepsherbrooke.qc.ca

Introduction

The development of artificial lighting technologies over the centuries has transformed human civilization and shaped the way we live. The world has become awash with artificial lighting both during the day and at night, indoors and outdoors, from office buildings to streetlights. Before Edison's invention of the light bulb (1879), people spent most of their time outdoors, receiving adequate daily doses of natural, full-spectrum sunlight during the day while spending their evenings and nights in relative darkness. With the growing availability of artificial lighting, people are spending an increasing amount of time inside under artificial lighting and consequently reducing the amount of time they are exposed to natural full-spectrum light during the day and darkness during the night. Around 99% of the population of the United States and Europe, and 62% of the world's remaining population, are exposed to artificial light at night (ALAN), the amount of which is increasing rapidly each year [1]. Not only are humans but also fauna and flora are exposed to ALAN, with ensuing environmental consequences. ALAN is one of the fastest growing and

most common kinds of environmental pollution. The effects of ALAN on fauna have been well defined and documented, and almost only negative effects have been reported. ALAN affects behavior, foraging, reproduction, communication, breeding cycles and the habitat of many nocturnal species [2], [3], [4], including invertebrates [5] amphibians [6], birds [7], bats [8], turtles [9], [10], [11], fish [12] and reptiles [13]. On the other hand, the impact of ALAN on flora is less documented; a review on the topic is reported by Briggs [14]. Exposure to artificial light prevents many trees from adjusting to seasonal variations. The presence of ALAN stimulates photosynthesis at a time when photosynthesis does not normally occur. Similar to humans and animals, plants require a specific cycle of light/darkness in order to grow healthily. Light affects several plant processes, such as seed germination, stem elongation, leaf expansion, conversion from a vegetative to a flowering state, flower development, fruit development, cessation of leaf production (bud dormancy) and leaf senescence and abscission; for all these processes, the duration, wavelength and intensity of the light are crucial [14]. Some of this knowledge is commonly used by the greenhouse industry to promote

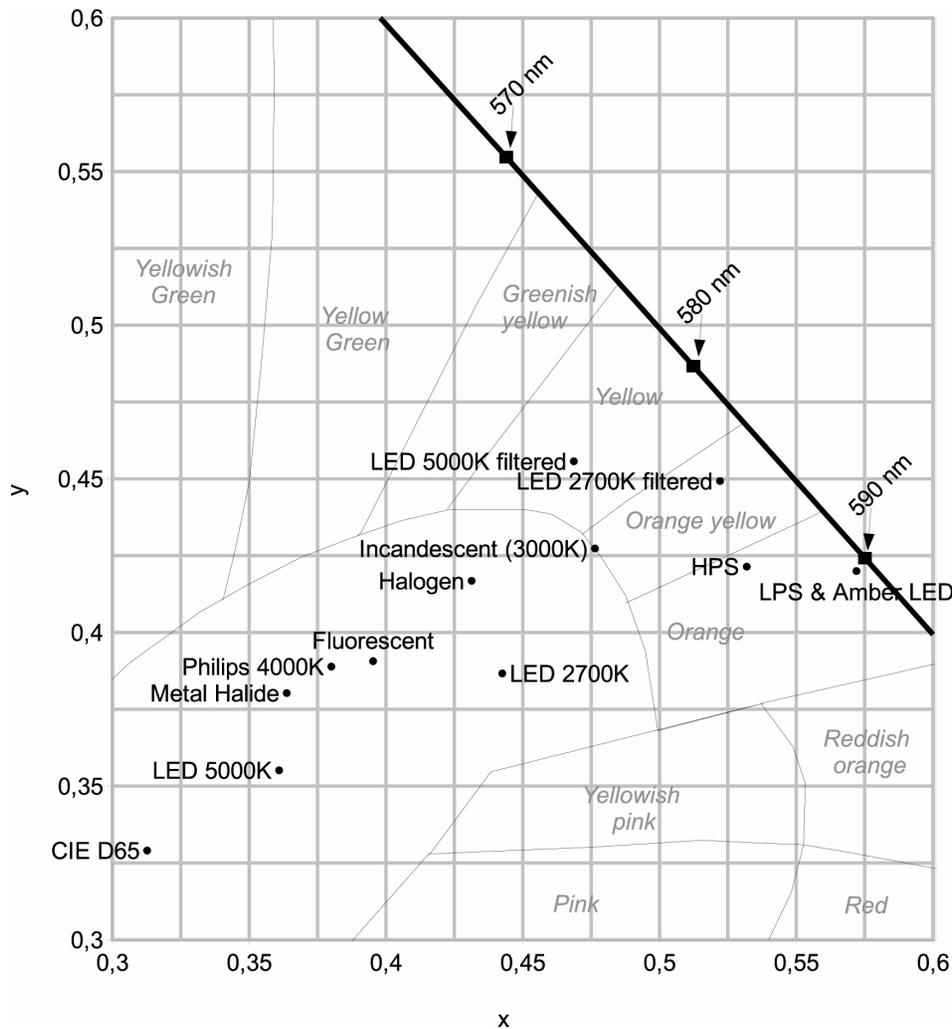


Figure 1. x and y chromaticity coordinates [52] for each lamp listed in Table 2. On that figure, the spectral locus, which is the line for monochromatic light, is shown by the thick black line. Thin black lines indicate color zones. Black squares show monochromatic values, while small black circles are lamps.
doi:10.1371/journal.pone.0067798.g001

flowering and growth, and to stimulate fruit, vegetable and plant production. High intensity discharge (HID) lamps are popular for a large area of lighting applications in horticulture.

Artificial light is sometimes beneficial and sometimes detrimental to human health. Light has a profound impact on circadian systems and physiological functions. Because of this major impact and the growth in ALAN, there is evidence for a strong link between exposure to ALAN and disease. ALAN may be associated with an increased risk of breast cancer [15], [16], [17], [18], [19], [20], prostate and colorectal cancer [21], [22], and may also cause obesity [23], [24], diabetes [25] and depression [26]. Kloog et al. [20] report that women have 30–50% higher risk of breast cancer in the countries with the highest exposure to ALAN compared to those with the lowest exposure. One efficient way to monitor the effect of light on circadian systems is to evaluate melatonin suppression in biofluids. Melatonin, also called the sleeping hormone, is produced by the pineal gland and is released mainly during the night. Light induces a decrease in pineal melatonin hormone production and secretion; and it may also induce a phase shift in daily rhythms [27]. The discovery of a novel non-visual photoreceptor, with the photopigment melanopsin acting on our

circadian function [28], [29], has changed the understanding of that mechanism. Melanopsin responds to light by decreasing pineal melatonin hormone production, with a maximum spectral sensitivity at blue wavelengths. Two light variables, intensity and wavelength [30], are responsible for the suppression of melatonin, and an illuminance of only 1.5 lux may disrupt circadian rhythms [31]. According to our measurements, taken in Sherbrooke (Canada), an illuminance of ~2 lux is frequently encountered in urban bedrooms. Moreover, the human circadian system responds to millisecond flashes of light, delaying pineal melatonin production [32].

Indoor artificial lighting can be beneficial to humans. For example, light therapy is commonly prescribed by doctors against seasonal affective disorder [33]. It has also been shown that blue-enriched light during the day increases performance, vigilance and sleeping patterns [34]. Exposure to compact fluorescent light (CFL) at a correlated color temperature (CCT) of 6500 K (blue-enriched light) induced greater melatonin suppression, together with enhanced subjective alertness, well-being and visual comfort [35]. These results suggest that the selection of CFL with different CCT has a significant impact on circadian physiology and

cognitive performance at home and at work. Finally, the availability of electronic devices with backlit screens, which are often used at night, is rapidly increasing throughout the world. In comparison with backlit liquid crystal display (LCD), evening exposure to a light emitting diode (LED)-backlit computer screen (blue-enriched light) resulted in attenuated salivary melatonin and sleepiness levels, with a concomitant increase in cognitive performance associated with sustained attention and with working and declarative memory [36]. With the progress of LED technologies, it will be important to build electronic device screens in accordance with the circadian cycle [36].

Since the 1960s, outdoor artificial lighting has progressively changed from incandescent-bulbs (orange-yellow color, see Fig. 1) to a high pressure sodium form (HPS, orange) and more recently to LED (blue-enriched white light). The indoor artificial lighting that is most used is cool-white fluorescent lighting (FL) for public areas and incandescent, halogen and CFL bulbs for private areas with a large span of CCT. In lighting engineering, lower CCT (CCT<5000 K) is often called warm white light while high CCT (CCT>5000 K) is called cool white light. The use of artificially generated full spectrum daylight for human activities is not common, but they are used in the field of light therapy, greenhouse lighting and for pet shops. This kind of light is reputed to mimic natural sunlight, but it is not exact in this, as will be discussed later.

Reduction in star visibility, one of the best known impacts of outdoor ALAN, has been identified by astronomers. A first abatement for the protection of night sky quality over professional astronomical observatories was adopted in 1958 in the vicinity of Flagstaff, AZ, USA. Astronomers have always preferred the use of low pressure sodium (LPS) lamps. This technology shows quasi-monochromatic spectral power distribution (SPD) in the orange part of the visible spectrum. This kind of SPD is easy to filter out using optical filters and its color is not very efficient in terms of atmospheric scattering. In fact, when light travels into the atmosphere, it is partly scattered by molecules and aerosols and can be redirected toward an observer looking at the stars. This astronomical light pollution is then competing with the faint light coming from the universe. According to the Mie and Rayleigh scattering theories, blue light is scattered more efficiently than

other colors (e.g. blue scattering is about one order of magnitude more efficient than red scattering).

The first main difference between daytime and nighttime natural light is the intensity level, since sunlight, starlight and moonlight are not so different in terms of their relative SPD. Sunlight is around five to nine orders of magnitude brighter than typical ancestral nighttime illumination (natural or human-made). In modern times, nighttime artificial illumination in lit areas is typically four orders of magnitude higher than illumination from a natural starry sky without moonlight, and around one to two orders of magnitude higher in comparison to full moonlight illumination. Light from wood/oil burning, which was the most intense source of human-made lighting for centuries, contains a very low blue light contribution in comparison to sunlight. Nowadays, human-made light shows important differences in comparison to wood/oil burning and the Sun's SPD. The most significant nighttime natural lights, such as those from the stars, moon and wood/oil burning, can be described as a quasi black body spectrum showing a predominant continuum SPD, while many modern artificial lights include the addition of discrete spectral lines with a very low continuum contribution. Natural light contains all wavelengths of the visible spectrum while some artificial lights contain only a subset or are dominated by a few spectral lines. Artificially generated full spectrum daylight lamps, which were designed to approximate to sunlight, contain essentially all the wavelengths of the visible spectrum but with relatively important discrete spectral lines superimposed to a continuum. Tungsten incandescent technology SPDs (halogen tungsten incandescent and standard tungsten incandescent) are similar to natural light in terms of the relative importance of the continuum, but with a lower CCT compared to the sun, moon and the brightest stars. In other words, tungsten-based SPD shows a higher relative red contribution compared to the sun. Even if, with passing time, humans are increasing their light spill into the environment, not enough consideration has been given to the development of lighting devices that have an SPD comparable to natural light (either daytime or nighttime).

In the field of lighting engineering, the parameters used to describe light spectra are very crude and do not characterize SPD in detail. As an example, CCT and the color rendering index

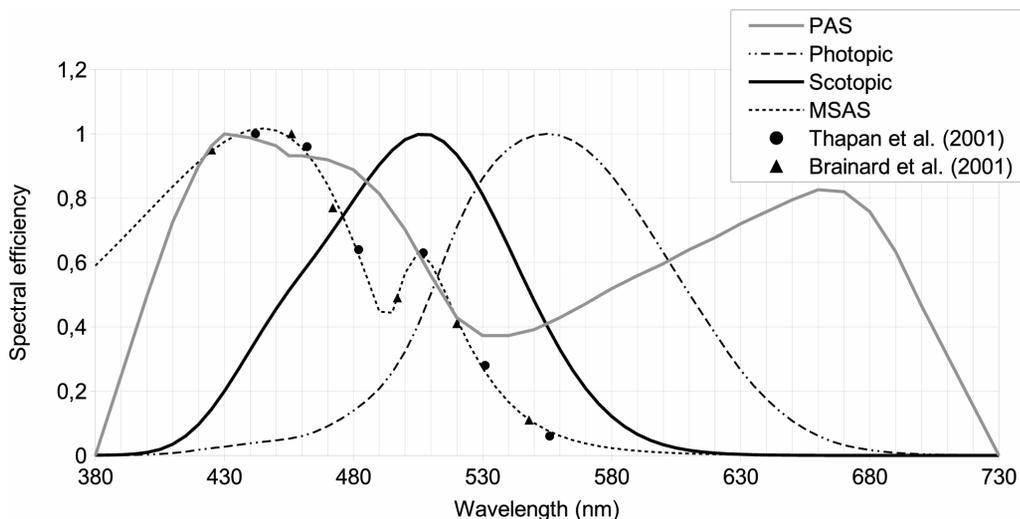


Figure 2. Various spectral sensitivities: human eye photopic [44] and scotopic [41] spectral sensitivity; MSAS: human melatonin suppression action spectrum; PAS: photosynthesis action spectrum.
doi:10.1371/journal.pone.0067798.g002

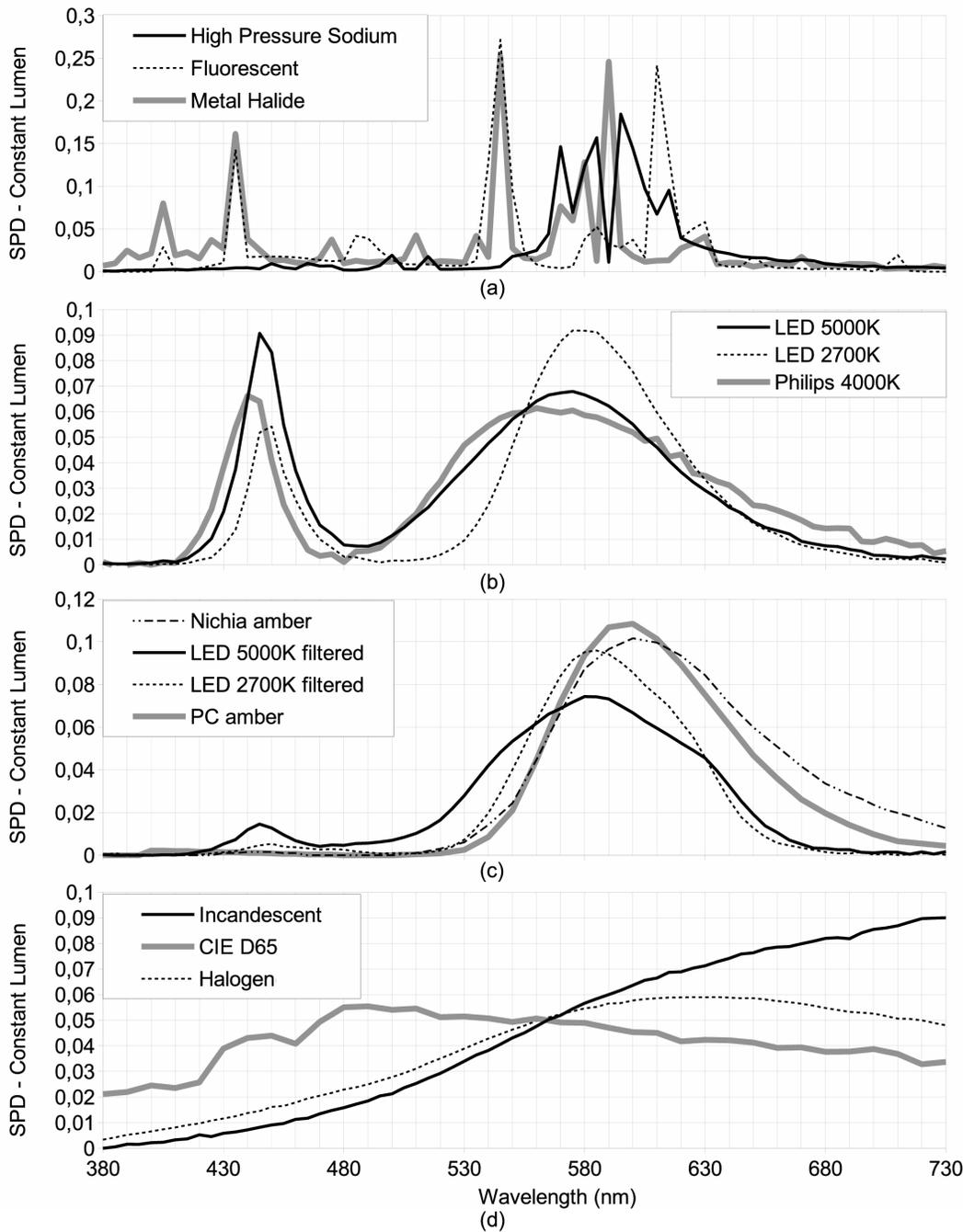


Figure 3. Constant lumen spectral power distributions. A subset of the spectrum used in this paper is shown here. Pane (a) shows HID lamps, pane (b) illustrates white LEDs, (c) shows low blue content broadband LEDs and (d) shows thermalized spectra such as for halogen and incandescent lamps and our reference D65 illuminant from the Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). D65 illuminant corresponds to a midday Sun in Western/Northern Europe with CCT~6500 K. LED filtering was performed using the *Equilib* optical filter commercialized by Ledtech International. doi:10.1371/journal.pone.0067798.g003

(CRI) are often used, but both parameters refer to a black body style of spectrum. CCT is the black body temperature that gives the same color sensation to the average human eye. CRI gives information concerning to what extent a lamp spectrum can be compared to a black body SPD in terms of its color rendering. A CRI value of 100 means that the lamp SPD is a perfect black body spectrum. CRI can be evaluated by comparing the color rendering of the source with a black body of the same CCT. This is why

tungsten halogen shows CRI~100, which is the optimal value of CRI. As stated above, most modern artificial light SPDs are very far from black body values. To obtain a good approximation of human eye color perception under sunlight, we need a CRI of 100 and a CCT of around 5800 K. One technology that is not far from this ideal target is the ceramic metal halide lamp (CCT~5400 and CRI~96), if we ignore spectral lines superimposed on the continuum spectrum.

Table 1. Parameters of the lognormal components of the MSAS fit.

Log normal #1		Log normal #2	
h_1	1.017	h_2	0.5239
λ_1	444.7	λ_2	509.3
w_1	111.9	w_2	30.18
b_1	-0.5785	b_2	0.6666

doi:10.1371/journal.pone.0067798.t001

Recently, LED technology from the field of solid state physics has been introduced to the lighting industry. LED emits a quasi-monochromatic SPD with a typical full width at half maximum (FWHM) of the order of 30 nm and a nominal wavelength depending on the material used to make the diode junction. Nowadays, the most efficient LEDs are the blue ones with a nominal wavelength ranging from 440 nm to 480 nm. Such light have of course a CCT and CRI that are very far from natural solar radiation. To overcome this drawback, a phosphorous material is placed between the blue LED and the observer. The role of that phosphorous material is to expand the narrow SPD of the blue LED into a broad band SPD. The resultant light is almost white but, when observing it with a spectrometer, one can clearly see that the white LED SPD can be described as including the addition of a broadband yellowish SPD with a significant remaining narrow band blue SPD.

The impact of artificial light on photosynthesis, on star visibility and on melatonin suppression is closely related to the concordance of the given spectral sensitivity of the phenomena being considered with the spectrum of the light. As an example, the photosynthesis action spectrum (PAS), or $P(\lambda)$, which represents the efficiency of each wavelength in inducing photosynthesis for averaged vegetable species, shows two peaks: one in the blue region at around 450 nm and the other in the red part of the spectrum at around 660 nm (see Fig. 2). Basically this means that an artificial light having a significant emission around these wavelengths is more likely to interfere with photosynthesis, especially during the night when there is no solar light. White LEDs are somewhat problematic for nighttime photosynthesis because their blue peak fits almost perfectly with the blue sensitivity peak of PAS.

The same kind of analysis can be made to estimate: 1- the impact of ALAN on star visibility by considering the low illumination eye spectral sensitivity (scotopic response), and 2- the potential impact of artificial light on circadian cycle disruption using the melatonin suppression action spectrum (MSAS).

In this paper, we will introduce three new parameters or indices to characterize a light spectrum in terms of its potential impact on respective biological processes: 1- melatonin suppression, 2- photosynthesis, and 3- scotopic vision. Our indices are intended to separate SPD from other factors acting on the given biological process. As an example, a minimum illumination is required to induce circadian cycle disruption, but our new index ignores this minimum illumination level. By using such an index, we will therefore have to assume that all other variables known to have an impact on the given biological process are favorable. In this way, the indices only deal with the potential impact of SPD shape. After defining the indices, we apply them to a variety of existing lighting technologies. We finally calculate the impact of atmospheric light scattering on indices values as a function of the distance between the light source and the observer, with and without cloud cover.

All comparisons are made considering a constant lumen output for each lamp.

Materials and Methods

Lamp Spectral Power Distribution Data

This experiment was conducted on the basis of a Lamp SPD Database (LSPDD) available online [37] and maintained by our research group. This dataset aims to provide independent information about the spectral characteristics of commercial lamp products. Among other information, we distribute SPDs in ASCII text format, allowing any other researchers to use this data for their own research. LSPDD is released under Creative Commons BY-NC-ND license. Some examples of SPDs from this database are shown in Figure 3.

Spectral Sensitivities

Various spectral sensitivities have been used for this study. The first, photopic spectral sensitivity $V(\lambda)$, was used in order to normalize the spectrum (see section on constant lumen normalization). The three other curves, which are 1- the melatonin suppression action spectrum (MSAS), 2- the photosynthesis action spectrum (PAS) and 3- the scotopic spectral sensitivity $V'(\lambda)$, were used to calculate the spectral impact on related biological processes. In the following sections, we will detail the choice of spectral sensitivity curves with respect to each process.

Melatonin suppression action spectrum. In 2001, data concerning the melatonin suppression action spectrum in the spectral range from 425 nm to 560 nm were published [28], [29] (triangles and circles on Fig. 2). MSAS represents to what extent each wavelength is efficient in suppressing melatonin production. Unfortunately, the dataset provided is quite small (only 12 data points) and contains no information about MSAS values in the very deep blue and UV-A regions (no data below 425 nm). In order to generate MSAS all over our spectral range, from 380 nm to 730 nm, we tried to fit the data using a combination of two log normal curves (see Eq. 3). We chose a 2 lognormal curves to capture a breakdown in the slope from the point at 507 nm, assuming this data to be reliable. Previous authors (e.g. [29]) used a vitamin A1 retinaldehyde photo pigment template to fit the data. They obtained a correlation of $R^2 = 0.91$ with $\lambda_{max} = 464\text{nm}$. Our 2 lognormal fit is shown by the dotted curve on Figure 2. The correlation of that fit was very good with $R^2 = 0.997$ and we obtained $\lambda_{max} = 445\text{nm}$. The fitted function and parameters are given in Table 1 and in Equation 1 (wavelength λ is in nm):

$$MSAS(\lambda) = h_1 \exp \left(- \ln(2) \left(\frac{\ln \left(1 + 2b_1 \frac{\lambda - \lambda_{max1}}{w_1} \right)}{b_1} \right)^2 \right) + h_2 \exp \left(- \ln(2) \left(\frac{\ln \left(1 + 2b_2 \frac{\lambda - \lambda_{max2}}{w_2} \right)}{b_2} \right)^2 \right) \quad (1)$$

where b represents asymmetry parameters, w the profile widths, λ_{max} the maximum wavelengths and h the function heights.

Since no constraint was exerted on the fit for wavelengths lower than 425 nm, we were unable to determine if the fitted MSAS remained good in this part of the spectrum, but we assumed that to be the case.

Photosynthesis action spectrum. Photosynthesis is a process in which plants, algae and some bacteria transform solar light into organic compounds. To infer the possible impact of artificial

Table 2. Photometric characteristics of lamps under direct lighting.

	x	y	CCT	CRI	MSI	IPI	SLI	Typ. Lumen/W
LPS	0.58	0.42	1720	-47	0.017	0.380	0.088	100–200
HPS	0.53	0.42	2010	19	0.118	0.509	0.231	85
Metal Halide	0.36	0.38	4500	48	0.624	0.640	0.577	120
Halogen	0.43	0.42	3200	92	0.377	0.829	0.597	24
Incandescent	0.48	0.43	2600	93	0.255	0.923	0.490	15
Fluorescent T8 cool-white	0.40	0.39	3730	82	0.435	0.606	0.608	90
LED 5000 K	0.36	0.36	4440	61	0.542	0.636	0.617	100
Philips LED 4000 K	0.38	0.39	4100	63	0.452	0.623	0.563	75
LED 2700 K	0.44	0.39	2760	37	0.285	0.541	0.359	69
Nichia Amber	0.57	0.42	1720	47	0.043	0.682	0.170	53
Lumiled PC Amber	0.57	0.42	1720	36	0.046	0.610	0.154	59
LED 5000 K Filtered	0.47	0.46	2910	55	0.172	0.470	0.380	82
LED 2700 K Filtered	0.52	0.45	2260	34	0.077	0.443	0.230	61
CIE D65	0.31	0.33	6504	100	1.000	1.000	1.000	-

x and y are the chromaticity coordinates [52], CCT is the Correlated Color Temperature, CRI is the Color Rendering Index, MSI is the Melatonin Suppression Index, IPI is the Induced Photosynthesis Index and SLI is the Star Light Index.
doi:10.1371/journal.pone.0067798.t002

lighting on photosynthesis, we needed to define the action spectrum to be used. Many authors have shown that action spectra change from one species to another (e.g. [38]). Chlorophyll

a and chlorophyll b are the two most abundant pigments in plants but we know of four other structures of chlorophyll molecules that are adapted to various environmental characteristics. As an

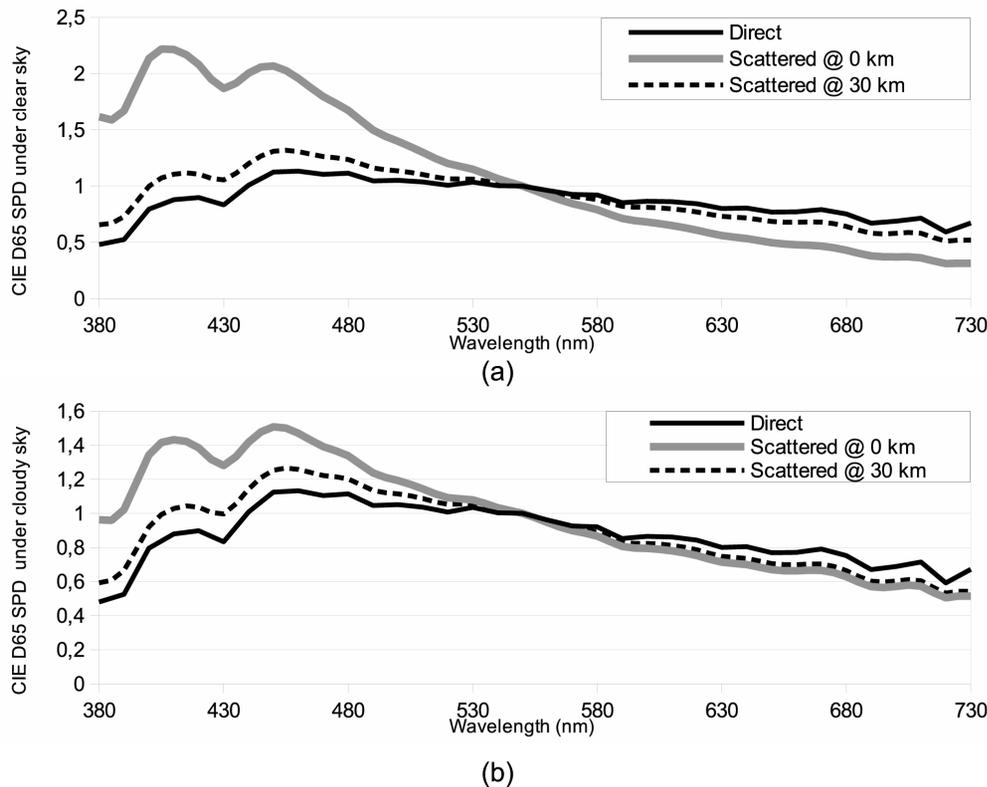


Figure 4. Spectral impact of the atmospheric transfer function as a function of the distance for the CIE D65 illuminant without cloud cover in (a) and with cloud cover in (b). Direct SPD relates to the original SPD before any atmospheric transformation. Compared to direct SPD, scattered SPD is bluer at short distances and redder at long distances.
doi:10.1371/journal.pone.0067798.g004

Table 3. Photometric characteristics of lamps after scattering into the atmosphere.

Distance (km)	Clear sky						Cloudy sky					
	MSI		IPI		SLI		MSI		IPI		SLI	
	0	30	0	30	0	30	0	30	0	30	0	30
LPS	0.008	0.014	0.241	0.349	0.053	0.078	0.012	0.015	0.317	0.359	0.072	0.081
HPS	0.099	0.113	0.342	0.465	0.188	0.218	0.107	0.114	0.430	0.477	0.210	0.221
Metal Halide	0.663	0.634	0.678	0.651	0.547	0.567	0.647	0.631	0.658	0.648	0.563	0.570
Halogen	0.329	0.364	0.592	0.761	0.544	0.583	0.350	0.369	0.718	0.779	0.571	0.587
Incandescent	0.203	0.241	0.572	0.820	0.431	0.474	0.225	0.245	0.759	0.846	0.461	0.478
Fluorescent T8 cool-white	0.403	0.427	0.549	0.594	0.561	0.595	0.417	0.430	0.579	0.598	0.585	0.598
LED 5000 K	0.500	0.533	0.601	0.631	0.598	0.610	0.517	0.536	0.618	0.633	0.608	0.611
Philips LED 4000 K	0.422	0.445	0.555	0.607	0.521	0.550	0.435	0.448	0.591	0.611	0.543	0.553
LED 2700 K	0.261	0.280	0.439	0.516	0.330	0.349	0.271	0.282	0.492	0.524	0.346	0.352
Nichia Amber	0.026	0.038	0.384	0.598	0.12	0.156	0.034	0.040	0.543	0.620	0.146	0.159
Lumiled PC Amber	0.034	0.042	0.357	0.540	0.107	0.140	0.039	0.043	0.491	0.558	0.131	0.144
LED 5000 K Filtered	0.136	0.162	0.336	0.437	0.315	0.362	0.151	0.165	0.406	0.446	0.349	0.367
LED 2700 K Filtered	0.056	0.071	0.288	0.403	0.173	0.214	0.065	0.073	0.370	0.415	0.203	0.218
CIE D65	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

doi:10.1371/journal.pone.0067798.t003

example, chlorophyll d is found in cyanobacteria and is more sensitive to far-red light (~710 nm). This particularity is useful, especially in a scattering medium, such as moderately deep water, where shorter wavelengths are removed by scattering along the light path. Chlorophyll a is common to all vegetable species, while chlorophyll b is mostly found in plants. These two pigments absorb more efficiently the blue and red part of the spectrum. This is in turn the reason why plants generally look green. However, along with these two important pigments, there exist some other accessory pigments, such as carotenes, that can be involved to a lower extent in the process of photosynthesis. The action spectrum of carotenes shows a blue absorption peak many times larger than the red peak, leading to an orange tint. Depending on the plant species, the relative importance of each pigment differs and the final action spectrum can therefore be seen as a combination of each individual action spectrum of the various pigments. We decided to use a global action spectrum, which will fit an averaged vegetation type. Such an action spectrum was adopted by the German Institute for Standardization and numbered DIN 5031-10 [39]. This action spectrum is shown by the gray line in Figure 2.

Scotopic spectral sensitivity. Scotopic vision occurs when luminance is below 10^{-3} cd/m² [40]. This is clearly the case for stargazing conditions, and we decided to use scotopic spectral sensitivity as a basis for estimating star visibility. We retained the scotopic vision curve adopted by the commission international de l'éclairage (CIE) in 1951 [41]. This curve is shown in Figure 2: one important feature to notice on this curve is that the sensitivity peak is displaced towards the blue compared to the photopic curve. Basically, this means that for the same lumen, a lamp with a greater contribution in the blue part of the spectrum should generate more disturbance to stargazing and nocturnal vision of humans in general.

Constant Lumen Normalization

In this work, one key element of spectral data processing was the normalization of all SPDs to a constant lumen output. We chose this normalization because most lamps are intended to illuminate

the environment in order to favor human activity. By normalizing the entire lamp SPD with the photopic spectral sensitivity, all the resultant SPDs produce the same stimuli to the human eye (ignoring color variations from one lamp to another). We assumed that lighting is designed in such a way that the desired luminance (L_v) reaching the eye is higher or equal to the minimum luminance required for the photopic vision regime of the human eye. The photopic vision luminance threshold can be set to 0.6 cd.m^{-2} [42]. In fact, when using a unified system of photometry [43] based on a combination of photopic and scotopic luminances, we obtained pure photopic luminance when $L_v = 0.6 \text{ cd.m}^{-2}$ or higher. Assuming a ground lambertian surface with a constant reflectance ρ , we were able to calculate the equivalent illuminance in lux (E_v) according to Equation 2:

$$E_v = \frac{L_v \pi}{\rho} \tag{2}$$

Assuming that luminance is higher or equal to 0.6 cd.m^{-2} and that for a typical summer city ground reflectance was 0.08 (based on asphalt reflectance from the NASA's ASTER spectral library), at least $E_v \approx 23$ lux is required to be within the photopic vision regime. For a snow-covered surface this minimal illuminance is $E_v \approx 2$ lux (snow reflectance of 0.98). This range of illuminance is representative of what is found on typical roadways.

The normalization method given by Equation 3 below defines the constant lumen SPD ($\Phi_n(\lambda)$)

$$\Phi_n(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda)}{\int_{380nm}^{730nm} \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \tag{3}$$

where $\Phi(\lambda)$ is the unnormalized SPD of the lamp and $V(\lambda)$ is the photopic spectral sensitivity function [44]. This function was derived from corrections to a previous revision of CIE 1931 -

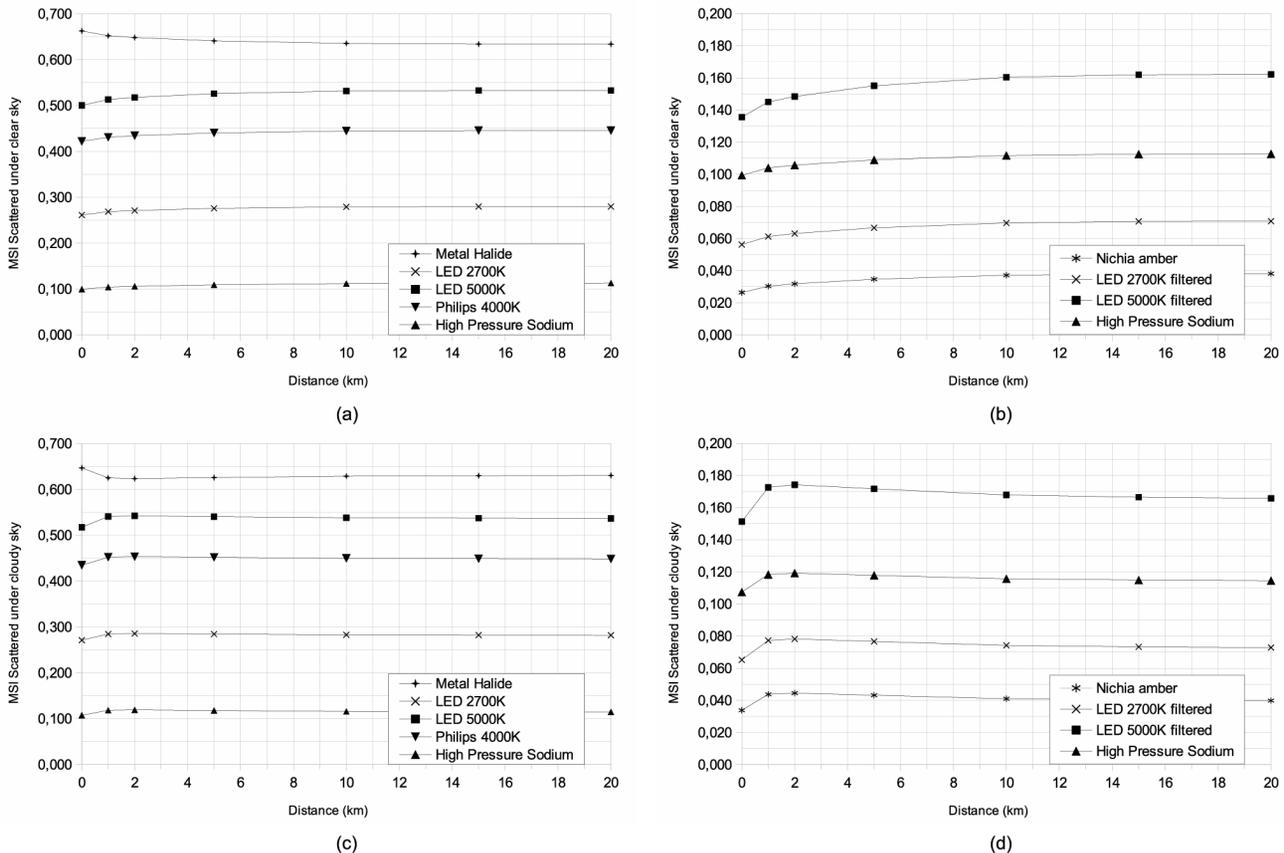


Figure 5. Atmospheric scattered Melatonin Suppression Index dependency, with distance between lamp and observer, (a) and (c) for usual street lamps and (b) and (d) for new technologies that reduce light pollution. The two upper plots (a) and (b) are for clear sky conditions, while (c) and (d) are for cloudy sky conditions.
doi:10.1371/journal.pone.0067798.g005

2 deg color matching functions [45]. $V(\lambda)$ is shown on Figure 2. To calculate the constant lumen normalization, the integration spectral range (380–730 nm) was chosen to include significant spectral sensitivities of the biological processes covered by the present work. More specifically, we used the limits given by the PAS.

Impact of Atmospheric Optics

Light sources usually have complex spectra and emit radiation in all directions. A proportion of the electromagnetic energy that is propagated upwards undergoes scattering and absorption processes before it is detected at the ground as diffuse radiation. It should be noted that the optical behavior of the diffuse radiation depends strongly on both the original spectra of the light source and its radiant intensity distribution as a function of the zenith angle z' and azimuth angle A' . If $I_0(z', A', \lambda)$ is the spectral radiance of an elementary surface, then the amount of electromagnetic energy delivered to and removed by an elementary atmospheric volume dv is

$$d^2E(h, z', A', \lambda) = I_0(z', A', \lambda) k_{ext}(h, \lambda) \exp \left\{ - \int_0^h \frac{k_{ext}(h', \lambda)}{\cos z'(h')} dh' \right\} dv dt d\Omega' \quad (4)$$

where k_{ext} is the extinction coefficient of an atmospheric environment, dt is a time interval, λ is the wavelength, and $d\Omega'$ denotes an elementary solid angle in which the radiance of the ground-based light source is received at altitude h . In Equation (4), we assumed that z' depends on the altitude due to vertical stratification of the air refractive index. For zenith angles smaller than 80 degrees and/or for short optical paths such a dependency can be neglected, and thus the factor $1/\cos z'$ can be placed before the integral (in curly brackets). In all other cases a corresponding optical air mass should be used instead of $1/\cos z'$. The exponential function in Eq. (4) is also called the transmission function:

$$T(h1, h2, z') = \exp \left\{ - \int_{h1}^{h2} \frac{k_{ext}(h', \lambda)}{\cos z'(h')} dh' \right\} \quad (5)$$

and typically characterizes the attenuation of electromagnetic radiation along the beam path. It is evident that any increased atmospheric turbidity implies a more rapid intensity decay in the atmospheric environment. However, elevated turbidity conditions are closely related to the increased number of scattering domains, which also make the scattering processes more efficient. Since the elementary volume dv can collect light from all directions, the amount of energy scattered within the elementary solid angle

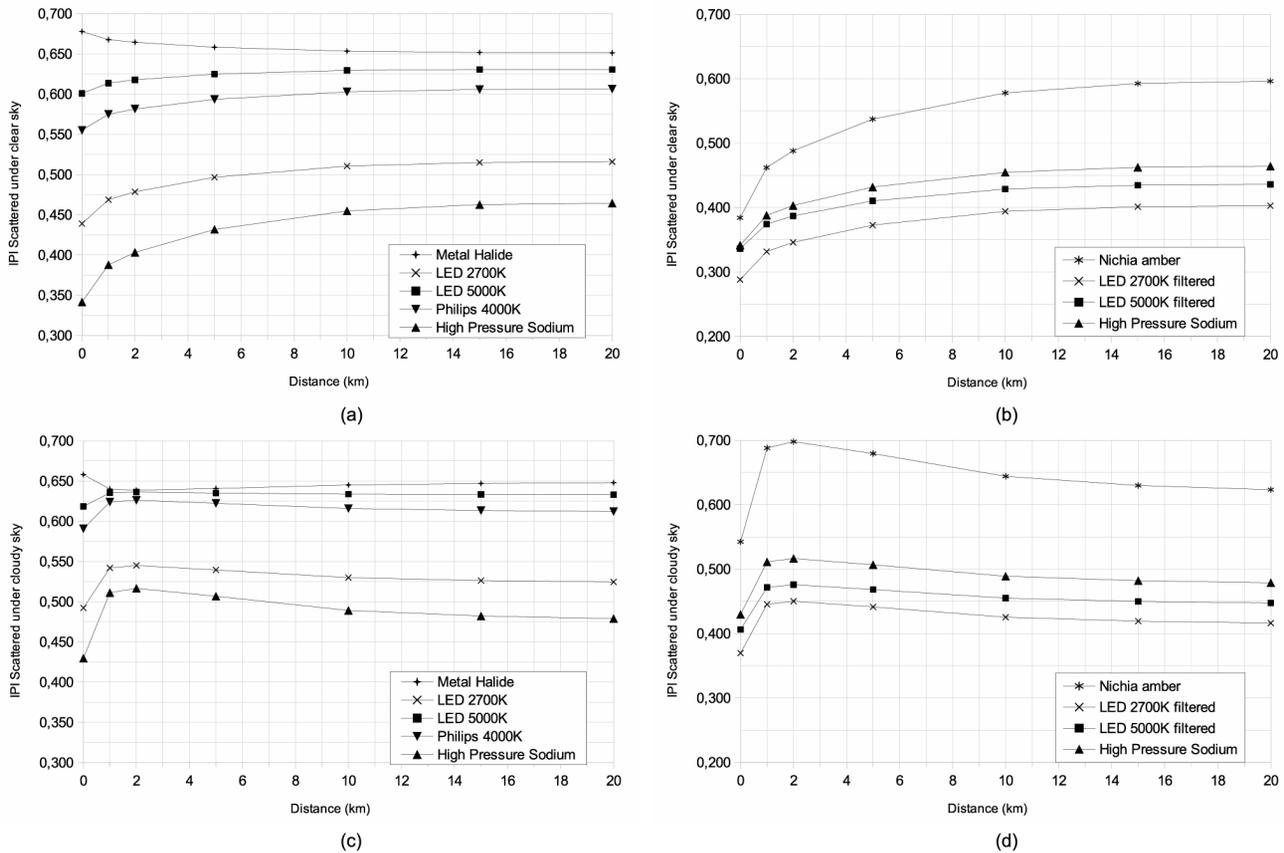


Figure 6. Same as Figure 5 but for Induced Photosynthesis Index.
doi:10.1371/journal.pone.0067798.g006

$d\Omega = \sin z dz dA$ will be:

$$d^2 E^S(h, z, A, \lambda) = \varpi k_{ext}(h, \lambda) dv dt d\Omega \int_{4\pi} I_0(z', A', \lambda) \exp\left\{-\int_0^h \frac{k_{ext}(h', \lambda)}{\cos z'(h')} dh'\right\} \frac{p(\theta, \lambda)}{4\pi} d\Omega' \quad (6)$$

where ϖ is the so-called atmospheric single scattering albedo [46], $p(\theta, \lambda)$ is the spectral scattering phase function, and z, A are the observational zenith and azimuth angles, respectively. The radiative energy scattered toward a hypothetical observer will be then given as:

$$dI^S(z, A, \lambda) = \frac{d^2 E^S(h, z, A, \lambda)}{dt d\Omega} \frac{dh}{dv} \frac{1}{\cos z} \quad (7)$$

since the photometry law dictates that the elementary amount of electromagnetic energy crossing an elementary surface $d\sigma$ is by definition $d^2 E^S = dI^S d\sigma d\lambda d\Omega dt$. The scattered beam we considered in Equation (6) crosses the elementary volume $dv = d\sigma dh$ under the inclination angle z , so the projection area is $d\sigma \cos z$ instead of $d\sigma$ (consult Eq. 7). The total amount of scattered radiation received at a measuring point is obtained as an integral

product of the spectral transmission function and elementary radiance, so:

$$I^S(z, A, \lambda) = \int_0^H T(0, h, z) dI^S(z, A, \lambda) \quad (8)$$

where H approaches infinity in a cloudless atmosphere. Under overcast conditions, H appears to be the altitude of the cloud base. The contribution of clouds to the spectral radiance is computed in the form of an additional term [47] (not shown here). One of most important parameters affecting the spectral radiance under overcast conditions is the spectral reflectance of the cloud. Green et al. [48] have shown that the average reflectance of a cloud is about 0.46, and we have used the same value in our computations.

In principle, k_{ext} , introduced in Equation (4), is a sum over all the extinction coefficients of the atmospheric constituents. However, we considered only aerosol and molecular extinction coefficients since these are dominant in a cloudless or undercloud atmosphere. Water vapor absorption was not considered because it becomes important only for wavelengths larger than 755 nm; in this work, we do not use wavelengths larger than 730 nm.

The optical thickness τ is used in the radiative transfer computations, rather than the extinction coefficient k_{ext} . The relationship between τ and k_{ext} can be written as follows:

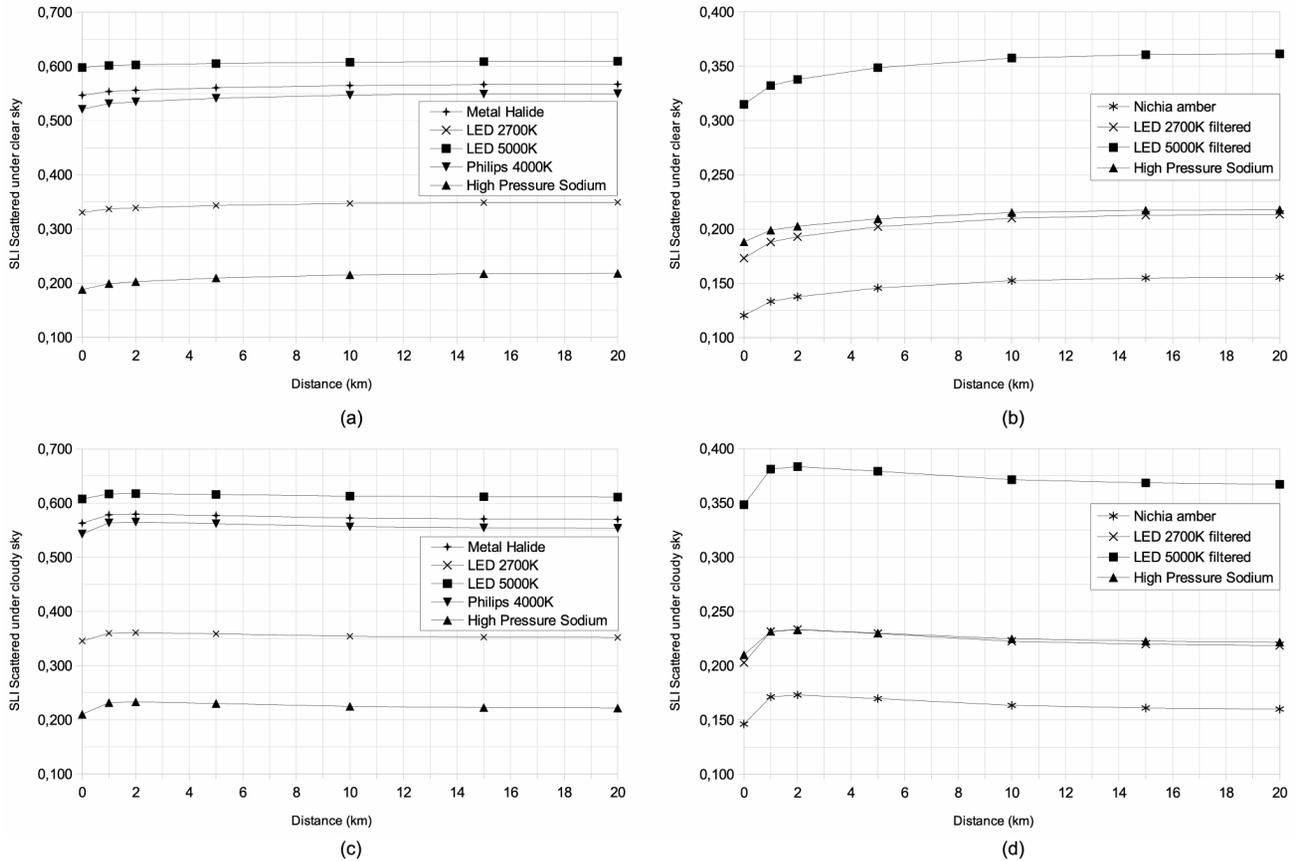


Figure 7. Same as Figure 5 but for Star Light Index.
doi:10.1371/journal.pone.0067798.g007

$$\tau(h, \lambda) = \int_h^{\infty} k_{ext}(\zeta, \lambda) d\zeta \quad (9)$$

Here, ζ is an integration variable that characterizes the altitude about ground level. It is commonly accepted that Rayleigh's optical thickness for the molecular atmosphere decreases exponentially with increasing altitude, h , i.e.

$$\tau_R(h, \lambda) = \tau_R(0, \lambda) \exp\left\{-\frac{h}{H_R}\right\} \quad (10)$$

where $H_R \cong 8 \text{ km}$ is the so-called scale height of the molecular atmosphere: it is the altitude up to which a homogeneous molecular atmosphere would extend. For the molecular optical thickness at ground level we used the following formula [49]:

$$\tau_R(\lambda) = 0.008735 \left(\frac{\lambda}{1000}\right)^{-4.08} \quad (11)$$

with the wavelength measured in nm. The concept of scale height is also frequently applied for aerosols. However, the aerosol scale height H_A is much lower than that for the molecular atmosphere. For aerosols we can write:

$$\tau_A(h, \lambda) = \tau_A(0, \lambda) \exp\left\{-\frac{h}{H_A}\right\} \quad (12)$$

where we employed $H_R \cong 1.5 \text{ km}$. This value correlates well with the results obtained e.g. by Horvath et al. [50]. For a typical clear atmosphere, we assumed values of $\tau_A(\lambda) = 0.2$ at $\lambda = 500 \text{ nm}$ with an Ångström coefficient of 1.0, because a set of experiments conducted in urban and suburban regions has shown that the Ångström exponent is close to unity (e.g. [51], [52]). The total optical thickness is computed as $\tau(h, \lambda) = \tau_R(h, \lambda) + \tau_A(h, \lambda)$.

The scattering angle θ used in Equation (6) is determined from spherical geometry in the form:

$$\cos \theta = \cos z \cos z' + \sin z \sin z' \cos(A - A') \quad (13)$$

Once the scattering angle has been determined in this way, the scattering pattern for a turbid molecular-aerosol atmosphere can be expressed as follows:

$$\begin{aligned} \varpi k_{ext}(h,\lambda) \frac{p(\theta,\lambda)}{4\pi} \\ = \frac{1}{4\pi} [k_{ext,R}(h,\lambda) p_R(\theta) + \varpi_A k_{ext,A}(h,\lambda) p_A(\theta,\lambda)] \end{aligned} \tag{14}$$

The expression given at the right hand side of Equation (14) has to be used in Equation (6). The molecular scattering phase function introduced with Equation (14) reads:

$$p_R(\theta) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \theta) \tag{15}$$

while the aerosol scattering phase function is determined based on Mie theory:

$$p_A(\theta,\lambda) = \frac{\lambda^2}{\pi} \frac{1}{k_{sca,A}(\lambda)} \int_{r=0}^{\infty} \left\{ \frac{|S_1(\theta,\lambda,r)|^2 + |S_2(\theta,\lambda,r)|^2}{2} \right\} f(r) dr \tag{16}$$

In this equation, $k_{sca,A} = \varpi_A k_{ext,A}$, with ϖ_A being the aerosol single scattering albedo. The dimensionless Mie functions $S_1(\theta,\lambda,r)$ and $S_2(\theta,\lambda,r)$ are weighted by a particle size distribution, $f(r)$, where r is the particle radius. It is expected that both $k_{sca,A}$ and f are altitude-dependent. The computations based on Equation (16) could be CPU-intensive if used in vast modeling. Therefore, some convenient approximations, such as the Henyey-Greenstein function [53],

$$p_A(\theta,\lambda) = \frac{1 - g^2(\lambda)}{[1 + g^2(\lambda) - 2g(\lambda) \cos \theta]^{3/2}} \tag{17}$$

are routinely applied in the use of radiative transfer tools. Although this function has no theoretical foundation, it can mimic the experimental scattering patterns quite well. The most significant advantage of this function is its analytical formulation. The asymmetry parameter $g(\lambda)$ used in Equation (17) is the cosine-weighted integral of the scattering phase function. In conjunction with the single-scattering albedo $\varpi_A(\lambda)$, the asymmetry parameter $g(\lambda)$ is the most important variable that is considered in any aerosol-related radiative problem. In principle, $\varpi_A(\lambda)$ can vary from 0 to 1, while the acceptable theoretical values of $g(\lambda)$ range from -1 to $+1$. Nevertheless, it has been well documented experimentally that typical values of $\varpi_A(\lambda)$ and $g(\lambda)$ range from 0.8 to 0.9 in urban and suburban regions [50], [54]. We have used $g = 0.8$ and $\varpi_A = 0.9$ for the visible spectrum.

We considered that photon removal from the light fixture to the observer can be calculated by assuming that direct light does not reach the observer because of obstacles such as trees, buildings or topography, and that the main source of illumination at remote sites is derived from the light dome. This assumption can of course be weak for an astronomical site located on top of a mountain from where a light fixture can be seen in a direct line of sight.

Reference Spectrum

In order to exclude any other parameter but wavelength, we decided to perform all calculations in reference to a standard SPD ($\Phi_{n(D65)}$). We chose the CIE D65 standard illuminant for this

purpose. This spectrum, or daylight illuminant, corresponds roughly to a midday sun in Western/Northern Europe. We also applied the constant lumen normalization to that spectrum, as explained by Equation 3. We considered that biological evolution occurred under sunlight, and assumed that the CIE D65 illuminant is closely related to the three biological processes studied here.

Spectral Indices Definition and Interpretation

Some attempt has been made in the past to define spectral indices related to photosynthesis and circadian action in the field of computer image rendering [55] and light and health research [56]. A melatonin suppression effect relative to HPS, and a ratio of the radiant power in a scotopic protected interval (440 nm - 540 nm) to photopic luminous flux, were also suggested in 2011 [30]. Starting from these anterior works, we set out to improve and standardize this concept, and to include the estimation of star visibility (scotopic vision). We also set out to explore the effect of the scattering of light through the atmosphere. In general, scattering processes may cause different effects in humans and other photosensitive species due to their different visual perceptions. Some species are even sensitive to the UV spectrum, as has been suggested in a recent study [57]. In this paper, the authors make a set of computations in order to estimate the real perception of three species by considering the spectral radiance produced by five different lamps. The findings are related specifically to the skyglow as perceived by humans (under scotopic vision) and two species of insects (one diurnal and one nocturnal). We suggested here three spectral indices ranging from 0 to ~ 1 to characterize independently the potential spectral impact of a lamp SPD on the three following biological processes: 1- melatonin suppression, 2- photosynthesis, and 3- scotopic vision. To isolate the spectral properties from other variables, we first calculated a weighted lamp constant lumen SPD, where the weight function is the spectral sensitivity of the biological process considered. We then performed the same calculation for a CIE D65 constant lumen SPD in place of the lamp SPD. Finally, we computed the ratio of the weighted constant lumen lamp SPD over the weighted constant lumen CIE D65 SPD. When atmospheric effects were considered, the atmospheric transfer function was applied to the SPD of both constant lumens so that we could always compare the lamp with the CIE D65 illuminant under the same conditions. The integration limits were set to the spectral extent of the photosynthesis action spectrum (380 nm to 730 nm).

According to this, we can write the Melatonin Suppression Index (MSI), the Induced Photosynthesis Index (IPI) and the Star Light Index (SLI) in Equations 18, 19 and 20, respectively.

$$MSI = \frac{\int_{380nm}^{730nm} \Phi_{n(lamp)}(r,\lambda) M(\lambda) d\lambda}{\int_{380nm}^{730nm} \Phi_{n(D65)}(r,\lambda) M(\lambda) d\lambda} \tag{18}$$

$$IPI = \frac{\int_{380nm}^{730nm} \Phi_{n(lamp)}(r,\lambda) P(\lambda) d\lambda}{\int_{380nm}^{730nm} \Phi_{n(D65)}(r,\lambda) P(\lambda) d\lambda} \tag{19}$$

$$SLI = \frac{\int_{380nm}^{730nm} \Phi_{n(lamp)}(r, \lambda) V'(\lambda) d\lambda}{\int_{380nm}^{730nm} \Phi_{n(D65)}(r, \lambda) V'(\lambda) d\lambda} \quad (20)$$

These indices can be easily calculated with the help of an OpenOffice spreadsheet file available at <http://galileo.graphyics.cegepssherbrooke.qc.ca/lpds/index.php?n=Site.Products>, if you have a SPD file to hand.

The three indices defined above enable the impact of the shape of the SPD to be evaluated. If we want to evaluate the global impact of a lamp we must also consider its illuminance. Since our indices use SPD normalized to a constant lumen (Eq. 3), we can thus obtain the global impact of a lamp by multiplying the indices by the illuminance of that lamp.

Results and Discussion

Spectral Indices for Direct Lighting

We first want to apply the above indices definitions to the special case of a direct sight towards a lighting device. By direct, we mean that we do not calculate any atmospheric effects. That special case does not only occur for direct sight, but can also be invoked when we observe a neutral reflecting surface lit by the lighting device. For example, when light trespass occurs, the light can enter a human eye after entering a bedroom by its window and then reflecting from a white wall. Table 2 shows the indices calculation results for a set of 13 lamps and for the CIE D65 illuminant. In our experiment, LED filtering was performed with the *Equilib* optical filter commercialized by Ledtech International. Together with the indices, we have provided in Table 2 the CCT approximation [58], CRI [59], x and y chromaticity coordinates [60], and typical spectral sensitivities (lumen/W). CCT, CRI, x and y were calculated for each lamp on the basis of their measured spectrum. The x and y chromaticity coordinates [60] for each lamp are given in Figure 1.

If we consider HPS as a reference device with MSI = 0.12, we can note that only LPS (0.02), Nichia amber (0.04), Lumiled Pc Amber (0.05) and LED 2700 K filtered (0.08) have a reduced potential impact on melatonin suppression (their MSI values are below the HPS value of 0.12, as shown in Table 2). So, these lamps should be favored for nighttime lighting in order to restrict the potential impact of ALAN on human health. It is important to note that, during the night, metal halides have an impact more than five times higher than HPS (0.64/0.12 = 5.33). This means that if the two lamps have the same lumen output, the metal halide will be 5.33x more efficient in suppressing melatonin, assuming that for both lamps the luminance is high enough to suppress melatonin. Similarly we can show that LED 5000 K, Philips LED 4000 K and fluorescent lamps are respectively 4.5x, 3.75x and 3.6x more efficient at suppressing melatonin than is HPS. If we need lighting during the daytime, LPS, phosphor-converted amber LEDs and LED 2700 K filtered lamps should not be used; during the daytime, we need to select the highest MSI values. In our lamp selection, the maximum MSI was obtained using the metal halide lamp (0.62), followed by the LED 5000 K (0.54), Philips LED 4000 K (0.45) and fluorescent (0.43) lamps. None of these are as efficient as the Sun itself, here represented by CIE D65 (1.0).

Making the same analysis for the impact on photosynthesis using IPI values, we determined that only LPS, LED 5000 K-filtered and LED 2700 K-filtered lamps had a lower impact than

HPS. The least beneficial lamp during the night is therefore clearly the incandescent lamp, with an index of 0.92, followed by the halogen lamp (0.83). However, during the daytime these lamps can be advantageously used for plant growth to compensate for shorter days and lower Sun illuminance in winter at high latitudes. This can also be helpful for greenhouse-based industries. Incandescent and halogen lamps showed a high IPI, but their lumen per watt ratio is low, so that even if they are efficient for photosynthesis per unit of lumen, they are not efficient for photosynthesis in terms of energy consumption. The IPI of phosphor-converted amber LEDs, metal halide and fluorescent lamps were found to be very similar (ranging from 0.61 to 0.68), even with very different SPDs (orange vs. white light). More specifically, phosphor-converted amber LEDs do not have any significant blue emission, in clear contrast to metal halide and fluorescent lamps (Fig. 3). However, if we look to the shape of PAS in Figure 2, we can see that both lamps have a similar IPI because phosphor-converted amber LEDs show a high emission in the region of the PAS red peak (~660 nm). For metal halide, the SPD shows an important line that coincides well with the blue PAS peak (~430 nm). Fluorescent light shows important lines in both the blue and red region.

The SLI is applicable to low illuminance conditions, which are basically satisfied during the nighttime. In this case, we used the scotopic spectral sensitivity to calculate the index so that it was not only applicable to the astronomical observation but more generally to low-light human vision. If again we take HPS as a reference (0.23), we can show that only LPS (0.09), phosphor-converted amber LEDs (0.17 and 0.15) and LED 2700 K filtered lamps (0.23) are better or equivalent to HPS for restricting the impact on observation of the night sky. LPS and phosphor-converted amber LEDs are better than HPS. The lamps with the most negative impact on night sky observation are, in decreasing impact order, LED 5000 K (0.62), fluorescent (0.61), halogen (0.6), metal halide (0.58) and Philips LED 4000 K (0.56). These lamps produce ~2.5x more astronomical light pollution than HPS for the same lumen output. It is of particular concern that white LEDs show such a high spectral impact on the dark sky. Groups and communities involved in dark sky protection initiatives should be aware of that, given the attractiveness of this technology to lighting professionals and local authorities. LED is a long lasting technology (50,000–100,000 hours), and is relatively efficient and easily controllable/dimmable. In order to constrain astronomical light pollution or to increase star visibility while changing HPS to cool white LED lighting, we recommend reducing newly installed LED lumens by a factor of 2.5x compared to the HPS lumen originally installed.

Spectral Indices for Indirect Lighting

We applied the atmospheric radiative transfer model described in the section ‘Impact of Atmospheric Optics’ to each lamp described in Table 2, and for a variety of distances from lamp to observer, ranging between 0 km and 30 km. This time, we did not observe the lamp directly but instead observed the light scattered by the surrounding atmosphere. It is important here to understand that the same model was applied to all SPDs, even the CIE D65. In other words, we compared the scattered light from a lamp with the reference CIE D65, both scattered to the same distance. In Table 3, we show the results for each index and for two distances (0 and 30 km). Atmospheric scattering increases the blue part of the SPD at 0 km. However, with increasing distance, the blue light is preferentially removed by extinction. This effect has a theoretical foundation and can be explained in terms of radiative transfer principles. If the distance from a hypothetical observer to

the light source is small enough, the emitted light beams propagate through the atmosphere along short optical paths before they are backscattered toward the ground and detected by an optical device. Short optical paths imply a low attenuation due to extinction, and thus the scattering efficiency is by far the greatest modulator of downwelling radiation at surface level. Since an Ångström coefficient of 1.0 has been used in our numerical simulations, the aerosol optical thickness $\tau_A(\lambda)$ appears to be an inverse function of the wavelength. It is well-known that the Rayleigh optical thickness behaves like $\lambda^{-4.08}$ (Eq. 11), so molecular scattering definitely dominates in the blue part of the spectrum. In our model, the aerosol optical thickness is considered to be $\tau_A(500\text{ nm}) = 0.2$ at the ground. Under these conditions, the Rayleigh optical thickness exceeds that for aerosols by 50% at 400 nm, but τ_R is almost three times smaller than τ_A at 650 nm. In addition, the aerosol backscatter is much weaker than Rayleigh theory dictates (compare e.g. Plate 10.7 b in [61] with Fig. 2.3 in [62]). Both factors, the low extinction at short optical paths and the fairly efficient molecular backscatter, result in a specific spectral behavior of diffuse radiation in which Rayleigh and aerosol optics appear to be important. This coincides very well with our numerical computations, which show that diffuse irradiance behaves like $\lambda^{-2.7}$ in the blue part of the visible spectrum. Thanks to a fairly steep decrease of $\tau_R(\lambda)$ with increasing wavelength, the spectral behavior of diffuse irradiance shows a functional dependency $\lambda^{-1.9}$ at the red edge of the visible spectrum. As the distance between an observer and light source increases, the situation changes significantly. The beams that form the light field near the measuring point are propagated at low elevation angles, thus traveling along long optical paths. In such a case, the aerosol optics become dominant due to the enhanced forward scatter and increased scattering efficiency. It should be noted that the ratio of forward to side scatter can exceed the value of 100 (or even more) for a polydispersed system of aerosol particles, while it is only 2:1 in the case of Rayleigh scattering. For these reasons, Rayleigh scatter is considered to have a marginal effect on sky glow if observations are made at larger distances from the light source. The spectral dependency of diffuse irradiance therefore mimics a function of λ^{-1} rather than λ^{-4} , because the large optical path means that the light beams interact with an elevated number of aerosol particles. On the one hand, the higher number of scattering domains translates to an increased scattering efficiency, while on the other hand it results in a more efficient intensity decay, due to the exponential form of the transmission function (Eq. 5). One could say these two effects act against each other. In a very simplified case, the energy of the scattered radiation or radiance (Eqs. 6 or 8) could behave like Xe^{-yX} , where X monotonically increases with growth in the optical path or number of scattering events (y is an arbitrary scaling parameter). This function peaks at $X_{peak} = y^{-1}$, so the extinction exceeds the scattering efficiency if $X > X_{peak}$, i.e. if the optical path is considerably large. The spectral dependency of diffuse irradiance is then further distorted, resulting in a functional behavior λ^{-a} with $a < 1$. The numerical experiments performed in this paper have shown that $a \cong 0.82$ for distances of about $d = 15$ km, $a \cong 0.77$ at $d = 30$ km, and $a \cong 0.75$ at $d = 60$ km. For very distant light sources, the coefficient a approaches its asymptotic behavior. The limit value of a depends on the mutual interaction of the aerosol phase function and the extinction and scattering efficiencies. Figure 4 illustrates the complexities of the atmospheric effects. This figure shows the SPD of illuminant CIE D65 as a function of distance for two different atmosphere ((a) clear sky and (b) cloudy

sky). All SPDs have been normalized at 550 nm to facilitate the comparison.

For most of the lamps shown in Table 3, MSI, IPI and SLI are lower in scattered light compared to direct lighting indices. The only exception is the metal halide lamp for which MSI and IPI are slightly higher after scattering. This is probably because of the presence of a significant deep blue line at around 405 nm. No other spectra in our selection show such an important emission at a very low wavelength where scattering is very efficient. The same phenomenon is not observed for SLI, because the scotopic spectral sensitivity curve is almost zero at 405 nm.

To obtain a better understanding of the distance dependency of each index, we produced plots showing the indices as a function of distance (Figs. 5, 6, 7) under clear and cloudy sky conditions. These figures show the complex behavior of indices with distance. We separated each figure into two cases, namely new technologies intended to reduce light pollution in the right-hand plots (b and d), and the more standard technologies that are shown in the left-hand plots (a and c). For all plots, we showed the HPS case as a common reference. The two upper plots (a and b) are for clear sky conditions, while the cloudy conditions are shown in the lower two plots (c and d). Only lamps used in street lighting are plotted. For all cases the scattered indices become closer to direct values with increasing distance. Under cloudy sky conditions, all indices show a peak located at a distance of approximately 2 km. This kind of curve inflexion is not observed under clear sky conditions.

Conclusions

In this paper, we introduced three new indices that can be used to characterize the SPD characteristics of any lighting device. These indices have been designed to allow a quick estimation of the potential impact of different lamp spectra on melatonin suppression, photosynthesis and star visibility. Indices have also been designed to separate the impact of the shape of the SPD from other factors, such as illuminance levels or the angular photometry of the lamp.

We used the indices to compare different lighting technologies in term of their spectral impacts. In particular we found that LPS, phosphor-converted amber LEDs and LED 2700 K-filtered lamps have a lower potential impact on melatonin suppression in comparison to HPS. LPS, LED 5000 K-filtered and LED 2700 K-filtered lamps show a lower impact on photosynthesis compared to HPS. Only LPS, phosphor-converted amber LEDs and LED 2700 K-filtered lamps are better than or equivalent to HPS in restricting the impact on star visibility. We also showed that atmospheric scattering under clear or cloudy skies generally reduces the value of the indices in comparison to direct light, except for metal halide lamps for which the effect is opposite.

During daytime, if we want to obtain the highest spectral impact, we should favor metal halide for increased melatonin suppression, while phosphor-converted amber LEDs and metal halide lighting is the best for stimulating photosynthesis.

It is important to realize that the spectral indices introduced here should not be considered alone in making a complete evaluation of the impact of a given lamp installation. As an example, a lamp with low MSI (low relative blue content) can impact significantly on melatonin suppression when the lamp illuminance is so high that the absolute blue flux becomes important. Basically, a global evaluation can be obtained by multiplying the index by the illuminance.

We hope that these indices will form some kind of standardization in characterization of lighting technologies, and that the lighting industry will provide such indices in the same way as they currently provide CCT or CRI, for example. Finally we consider

that these indices will favor the design of new environmentally and health-friendly light devices, by providing a means of quickly evaluating the relative potential impact of a device at the design stage.

Acknowledgments

We want to thank Pierre Goulet, Mont-Mégantic National Park Director and responsible for the 1st International Dark Sky Reserve, for the fruitful conversations that have been helpful in rendering our work more attractive

References

1. Cinzano P, Falchi PF, Elvidge CD (2001) The first world atlas of the artificial night sky brightness. *Mon Not R Astron Soc* 328: 689–707.
2. Longcore T, Rich C (2004) Ecological light pollution. *Front Ecol Environ* 2(4): 191–198.
3. Rich C, Longcore T (2006) Ecological consequences of artificial night lighting. Washington DC: Island Press. 478 p.
4. Navara KJ, Nelson RJ (2007) The dark side of light at night: physiological, epidemiological, and ecological consequences. *J Pineal Res* 43: 215–224.
5. Bruce-White C, Shardlow M (2011) A review of the impact of artificial light on invertebrates: Putting the backbone into invertebrate conservation. Peterborough, UK: Buglife – The Invertebrate Conservation Trust. 32 p.
6. Buchanan BW (2006) Observed and potential effects of artificial night lighting on Anuran amphibians. In: Richt C, Longcore T, editors. Ecological consequences of artificial night lighting. Washington DC: Island Press. 192–200.
7. Gauthreaux SA, Belser CG (2006) Effects of artificial night lighting on migrating birds. In: Rich C, Longcore T, editors. Ecological consequences of artificial night lighting. Washington DC: Island Press. 67–93.
8. Kuijper DPJ, Schut J, Van Dullemen D, Toorman H, Goossens N, et al. (2008) Experimental evidence of light disturbance along the commuting routes of pond bats (*Myotis dasycneme*). *Lutra* 51(1): 37–49.
9. Salmon M (2003) Artificial night lighting and sea turtles. *Biologist* 50: 163–168.
10. Calo F, Bardonnet C (2011) Les tortues marines et la pollutions lumineuses sur le territoire français. Rapport GTMF-SPN 2. Paris: MNHN-SPN. 40 p.
11. Fritsches KA (2012) Australian Loggerhead sea turtle hatchlings do not avoid yellow. *Mar Freshw Behav Physiol* 45(2): 79–89.
12. Nightingale B, Longcore T, Simenstad A (2006) Artificial night lighting and fishes. In: Rich C, Longcore T, editors. Ecological consequences of artificial night lighting. Washington DC: Island Press. 257–276.
13. Perry G, Fischer NR (2006) Night lights and reptiles: Observed and potential effects. In: Rich C, Longcore T, editors. Ecological consequences of artificial night lighting. Washington DC: Island Press. 169–191.
14. Briggs WR (2006) Physiology of plant responses to artificial lighting. In: Rich C, Longcore T, editors. Ecological consequences of artificial night lighting. Washington DC: Island Press. 389–406.
15. Hansen J (2001) Light at night, shiftwork, and breast cancer risk. *J Natl Cancer Inst* 93(20): 1513–1515.
16. Blask DE, Brainard GC, Dauchy RT, Hanifin JP, Davidson LK, et al. (2005) Melatonin-depleted blood from premenopausal women exposed to light at night stimulates growth of human breast cancer xenografts in nude rats. *Cancer Res* 65(23): 11174–11184.
17. Stevens RG (2009) Light at night, circadian disruption and breast cancer: Assessment of existing evidence. *Int J Epidemiol* 38(4): 963–970.
18. Stevens RG (2011) Testing the light at night (LAN) theory for breast cancer causation. *Chronobiol Int* 28(8): 653–656.
19. Kloog I, Haim A, Stevens RG, Barchana M, Portnov BA (2008) Light at night co-distributes with incident breast but not lung cancer in the female population of Israel. *Chronobiol Int* 25(1): 65–81.
20. Kloog I, Stevens RG, Haim A, Portnov BA (2010) Nighttime light level co-distributes with breast cancer incidence. *Cancer Causes Control* 21: 2059–2068.
21. Kloog I, Haim A, Stevens RG, Portnov BA (2009) Global co-distribution of light at night (LAN) and cancers of prostate, colon, and lung in men. *Chronobiol Int* 26(1): 108–125.
22. Haim A, Yukler A, Harel O, Schwimmer H, Fares F (2010) Effects of chronobiology on prostate cancer cells growth in vivo. *Sleep Science* 3(1): 32–35.
23. Spiegel K, Tasali E, Penev P, Van Cauter E (2004) Sleep curtailment in healthy young men is associated with decreased leptin levels, elevated ghrelin levels, and increased hunger and appetite. *Ann Intern Med* 141(11): 846–850.
24. Fonken LK, Workman JL, Walton JC, Weil ZM, Morris JS, et al. (2010) Light at night increases body mass by shifting the time of food intake. *Proc Natl Acad Sci U S A* 107(43): 18664–18669.
25. Spiegel K, Knutson K, Leproult R, Tasali E, Van Cauter E (2005) Sleep loss: A novel risk factor for insulin resistance and Type 2 diabetes. *J Appl Physiol* 99(5): 2008–2019.
26. Bedrosian TA, Fonken LK, Walton JC, Haim A, Nelson RJ (2011) Dim light at night provokes depression-like behaviors and reduces CA1 dendritic spine density in female hamsters. *Psychoneuroendocrinology* 36: 1062–1069.

for potential end users. We also want to thank Ledtech International and Hydro Sherbrooke for providing some of the lamp fixtures used for this study

Author Contributions

Conceived and designed the experiments: MA JR. Performed the experiments: MA JR MK. Analyzed the data: MA JR MK. Contributed reagents/materials/analysis tools: MA JR MK. Wrote the paper: MA JR MK.

27. Lockley SW, Brainard GC, Czeisler CA (2003) High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light. *J Clin Endocrinol Metab* 88(9): 4502–4505.
28. Thapan K, Arendt J, Skene DJ (2001) An action spectrum for melatonin suppression: Evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *J Physiol* 535(1): 261–267.
29. Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, Byrne B, Glickman G, et al. (2001) Action spectrum for melatonin regulation in humans: Evidence for a novel circadian photoreceptor. *J Neurosci* 21(16): 6405–6412.
30. Falchi F, Cinzano P, Elvidge CD, Keith DM, Haim A (2011) Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. *J Environ Manage* 92: 2714–2722.
31. Wright Jr KP, Hughes RJ, Kronauer RE, Dijk DJ, Czeisler CA (2001) Intrinsic near-24-h pacemaker period determines limits of circadian entrainment to a weak synchronizer in humans. *Proc Natl Acad Sci U S A* 98(24): 14027–14032.
32. Zeitzer JM, Norman FR, Fiscaro RA, Heller HC (2011) Response of the human circadian system to millisecond flashes of light. *PLoS ONE* 6(7): e22078.
33. Rosenthal N, Blehar MC, editors (1989) Seasonal affective disorders and phototherapy. New York: Guilford Press. 350 p.
34. Viola AU, James LM, Schlangen LJM, Dijk DJ (2008) Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality. *Scand J Work Environ Health* 34(4): 297–306.
35. Chellappa SL, Steiner R, Blattner P, Oelhafen P, Götz T, et al. (2011) Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: Can blue-enriched light keep us alert? *PLoS ONE* 6(1): e16429.
36. Cajochen C, Frey S, Anders D, Späti J, Bues M, et al. (2011) Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance. *J Appl Physiol* 110: 1432–1438.
37. LS Data – Light Pollution Data Server. Available: <http://galileo.graphyics.cegepsherbrooke.qc.ca/lpds/index.php?n=Site.LSData>. Accessed 2013 May 30.
38. Clark JB, Lister GR (1975) Photosynthetic action spectra of trees - I. Comparative photosynthetic action spectra of one deciduous and four coniferous tree species as related to photorespiration and pigment complements. *Plant Physiol* 55: 401–406.
39. DIN 5031–10 (2000) Optical radiation physics and illuminating engineering - Part 10: Photobiologically effective radiation, quantities, symbols and action spectra. Germany: Deutsches Institut Fur Normung EV (German National Standard).
40. Bisketzi N, Polymeropoulos G, Topalis FV (2004) A mesopic vision approach for a better design of road lighting. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems* 3(5): 1380–1385.
41. Wyszecki G, Stiles WS (1982) Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae, second edition. New York: Wiley. 935 p.
42. Rea MS, Freyssinier JP (2009) Outdoor lighting: Visual efficacy (ASSIST recommends, Volume 6, Issue 2). New York: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute. 14 p.
43. Rea MS, Bullough JD, Freyssinier-Nova JP, Bierman A (2004) A proposed unified system of photometry. *Light Res Technol* 36(2): 85–111.
44. Vos JJ (1978) Colorimetric and photometric properties of a 2-deg fundamental observer. *Color Res Appl* 3: 125–128.
45. Judd DB (1951) Report of U.S. secretariat committee on colorimetry and artificial daylight. In: Proceedings of the twelfth session of the CIE, Stockholm. Paris: Bureau Central de la CIE. 1(7): 11 p.
46. Thomas GE, Stammes K (2002) Radiative transfer in the atmosphere and ocean. Cambridge: Cambridge University Press. 548 p.
47. Leckner B (1978) The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface – elements of a model. *Sol Energy* 20: 143–150.
48. Green RN, Wielicki BA, Coakley JA, Stowe LL, Hinton PO'R, et al. (1997) Clouds and the Earth's radiant energy system (CERES): Algorithm theoretical basis document. CERES inversion to instantaneous TOA fluxes, Release 2.2, June 2. Available: http://ceres.larc.nasa.gov/documents/ATBD/pdf/r2_2/ceres-atbd2.2-s4.5.pdf. Accessed : 2013 May 30.
49. Kocifaj M (2007) Light-pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources. *Appl Optics* 46: 3013–3022.
50. Horvath H, Arboledas LA, Olmo FJ, Jovanović O, Gangl M, et al. (2002) Optical characteristics of the aerosol in Spain and Austria and its effect on radiative forcing. *J Geophys Res* 107: 4386–4403.

51. Pesava P, Horvath H, Kasahara M (2001) A local optical closure experiment in Vienna. *J Aerosol Sci* 32: 1249–1267.
52. Gushchin GP (1988) The methods, instrumentation and results of atmospheric spectral measurements. Leningrad: Gidrometeoizdat. 200 p.
53. Braak JC, de Haan JF, Van der Mee CVM, Hovenier JW, Travis LD (2001) Parameterized scattering matrices for small particles in planetary atmospheres. *J Quant Spectrosc Radiat Transf* 69: 585–604.
54. Toublanc D (1996) Henyey-Greenstein and Mie phase functions in Monte Carlo radiative transfer computations. *Appl Opt* 35: 3270–3274.
55. Geisler-Moroder D, Dür A (2010) Estimating melatonin suppression and photosynthesis activity in real-world scenes from computer generated images. In: CGIV 2010/MCS'10 5th European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision and 12th International Symposium on Multispectral Colour Science, Joensuu, Finland. 346–352.
56. Gall D, Bieske K (2004) Definition and measurement of circadian radiometric quantities, light and health - non-visual effects. In: Proceedings of the CIE symposium '04 : 30 September–2 October 2004, Vienna, Austria. 129–132.
57. Lamphar HAS, Kocifaj M (2013) Light pollution in ultraviolet and visible spectrum: Effect on different visual perceptions. *Plos One* 8(2): e56563.
58. McCamy CS (1992) Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates. *Color Res Appl* 17(2): 142–144.
59. CIE 13.3 (1995) Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources. Paris: Commission Internationale de l'Éclairage. 20 p.
60. CIE (1932) 1931 Commission Internationale de l'Éclairage Proceedings. Huitième session. Cambridge: Cambridge University Press, 19–29.
61. Mishchenko MI, Travis LD, Lacis AA (2002) Scattering, absorption, and emission of light by small particles. Cambridge: Cambridge University Press. 445 p.
62. Kokhanovsky AA (2004) Light scattering media optics: Problems and solutions. Berlin, Heidelberg, New York: Springer. 320 p.

Skyglow Changes Over Tucson, Arizona, Resulting From A Municipal LED Street Lighting Conversion

John C. Barentine^{a,b,*}, Constance E. Walker^{c,a}, Miroslav Kocifaj^{d,e},
František Kundracik^e, Amy Juan^f, John Kanemoto^g, Christian K. Monrad^h

^a*International Dark-Sky Association, 3223 N. 1st Ave, Tucson, AZ 85710 USA*

^b*Consortium for Dark Sky Studies, University of Utah, Sterling Sill Center, 195
Central Campus Dr, Salt Lake City, UT 84112 USA*

^c*National Optical Astronomy Observatory, 950 N. Cherry Ave, Tucson, AZ 85719 USA*

^d*ICA, Slovak Academy of Sciences, Dúbravská Road 9, 845 03 Bratislava, Slovakia*

^e*Faculty of Mathematics, Physics, and Informatics, Comenius University, Mlynská
Dolina, 842 48 Bratislava, Slovakia*

^f*University of Arizona, Tucson, AZ 85719 USA*

^g*Natomas Unified School District, 1901 Arena Blvd., Sacramento, CA 95834 USA*

^h*Monrad Engineering, Inc., 1926 E. Fort Lowell Road Suite 200, Tucson, AZ 85719
USA*

Abstract

The transition from earlier lighting technologies to white light-emitting diodes (LEDs) is a significant change in the use of artificial light at night. LEDs emit considerably more short-wavelength light into the environment than earlier technologies on a per-lumen basis. Radiative transfer models predict increased skyglow over cities transitioning to LED unless the total lumen output of new lighting systems is reduced. The City of Tucson, Arizona (U.S.), recently converted its municipal street lighting system from a mixture of fully shielded high- and low-pressure sodium (HPS/LPS) luminaires to fully shielded 3000 K white LED luminaires. The lighting design intended to minimize increases to skyglow in order to protect the sites of nearby astronomical observatories without compromising public safety. This involved the migration of over 445 million fully shielded HPS/LPS lumens to roughly 142 million fully shielded 3000 K white LED lumens and an expected concomitant reduction in the amount of visual skyglow over Tucson. SkyGlow Simulator models predict skyglow decreases on the order of 10-20% depending on whether fully shielded or partly shielded lights are in use. We tested this prediction using visual night sky brightness estimates and luminance-calibrated, panchromatic all-sky imagery at 15 locations in and near the city. Data were obtained in 2014, before the LED conversion

began, and in mid-2017 after approximately 95% of ~18,000 luminaires was converted. Skyglow differed marginally, and in all cases with valid data changed by $< \pm 20\%$. Over the same period, the city's upward-directed optical radiance detected from Earth orbit decreased by approximately 7%. While these results are not conclusive, they suggest that LED conversions paired with dimming can reduce skyglow over cities.

Keywords: light pollution, skyglow, sky brightness, modeling, site testing

1. Introduction

The conversion of the world's lighting from conventional to solid-state lighting (SSL) technologies is among the most significant changes to the way we light our world at night since the invention of electric light itself. Environmental pollution from artificial light at night (ALAN) has already reached significant levels in many parts of the world. [1] Improved luminous efficacy among SSL products is hypothesized to lead to a "rebound" effect, furthering global dependence on ALAN as cost savings are redirected into the deployment of additional outdoor lighting. [2, 3, 4, 5] The conversion to SSL has also brought significant changes to the spectrum of artificial light radiated into the global nighttime environment, shifting a considerable amount of emission to shorter wavelengths. A number of known and suspected hazards to wildlife ecology and human health have been identified that are thought to result from exposure to short-wavelength ALAN. [6, 7, 8]

The spectrum shift in new SSL systems is also thought to yield increases to skyglow, which is the diffuse luminescence of the night sky attributable to light emitted from sources on the ground that is scattered back toward the ground from molecules and aerosols in the Earth's atmosphere. Enhanced short-wavelength light emissions associated with blue-rich white LED are subject to strong Rayleigh scattering in the atmosphere, resulting in higher scattering probabilities, associated with the formation of skyglow, than light

*Corresponding author

Email addresses: john@darksky.org (John C. Barentine), cwalker@noao.edu (Constance E. Walker), miroslav.kocifaj@savba.sk (Miroslav Kocifaj), frantisek.kundracik@fmph.uniba.sk (František Kundracik), protecthindag@gmail.com (Amy Juan), kanemotojohn@hotmail.com (John Kanemoto), chrismonrad@monradengineeringinc.com (Christian K. Monrad)

of longer wavelengths. Radiative transfer models therefore predict that conversion from older technologies to solid-state lighting should result in more skyglow, even when the system outputs are matched lumen-for-lumen. [9] Clouds, fog, and other sources of opacity at optical wavelengths in the lower atmosphere amplify skyglow [10], leading to higher sky luminance values and resulting increases in ambient light level at ground level in cities. As the world increasingly adopts SSL, we expect the associated problems to be exacerbated unless the lighting conversions involve corresponding reductions in the overall light levels employed. However, relatively few communities to date have experimented with reducing lighting levels as they convert their municipal lighting systems to solid state.

It is often held in media coverage of SSL conversions that moving from legacy lighting technologies to light emitting diode (LED) lighting will reduce “light pollution” because almost all new luminaire designs are fully shielded and LEDs are highly directional light sources. [11, 12, 13, 14] However, a casual survey of the same media stories reveals that most municipalities are driven toward converting by lower total cost of ownership enabled by the improved luminous efficacy of LED luminaires. The rebound effect and impact of shifting the spectrum of light emitted by street lighting systems to short wavelengths can displace the potential benefits of SSL to communities. Claims about the purported benefits of SSL may well be dubious, and a lack of sound research can perpetuate unfounded myths about these benefits. [15, 16, 17] To the extent that conversion to SSL results in changes to skyglow over cities, there is a strong need to measure conditions before and after the implementation of LED conversions and identify strategies that successfully ensure they do not aggravate the problem.

Tucson, Arizona (U.S.), elected to reduce lighting levels during the conversion of its municipal street lighting system from a mixture of high-pressure sodium (HPS) and low-pressure sodium (LPS) to 3000 Kelvin correlated color temperature white LED in 2016-2017. The design of Tucson’s LED lighting system involved the migration of over 4.45×10^8 fully shielded HPS/LPS lumens to roughly 1.42×10^8 fully shielded 3000 K white LED lumens, resulting in a total lumen reduction of 62.8%. The maximum illuminance directly beneath each street light at the road surface dropped from 60 lux to 17 lux (-72%) as HPS lighting was removed and replaced with LED luminaires. The program was undertaken by the City of Tucson in part to help protect the assets of several major professional astronomical observatories located nearby, whose collective impact to the local economy

is significant. [18]

We obtained an interesting and unique dataset in the Tucson area in 2014 that serves as a point of comparison for skyglow after the 2016-17 LED conversion. The data were part of a student project to inter-compare different methods of characterizing the brightness of the night sky through both direct detection of sky radiance and indirect sensing of sky brightness using visual limiting stellar magnitude estimates. While the project goal was to inter-calibrate different measurement methods, the data set forms a record of sky brightness conditions in and around Tucson in the years just prior to the LED conversion. Further, the data were collected in early summer, when weather conditions are typically most favorable for night sky brightness measurements. New data collected after the LED conversion is complete (or nearly so) may reveal changes in skyglow attributable to the new lighting system, if street lighting comprises a significant component of the city's overall light emission budget. [19]

This dataset enables us to address a fundamental question: did the skyglow over Tucson change as the result of reduced lighting levels implemented during the municipal LED street lighting conversion? Any net change would be attributable to a combination of greater molecular scattering, as a consequence of fractionally more short-wavelength light emitted by the new LED system, and lower overall light emission, resulting from the City of Tucson's decision to reduce the number of lumens emitted per City-owned luminaire. Since the molecular content of the lower atmosphere fluctuates only by a few percent, we cannot attribute any net change of skyglow to only molecular scatter.

Aerosols are the only atmospheric constituent that can vary significantly, thus modulating skyglow. There is no doubt that backscatter of light is mostly due to molecular scatter, but this is true only if: (1) the particles are large compared to air molecules; and, concurrently, (2) the number concentration of aerosol particles is several orders of magnitude smaller than that of molecules. The size distribution of particles in urban air is conventionally characterized by three modes. The smallest nucleation mode contains particles sized $< 0.1 \mu\text{m}$ and is formed by condensation of hot vapor from combustion sources and from chemical conversion of gases to particles. These particles, or even the smallest fraction of accumulation-mode particles, can affect the backscatter significantly also, because the number concentration of these particles is usually high. [20] We therefore endeavored to obtain night sky radiance measurements under comparable

atmospheric conditions in order to reduce the chance that differing turbidity would mask skyglow effects properly attributable to light source changes.

Assuming that (1) the reduction of lumens during the LED conversion outweighed the increased upward light scattering contribution resulting from shifting the spectrum of lighting toward shorter wavelengths, and (2) municipal street lighting accounts for a significant fraction of the overall upward-directed light emissions from Tucson, we expected skyglow to decrease over Tucson as a consequence of the conversion. Further, the expected reduction in skyglow was simply proportional to the reduction in the municipal street lighting emission, adjusted according to the anticipated increase in light scattering. This is because no other changes were made: luminaire mounting height, pole spacing, target albedo and other factors were left unchanged during the conversion. In order to address the research question, we compared the observations with results of radiative transfer model runs describing both the “before” and “after” conversion scenarios. We also measured change in the upward-directed radiance from the city as seen by Earth-orbiting satellites.

This paper is organized as follows. First, in Section 2, we describe the radiative transfer model used to predict relative skyglow changes after the completion of the Tucson LED conversion project. Next, in Section 3, we review the site selection and measurement methods for ground-based skyglow observation campaigns in 2014 and 2017. The results are presented in Section 4 along with an analysis in the context of our modeling outcomes. Finally, in Section 5, we summarize our work, point out its limitations, and comment on the applicability of the results to other LED conversion efforts.

2. SkyGlow Simulator Predictions

2.1. Light clustering approach

The algorithm we have used to model the sky radiance and luminance distributions for Tucson is based on the theory developed by Kocifaj [21] and improved in later releases. The software solution “Skyglow v.5” is publicly available¹ and can be used to simulate sky radiance or luminance patterns over any place in the world. The SkyGlow tool allows for clustering of the light-emitting areas that share similar properties such as spectral power distribution (SPD), average number of lumens installed per unit land area, angular emission pattern, and the spectral reflectance of the ground.

¹<http://skyglow.sav.sk/#simulator>



Figure 1: Model of the Tucson city and suburban region illustrating the 18 polygonal modeling units referred to in the text. The inset image at right shows a 2017 NASA/NOAA *Suomi National Polar-orbiting Partnership* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day-Night Band (VIIRS-DNB) image of the area at night, at approximately the same spatial scale and orientation.

The City of Tucson was divided into 18 light-emitting areas that share common physical properties (Figure 1), meaning that, e.g., uplight levels or built-up area densities fall within the same categories. Our analysis was based on Google Earth, Day-Night Band (DNB) maps made using the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) instrument aboard the NASA/NOAA *Suomi National Polar-orbiting Partnership* satellite [22], and NASA “City Lights” that is part of Google Earth gallery [2]. A complete inventory of luminaires in the central part of Tucson was available for City-owned lights, and a partial inventory for other lights. However, the informa-

²https://www.gearthblog.com/blog/archives/2012/02/the_city_lights_of_earth.html.

tion on lumens installed in suburban areas was completely missing; it was thus determined numerically and normalized using the VIIRS database.

The procedure was simple. First we analyzed a few areas in central Tucson, where total emission spectra were computed as the collective contribution of HPS, LPS and LED lamps, taking into account the information on initial lamp lumens and luminaire efficiency. We found that the ratio of VIIRS-DNB uplight to lumens installed varies only slightly for these areas ($\pm 4\%$); thus, the same ratio was used to estimate lumens installed in other suburban zones. Such calibration was possible also because the mean ground albedo does not significantly change across the city territory.

Using the luminaire inventory and the above calibration we found that, prior to the LED conversion, the central part of Tucson emitted 8.52×10^8 photopic lumens, constituting a mixture of 93% HPS, 5.8% LPS, and 1.2% 3000 K white LED. We determined that the legacy street lighting system comprised 4.81×10^8 lumens, which was 56.4% of lumens installed from all sources, both public and private. The City of Tucson chose to replace the legacy system with new LED luminaires whose output is 63% less than the existing lighting.

City planners estimated that the LED lamps would emit 1.79×10^8 lumens if operated at maximum power, leaving 3.71×10^8 lumens (43.6% of all light emissions) unchanged. This results in a total of 5.50×10^8 lumens from all sources, and represents a 35.4% reduction from the pre-retrofit condition if the new luminaires were operated at full power. However, the City elected to further dim the new LED lights to 90% of their maximum power upon installation, so the total post-retrofit emission of the city was 5.33×10^8 lumens, for a total reduction of 37.6% from the pre-retrofit condition.

2.2. Model lighting scenarios and inputs

The models in this study comprise two scenarios:

M1: Status quo ante (pre-retrofit condition): 8.52×10^8 lumens installed prior the LED conversion

M2: Post-retrofit, dimming to 90% output: 5.33×10^8 lumens after LED conversion (56.4% lumens undergo conversion, while the lights are dimmed to 90% of maximum power). The total post-conversion lumen output, I_{post} , is obtained from the sum of (90%-dimmed) street lighting and unchanged, non-street lighting:

$$I_{\text{post}} = (0.9 \times 1.79 \times 10^8 \text{ lm}) + (0.436 \times 8.52 \times 10^8 \text{ lm}). \quad (1)$$

The best we can do to get closer to at least a partially-controlled experiment is to make both the numerical modeling and field measurements under similar sky conditions (clear sky, low dust, low relative humidity, no moonlight, no twilight, no Milky Way in the zenith). The input parameters to the model were kept constant unless stated otherwise. For instance, the aerosol optical depth (AOD) at the reference wavelength ($\lambda = 500$ nm) was 0.1, while the Ångström exponent was $\nu = 1.3$. The latter parameter models AOD as an exponential function of wavelength: $\text{AOD} \sim \lambda^{-\nu}$. Models were computed for five locations in and around Tucson, shown in Figure 2.

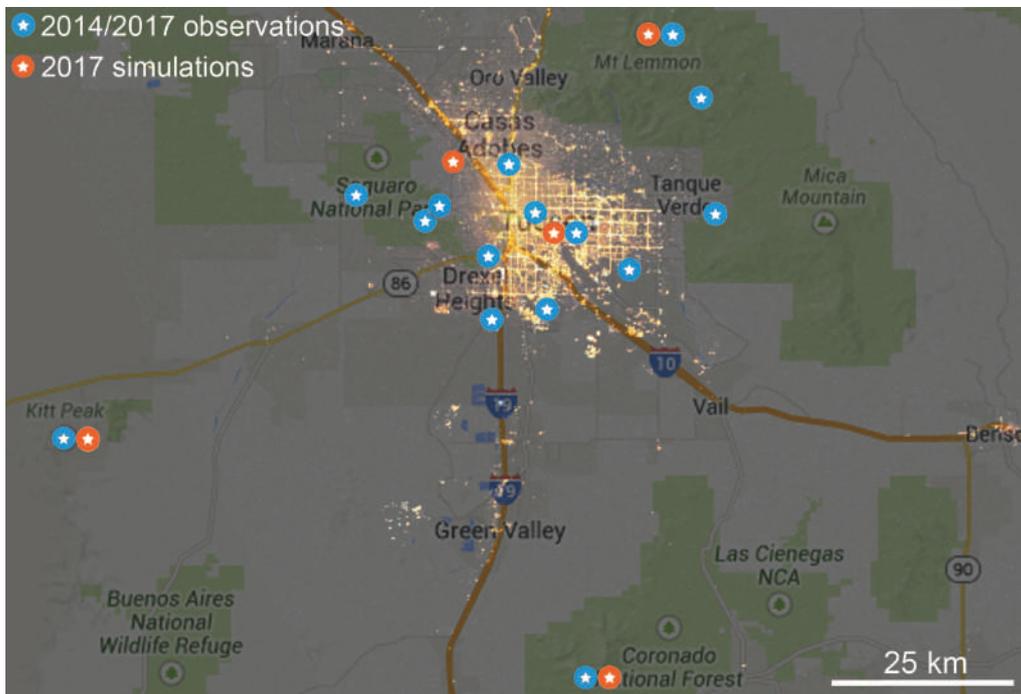


Figure 2: A nighttime optical-light photograph of the Tucson, Arizona, vicinity from low Earth orbit shown superimposed on a background political map of the area; locations of SkyGlow Simulator model runs are indicated with red symbols and 2014/2017 night sky brightness measurements with blue symbols. Light at night image: National Aeronautics and Space Administration Astronaut Photo ISS030-E-61700, obtained on 31 January 2012. Background map: copyright 2017 Google, INEGI, used with permission.

2.3. Results of model runs

To illustrate results exemplifying the city core, skyglow modeling and baseline/post conversion empirical measurements are indicated for the Reid

Park Brown Conservation Learning Center ($32^{\circ}12'29.7''\text{N}$ $110^{\circ}55'17.8''\text{W}$; see the red cross in Figure 3). The luminance distribution as well as the percent change when transitioning from M1 to M2 for Reid Park are shown in Figure 4. The zenith luminance and horizontal illuminance computed were approximately 3.5 mcd m^{-2} and 25 lux , respectively.

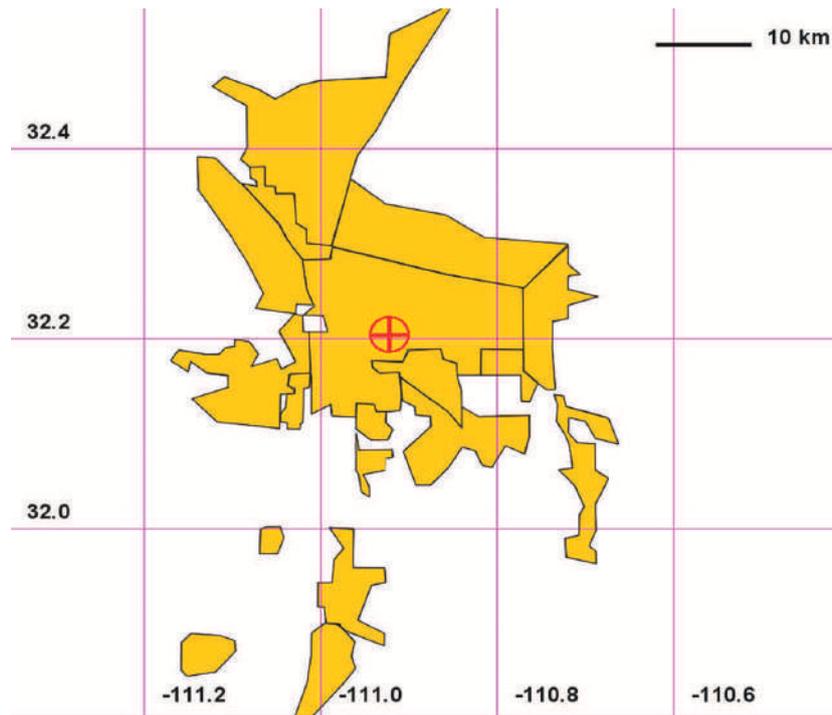


Figure 3: A polygonal map of Tucson with a discrete observation site (Reid Park Brown Conservation Learning Center) marked by the red cross in the red circle. This site represents model predictions typical of the city core.

Bear in mind that the focus of the model is not on absolute values, but on the relative influence of lumen output change, given the uncertainty of the normalization coefficient for the VIIRS data and the intent of this study to examine skyglow relative to the situation prior to the LED conversion. This is why the rightmost plot in Figure 4 and consequent graphical outputs show the percent change only. For example, a value of +20% for model M2 means a conversion with LED lights dimmed to 90% increases the sky glow by 20% or 1.2 times the M1 result, whereas a negative value of -20% means the sky glow will decrease by 20% or 0.8 times the M1 value.

The percent change was computed for every radiance/luminance or ir-

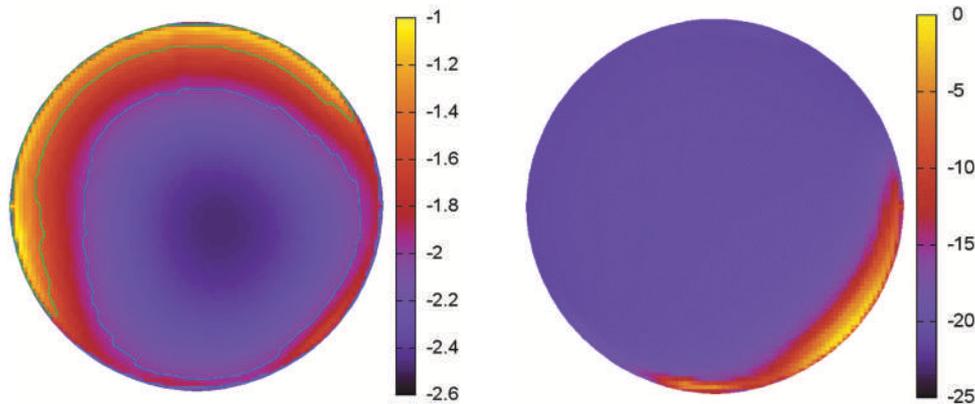


Figure 4: Model outputs for the Reid Park Brown Conservation Learning Center site. Left: All-sky luminance distribution in units of $\log_{10} \text{ cd m}^{-2}$. Right: Percent change in all-sky luminance when transitioning from M1 to M2. North is up and east is at right in both images. Because backscatter dominates over other forms of scattering in and near urban environments, the largest changes in skyglow are seen in directions opposite the azimuthal position of the dominant skyglow source.

radiance/illuminance. A change of -20% was predicted for almost all computed luminance data for Reid Park, while no change is only observed in the part of the sky opposite to the azimuthal position of the dominant light source; compare the left and right plots in Figure 5, which shows the percent changes predicted by the models for the transition from M1 to M2. Here we have assumed that fully shielded LED lights are mixed with lights that are not properly shielded, implying that the direct uplight ranges from 0% to 5%.

Computations were made for different combinations of F and AOD values in order to identify the statistical range of the optical effects we studied. There is therefore no reason a priori to expect that the red bars in Figure 5 will be completely isolated from green bars and blue bars. Instead, a partial overlap of blue, green and red bars is seen in the figure. Additionally, the arrangement of blue, green and red bars in the figure is due to a non-trivial combination of different optical effects; e.g., spectral power distribution and atmospheric optics, including an intensive scattering in the blue, but also an elevated value of AOD in blue. While a large AOD implies more scattering events and increased scattering efficiency, it also means more rapid intensity decay because of increased extinction. AOD is low for red wavelengths, so the scattering efficiency and extinction are both low. The order in which the colored bars appear in Figure 5 does not depend on the spectral ar-

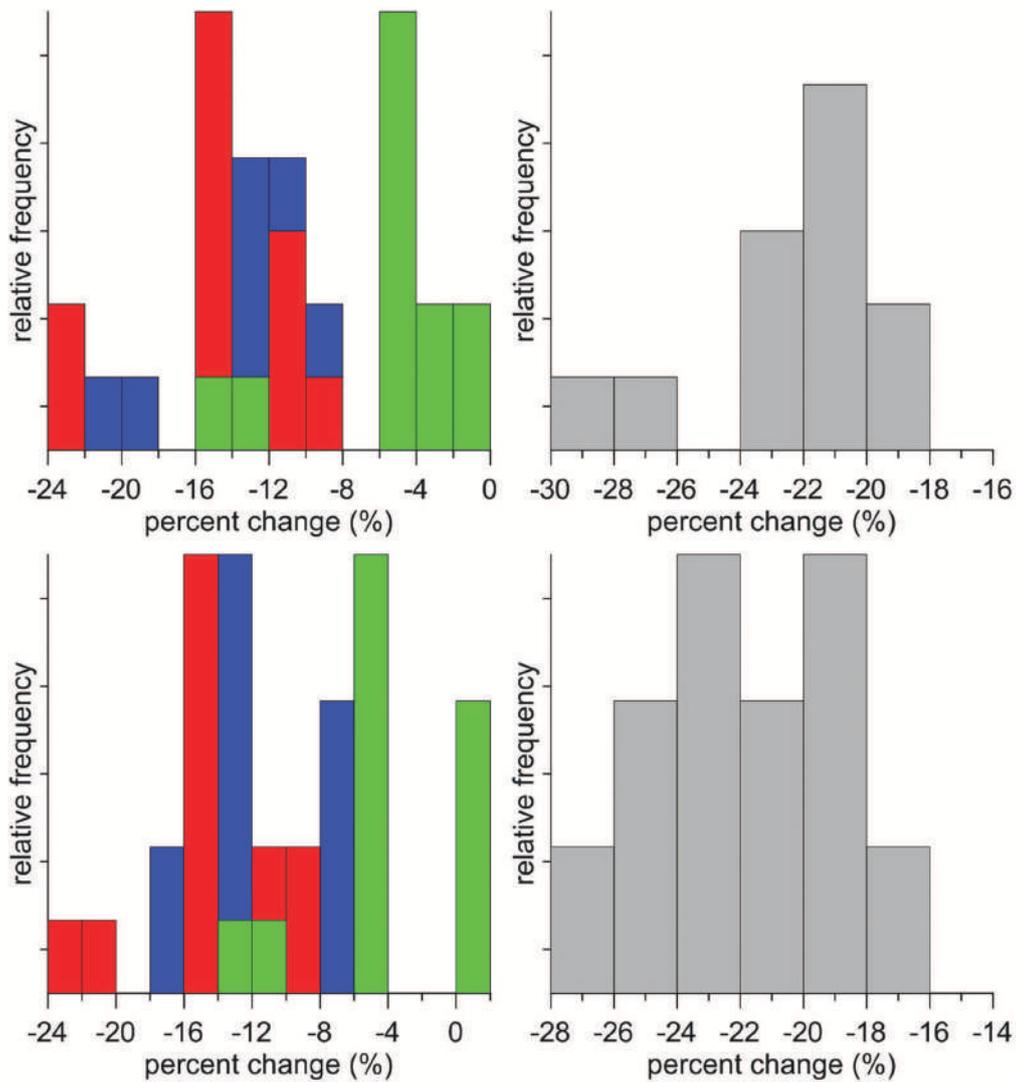


Figure 5: The percent change of skyglow in the transition from M1 to M2. M1 represents the theoretical sky state in Reid Park prior LED conversion, while M2 is for sky after conversion with LED lights dimmed to 90% of maximum power. The plots at top left are for diffuse horizontal irradiance in the blue, green and red parts of the spectrum. Diffuse scotopic illuminance predictions are shown at top right. The bottom panels are for zenith radiance in the blue, green and red (bottom left), and zenith luminance (bottom right).

rangement of the optical effects studied, since the computations were made under differing combinations of F and AOD.

The spectral irradiances before and after the LED conversion change only slightly with AOD. This is because backscatter typically dominates other effects when forming skyglow in the territory of a city or in its vicinity. We know from light scattering theory that backscatter from aerosol particles is typically low compared to side-scatter or forward scatter, so solid and liquid particles are the strongest modulators of ground-reaching radiation in distant places. However, the effect that aerosols have on skyglow is lowered if the horizontal distance to a light source is small, i.e., when large scattering angles become decisive in forming the diffuse light of a night sky.

In the example shown in the left panel of Figure 4, the dominant light sources are situated along directions ranging from northeast to southwest along the horizon. The percent change in luminance is shown in the right panel, where the maximum values are seen toward the southeast. The maximum value in terms of percent change is near zero, whereas the minimum value of -20% is seen over almost all of the rest of the sky. Note that the percent change is not an amplitude, and that the sign of the change is therefore important. Since we expect that the luminance decrease resulting from changes to the whole-city light emission in the LED conversion affects the entire sky, the percent change in luminance in the direction of backscatter is close to zero ($-20\% + 20\% = 0\%$), explaining the perhaps counterintuitive appearance of the figure.

When cities are large in geographic extent ($>20\text{-}30$ km) and the distance between the light source and observer is comparable to the city size, the dominant source of ground-reaching irradiance is the fraction of light radiated directly into the upward hemisphere, F . For Reid Park, the percent change in clear-sky spectral irradiance was predicted to increase by a factor of two when transitioning from $F = 0\%$ to $F = 5\%$. However, an overcast sky has the opposite behavior, yielding a decrease of spectral irradiance by a factor of two (not shown here). This is because for $F = 0\%$, photons are effectively “trapped” in city territory where backscattering dominates the formation of skyglow, while photons emitted at small upward angles reach the cloud level at relatively large horizontal distances and therefore do not increase irradiance in the city.

Although all LED lamps were assumed to emit only downwards, we have also introduced 5% uplight into the results presented in Figure 4 in order to simulate combined effect of fully shielded lights and incumbent luminaire

distributions. The 5% upright figure was chosen following the estimate of Kinzey et al. [23] for “relatively poor drop-lens cobra head street lights.” While $F = 0\%$ and low AOD is the condition most representative of the field skyglow measurements reported here, we varied both parameters.

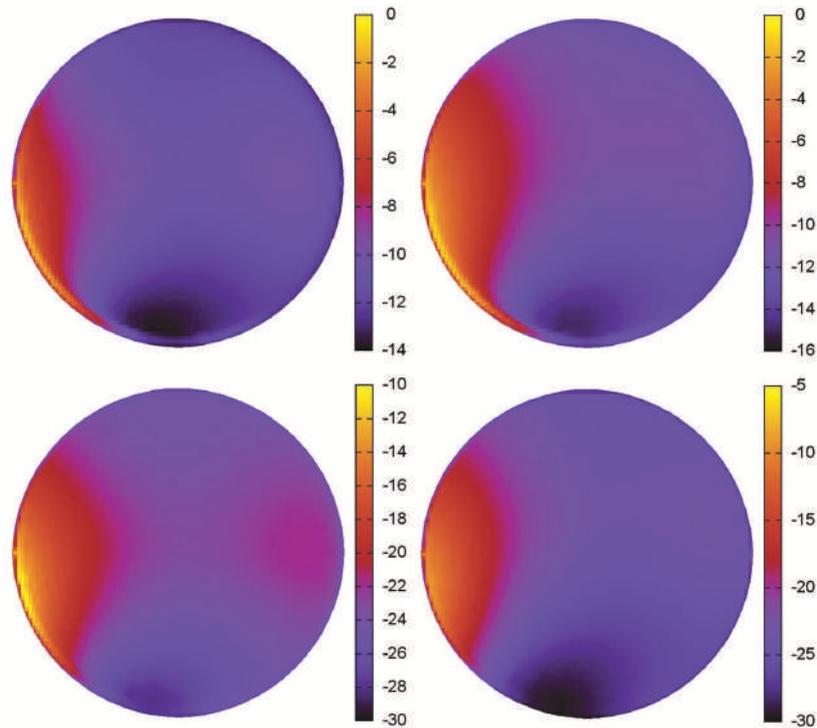


Figure 6: Predicted percent change in all-sky luminance at the Mount Lemmon SkyCenter when transitioning from M1 to M2. The panels at the top are for fully shielded lights ($F=0\%$), while the bottom panels are for $F=5\%$. From left to right: $AOD_{500} = 0.1$, and 0.5 , where AOD_{500} is the aerosol optical depth at the nominal wavelength of 500 nm. North is up and east is at right in all images.

The maximum percent change for skyglow for the Mount Lemmon SkyCenter ($32^{\circ}26'32.1''N$ $110^{\circ}47'20.0''W$; uppermost symbols in Figure 2) is shown in Figure 6. The SkyCenter represents a sensitive astronomical observatory facility beyond the territory of the City of Tucson and its suburbs. Model results consider both low and high atmospheric turbidity conditions assuming direct upright is either zero (the plots at the top of Figure 6) or $F = 5\%$ (the bottom panels). The computational results for Mount Lemmon indicate the effect of AOD is apparent especially for $F = 0\%$. A negative percent change in sky luminance is found at small angular dis-

tances from a light source if AOD is low. In a turbid atmosphere with AOD as large as 0.5, the percent change is small near the azimuthal position of the dominant light source and decreases only if angular distance increases (compare left and right plots at the top of Figure 6).

Unlike Reid Park, Mount Lemmon is outside the city territory, implying that side scatter is equally or even more important than backscatter in forming the skyglow over such sites. Therefore, the turbidity increase is reflected in the percent change in luminance for only some parts of sky. In the case of fully shielded luminaires, the percent change in luminance is roughly two times smaller than that for $F = 5\%$ (compare the plots at the top and bottom in Fig. 6). This result coincides well with what we have found for other places toward the urban core of Tucson, including Reid Park.

3. Skyglow Measurements

The field measurements reported in this paper resulted from an effort, carried out in June 2014, to inter-compare various approaches to characterizing the brightness of the night sky. The goal of this project was to assess the reliability of different methods in relation to one another, and to look for any systematic biases in the measurement approaches or dependencies among them. In 2016, we realized that this data set comprised a useful assessment of skyglow conditions in and around Tucson before the municipal LED lighting conversion began. We repeated the 2014 observations in May and June 2017, anticipating completion of the conversion project by 1 May 2017. In reality, the conversion was completed around 1 August; at the time of our second-epoch observations, the conversion was approximately 95% complete.

3.1. Site selection

We used a variety of data sources to characterize the visual brightness of the night sky from 15 locations in and around Tucson; the locations and visit dates of each place included in the sample are listed in Table 1. The measurement sites are also shown on the map in Figure 2. The selection of measurement sites intended to probe both urban conditions within the continuously-built environment of the Tucson area, as well as a number of more distant locations whose skies are impacted by the Tucson light dome. In each case, the geospatial distribution of measurement locations was considered, as well as the relative ease of nighttime access. In some instances,

and particularly for the suburban/rural sites, we chose astronomical observatories with histories of their own measurements of night sky brightness.

3.2. Data sources and acquisition

We used various methods of characterizing the brightness of the night sky as summarized in Table 2. The direct luminance data sources included four narrow-angle Sky Quality Meter (“SQM-L”) devices [24], the Dark Sky Meter iPhone app [25], and luminance-calibrated all-sky digital imagery [26]. Estimates of the naked-eye limiting magnitude (NELM) were made at each site using both the Loss Of The Night app for Android [27] as well as the Globe At Night reference charts [28]. The SQM-L units we used were serial numbers 3829, 5428, 5442, and 8161. While we collected limiting visual stellar magnitude estimates, we found that they varied too greatly between observers to provide a reliable indirect measurement of the sky luminance.

We endeavored as much as possible during the measurements to avoid contamination from local sources of glare, and to account for the presence of the Milky Way in the measurements. Some observations in 2014 were made in conditions that were neither astronomically dark nor under fully clear skies. We noted these anomalies in our analysis and rejected any measurements known to have been thusly compromised.

The native measurement unit of the SQM-L device is the magnitude per square arcsecond (mag arcsec^{-2}), a non-SI unit mostly used by astronomers. An approximate conversion between mag arcsec^{-2} and the SI unit of surface brightness, the candela per square meter, is given in [31] as:

$$S(\text{cd m}^{-2}) = (1.08 \times 10^5) \times 10^{-0.4 \times S(\text{mag arcsec}^{-2})}. \quad (2)$$

Because the photometric passband of the SQM-L differs from the photopic vision response curve, the SQM-L output is a device-specific, spectrally weighted broadband radiance and not properly a luminance. However, because its passband is similar to the photopic curve, SQM-L measurements can be considered approximate luminances.

SQM-L measurements were made using handheld devices aimed at the zenith. We discarded the initial reading in each set, which tends to be systematically brighter or darker than others in a series. This is a known issue with the device thought to result from slight internal heating of the sensor when power is initially applied. [32] We then took and recorded at

Site name	Lat (deg)	Long (deg)	Elevation (m)	Visit 1	Visit 2
<i>Cooper Center for Environmental Learning</i>	+32.24119	-111.08097	859	6/18/2014	5/23/2017
<i>Fred Lawrence Whipple Observatory</i>	+31.68060	-110.87886	2345	6/24/2014	6/3/2017
Gates Pass	+32.22341	-111.10156	964	6/18/2014	5/23/2017
John F. Kennedy Park	+32.18135	-111.01299	753	6/22/2014	5/22/2017
<i>Kitt Peak National Observatory</i>	+31.96072	-111.59949	2080	6/25/2014	(Note 1)
<i>Mission San Xavier del Bac</i>	+32.10644	-111.00787	767	6/19/2014	5/22/2017
Mt. Lemmon SkyCenter	+32.44225	-110.78889	2789	6/23/2014	5/28/2017
<i>National Optical Astronomy Observatory Headquarters</i>	+32.23346	-110.94720	747	6/17/2014	(Note 2)
<i>Pima Community College East Campus</i>	+32.16586	-110.81629	850	6/20/2014	6/16/2017
<i>Reid Park Brown Conservation Learning Center</i>	+32.20826	-110.92161	757	6/21/2014	5/21/2017
<i>Saguaro National Park Rincon Mountain District</i>	+32.17992	-110.73643	941	6/20/2014	6/16/2017
<i>Saguaro National Park Tucson Mountain District</i>	+32.25366	-111.19744	779	6/22/2014	5/22/2017
<i>Tucson Auto Mall</i>	+32.28974	-110.98444	701	6/21/2014	5/21/2017
<i>Tucson International Airport</i>	+32.11841	-110.93128	793	6/19/2014	6/16/2017
<i>University of Arizona Campus</i>	+32.23189	-110.94665	747	6/17/2014	5/21/2017
<i>Windy Point</i>	+32.36827	-110.71675	2002	6/23/2014	5/28/2017

Table 1: Summary of locations in and near Tucson, Arizona, where sky brightness data were obtained in 2014 and 2017. The dates of pre- and post-LED conversion visits are given in columns 5 and 6, respectively. Sites that did not yield useful data, or did not receive a follow-up visit in 2017 under good observing conditions, are indicated by name *in italics*. Notes in column 6: (1) we were unable to make a repeat visit under good weather conditions before the onset of the 2017 summer monsoon season; (2) we decided not to make a repeat visit to this site because of its proximity (~ 200 m) to the University of Arizona Campus site.

Source	Measurement	Reference
Sky Quality Meter with lens (SQM-L)	Single-channel broadband radiance	24
Globe At Night	Naked-eye limiting magnitude estimate	29 30
Loss Of The Night app	Naked-eye limiting magnitude estimate	27
Dark Sky Meter app	Spatially-averaged, multichannel illuminance	25
Digital single-lens reflex (DSLR) camera	Spatially-resolved multichannel illuminance	26

Table 2: Summary of data sources used to characterize visual night sky brightness in this study.

least five measurements in the direction of the zenith in quick succession. In the 2014 campaign, five readings were obtained at each location; during the 2017 campaign, we took 30 measurements at each location for improved statistics and to look for any systematic trends.

For the all-sky imagery, we used an off-the-shelf Canon T5i DSLR body and a Sigma 4 mm circular fisheye lens, giving an apparent field of view of 180 degrees. For consistent orientation of the resulting frames, the camera was pointed at the zenith with the bottom of the camera body oriented toward the northern horizon. The camera settings for all light frames were 30-second exposures at $f/2.8$ and ISO 1600. The image sequence was: dark, light, light, light, light, light, light, dark. Dark frames were obtained with the same settings but with the lens cap on, which were later subtracted from light images to remove the contribution from thermal noise in the camera electronics. We allowed the camera body to equilibrate to the ambient air temperature before recording images. No flat fields or other calibration data were obtained.

3.3. Data reduction

Different SQM-L units were used during the 2014 and 2017 campaigns. To check the reliability of comparisons between the units, we measured the responses of three of the units (serial numbers 5428, 5442, and 8161) to light under a large range of luminance levels by making simultaneous measurements of the zenith sky during evening twilight on 31 May 2017. The observations were made in non-photometric conditions, which does not affect the validity of the inter-comparison because each of the measurements was made simultaneously with all three devices.

Results from the inter-comparison are shown in Figure [7](#). We derived the following transformation equations for the three SQM-L devices from linear least-squares fits to these data, for broadband radiance R given in

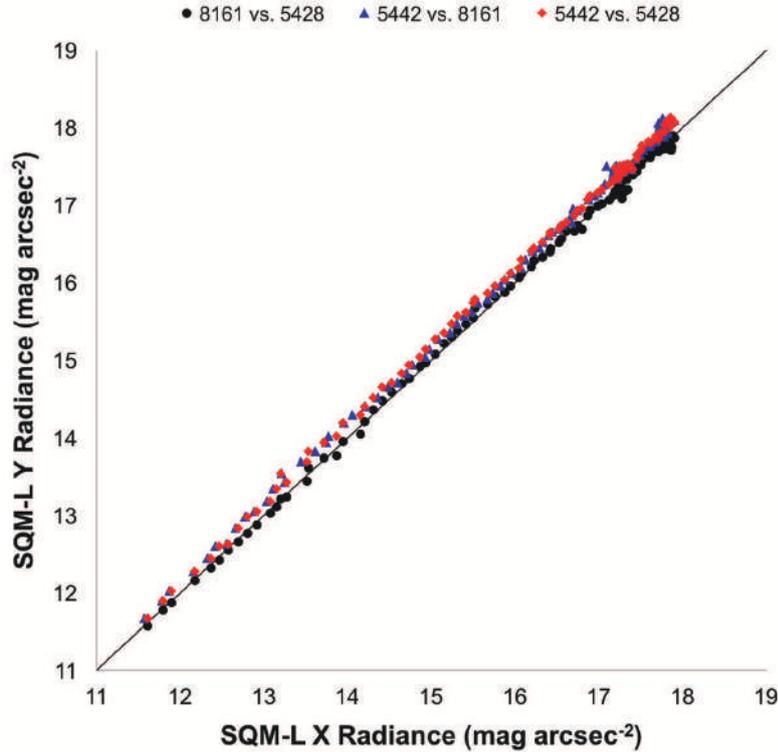


Figure 7: Results of an inter-comparison between SQM-L serial numbers 5428, 5442 and 8161 using as a light source the twilight sky after sunset on 31 May 2017. Each color represents a pair of devices in ‘Y vs. X’ format: device 8161 vs. device 5428 (black circles), device 5442 vs. device 8161 (blue triangles), and device 5442 vs. device 5428 (red circles). Uncertainties on the individual measurements, $\sim \pm 4\%$ of the values, are of the order of the symbol size, and thus are not shown. A 1:1 correspondence between the two axes is indicated with a solid black line.

mag arcsec⁻²:

$$R(5442) = (0.0495 \pm 0.0033) + [(1.0089 \pm 0.0537) \times R(8161)] \quad (3)$$

$$R(5442) = (0.0703 \pm 0.0027) + [(1.0074 \pm 0.0429) \times R(5428)] \quad (4)$$

$$R(5428) = (0.0146 \pm 0.0033) + [(1.0011 \pm 0.0540) \times R(8161)]. \quad (5)$$

We find no large systematic discrepancies between the units when operated under identical conditions of ambient temperature and target luminance. The individual devices showed internal scatter and repeatability comparable to results reported by other authors. [33] The linearity seems to be preserved to lower illuminances, although the fits are less reliable as the data become

increasingly noisy. Equations 2-4 are simple linear fits, stated with fitting uncertainties on the parameters.

The equations enabled us to put measurements from all of the SQM devices we used onto a common photometric system so that meaningful comparisons can be made. We transformed all measurements made with SQM serial numbers 5428 and 8161 to the system defined by serial number 5442. We chose 5442 as the reference since, among the four devices we used, it showed the smallest internal scatter (± 0.03 mag arcsec⁻²) in repeatability tests. Note that SQM-L serial number 3829 was unavailable for use during the 2017 measurement campaign, so we did not include it in the inter-comparison.

All-sky luminance images were calibrated using the method and ‘dslrlum’ software described by Kolláth and Dömény [26]. The routines read the camera RAW-formatted images, apply spatial distortion/vignetting and luminance corrections, and output several data products. These include a luminance-calibrated version of the input image in cd m⁻²; a Mercator-projected version of this image; and predicted SQM-L values in both mag arcsec⁻² and cd m⁻². The predictions are based on photometry of the calibrated images within software apertures of equivalent fields of view; we refer to these values hereafter as “synthetic” luminances. The photometry was tied to lab calibration of the camera and lens combination and not to standard stars or other field calibrators. Comparison with actual SQM-L measurements at each site was made as a check, and in most cases the results agreed to within their respective internal uncertainties.

4. Analysis

A summary of the results of the 2014 and 2017 measurement campaigns is presented in Table 3. For this analysis we used only the actual and ‘synthetic’ (from all-sky imagery) zenith SQM-L values, being the most reliable figures in the entire data set. We discarded most of the NELM estimates, finding that the values we obtained varied according to observer experience and individual visual acuity too inconsistently in order to draw any reliable conclusions. Instead, we chose to focus on direct luminance measurements. A selection of the calibrated all-sky images, comparing the observations epochs and circumstances in 2014 and 2017, is shown in Figure 8.

Location Name	Distance (km)	2014 SQM-L (mag arcsec ⁻²)	2017 SQM-L (mag arcsec ⁻²)	2014 sSQM-L (mag arcsec ⁻²)	2017 sSQM-L (mag arcsec ⁻²)
Cooper Center for Environmental Learning	10.5	20.43±0.02	20.46±0.01	19.79±0.01	20.20±0.01
Fred Lawrence Whipple Observatory	61.2	21.52±0.03	21.45±0.02	21.54±0.01	21.28±0.01
Gates Pass	12.2	20.64±0.10	20.51±0.02	20.20±0.01	20.43±0.01
John F. Kennedy Park	6.1	19.61±0.02	19.40±0.02	19.08±0.01	19.07±0.01
Mission San Xavier del Bac	13.1	20.02±0.02	20.01±0.03	19.51±0.04	19.82±0.01
Mt. Lemmon SkyCenter	29.8	21.14±0.08	21.38±0.01	21.10±0.01	21.31±0.01
Pima Community College East Campus	16.1	19.77±0.02	19.84±0.04	18.99±0.01	19.56±0.01
Reid Park	4.8	18.69±0.06	19.01±0.02	18.37±0.01	18.77±0.01
Saguaro National Park Rincon Mountain District	26.9	20.93±0.03	20.82±0.03	18.99±0.01	20.74±0.01
Saguaro National Park Tucson Mountain District	21.6	20.79±0.07	20.83±0.02	20.50±0.01	20.77±0.01
Windy Point	29.0	21.60±0.07	21.36±0.01	18.38±0.01	21.19±0.01
Tucson International Airport	12.2	19.14±0.05	19.19±0.02	18.58±0.02	18.74±0.01
University of Arizona Campus	2.5	17.50±0.21	18.39±0.03	17.81±0.01	18.38±0.01

Table 3: Zenith luminance measurements from the 15 survey locations in 2014 and 2017. “Distance” means the radial distance from downtown Tucson (32°13'19.3"W 110°58'07.0"W). For SQM-L data, “sSQM-L” refers to ‘synthetic’ SQM-L values derived from aperture photometry of luminance-calibrated all-sky imagery; see the main text for details. Data are shown only where all of our quality criteria were met. Two sites are not shown: No data were obtained at Kitt Peak National Observatory in 2017, and the 2014 Tucson Auto Mall data were not usable.

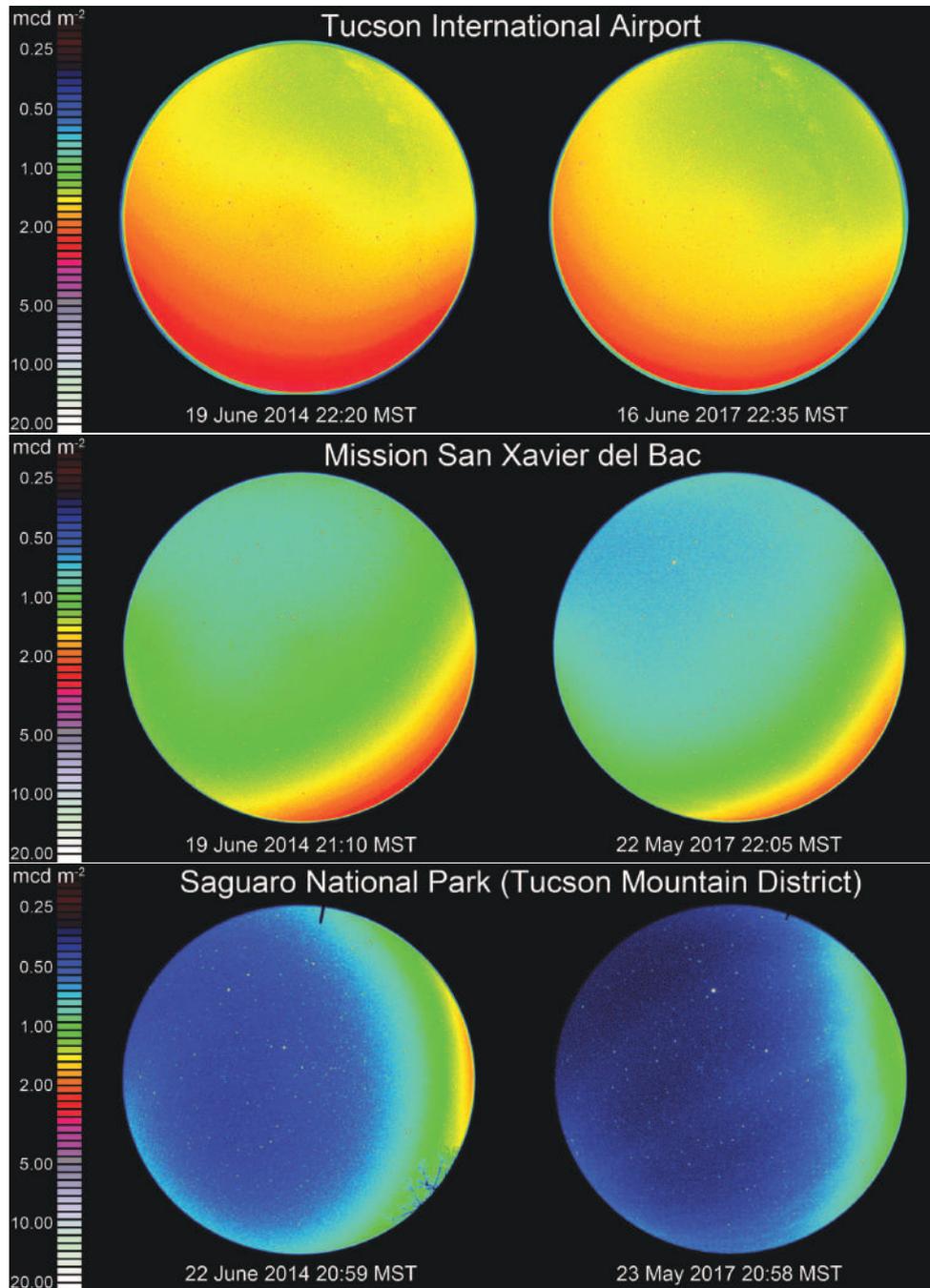


Figure 8: Luminance-calibrated all-sky imagery for a selection of sites in our measurement sample. The pre-LED-conversion condition is shown at left in each pair of images, while the post-conversion condition is shown at right. Only sites are shown for which imagery obtained at both epochs was available and met all of our quality criteria, and the images pairs are arranged in order of increasing site distance from downtown Tucson. All images are oriented alike with north down and east at right.

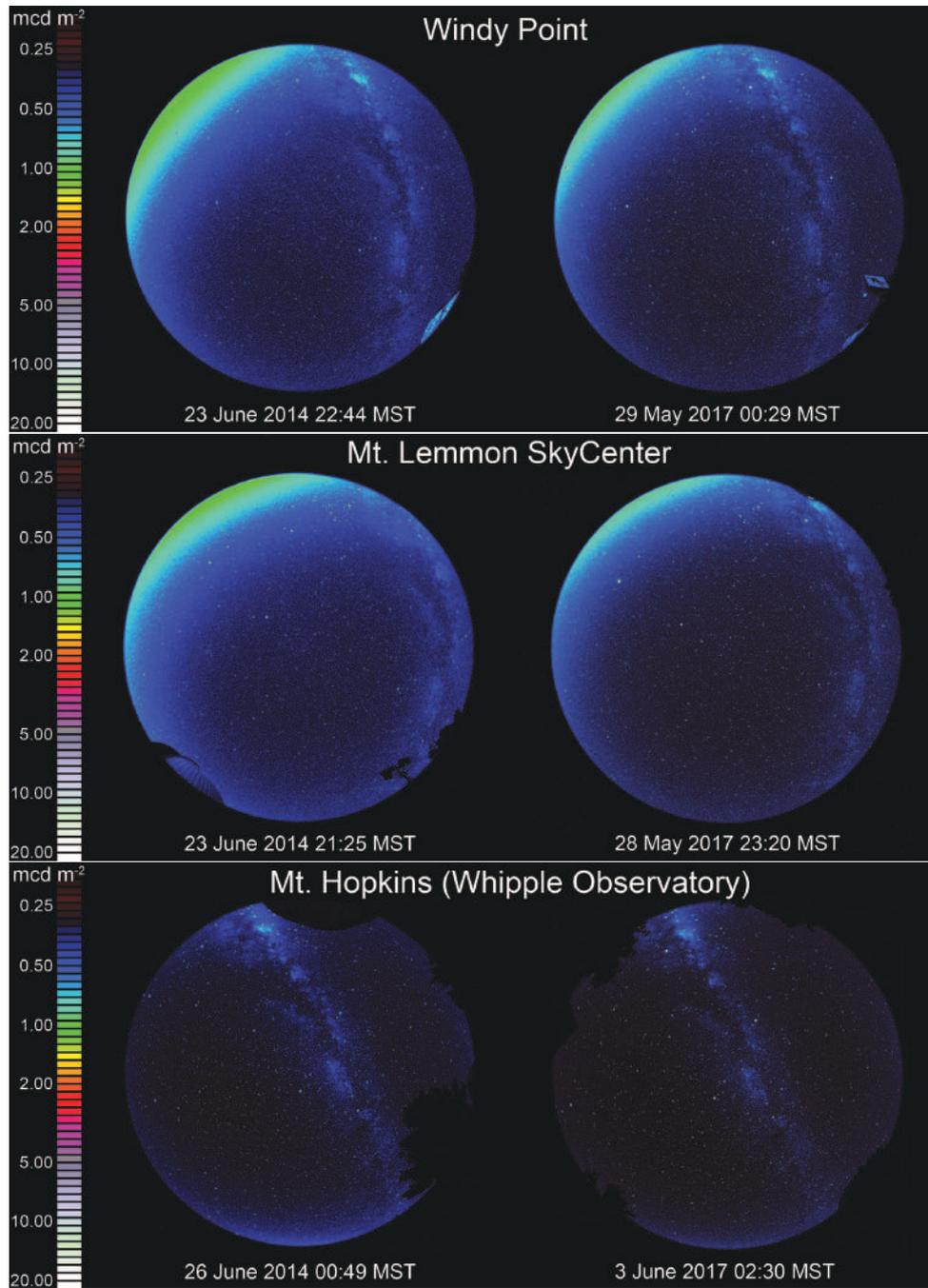


Figure 8: (continued)

Only three sites in our sample yielded a complete set of measurements in both 2014 and 2017 that meet all of our quality criteria (astronomical darkness; no interference from clouds, dust, or ground light sources; no Milky Way in the zenith): Gates Pass, John F. Kennedy Park, and the Mount Lemmon SkyCenter. Percent changes in zenith luminance obtained through both direct SQM-L measurements and photometry of all-sky calibrated imagery for these three sites between 2014 and 2017 are given in Table 4.

Site name	Distance (km)	Δ SQM-L (%)	Δ sSQM-L (%)
John F. Kennedy Park	6.1	$+21.1^{+4.5}_{-4.4}$	$+0.9^{+1.9}_{-1.8}$
Gates Pass	12.2	$+13.2^{+9.8}_{-9.0}$	-19.1 ± 1.5
Mount Lemmon SkyCenter	29.8	$-19.9^{+6.1}_{-5.7}$	-17.6 ± 1.5

Table 4: Percent changes in zenith illuminances between 2014 and 2017 for three sites (1) for which a complete set of measurements in both exists and that (2) meet all of our quality criteria. “Distance” means the radial distance from downtown Tucson ($32^{\circ}13'19.3''\text{N}$ $110^{\circ}58'07.0''\text{W}$). To differentiate measurements made with actual SQM-L units from predicted values obtained from synthetic aperture photometry of all-sky imagery, we denote the latter here as “sSQM-L”.

Of these, only one site gives consistent results between SQM-L measurements and predicted SQM-L values obtained from aperture photometry of luminance-calibrated all-sky imagery in the sense that both sources show changes of approximately the same magnitude and sign: the Mount Lemmon SkyCenter, which showed zenith luminance changes between the two epochs of $(-19.9^{+6.1}_{-5.7})\%$ and $(-17.6 \pm 1.5)\%$, respectively. In all visual skyglow indicators we considered, it appears that the zenith luminance at the Mount Lemmon SkyCenter decreased in the time period that included the bulk of the changes to Tucson’s LED lighting. Other measurement sites show either indications of increased brightness or evidence of systematic errors in the 2014 data collection; we suspect that the former were influenced by changes to highly local lighting sources between the two observation epochs.

We hesitate to draw strong conclusions about the impact of the City of Tucson’s LED conversion on the brightness of the Tucson light dome, other than to say that we find no evidence that the LED conversion resulted in consistently brighter night skies. The impact to skyglow is either neutral,

or possibly toward lower intensities, and depends on location. Further, it is possible that in some cases where apparent large positive changes in zenith luminance exist, skyglow from local (\sim few km distant) light sources dominate over the background signal attributable to the skyglow from the integrated light of Tucson and its surroundings.

As a point of comparison illustrating the need for ground-based validation of skyglow changes after LED retrofits, we obtained nighttime orbital imagery of Tucson from the VIIRS archive during the two epochs of our ground observations. Figure 9 shows VIIRS-DNB monthly cloud-free composite images of Tucson and its surroundings in June 2014 and June 2017, along with a difference image made from the two. The difference image shows an overall apparent decrease in the amount of light emitted by the city core during those three years. Suburban areas serve as controls, since they did not undergo large-scale changes to their lighting during the same period. They show mostly an apparent net zero change, while pixels defining the area of the City of Tucson in which the LED conversion was carried out show a decrease in intensity.

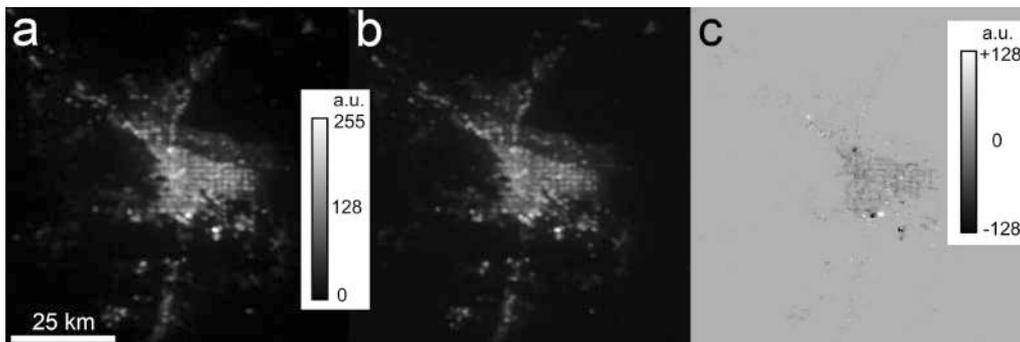


Figure 9: Panels (a) and (b) show VIIRS-DNB monthly cloud-free composite images of Tucson and vicinity in June 2014 and June 2017, respectively. The original 32-bit images have been resampled to 8 bits and scaled identically to allow resolution of individual bright light sources without saturation; scale bars indicating the gray levels in arbitrary units (‘a.u.’) are provided. The horizontal line in panel (a) is a 25-km scale indicator common to all three panels; the spatial resolution of each image is approximately 750 m pixel^{-1} . Panel (c) results from the subtraction of (a) from (b), showing the change in pixel intensity between the two epochs. North is up and east is right in all images.

To determine numerically the change in light emissions from the part of Tucson receiving LED retrofits between the two epochs, we calculated for each epoch the irradiance (E) over the scotopic visual passband and the VIIRS-DNB passband. These irradiances are the integrals of the source

spectral power distribution, written here as $P(\lambda)$, in the DNB multiplied by, alternately, the scotopic vision response curve, $S(\lambda)$ [34], and the normalized VIIRS-DNB spectral response function, $V(\lambda)$ [35]:

$$E_S = \int P(\lambda)S(\lambda)d\lambda \quad (6)$$

$$E_V = \int P(\lambda)V(\lambda)d\lambda, \quad (7)$$

where each integral is evaluated over the wavelength range $350 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1000 \text{ nm}$. We computed $P(\lambda)$ for the pre- and post-retrofit conditions using the known mixture of sources and their respective fractions of the total municipal light emissions in each case; the assumed spectral power distributions are shown in Figure 10.

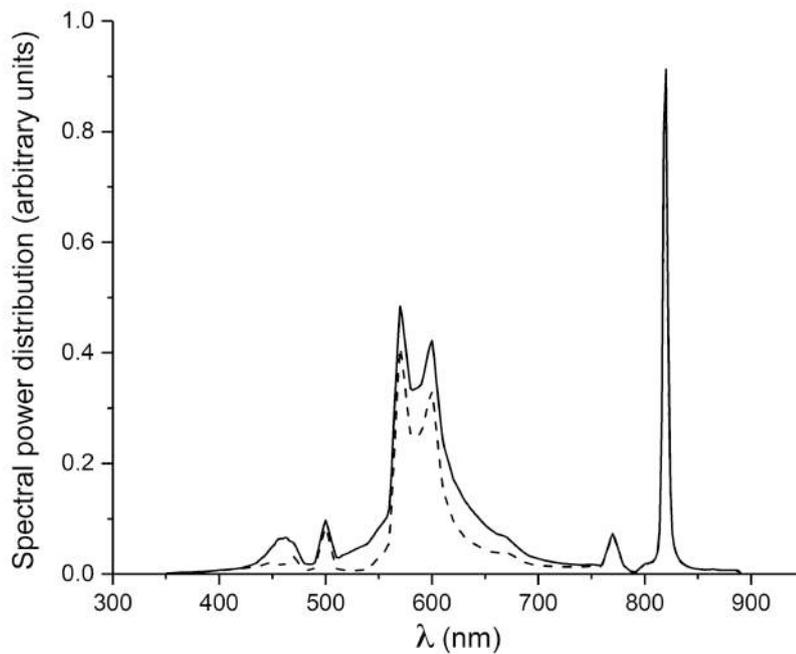


Figure 10: Normalized spectral power distributions for the municipal light emissions of Tucson in the pre-retrofit (dashed line) and post-retrofit (solid line) conditions described in the main text.

The ratio of the irradiances determines the rate by which the DNB data underestimate the signal if part of the light emissions shift toward the blue part of the spectrum, as expected during the conversion to white LED street

lighting. The DNB underestimates light emissions from white LED street lights by a factor of about 1.16. Since VIIRS detects light from all sources, we determined this factor under the assumption that direct light from luminaires represents approximately 60% of all upward-directed radiance. We note further that while there are some near-infrared emission lines in the spectra of high-pressure sodium light sources and that the VIIRS-DNB is sensitive to light from lines at these wavelengths, they contribute less spectral power than light from the 450 nm “blue peak” of white LED emissions.

We find that the upward-directed radiance in the VIIRS-DNB passband originating in the central part of the Tucson metropolitan area apparently changed by -20% during the LED conversion. However, multiplying the difference by our scaling factor, accounting for the relative insensitivity of the VIIRS-DNB at certain wavelengths, the real change is only about -7%: $\Delta L \propto 1 - (0.8 \times 1.16) = -0.072$. This figure compares favorably with the -10% change our models predict for the case of zero uplight ($F = 0\%$).

Given that we estimated that the legacy street lighting system comprised 56% of the total Tucson lumen budget prior to the LED retrofit and that the output of the retrofitted luminaires is 32% of the earlier system, one might expect a skyglow decrease on the order of 18% ($= 0.56 \times 0.32$). That would be correct if all emissions were due only to streetlights. However, the contribution of other sources of non-inventoried light sources, such as buildings and advertising signs, was completely unknown to us. Since these lights are not under direct control of the municipality, we cannot reasonably expect that such lights would be dimmed synchronously with street lighting. Assuming the other lights represent approximately 50% of all city lights, the skyglow reduction by 7% (and not 18%) is realistic. We have simply extracted the maximum information content from an incomplete data set, while keeping in place the theoretical foundations of the procedures used.

We expect that the light-emitting areas of Tucson will continue to expand from year to year according to population growth, implying that an increasing number of light sources will compensate for the decrease predicted theoretically here. As this growth is not strictly predictable, we did not include it in our analysis. The most important outcome from our numerical modeling is that skyglow decreases, independent of the size of the rate of decrease, and that conversion of municipal lighting systems from earlier technologies to LED does not necessarily cause skyglow to increase.

5. Summary and Conclusions

We obtained direct and indirect measurements of the luminance of the night sky from 15 locations in and near Tucson, Arizona, during two epochs in June 2014 and May-June 2017, in between which the City of Tucson converted $\sim 18,000$ municipally-owned street lights from a mixture of HPS and LPS to 3000 K white LED, while reducing the number of photopic lumens emitted by the street lighting system by 63%. We modeled the expected changes in skyglow using the SkyGlow Simulator software, which predicted relative decreases in the brightness of skyglow over Tucson of roughly -10% for $F = 0\%$ (full shielding of all lights) and -20% for $F = 5\%$ (allowing a small amount of direct uplight).

The signal corresponding to the change resulting from the street lighting conversion is not entirely clear in our data, but there is some evidence of a decrease at certain measurement sites of the order predicted by the models. Only one site of 15 yielded data of sufficient quality to conclude that the LED conversion reduced skyglow in a manner consistent with our expectations: $(-19.9_{-5.7}^{+6.1})\%$ and $(-17.6 \pm 1.5)\%$, using two different estimation methods. Upward-directed radiance from the city detected in the VIIRS-DNB shows an apparent decline of 7% during the same period. To the extent that upward-directed radiance is a proxy for skyglow intensity observed from the ground, the VIIRS-DNB data may further support the conclusion that skyglow over Tucson decreased after the municipal LED conversion. Therefore, there is some evidence that the lumen reduction accompanying Tucson's conversion to SSL measurably decreased both the intensity of skyglow and upward-directed radiance.

5.1. Limitations of this work

There are a number of shortcomings in the approach to this study that could be overcome in future efforts to characterize the outcomes of LED conversions with regard to skyglow over cities. These deficiencies result from the serendipitous nature of the 2014 field observations, which were not carried out with the intent of making comparisons to a later epoch. We used different SQM devices in the two campaigns, although we attempted to understand any systematic differences in their responses after the fact through mutual inter-comparison under controlled conditions. A number of the 2014 measurements were carried out under circumstances that were not ideal for the goals of this study; in particular, some of the measurements were made at times during which we now know the data were influenced by

either moonlight or twilight interference, or were taken in the presence of clouds. Conditions were not precisely the same during the two epochs, such as the time of night during which measurements were obtained, ambient air temperature, relative humidity, and atmospheric turbidity. Furthermore, not all observations could be precisely replicated in terms of geographic location, and we cannot rule out the possibility that observations from a given site in one epoch or the other were contaminated by the presence of nearby, highly local outdoor lighting sources. Lastly, observations in 2014 and 2017 were undertaken by different observers with different levels of experience, which may have further influenced certain measurements, in particular the naked-eye limiting magnitude estimates.

From these considerations, we conclude that such experiments are difficult to conduct under real-world conditions when carried out in campaign-style fashion. The variability of conditions from one night to another, not to mention nights separated by several years, is sufficiently unpredictable that perfect comparisons are not possible. Rather, and in hindsight, a more effective approach would be to install permanently-mounted sky brightness monitors prior to the start of an LED conversion, and to collect data throughout. Not only would such an approach allow for the suppression of variable conditions from one night to the next, but it would also offer temporal resolution that could be related back to the schedule of luminaire replacements in a city.

The number and distribution of monitors should also be sufficient to adequately sample the spatial distribution of light emitted or reflected into the night sky over the geographic extent of a city of arbitrary size. The recent work of Bará [\[36\]](#) suggests that optimum spatial sampling to reconstruct the zenith sky luminance to a precision of $\sim 10\%$ rms is about one sample per square kilometer.

5.2. Applicability to other cities

Tucson is unusual compared to many world cities due to its typically low relative humidity (and therefore often low AOD). On average, its frequently transparent night skies lead to darker conditions than experienced by other cities in more humid climates. However, it can at times be a dusty environment. We accounted for turbidity effects in our models that can be likewise extended to models of other cities, given local AOD inputs.

In policy terms, Tucson is also unusual in that the concern for limiting light pollution is connected to the site protection of astronomical observatories that contribute significantly to its local economy. Most world cities do

not have such an influence on local decision making with respect to outdoor lighting practices and policies. Yet the approach taken by Tucson of dimming its LED streetlights relative to the light levels of its legacy HPS/LPS system could be effectively implemented by any city interested in limiting increases in skyglow during a conversion to SSL. There are preliminary indications in this study that that reducing lumens during municipal LED conversions may reduce skyglow over a city, even given a shift in the spectrum of lighting toward bluer wavelengths. Presumably, full shielding of luminaires is especially effective in this regard; we expect that cities moving from partially shielded luminaires to fully shielded ones during their LED conversions will see even greater overall decreases in skyglow when coupled with Tucson-like dimming schemes. However, cities that elect not to dim may still see some benefit by simply converting to modern, fully shielded luminaires.

5.3. *Future work*

There is a distinct need for further studies like this one, given that policymakers planning LED conversions for their jurisdictions are confronted with decisions that affect outcomes for skyglow, whether positive or negative. We encourage more before/after studies, especially in cases where cities either (1) keep the intensity of their new lighting systems equal to the intensity of their previous systems, or (2) increase or decrease intensity during the conversion. We expect skyglow will worsen in cases where the ‘rebound’ effect results in the installation of more lighting than existed prior to conversion. The installation of permanent sky brightness monitoring equipment can obviate some of the practical problems identified in our single-epoch observations by allowing researchers to more readily identify typical or average conditions, as well as to understand the range of parameters such as AOD.

We also encourage monitoring of upward-directed radiance in VIIRS-DNB before and after LED conversions as a check on the ground-based skyglow measurements. It is possible to use the approach of Falchi et al. [1] in predicting skyglow changes using DNB radiances as inputs and a model for skyglow formation, while keeping in mind the relative insensitivity of the DNB to emissions in the 450 nm “blue spike” of white LED products.

Lastly, it would be interesting to examine Tucson road safety and uniform crime statistics after 2017-18 data become available to see whether changing the illuminance of roadways had any effect on either traffic accidents or the perpetration of certain crimes. However, given the criticism of

poorly-constructed studies aiming to find correlations between crime, public safety, and outdoor lighting [15, 16, 17], such efforts should be very carefully considered.

Acknowledgments

The authors wish to recognize Jesse Sanders (LED Project Manager, City of Tucson, Arizona) for providing streetlight inventory data, and Gilbert Esquerdo (Fred Lawrence Whipple Observatory and Planetary Science Institute) for assistance in obtaining some sky luminance data during the 2017 measurement campaign. They further thank the two anonymous reviewers whose comments and suggestions improved the quality of this manuscript.

Funding: This work was supported by the Slovak Research and Development Agency under contract No. APVV-14-0017. Computational work was supported by the Slovak National Grant Agency VEGA (grant No. 2/0016/16).

References

- [1] F. Falchi, P. Cinzano, D. Duriscoe, C. C. M. Kyba, C. D. Elvidge, K. Baugh, B. A. Portnov, N. A. Rybnikova, R. Furgoni, The new world atlas of artificial night sky brightness, *Science Advances* 2 (6). [doi:10.1126/sciadv.1600377](https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377).
- [2] J. Y. Tsao, H. D. Saunders, J. R. Creighton, M. E. Coltrin, J. A. Simmons, Solid-state lighting: an energy-economics perspective, *Journal of Physics D: Applied Physics* 43 (35) (2010) 354001. [doi:10.1088/0022-3727/43/35/354001](https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/35/354001).
- [3] H. D. Saunders, J. Y. Tsao, Rebound effects for lighting, *Energy Policy* 49 (Supplement C) (2012) 477 – 478, special Section: Fuel Poverty Comes of Age: Commemorating 21 Years of Research and Policy. [doi:10.1016/j.enpol.2012.06.050](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.06.050).
- [4] J. Y. Tsao, P. Waide, The world's appetite for light: Empirical data and trends spanning three centuries and six continents, *LEUKOS* 6 (4) (2010) 259–281. [doi:10.1582/LEUKOS.2010.06.04001](https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2010.06.04001).
- [5] S. Borenstein, A microeconomic framework for evaluating energy efficiency rebound and some implications, *The Energy Journal* Volume 36 (1). [doi:10.5547/01956574.36.1.1](https://doi.org/10.5547/01956574.36.1.1).
- [6] K. J. Gaston, M. E. Visser, F. Hölker, The biological impacts of artificial light at night: the research challenge, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 370 (1667). [doi:10.1098/rstb.2014.0133](https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0133).
- [7] A. Zubidat, A. Haim, Artificial light-at-night – a novel lifestyle risk factor for metabolic disorder and cancer morbidity, *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology* 28 (4). [doi:10.1515/jbcpp-2016-0116](https://doi.org/10.1515/jbcpp-2016-0116).
- [8] R. M. Lunn, D. E. Blask, A. N. Coogan, M. G. Figueiro, M. R. Gorman, J. E. Hall, J. Hansen, R. J. Nelson, S. Panda, M. H. Smolensky, R. G. Stevens, F. W. Turek,

- R. Vermeulen, T. Carre n, C. C. Caruso, C. C. Lawson, K. A. Thayer, M. J. Twery, A. D. Ewens, S. C. Garner, P. J. Schwingl, W. A. Boyd, Health consequences of electric lighting practices in the modern world: A report on the national toxicology program’s workshop on shift work at night, artificial light at night, and circadian disruption, *Science of The Total Environment* 607-608 (Supplement C) (2017) 1073 – 1084. [doi:10.1016/j.scitotenv.2017.07.056](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.056).
- [9] C. B. Luginbuhl, P. A. Boley, D. R. Davis, The impact of light source spectral power distribution on sky glow, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 139 (Supplement C) (2014) 21 – 26, light pollution: Theory, modeling, and measurements. [doi:https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.12.004](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.12.004).
- [10] C. C. M. Kyba, T. Ruhtz, J. Fischer, F. Hölker, Cloud coverage acts as an amplifier for ecological light pollution in urban ecosystems, *PLoS ONE* 6 (3) (2011) e17307. [doi:10.1371/journal.pone.0017307](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017307).
- [11] C. Thomson, J. Anderson, [City converts streetlights to energy-saving leds](#) (August 2012) [cited 4 January 2018].
URL <http://www.baltimoresun.com/news/maryland/baltimore-city/bs-md-city-street-lights-20120816-story.html>
- [12] E. Bisknell, [Gloucestershire’s led street light upgrade set to cost 22 million pounds but save 17 million pounds in 12 years](#) (February 2017) [cited 4 January 2018].
URL http://www.gazetteseries.co.uk/news/15109951.Gloucestershires_LED_street_light_upgrade_set_to_cost___22million_but_save___17million_in_12_years/
- [13] W. Kelly, [New led street lighting being eyed for far north end](#) (August 2017) [cited 4 January 2018].
URL <http://www.palmbeachdailynews.com/news/local/palm-beach-news-new-led-street-lighting-being-eyed-for-far-north-end/iDRDdCgr0zgIprFOfteASM/>
- [14] M. Fischenich, [Xcel street light conversion comes to mankato](#) (July 2017) [cited 4 January 2018].
URL http://www.mankatofreepress.com/news/xcel-street-light-conversion-comes-to-mankato/article_a1c1cfb4-7640-11e7-9f1e-738877e2f10.html
- [15] P. R. Marchant, A demonstration that the claim that brighter lighting reduces crime is unfounded, *British Journal of Criminology* 44 (3) (2004) 441–447. [doi:10.1093/bjc/azh009](https://doi.org/10.1093/bjc/azh009).
- [16] P. R. Marchant, What works? a critical note on the evaluation of crime reduction initiatives, *Crime Prevention and Community Safety* 7 (2) (2005) 7–13. [doi:10.1057/palgrave.cpcs.8140214](https://doi.org/10.1057/palgrave.cpcs.8140214).
- [17] P. R. Marchant, Why lighting claims might well be wrong, *International Journal of Sustainable Lighting* 19 (1) (2017) 69–74. [doi:10.26607/ijsl.v19i1.71](https://doi.org/10.26607/ijsl.v19i1.71).
- [18] V. Pavlakovich-Kochi, A. Charney, L. Mwaniki-Lyman. [Astronomy, planetary and space sciences research in arizona: An economic and tax revenue impact study](#) [online] (2007) [cited 21 October 2017].
- [19] H. Kuechly, C. C. M. Kyba, T. Ruhtz, C. Lindemann, C. Wolter, J. Fischer, F. Hölker, [Aerial survey and spatial analysis of sources of light pollution in berlin, germany](#), *Remote Sensing of Environment* 126 (Supplement C) (2012) 39 – 50. [doi:https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.08.008](https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.08.008).

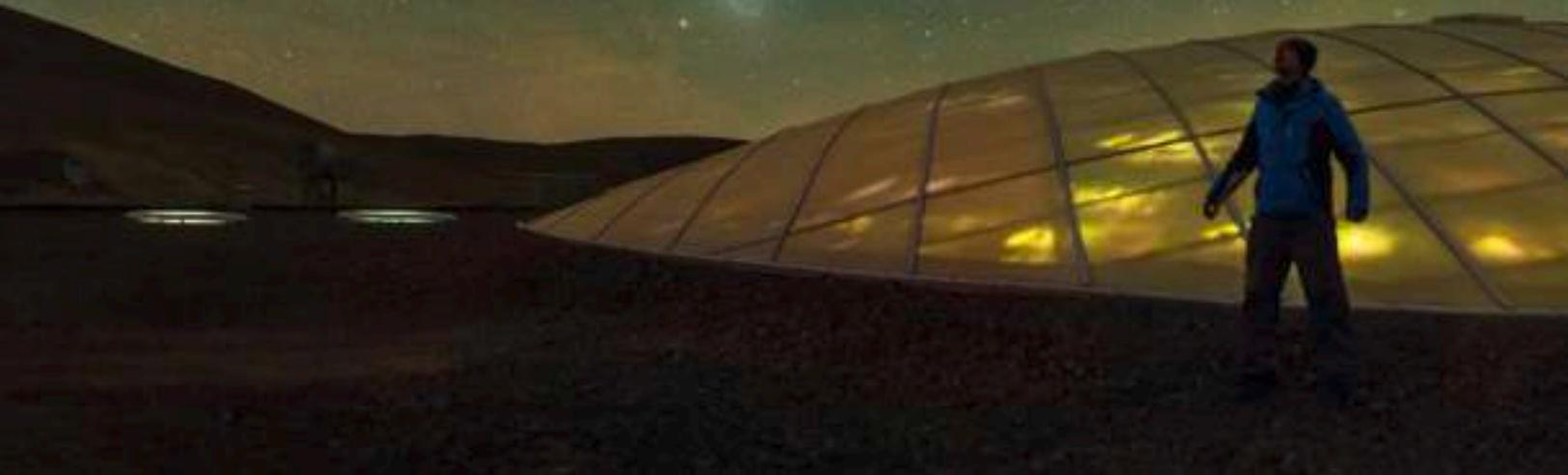
- URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425712003203>
- [20] D. Deirmendjian, Electromagnetic scattering on spherical polydispersions., Elsevier Scientific Publishing, New York, 1969.
- [21] M. Kocifaj, Light-pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources, *Appl. Opt.* 46 (15) (2007) 3013–3022. doi:10.1364/AO.46.003013.
- [22] R. E. Murphy, P. Ardanuy, F. J. Deluccia, J. E. Clement, C. F. Schueler, The visible infrared imaging radiometer suite, *Earth Science Satellite Remote Sensing* (2006) 199–223 doi:10.1007/978-3-540-37293-6_11.
- [23] B. Kinzey, T. E. Perrin, N. J. Miller, M. Kocifaj, M. Aub]’e, H. S. Lamphar. [An investigation of led street lighting’s impact on sky glow](#) [online] (Apr 2007) [cited 21 October 2017].
- [24] P. Cinzano, [Report on sky quality meter, version 1](#), Tech. rep., ISTIL Internal Report (2007) [cited 18 October 2017].
URL <http://unihedron.com/projects/sqm-1/sqmreport2.pdf>
- [25] N. Schmidt. [Dark sky meter website](#) [online] (2017) [cited 21 October 2017].
- [26] Z. Kolláth, A. Dömény, [Night sky quality monitoring in existing and planned dark sky parks by digital cameras](#), *International Journal of Sustainable Lighting* 19 (2017) 61–68.
URL <https://arxiv.org/abs/1705.09594>
- [27] C. C. M. Kyba, [Brief introduction to the loss of the night app project](#), Tech. rep., *Loss Of The Night Network* (2015) [cited 7 October 2017].
URL <http://lossofthenight.blogspot.co.at/2015/01/brief-introduction-to-loss-of-night-app.html>
- [28] Globe At Night reference charts, <http://www.globeatnight.org/magcharts/>, accessed: 2017-10-01.
- [29] C. C. M. Kyba, J. M. Wagner, H. U. Kuechly, C. E. Walker, C. D. Elvidge, F. Falchi, T. Ruhtz, J. Fischer, F. Hölker, Citizen science provides valuable data for monitoring global night sky luminance, *Scientific Reports* 3 (2013) 1835. doi:10.1038/srep01835.
- [30] J. J. Birriel, C. E. Walker, C. R. Thornsberry, Analysis of seven years of globe at night data, *Journal of the American Association of Variable Star Observers* 42 (2014) 219–228.
- [31] M. Kubala, T. Ścieżor, T. Dworak, W. Kaszowski, Artificial sky glow in cracow agglomeration, *Polish Journal of Environmental Studies* 18 (3A) (2009) 194–199.
- [32] A. Tekatch, Private communication (Oct 2017).
- [33] P. den Outer, D. Lolkema, M. Haaima, R. van der Hoff, H. Spoelstra, W. Schmidt, Stability of the nine sky quality meters in the dutch night sky brightness monitoring network, *Sensors* 15 (4) (2015) 9466–9480. doi:10.3390/s150409466.
- [34] B. C. de la Commission Internationale de l’Éclairage, (no title), in: *CIE Proceedings*, Vol. 1, 1951, p. 37.
- [35] N. Oceanic, A. Administration, Viirs relative spectral response functions (rsr), <https://ncc.nesdis.noaa.gov/VIIRS/VIIRSSpectralResponseFunctions.php>, accessed: 2018-01-04 (April 2013).
- [36] S. Bará, Characterizing the zenithal night sky brightness in large territories: How

many samples per square kilometer are needed?, Monthly Notices of the Royal
Astronomical Society 473 (3) (2017) 4164–4173. [doi:10.1093/mnras/stx2571](https://doi.org/10.1093/mnras/stx2571).



Astronomía y sociedad

Resumen de cooperación entre ESO y Chile 2020









Cerro Armazones, Región de Antofagasta.

Cooperación para el beneficio mutuo

En 1963, Chile y el Observatorio Europeo Austral (ESO, por su sigla en inglés) firmaron un acuerdo visionario que abrió el paso a la construcción de un observatorio astronómico en el cerro La Silla, en la Región de Coquimbo. Esa intención original, alimentada por una confianza mutua, ha conducido a que ESO, casi 60 años después de ese hito, opere en Chile todos sus observatorios, entre ellos algunos de los más potentes del mundo (por ejemplo en Cerro Paranal o en el Llano de Chajnantor), y esté actualmente desarrollando nuevos y ambiciosos proyectos para instalar en el país.

Los observatorios de ESO, además de realizar descubrimientos clave sobre el Universo, generan oportunidades comerciales, desarrollo local y, sobre todo, cumplen un rol de formación de nuevas generaciones. Hoy, Chile es una gran alternativa a nivel mundial para estudiar y trabajar en temas directa o indirectamente relacionados con la astronomía.

El asombroso crecimiento de ESO tiene en Chile un impacto directo y tangible en el desarrollo de la astronomía, que hoy es parte de la identidad nacional. La astronomía chilena ha crecido en números y prestigio, alcanzando visibilidad a nivel internacional, en la comunidad científica y en la prensa. Hoy, las ciencias astronómicas son parte del patrimonio popular chileno y ESO se enorgullece de haber contribuido a esta transformación.

La renovada institucionalidad científica chilena, con su Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, sus secretarías regionales y la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), apunta al avance en los campos de la ciencia de datos, la inteligencia artificial y la automatización. La nueva estrategia nacional está enfocada en potenciar laboratorios naturales, fomentar la descentralización y consolidar alianzas internacionales, todas áreas en las que ESO puede aportar, a través de una relación de cooperación con el país.

Así, en un momento histórico en que la ciencia y la tecnología desempeñan un rol fundamental en los desafíos que afronta la humanidad, queremos consolidar la memoria del camino recorrido.

Esperamos que este breve informe les brinde una perspectiva de lo que se ha logrado a través de una relación sólida de colaboración y confianza como la que ESO y Chile han ido forjando durante casi 60 años y, a partir de ello, reflexionemos sobre las oportunidades que la cooperación puede brindar en el futuro.



Xavier Barcons, Astrónomo
Director General de ESO



Claudio Melo, Astrónomo
Representante de
ESO en Chile

Aportes de ESO a Chile – Datos destacados



Ciencia y formación

- + La comunidad astronómica chilena tiene un **10% de tiempo de observación garantizado en los telescopios de ESO.**
- + El Comité Mixto ESO-Chile repartió **CLP \$450 millones en 2020.**
- + Los/as estudiantes de nacionalidad chilena representan **el mayor porcentaje de becados/as por ESO** para cursar doctorados en astronomía.
- + ESO ha contribuido a **triplicar la productividad** de la astronomía local en la última década.



ALMA

- + ESO aporta el **37.5% del presupuesto anual** de ALMA.
- + El Fondo ALMA-ANID financió en 2020 proyectos por unos **CLP \$610 millones.**
- + El Fondo ALMA-II Región aportó en 2020 unos **CLP \$260 millones.**



Foco regional

- + En 2019 ESO creó una **oficina de relaciones regionales** para fomentar la vinculación con las zonas donde operan los observatorios.
- + El **19% de las adquisiciones de ESO en Chile** se hicieron en la Región de Antofagasta en la última década.
- + ESO mantiene un **programa de becas para estudiantes de Taltal** (Región de Antofagasta).



Inversión económica

- ✦ Las operaciones de las instalaciones de ESO en Chile constituyen **una inversión anual estimada de CLP \$59 mil millones**.
- ✦ **Un 25% del personal de ESO es de nacionalidad chilena**, siendo ésta la nacionalidad con mayor presencia en la Organización.
- ✦ **El 30% de los compromisos de compra de ESO en la última década se han hecho en Chile**, porcentaje superior al de todos y cada uno de los 16 Estados Miembros de ESO.



ELT

- ✦ **El 81% de su presupuesto total (unos CLP \$1,2 millones de millones)**, se destina a contratos con la industria, mayoritariamente en Europa y también en Chile.



Sustentabilidad

- ✦ **El Observatorio La Silla opera 100% con energía renovable** desde 2016.
- ✦ ESO mantiene un programa de **recambio gradual hacia una flota de vehículos eléctricos**.
- ✦ **ESO participa en la protección de la oscuridad de los cielos de Chile** y la implementación de la normativa lumínica.



Extensión

- ✦ **La Silla y Paranal reciben anualmente unos 8.000 visitantes**. Las visitas son gratuitas y abiertas al público.



Edificio de ALMA en las dependencias de ESO en Vitacura, Santiago de Chile.

ESO/C. Brammer



Sede principal de ESO en Garching, cerca de Munich, Alemania.

ESO/C. Malin

58 años contribuyendo al desarrollo de la astronomía en Chile



Gracias a una fructífera colaboración con Chile, ESO funciona en el país desde 1963, con sus oficinas centrales en Vitacura, Santiago, y sus centros de observación en las regiones de Coquimbo y Antofagasta.

Constituido en 1962, el Observatorio Europeo Austral, ESO —formalmente conocido como Organización Europea para la Investigación Astronómica en el Hemisferio Austral— es la principal organización astronómica intergubernamental de Europa, con sede central en Garching, Alemania.

ESO lleva a cabo un ambicioso programa centrado en el diseño, la construcción y operación de instalaciones de vanguardia para observación astronómica desde la Tierra, todas ubicadas en Chile.

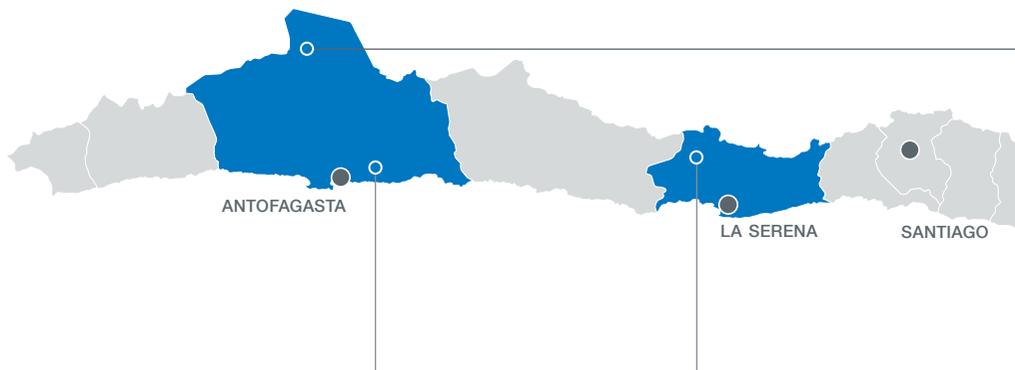
ESO es un organismo público compuesto en la actualidad por 16 Estados Miembros —Austria, Alemania, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Irlanda, Italia, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suecia y Suiza—, Australia como socio estratégico y Chile como Estado anfitrión de sus observatorios y socio fundamental, desde 1963.

A través de la operación conjunta y coordinada de todos sus sitios en Chile y en Alemania, ESO lleva adelante su misión como organización intergubernamental sin fines de lucro, permitiendo importantes descubrimientos científicos, además de fomentar el desarrollo tecnológico, la inversión económica, la formación de nuevas generaciones, la difusión de la ciencia y la cooperación internacional en el campo de la investigación astronómica y disciplinas relacionadas.

En calidad de organismo internacional, ESO sustenta su funcionamiento en el país en una serie de acuerdos internacionales con la República de Chile, siendo su contraparte la Dirección de Energía Ciencia y Tecnología e Innovación (DECYTI) del Ministerio de Relaciones Exteriores. Asimismo, ESO mantiene un vínculo activo con instituciones gubernamentales afines como la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) —anteriormente Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT)— y más recientemente con el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Centros de observación

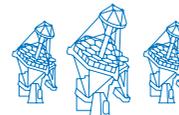
Una atmósfera quieta y seca, más de 300 noches despejadas al año y la lejanía de fuentes de luz artificial hacen de estos lugares del norte de Chile una ventana privilegiada al Universo.



Observatorio Paranal
Hogar del VLT

ELT
El próximo gran ojo para mirar el cielo

Proyecto CTA Sur
El mayor observatorio de rayos gamma del mundo



Región de Antofagasta,
comuna de Taltal

Región y comuna
de Antofagasta

Región de Antofagasta,
comuna de Taltal

Altura: 2.635 m.s.n.m.

Altura: 3.046 m.s.n.m.

Altura: 2.100 m.s.n.m.

Con cuatro telescopios principales —cada uno con un espejo primario de 8,2 metros de diámetro—, cuatro telescopios auxiliares de 1,8 metros cada uno, una batería de sofisticados instrumentos y tecnologías de última generación —entre ellas la interferometría y la óptica adaptativa—, el Very Large Telescope (VLT, por su sigla en inglés), con su interferómetro (VLTi), **es el telescopio óptico e infrarrojo cercano más avanzado del mundo**. Empezó las operaciones científicas en 1999.

También existen en Paranal dos potentes telescopios de rastreo: el VLT Survey Telescope y el Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy (VST y VISTA por sus respectivas siglas en inglés).

Actualmente en construcción en el Cerro Armazones, a poco más de 20 kilómetros del Observatorio Paranal, el Extremely Large Telescope (ELT, por su sigla en inglés) será **el mayor telescopio del mundo para la astronomía óptica e infrarroja desde la Tierra**.

El ELT permitirá estudios detallados de planetas alrededor de otras estrellas, las primeras galaxias del Universo, los agujeros negros supermasivos y la naturaleza y distribución de la materia y la energía oscura. Se proyecta que el ELT entre en operaciones durante la segunda mitad de la década.

ESO será responsable de alojar y operar, a unos 11 kilómetros de Paranal, el conjunto sur del Cherenkov Telescope Array (CTA, por su sigla en inglés), proyecto astronómico para la detección de rayos gamma de alta energía. Su construcción se iniciará dentro de los próximos años.

CTA Sur estará conformado por casi un centenar de telescopios, con diámetros entre 4 y 23 metros y complementará los 19 telescopios del conjunto norte, en el Observatorio del Roque de los Muchachos en la isla canaria de La Palma.

Para más información sobre la gobernanza de CTA, dirigirse a www.cta-observatory.org



Observatorio La Silla

El primer observatorio de ESO



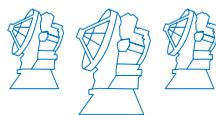
Región de Coquimbo,
comuna de La Higuera

Altura: 2.400 m.s.n.m.

Inaugurado en 1969, el Observatorio La Silla ha alojado generaciones de telescopios e instrumentos. De estos, **ESO sigue operando dos de los telescopios de la categoría de 4 metros más productivos del mundo:** el Telescopio de 3,6 metros de ESO, que alberga al buscador de planetas extrasolares High Accuracy Radial velocity Planet Searcher (HARPS), y el Telescopio de Nueva Tecnología (NTT, por su sigla en inglés), pionero en avances tecnológicos como la óptica activa, que abrieron el camino a la siguiente generación de grandes telescopios, entre ellos, el VLT.

Observatorio ALMA

Ejemplo de colaboración internacional



Región de Antofagasta, comuna
de San Pedro de Atacama

Altura: 5.000 m.s.n.m.

Compuesto por **66 antenas —50 de ellas de 12 metros de diámetro y 16 de 7 metros— que pueden distribuirse sobre un diámetro de hasta 16 kilómetros**, el Atacama Large Millimeter/ sub-millimeter Array (ALMA, por su sigla en inglés), es el radiotelescopio más potente del mundo.

Inaugurado en 2013, ALMA es una colaboración intercontinental entre ESO, Norteamérica y Asia Oriental, que funciona en cooperación con la República de Chile.

Observatorio APEX

Pionero en el Llano de Chajnantor

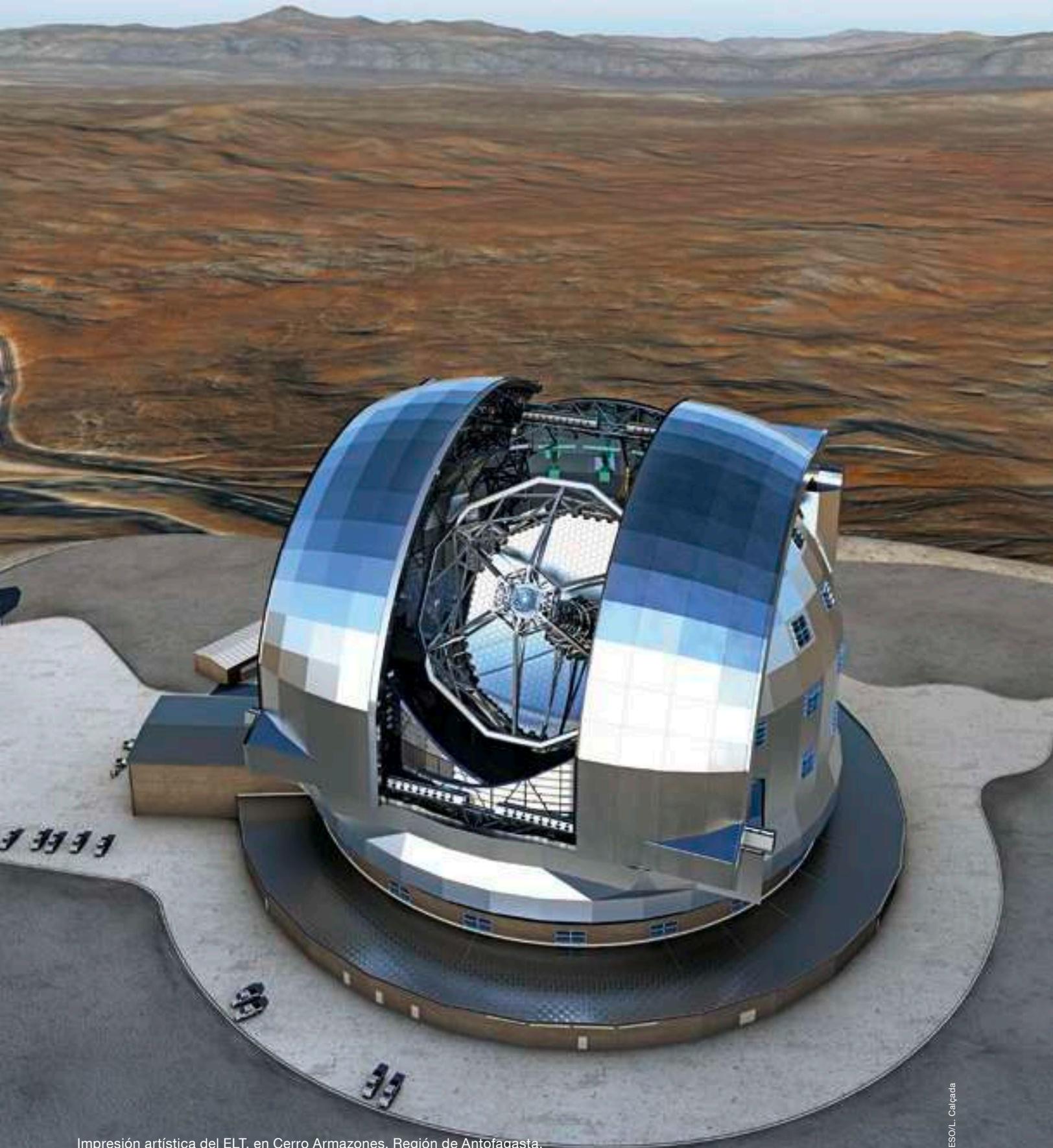


Región de Antofagasta, comuna
de San Pedro de Atacama

Altura: 5.050 m.s.n.m.

El Atacama Pathfinder Experiment (APEX, por su sigla en inglés), **es un radiotelescopio de 12 metros de diámetro que, desde 2005, observa el Universo** en longitudes de onda milimétricas y submilimétricas.

Precursor del Observatorio ALMA en el Llano de Chajnantor, es una colaboración internacional entre ESO, el Observatorio Espacial de Onsala (Suecia) y el Instituto Max Planck para la Radioastronomía (Alemania).



Impresión artística del ELT, en Cerro Armazones, Región de Antofagasta.

ELT

El ojo más grande del mundo para mirar el cielo



Con el ELT, se abre desde Chile una puerta a descubrimientos que revolucionarán nuestra comprensión del cosmos.

El siguiente paso para la astronomía desde la Tierra son los telescopios extremadamente grandes. De los tres proyectos existentes a la fecha a nivel mundial, dos estarán ubicados en Chile. Uno de ellos, es el ELT de ESO.

Este proyecto innovador, con su espejo primario de 39 metros de diámetro, será el telescopio óptico e infrarrojo cercano más grande del mundo.

Su enorme superficie colectora, su novedoso diseño y su tecnología de última generación permitirán detectar planetas similares a la Tierra orbitando otras estrellas, así como medir la aceleración en la expansión del Universo y medir variaciones en las magnitudes físicas fundamentales a lo largo de su historia.

Desde 2005, ESO ha estado trabajando con su comunidad y la industria para desarrollar este telescopio, que espera ver su primera luz durante la segunda mitad de esta década.

Etapas de construcción del ELT



Abril 2010

Cerro Armazones es elegido como sitio para el ELT.



Junio 2014

Tronadura del cerro.



Diciembre 2018

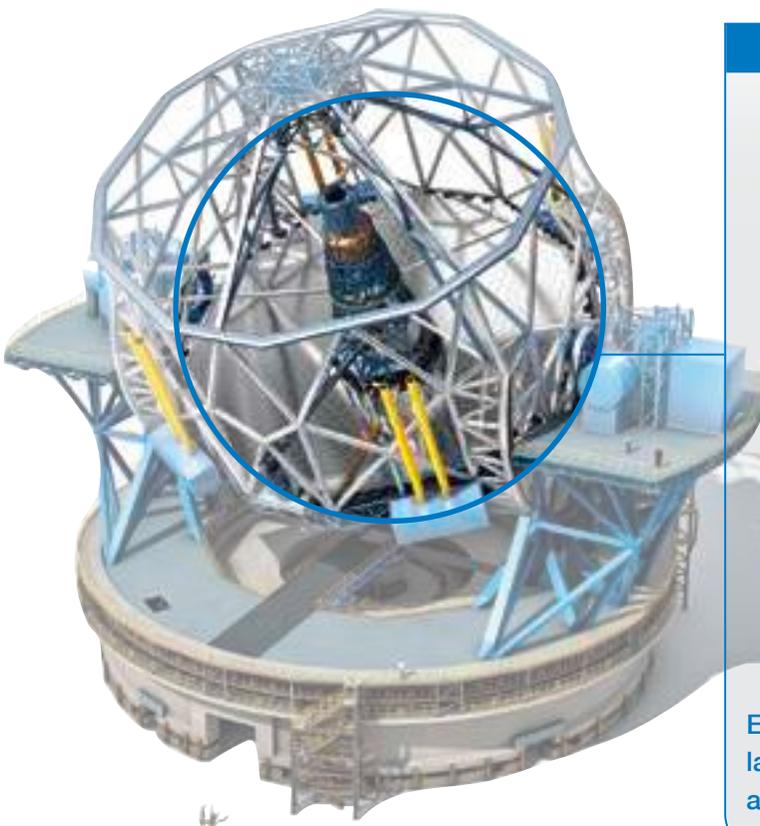
Comienzo de la construcción de cúpula y edificio auxiliar.



Segunda mitad de esta década

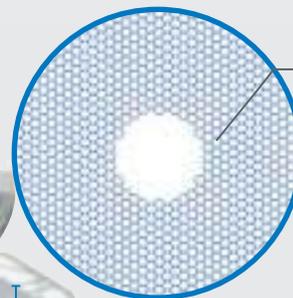
Primera luz planificada.

▼ Representación de la estructura del telescopio.



Espejo principal

— Diámetro: 39 m —



— Ø 1,4 m —

N° segmentos:
798

Área colectora
de luz: 978 m²

El área colectora del ELT, por sí sola, es mayor a la suma de todos los telescopios ópticos mayores a 8 metros existentes en la actualidad.

Chile y el ELT

El ELT tiene un presupuesto de unos CLP \$1,2 millones de millones (equivalentes a EUR €1.300 millones), de los cuales un 81% es gastado en contratos con la industria, mayoritariamente europea y también chilena. Por otro lado, la variedad de disciplinas que crecen en torno a la astronomía abre puertas a la generación de nuevo conocimiento y servicios creados en Chile, los cuales se pueden fomentar a través de la acción estratégica conjunta en ámbitos de interés para el país.

Para cumplir ese objetivo, ESO firmará un acuerdo de cooperación con Chile en el marco de la construcción, puesta en marcha y operación del ELT. Dicho acuerdo contempla, entre otros:

- ✦ **Convocatorias de astronomía e ingeniería.** Llamados anuales emitidos por la ANID del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación de Chile, abiertos a iniciativas de investigación y desarrollo, en las áreas de ingeniería, informática y otras, las que serán ejecutadas por investigadores/as afiliados/as a instituciones públicas o privadas chilenas.
- ✦ **Contrataciones académicas.** ESO financiará hasta dos puestos por año en el Observatorio Paranal, y también visitas de profesionales de Chile de las áreas de ciencia e ingeniería a Europa. Para promover el intercambio de conocimiento, se incentivará la participación de estudiantes provenientes de instituciones de la Región de Antofagasta.
- ✦ **Pasantías e intercambios.** Residencias académicas en instituciones chilenas para personas afiliadas a las instituciones de los Estados Miembros de ESO en las áreas de ciencia e ingeniería, con el fin de promover el intercambio de conocimiento tecnológico en la academia.
- ✦ **Tiempo reservado de observación.** Una vez en operaciones, el ELT, igual que los demás telescopios de ESO, reservará un 10% del tiempo de observación para equipos científicos afiliados a instituciones chilenas.

▼ Representación a escala del ELT y la Portada de Antofagasta.





La Vía Láctea sobre el Observatorio ALMA, Región de Antofagasta.

ALMA

Descubriendo desde Chile nuestros orígenes cósmicos



ALMA consta de 66 antenas móviles que funcionan como un solo telescopio de hasta 16 km de diámetro, para la observación astronómica en la radiación milimétrica y submilimétrica.

Emplazado a unos 50 km al este de San Pedro de Atacama, en lo alto del Llano de Chajnantor (5.000 m.s.n.m.), ALMA es el mayor observatorio astronómico existente y es único en términos de ciencia, tecnología, ubicación y cooperación internacional.

Inaugurado en 2013, gracias a una inversión de EUR €1.100 millones, ALMA es fruto de la asociación entre ESO, la Fundación Nacional de Ciencia de Estados Unidos y los Institutos Nacionales de Ciencias Naturales de Japón, en cooperación con la República de Chile.

La radiación milimétrica y submilimétrica con la que opera ALMA es invisible al ojo humano, y es clave para estudiar las regiones más frías de la materia interestelar y descifrar los procesos de formación de estrellas y sistemas planetarios. Asimismo, permite captar las primeras estructuras que se formaron en el Universo.

ESO ha sido clave en el avance tecnológico, técnico y científico de ALMA, aportando con 25 de las antenas del conjunto y los dos vehículos transportadores especialmente diseñados para su relocalización. Además, ESO ha desarrollado algunos de los receptores de alta tecnología del radiotelescopio y ha contribuido al proyecto con infraestructura crítica, tanto en el sitio del observatorio como en las dependencias de Vitacura. ESO aporta el 37,5% del presupuesto anual de ALMA.

Aporte a la ciencia en Chile

A través de ALMA, las instituciones científicas chilenas pueden acceder anualmente a fondos de investigación, tiempo de observación garantizado y ser parte activa del intercambio entre los grupos científicos asociados al proyecto.

El Fondo ALMA-ANID (ex Fondo ALMA-CONICYT) fue creado para fortalecer la investigación científica y el desarrollo de la astronomía en Chile. En 2020 financió proyectos por unos CLP \$610 millones (equivalentes a EUR €669 mil), y desde su implementación ha beneficiado programas por más de CLP \$9 mil millones (equivalentes a EUR €10 millones). Adicionalmente a las contribuciones a través del Comité Mixto ESO-Gobierno de Chile (ver pág. 24) y a la co-financiación del acuerdo de cooperación del ELT (ver pág. 13), ESO aporta el 37,5% de estas sumas.

Las instituciones chilenas cuentan con un 10% de tiempo de observación reservado. Además, diferentes grupos científicos chilenos han participado en la creación de tecnología e infraestructura crítica del observatorio, tal como ocurrió con algunos de los receptores de las antenas de ALMA.



Vista aérea del Observatorio ALMA, Región de Antofagasta.

Apoyo a las comunidades locales

Los beneficios de ALMA trascienden el ámbito científico e impactan nacional y localmente.

A través del Fondo ALMA-II Región, el observatorio aporta al desarrollo regional en los sectores productivos, sociales y económicos, especialmente en la comuna de San Pedro de Atacama. **En 2020, este fondo aportó recursos por unos CLP \$260 millones (equivalentes a unos EUR €297 mil), sumando un total de más de CLP \$3.500 millones desde su creación en 2004.**

Además, ALMA busca impactar positivamente en sus vecinos más próximos. Toco-nao, localidad más cercana al observatorio, cuenta con un programa para mejorar y potenciar el trabajo educativo de su escuela en las áreas de inglés y ciencia, beneficiando directamente a los niños y niñas de la comunidad.

Entre las principales contribuciones de ESO a ALMA figuran:



37,5%
del presupuesto
anual del proyecto.



25 antenas
de 12 metros de diámetro.



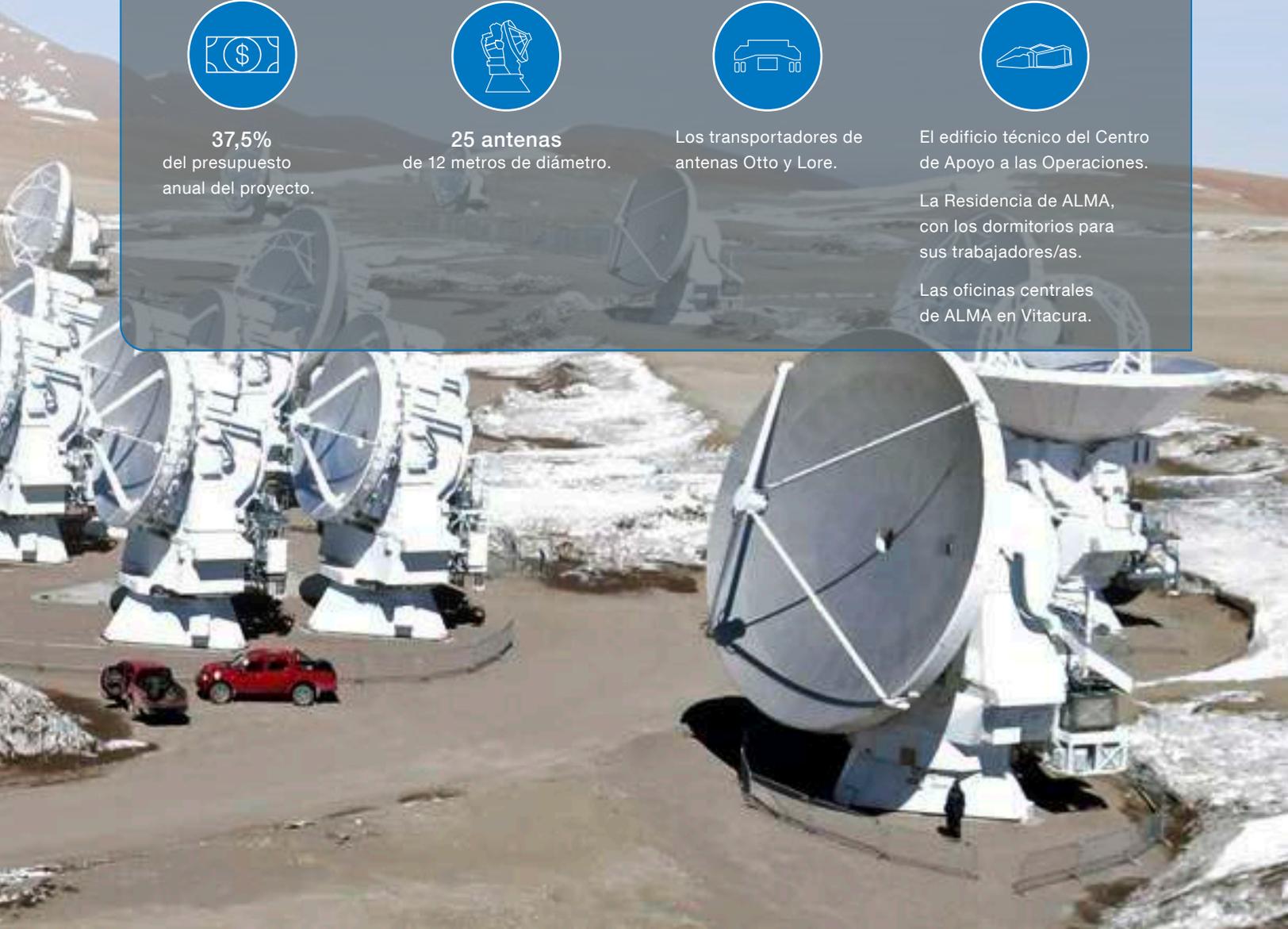
Los transportadores de
antenas Otto y Lore.



El edificio técnico del Centro
de Apoyo a las Operaciones.

La Residencia de ALMA,
con los dormitorios para
sus trabajadores/as.

Las oficinas centrales
de ALMA en Vitacura.



Descubrimientos destacados

En la última década, ESO se ha consolidado como el observatorio astronómico más productivo del mundo.

Además de permitir importantes descubrimientos científicos, ESO aporta a la difusión de la ciencia en el país y fomenta la imagen de Chile como capital astronómica mundial.



Agujeros negros

1. Primera imagen de un agujero negro captada con el Event Horizon Telescope, instrumento que ha utilizado ocho radiotelescopios distribuidos por el planeta, entre ellos, ALMA y APEX.
2. Seguimiento de estrellas orbitando el centro de la Vía Láctea durante más de 25 años permite estudio del agujero negro supermasivo en el corazón de nuestra galaxia. La región circundante es captada por el VLT en esta imagen.

Exoplanetas

3. Descubrimiento de un planeta (Próxima b) en la zona habitable que rodea a la estrella más cercana (con Telescopio 3,6 metros de ESO, entre otros); primera imagen de un exoplaneta (en la foto) y primera imagen de dos exoplanetas orbitando una estrella similar al Sol, ambas captadas con el VLT.
4. Imágenes de génesis planetaria. En la foto, el disco protoplanetario que rodea a HL Tauri, captado por ALMA.

Cosmología

5. Expansión acelerada del Universo utilizando el Telescopio 3,6 metros de ESO y el NTT, entre otros.
6. Identificación de una de las primeras fuentes de ondas gravitacionales utilizando ALMA y telescopios en La Silla y Paranal, entre otros.



Nebulosa Messier 78, en la constelación de Orión. Imagen tomada desde el Observatorio La Silla.

Cómo la colaboración con ESO beneficia a la comunidad astronómica de Chile



Gracias a los acuerdos entre ESO y la República de Chile, las instituciones de investigación chilenas reciben un 10% de tiempo de observación garantizado en los telescopios de ESO.

La historia de la astronomía en Chile y la de ESO están estrechamente ligadas. La astronomía es hoy una de las ciencias más relevantes en el país, en gran parte gracias a la cooperación entre Chile y ESO.

A partir de los años sesenta —con el desarrollo del Observatorio La Silla y sus telescopios— ESO ha ido consolidando su rol de servicio a la comunidad astronómica a través de la operación de instalaciones científicas de vanguardia. Desde entonces, ESO aporta datos de observación astronómica a diversos grupos de investigación de todo el mundo, incluyendo Chile. Por su parte, la comunidad científica chilena aceleró su crecimiento en el campo de la astronomía. De tener pequeños grupos localizados, hoy es una gran comunidad que se extiende a lo largo de todo el país.

Actualmente, hay más de 250 astrónomos/as profesionales trabajando en 17 instituciones chilenas, con grandes resultados científicos, y ESO ha estado presente en parte de ellos.

Hoy, gracias a esta sinergia, las instituciones científicas de Chile y ESO pueden trabajar en proyectos más ambiciosos, diversos y revolucionarios.

Apoyo directo a la comunidad astronómica

Desde los años noventa, la comunidad científica chilena ha tenido una expansión acelerada. Su vitalidad es alimentada por el desarrollo de observatorios internacionales en el país, entre ellos Paranal, La Silla y ALMA.

Gracias a los acuerdos entre ESO y la República de Chile, las instituciones de investigación chilenas reciben un 10% de tiempo de observación garantizado en los telescopios de ESO. Según los datos proporcionados por SOCHIAS (Sociedad Chilena de Astronomía), en 2019, casi 500 investigadores/as de 21 universidades a lo largo de Chile se habilitaron para concursar a este tiempo reservado.

Además, desde 1996, ESO financia un fondo anual concursable de apoyo a la investigación científica y desarrollo de la astronomía en Chile (ver pág. 24).



Creación y fortalecimiento de intercambios científicos

La construcción de nuevos observatorios genera un escenario ideal para el intercambio entre las comunidades científicas chilenas e internacionales.

Entre 1999 y 2018, ESO ha realizado y auspiciado en Chile —como organizador principal o partícipe— 38 conferencias internacionales en astronomía, donde han asistido más de 400 investigadores/as de 16 universidades chilenas.

Las reuniones científicas organizadas por ESO representan oportunidades únicas para la comunidad astronómica chilena, permitiéndole establecer o fortalecer contactos con representantes de la comunidad científica internacional sin salir de sus fronteras.

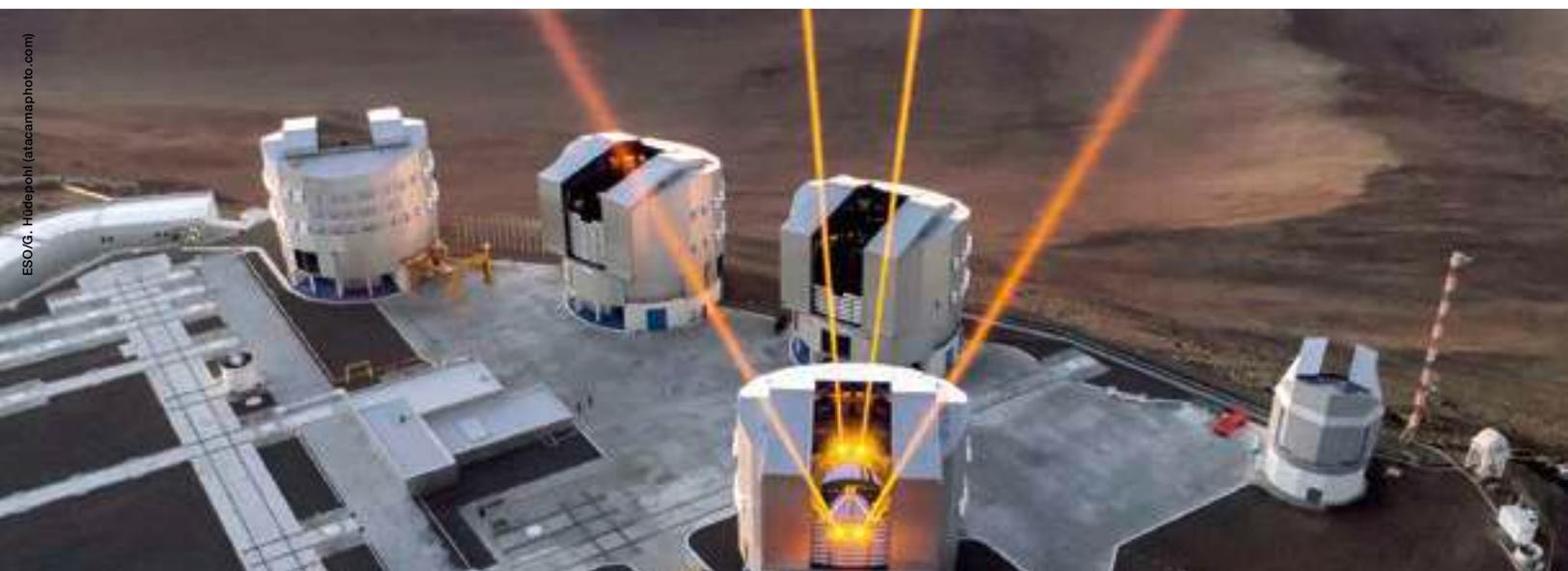
Producción científica

La comunidad astronómica chilena es parte activa de la discusión e intercambio de nuevas ideas en diversos campos de estudio de la astronomía. Su producción científica así lo refleja.

El número de artículos científicos publicados con autorías de instituciones chilenas y datos de telescopios de ESO ha crecido vigorosamente en los últimos 10 años.

De igual modo, los artículos elaborados por grupos internacionales de astronomía con al menos un autor/a de Chile se incrementaron considerablemente. Si en 2009 eran 72, en 2018 fueron 246, acumulando 1.747 artículos en ese periodo.

▼ Vista aérea de la plataforma del VLT, en el Cerro Paranal.



Astronomía en Chile en la actualidad



17 Instituciones

chilenas realizan investigación.



255 astrónomos/as

profesionales trabajando en instituciones nacionales.



163 académicos/as

ligados a la astronomía.



+ de 500 estudiantes

de pregrado en astronomía.

Fuente: SOCHIAS

Comité Mixto ESO-Gobierno de Chile

En 1996, ESO y la República de Chile firmaron un acuerdo que asignó un 10% de tiempo garantizado de observación con los telescopios ESO a instituciones científicas chilenas. Además, con miras a potenciar este capital científico, se creó el Comité Mixto, que desde 1998 administra un fondo anual concursable para contribuir sostenidamente al desarrollo de la astronomía y disciplinas tecnológicas asociadas en el país. Representantes de ESO, en conjunto con integrantes del Gobierno de Chile, evalúan año a año la asignación de estos fondos que se otorgan a instituciones académicas públicas y privadas, y a organizaciones afines a lo largo del territorio nacional. El objetivo de este fondo es colaborar con el crecimiento de la comunidad de investigación y desarrollo tecnológico local, así como el fortalecimiento y apropiación de la cultura astronómica entre chilenas y chilenos.

Para el concurso 2020, ESO destinó aproximadamente CLP \$450 millones (equivalentes a unos EUR €500 mil) al fondo del Comité Mixto, el cual promueve anualmente las siguientes áreas:

- + **Postdoctorado.** Programas de postdoctorado en astronomía en instituciones académicas chilenas. La incorporación de jóvenes investigadores/as ha impactado positivamente el número de publicaciones científicas de sus instituciones, que es uno de los principales índices con el que se mide la calidad de las universidades.
- + **Formación.** Puestos académicos por períodos de hasta dos años en instituciones universitarias chilenas. Al facilitar la apertura de nuevos cargos docentes y demostrar su positivo impacto en la investigación, éstos con el tiempo son costeados por las universidades generando puestos permanentes.
- + **Tecnología.** Apoyo a programas de desarrollo y construcción de sistemas tecnológicos para la astronomía. Esta área ha generado polos locales que podrán protagonizar avances en la ciencia aplicada, como por ejemplo la producción de espejos astronómicos hechos en Chile.
- + **Educación y difusión.** Apoyo a la presentación y desarrollo de programas educativos para la enseñanza y difusión de la astronomía en Chile, para la capacitación de docentes de colegios en básica y media, así como financiamiento de exposiciones en museos y materiales de extensión en diversas plataformas para el público no experto.
- + **Otros.** Apoyo al desarrollo de la astronomía en áreas no cubiertas por las cuatro categorías anteriores.

La convocatoria anual del Comité Mixto se anuncia entre junio y julio de cada año en el sitio web de ESO.

Entre 2013 y 2019, el Comité Mixto financió:

29 postdoctorados

de dos años: 1/3 en Santiago y 2/3 en otras regiones de Chile.

13 puestos académicos:

subvención para financiar los años iniciales de los nuevos puestos de profesorado en universidades chilenas.

23 programas

de divulgación de la ciencia.

12 proyectos

de instrumentación.

Proyectos destacados en los últimos años:

Universidad de

Antofagasta: fondos semilla para puestos de profesores/as.

Universidad de

Valparaíso: producción de espejos astronómicos.

Pontificia Universidad

Católica: instrumento PLATO-Spec para estudio de estrellas y planetas a su alrededor.

Fondos Regionales

Con el objetivo de generar un nuevo modelo de cooperación entre ESO y las regiones que alojan a los observatorios, en 2019 se inició la revisión del modelo de asignación de fondos para la regiones de Antofagasta y Coquimbo en una mesa de trabajo compuesta por autoridades locales y el Ministerio de Relaciones Exteriores.

Esta iniciativa busca priorizar la participación de las regiones en la toma de decisiones que involucran sus intereses estratégicos para el desarrollo regional.



Región de formación estelar IC 2944. Imagen tomada con el instrumento FORS 1 del VLT, en el Observatorio Paranal.

Región alrededor de la estrella WR 22, en la Nebulosa de Carina.
Imagen tomada con el Telescopio MPG/ESO de 2,2 metros, en el Observatorio La Silla.

Talentos jóvenes para el país y el mundo

ESO abre sus puertas a jóvenes profesionales que buscan potenciar sus carreras en astronomía. Ya sea en Chile o en Alemania, los y las estudiantes de postdoctorado de ESO o *fellows*, cumplen una labor destacada, tanto en las oficinas de ciencia como en los observatorios de ESO. Una vez que terminan sus programas en ESO, muchos/as *fellows* extienden y profundizan estas labores, enriqueciendo la comunidad astronómica nacional e internacional.

“Las redes de ESO han sido fundamentales para mí y mis estudiantes, quienes se benefician hoy de estas conexiones”



Claudia Lagos (Chile), Investigadora y profesora del International Centre for Radio Astronomy Research (ICRAR) de Australia.

“Mi paso por ESO fue en la sede central en Garching (Alemania) y lo considero crítico en mi carrera. Fue durante mi trabajo en la Organización que forjé mi perfil como investigadora. Estoy interesada en aspectos de la formación y evolución de las galaxias: estudio cómo se forman, qué rol juega la materia oscura y qué observaciones se podrían hacer para distinguir diferentes procesos físicos en ellas.

La experiencia adquirida en mi doctorado fue principalmente teórica, y mi trabajo en ESO me permitió establecer los contactos necesarios para desenvolverme en el ámbito de observaciones, búsquedas o sondeos de galaxias”.

“Lo que más me gustó de mi paso por ESO fue la libertad para buscar nuevos desafíos”



Oscar González (Chile), Astrónomo del United Kingdom Astronomy Technology Centre (UK ATC).

“Mi paso por ESO forjó mi perfil profesional. Trabajo como científico encargado de proyectos en uno de los principales laboratorios nacionales del Reino Unido (UK ATC), que se dedica al desarrollo de tecnología para la astronomía.

Mi trabajo consiste en identificar nuevas ideas para instrumentación astronómica. Debo determinar las necesidades del mundo científico, trabajar con ingenieros durante el diseño, construcción e instalación, para luego liderar la explotación científica de los instrumentos. ESO me entregó el ambiente perfecto para desarrollar las habilidades necesarias para hacer esto. El conocimiento que adquirí en ESO, primero durante mi doctorado en la sede de ESO en Garching (Alemania), y luego operando instrumentos en el Observatorio Paranal como *fellow*, me dio esa especialidad única.

Mi paso por Paranal fue una maravillosa experiencia. Detrás de la estructura necesaria para el funcionamiento de una organización de ese tamaño, fue genial encontrarme con muchas oportunidades para desarrollarme. Además, tuve la oportunidad de compartir la astronomía con niños de regiones, fuera de Santiago, como también alguna vez yo lo fui”.

“Aprendí muchísimo de tecnología, de lo enriquecedor que es trabajar codo a codo con gente del área técnica e ingeniería”



Amelia Bayo (España), Profesora de la Universidad de Valparaíso y directora del Núcleo Milenio de Formación Planetaria (NPF).

“El paso por ESO marcó mi carrera profesional y el Observatorio Paranal realmente fue una segunda casa para mí. Siento que es la mejor experiencia de enseñanza integral. Además, estar expuesta constantemente a distintos temas de investigación, amplió mi propia ciencia y enriqueció enormemente mis colaboraciones. Todo el mundo trabaja coordinadamente para ofrecer el mejor servicio posible a la comunidad científica.

La estructura de trabajo, el modo de comunicación entre grupos de ingeniería y astronomía me ha sido excepcionalmente útil a la hora de dirigir el NPF. Somos 40 personas con trayectorias muy distintas. Juntos, nos hemos embarcado en un proyecto único en Chile: la producción de espejos en base a fibra de carbono. Tener una rutina de documentación, procedimientos, validación —como la de ESO— puede sonar como algo logístico y aburrido, pero tiene un impacto enorme y mejora la eficiencia de la I+D”.



Trabajando en el laboratorio de integración de ESO en Garching, Alemania.

Contribuyendo a la formación de nuevas generaciones

**ESO ofrece y
financia, mediante
becas y pasantías,
oportunidades de
formación en
pregrado, magíster,
doctorado y
postdoctorado.**

ESO ofrece programas de becas y pasantías en el campo de la ciencia y la ingeniería, que permiten a estudiantes de Chile y el mundo integrarse a la comunidad astronómica local e internacional.

Quienes optan a estas becas enriquecen su experiencia a través de la interacción con profesionales de ESO y visitantes de todas partes del mundo, especialistas en distintas áreas de la astronomía y la ingeniería, en un ambiente multicultural y diverso.

Los conocimientos adquiridos, tanto a nivel técnico como de habilidades blandas, son fundamentales para el desarrollo de su carrera.

Entre 2010 y 2020, 15 estudiantes de Chile han realizado sus programas de doctorado y postdoctorado en la oficina de ciencia de ESO en Chile, mientras que ocho lo han hecho en la oficina de ciencia de ESO en Alemania.

Becas de doctorado para estudiantes de astronomía

ESO brinda la posibilidad de pasar hasta dos años en su oficina de ciencia en Santiago para que las y los estudiantes lleven a cabo su trabajo de investigación, bajo la supervisión conjunta del/la director/a de tesis de la universidad de origen y de un/a astrónomo/a de ESO. En la última década, ocho estudiantes de Chile han sido becados. Esto corresponde al 18% del total de los estudiantes de doctorado de ESO en el país y posiciona a Chile como la nación que más se beneficia de estas becas, por sobre los Estados Miembros de ESO y el resto de mundo.

“Ser estudiante de astronomía en el lugar preferido por los grandes observatorios del mundo es todo un privilegio, sobre todo con el acceso especial al tiempo de observación de la comunidad chilena”



Sebastián Zúñiga (Chile), Ingeniero Civil Electrónico y Magíster en Ingeniería Electrónica de la Universidad Federico Santa María. Actualmente es estudiante de doctorado en Astrofísica de la Universidad de Valparaíso y ESO Chile.

“Haber sido seleccionado para la beca ESO fue un gran paso en mi carrera, sobre todo en mis aspiraciones de construir un perfil híbrido donde pudiese desarrollar mi ciencia y ganar experiencia relacionada a las operaciones y la instrumentación en los observatorios de ESO en Chile.

Durante el proceso de postulación, me di cuenta de que había posiciones preferentes para estudiantes locales, y me pareció una buena medida, pensando en el desarrollo de los futuros astrónomos formados en nuestro país.

Está claro que existen estudiantes chilenos (y latinoamericanos) de gran capacidad intelectual que no necesitarían un espacio preferente en la selección, sin embargo, el desarrollo de la ciencia en Chile, y Latinoamérica, aún no cuenta con los recursos que se manejan en otros países. Por tanto, estos espacios aportan a “emparejar la cancha”, al mismo tiempo que propician redes de colaboración entre universidades chilenas e investigadores del mundo.

Por otro lado, ESO entrega estabilidad económica y seguridad para la familia, herramientas a veces difíciles de conseguir para estudiantes, y que son de gran importancia para estar tranquilo y concentrarse en la investigación”.

Becas de investigación postdoctoral en astronomía

Estas becas duran cuatro años, con la posibilidad de pasar el último en otra institución. Las personas realizando investigación postdoctoral tienen el 50% de su tiempo de trabajo asignado a tareas de soporte operacional en el Observatorio Paranal o en ALMA. La otra mitad del tiempo la dedican a su propia investigación científica. En la última década, cuatro chilenos han sido becados, representando el 7,5% de la totalidad de *fellows* de ESO, lo que posiciona a Chile en el quinto lugar.

Por otro lado, varios/as *fellows* de ESO han continuado su carrera en universidades chilenas, contribuyendo al desarrollo de la investigación astronómica nacional.

“ESO reúne en Chile a astrónomos y astrónomas de distintas nacionalidades realizando investigaciones de vanguardia en astrofísica. Este rico ambiente de trabajo me permite crecer como investigadora y expandir mis intereses científicos”



Camila Navarrete (Chile), Doctora en Astrofísica de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Ha desarrollado parte de su trabajo de investigación en la Universidad de Cambridge (Reino Unido). En 2017, fue galardonada con el prestigioso premio L'Oréal-UNESCO para mujeres en ciencia.

“Mi actual línea de investigación es la búsqueda y caracterización de zonas del halo de la Vía Láctea con exceso en la densidad de estrellas. En mi investigación, utilizo diversas técnicas e instrumentos astronómicos para medir la posición, distancia movimiento y, finalmente, composición química de estas estrellas y así reconstruir las etapas tempranas de la formación de la Vía Láctea.

Siendo *follow* en ESO, me desempeño como astrónoma de soporte en Paranal durante 80 noches al año. Llevo a cabo las observaciones programadas con el telescopio UT2 (Kueyen) y doy soporte y seguimiento al instrumento Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph (UVES).

Estar en turnos de hasta 14 noches en el observatorio puede ser desgastante, pero es una experiencia increíble. Trabajar codo a codo con ingenieros, técnicos y operadores de telescopios, en un ambiente grato y acogedor donde cada día o, más bien, cada noche, se aprende algo nuevo.

Las becas de postdoctorado son una oportunidad excepcional para los y las astrónomas de la comunidad chilena ya que, a diferencia de muchas otras posiciones postdoctorales, se complementa la investigación con el trabajo en el observatorio óptico más productivo del mundo”.

Escuela de observación de La Silla

Desde 2016, ESO organiza cada dos veranos sus populares escuelas de observación en el Observatorio La Silla. De los tres eventos llevados a cabo hasta la fecha, un total de 14 estudiantes de pregrado de nacionalidad chilena asistieron a estas escuelas, que tienen como objetivo preparar a las próximas generaciones de profesionales en astronomía.

Durante dos semanas de intenso trabajo en las oficinas de Vitacura y en el Observatorio La Silla, las personas que participan acceden a una experiencia práctica y real del ciclo científico completo, desde la preparación de una propuesta de observación hasta la reducción de datos.

Pasantías de corto plazo en astronomía:

De 2001 a 2019, la oficina de ciencia de ESO acogió adicionalmente a **22 estudiantes nacionales** de posgrado en astronomía, de seis universidades distintas, para pasantías de tres a cinco meses.

La Silla bajo la Vía Láctea, Región de Coquimbo.

Pasantías cortas de ingeniería en Paranal

ESO ofrece a estudiantes chilenos/as, de distintas ramas de la ingeniería, la posibilidad de realizar sus prácticas profesionales en el Observatorio Paranal, brindándoles la experiencia única de participar en proyectos y tareas del departamento de ingeniería y mantenimiento del observatorio. Estas pasantías tienen una duración de entre dos y seis meses.

Cada año, el programa otorga seis becas de verano reservadas para estudiantes chilenos/as, número que se elevó a 14 a contar de fines de 2020. A éstas se suman, cada año, tres becas de invierno, también abiertas a estudiantes de universidades europeas.



“Mi experiencia en el observatorio superó mis expectativas: las condiciones de trabajo son ejemplares”



Vicente Lizana (Chile), Ingeniero Civil Informático de la Universidad Federico Santa María. En 2019, hizo su práctica profesional en el grupo de óptica y sistemas del Observatorio Paranal. En marzo 2020 pasó a integrar el grupo de software del mismo observatorio como ingeniero de planta de ESO.

“En general, a las prácticas profesionales uno va dispuesto a realizar trabajos que el resto no quiere hacer, sin embargo, en Paranal me ofrecieron proyectos muy interesantes, verdaderas oportunidades de hacer una diferencia en el observatorio y aprender en el proceso. Esto potenció mi desarrollo, entregándome herramientas y ayudándome a sentirme capaz de enfrentar el mundo laboral.

Estas oportunidades son bastante escasas en Chile y las considero fundamentales para el desarrollo de los futuros profesionales del país. Tal como esta experiencia tuvo un gran impacto positivo en mi carrera, es probable que una mala primera experiencia laboral tenga impacto negativo en otros futuros ingenieros. No es fácil para la mayoría aproximarse al mundo laboral, sin embargo en el observatorio las condiciones son ideales”.

Becas para estudiantes de la Municipalidad de Taltal

El aporte anual de ESO a estudiantes de la comuna de Taltal en la Región de Antofagasta, donde está emplazado el Observatorio Paranal, ha apoyado a generaciones de enseñanza media y, principalmente, de educación superior con excelencia académica.

Durante la última década, más de 20 jóvenes de Taltal con excelencia académica recibieron la cobertura completa de su arancel universitario, pudiendo terminar exitosamente sus carreras de pregrado.

Adicionalmente, ESO distribuye cada año fondos destinados a cubrir parcialmente el arancel universitario de otros 40 estudiantes, lo que se traduce en un apoyo económico significativo para sus familias.



Fondos de cooperación con universidades regionales

ESO colabora con dos de las principales universidades de la Región de Antofagasta:

Universidad Católica del Norte. Desde 1998, a través del Centro de Divulgación Astronómica administrado por el Instituto de Astronomía de la misma universidad, y mediante el cual cientos de estudiantes y público general pueden acceder de manera regular a diversos contenidos y actividades de difusión científica.

Universidad de Antofagasta. Desde el año 2015, a través del apoyo a su Centro de Investigación, Tecnología, Educación y Vinculación Astronómica, para el fortalecimiento del programa de magíster en astronomía de la misma universidad, y para el desarrollo de iniciativas de difusión astronómica dirigidas a estudiantes y público general. Éstas incluyen un programa anual de capacitación para docentes y guías turísticos, así como charlas, visitas educativas y noches de observación en el desierto.





El VLT en la cumbre del Cerro Paranal, Región de Antofagasta.

Gestión financiera en el país

Las operaciones del conjunto de instalaciones y telescopios de ESO en Chile constituyen un desembolso anual estimado en el país en torno a los CLP \$59 mil millones (equivalentes a unos EUR €66 millones).

Para llevar a cabo su misión, ESO recibe una contribución anual de parte de sus Estados Miembros equivalente a unos CLP \$168 mil millones (EUR €188 millones). Sumados a otras contribuciones e ingresos adicionales, conforman un presupuesto anual de unos CLP \$314 mil millones (EUR €350 millones), de los cuales cerca de la mitad está dedicada al ELT.

La gestión financiera de estos fondos está cuidadosamente regulada por los principales órganos directivos de ESO.

La inversión de ESO en Chile se distribuye principalmente en fondos e instrumentos de financiamiento para el desarrollo de la ciencia y la astronomía nacional, en fondos de carácter educativo, en contratos por compras de bienes y servicios con profesionales y empresas a nivel nacional y regional, y en el empleo del personal de planta.

Importancia del talento local

De un total aproximado de unos 750 funcionarios/as de la Organización a nivel mundial, **más de un 25% es de nacionalidad chilena**, superando el número de funcionarios/as de otras nacionalidades, incluidas las de todos y cada uno de los 16 Estados Miembros de ESO. De ellos, 176 chilenos/as trabajan en Chile y 14 en la sede de ESO en Alemania.

Actualmente, un 60% del personal de nacionalidad chilena, tanto en Chile como en Alemania, se desempeña en el área de ingeniería, seguido por un 20% en el área administrativa y un 15% en el área técnica. El porcentaje restante corresponde a personal que ocupa puestos de astrónomo/a y funciones gerenciales dentro de la Organización.

La predominancia de ingenieros e ingenieras locales es particularmente evidente en sitios como La Silla y APEX, donde el 100% del personal de esta área es de nacionalidad chilena, mientras que en Paranal alcanza más de un 80%.

Si bien el personal de nacionalidad chilena sigue siendo mayoritariamente masculino, en la última década se ha producido un leve incremento en el personal femenino, pasando de un 20% en el año 2008 a un 26% en el 2019. ESO está comprometida con la inclusión e igualdad de oportunidades, y está impulsando medidas para promover la contratación de personal femenino, con énfasis en las áreas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemática (STEM, por su sigla en inglés).

Además de la oportunidad de trabajar en un ambiente multicultural, ESO ofrece a su personal en Chile remuneraciones competitivas, junto a un amplio paquete de beneficios. Entre ellos, se incluye el apoyo económico para la educación de hijas e hijos desde la primera infancia hasta la educación universitaria de posgrado. Asimismo, ESO contribuye al fondo de pensiones de sus funcionarios, seguros y cobertura parcial de sus gastos médicos, entre otros.

▼ Sala de control del interferómetro del VLT (VLTI), en el Observatorio Paranal.



“Me siento con la confianza de que, frente a cualquier desafío, lo enfrentaré con paso seguro gracias al apoyo de la familia ESO”



Carlos Durán (Chile), Ingeniero Civil Eléctrico y Magíster en Ciencias de la Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, además de Doctor en Astrofísica de la Universidad de Bonn (Alemania) y especialista en instrumentación astronómica. Actualmente es Gerente de Operaciones del Observatorio APEX.

“Lidero las operaciones administrativas, técnicas y científicas del observatorio, coordinando el funcionamiento interno del sitio, el trabajo de los institutos del consorcio APEX y de la comunidad científica que ahí investiga. Todo lo anterior velando por la seguridad e integridad del equipo de más de 25 colegas, quienes pueden así contar con las condiciones para desarrollar sus labores de manera eficiente y segura.”

Su trayectoria profesional está estrechamente ligada con ESO y se remonta a más de 15 años. Entre 2004 y 2015 fue Ingeniero Electrónico de APEX y llegó a convertirse en jefe de ingeniería subrogante, para luego migrar a Alemania a obtener su doctorado. De este período señala: “Crecí profesionalmente, abierto a aprender de los *seniors* del grupo, y trabajando siempre en primera línea”.

Tras unos años en la División de Tecnología Sub-milimétrica del Instituto Max Planck para la Radioastronomía, decidió postular al cargo de gerente de operaciones de APEX, lo que lo trajo de vuelta a ESO desde comienzos de 2020: “El regreso se sintió como volver a casa. El equipo me recibió afectuosa y respetuosamente”.

▼ Radiotelescopio APEX en el Llano de Chajnantor, Región de Antofagasta.



Operando junto a la empresa regional y nacional

El éxito de las operaciones de ESO en el país está estrechamente relacionado con la gestión de contratos y compras que se realiza localmente con el propósito de obtener la mejor calidad en bienes y servicios a un precio competitivo para cumplir la misión de la Organización.

Durante la última década, el total de las adquisiciones de bienes y servicios hechos por ESO en Chile ascendió a un 30% del valor de todos los compromisos de compra realizados por la Organización en este período, alcanzando un promedio anual de aproximadamente CLP\$ 40 mil millones (equivalentes a unos EUR €45 millones) invertidos en el país.

Estas necesidades abarcan una amplia gama de bienes y prestaciones, desde trabajos de construcción y desarrollo de nuevas tecnologías con socios de la industria, hasta adquisición de artículos recurrentes necesarios para las operaciones cotidianas y de funciones de apoyo doméstico para las instalaciones. Desde el suministro de agua potable para los observatorios, la construcción de la residencia en el sitio de ALMA, los servicios de transporte aéreo y terrestre tanto para personal como para carga, hasta prestaciones especializadas de ingeniería para el mantenimiento de instrumentos en los observatorios, por mencionar algunos ejemplos.

Durante los últimos diez años, ESO realizó una fracción mayor de sus compras en Chile que en cualquiera de sus Estados Miembros. En este período, el 19% de las adquisiciones de ESO en Chile se hicieron en la Región de Antofagasta, representando el 6% del presupuesto total de la Organización en este ítem. Esta inversión regional en Antofagasta solo fue superada por aquella hecha a nivel nacional en Alemania, Italia y Francia.

▼ Firma de contrato (2018) con la empresa de ingeniería y construcción Abengoa Chile para construir instalaciones de montaje y mantenimiento de los espejos del ELT. En la imagen, el equipo de ESO y la empresa involucrados en el contrato.





G. Hudepohl/ESO

▲ Vista aérea de la construcción del edificio de soporte técnico para el ELT en el Observatorio Paranal, finalizada en 2020.

MT Mecatrónica: Mantenimiento y soporte altamente especializado en el norte de Chile

MT Mecatrónica SpA —actualmente OHB Chile— es una empresa de servicios de mantenimiento, ingeniería y ensamblaje que ofrece soporte altamente especializado en dos grandes áreas en crecimiento en Chile: las instalaciones astronómicas y las plantas de energía renovables en el norte del país.

Fue fundada en 2009 como subsidiaria chilena de la empresa alemana MT-Mechatronics GmbH, luego de ser socia local en el ensamblaje de las 25 antenas europeas, parte del conjunto del radiotelescopio ALMA. Con 30 técnicos e ingenieros, el equipo de MT Mecatrónica SpA prestó servicios por más de ocho años en el Observatorio Paranal, realizando mantenimiento preventivo y correctivo en los telescopios e instalaciones técnicas del sitio, así como proyectos de montaje, mejoramiento y fabricación de piezas especializadas en el lugar.

“Durante estos años pudimos establecer una sólida relación entre ESO y MT Mecatrónica, caracterizada por la confianza, la colaboración y el servicio a un alto nivel. Logramos formar parte de un nuevo desarrollo: la aplicación de normas de mantenimiento industrial y de información en un área muy especializada como son las instalaciones astronómicas en Chile”.

Pierre Chapus, Gerente General de MT Mecatrónica SpA.



Eclipse total de Sol 2019, Observatorio La Silla, Región de Coquimbo.

ESO

para todo público



Una institución pública como ESO tiene la responsabilidad de nutrir a la sociedad con contenidos y experiencias significativas, como resultado de sus actividades científicas. Con este propósito, ESO despliega un amplio abanico de actividades de comunicación y difusión, especialmente en sus Estados Miembros y en Chile.

Uno de los eventos públicos más relevantes realizados por la Organización se vivió en 2019. Unos tres meses después de conmemorar el cincuentenario de su inauguración, el Observatorio La Silla fue testigo de un eclipse total de Sol.

“Esto es una demostración de que la ciencia, cuando se abre, se trabaja con toda la ciudadanía, se puede convertir en una gran celebración de cómo los seres humanos hemos sido capaces de explorar el Universo, descifrar misterios a través de nuestra creatividad y pensamiento crítico”.

Andrés Couve, Ministro de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, (2 de julio de 2019, día del eclipse de Sol en La Silla).

Para celebrar esta oportunidad —que no se repetirá en más de dos siglos— La Silla recibió, por primera vez en su historia, a más de mil visitantes en un solo día, entre ellos, unos 50 escolares y unos 30 adultos mayores de la Región de Coquimbo, junto con una delegación de más de 30 estudiantes de enseñanza media de todas las regiones del país, seleccionados por Explora CONICYT (actual ANID).

“Nuestros jóvenes pasaron una experiencia fantástica en el Observatorio... estoy feliz de saber que nunca se olvidarán de esta linda oportunidad en sus vidas. A eso se llama ‘marcar’ las vidas de nuestros estudiantes”, señaló María Rebeca López Santander, encargada del programa de astronomía de la Corporación Gabriel González Videla de La Serena. Entre las personas invitadas se contaron también a turistas de cuatro continentes, científico/as, personal de ESO, casi 70 periodistas de medios nacionales e internacionales y autoridades chilenas, entre ellas dos Ministros de Estado y el Presidente de la República.

Medios de comunicación

La prensa es un aliado clave para acercar los observatorios a un público mucho mayor que el que puede visitarlos. Con ese propósito, **ESO recibe cada año un promedio de 50 visitas de medios nacionales e internacionales** a los observatorios Paranal, La Silla, APEX y ALMA. Esto contribuye a difundir la astronomía y la labor de ESO en el país anfitrión. Por otra parte, a través de medios internacionales, permite promover la imagen de Chile como país astronómico, desde la investigación de vanguardia al turismo, **alcanzando potencialmente a cientos de millones de personas alrededor del mundo.**

Además, en ocasiones especiales, como han sido el eclipse total de Sol del 2 de julio de 2019 en el Observatorio La Silla o la primera piedra del ELT en mayo de 2017, ESO ha invitado a delegaciones de periodistas nacionales e internacionales para potenciar la cobertura mediática. Con este propósito, desde 2017, ESO ha establecido alianzas estratégicas con Imagen de Chile, organización gubernamental responsable de promover la marca país en el extranjero.

Además de las visitas a los observatorios ESO, cada año su departamento de comunicación atiende desde Chile **más de 60 solicitudes de entrevistas de medios chilenos o extranjeros con base en Chile y América Latina.**



◀ La alianza con Televisión Nacional de Chile permitió que La Silla fuera una de las cinco locaciones escogidas para la transmisión en vivo del eclipse total de Sol de 2019, que acompañó a personas de todo Chile desde tempranas horas de la mañana, hasta el atardecer.

Primera imagen de un agujero negro

El día 10 de abril de 2019 se realizó una conferencia de prensa simultánea en Bruselas, Washington, Taipei, Tokyo y Santiago para anunciar uno de los descubrimientos astronómicos más importantes de la década: la primera imagen de la sombra del agujero negro ubicado en el centro de la galaxia M87. En Santiago, las oficinas de ALMA en Vitacura fueron la sede del evento mundial.

▼ Primera imagen de un agujero negro captada con el Event Horizon Telescope (EHT), instrumento que ha utilizado ocho radiotelescopios distribuidos por el planeta, entre ellos, ALMA y APEX.

Cobertura y audiencia



+ de 35 medios

asistieron al evento.



+ de 700 millones

de personas recibieron noticias del EHT asociado a ALMA/APEX en todo el mundo.



+ de 291 mil

visitantes, entre sitio web y redes sociales.

Visitas públicas y educacionales

ESO abre las puertas de sus observatorios a toda persona interesada en acercarse al trabajo que, desde estos lugares recónditos, hace posible alcanzar y expandir el conocimiento sobre el Universo. El programa de visitas públicas contempla tours gratuitos semanales guiados a los Observatorios La Silla y Paranal.

Con el fin de ofrecer más oportunidades a los grupos escolares y generar un vínculo más directo con las nuevas generaciones de las comunas aledañas, ESO ha dispuesto un programa especial de visitas educacionales guiadas a los observatorios La Silla y Paranal, con frecuencia mensual y en días lectivos. Este programa, que incluye servicio de transporte desde el colegio hasta el observatorio, está dirigido a establecimientos de escasos recursos económicos de las regiones de Coquimbo y Antofagasta respectivamente. Cuando entre en funcionamiento, beneficiará a unos 1.000 estudiantes de enseñanza básica y media por año.

Recibir visitantes de manera segura en sitios remotos no diseñados para tal fin, requiere la contratación de servicios profesionales especializados, que implican una inversión estimada de CLP \$25 mil por visitante, presupuesto financiado enteramente por ESO.

Inaugurados en julio de 2020 como alternativa a las visitas presenciales durante la pandemia, los recorridos virtuales guiados se han consolidado como una herramienta muy eficaz para conectar con el público, ofreciendo una experiencia inmersiva e interactiva, un espacio compartido entre ciencia y sociedad. Estos tours, accesibles vía redes sociales, se realizan dos veces por semana (una en español y otra en inglés) y han cautivado a público del mundo entero.

Cada año:

Los Observatorios La Silla y Paranal reciben cerca de 8.000 visitantes, de Chile y el mundo, sumando más de 84 mil visitantes en la última década.

▼ Turistas en visita pública al Observatorio Paranal.



Eventos y exposiciones

Eventos públicos y educativos, además de exposiciones, son una manera de involucrar directamente a la sociedad con la astronomía. Para ello, la colaboración con instituciones afines a lo largo de todo Chile es vital.

ESO participa regularmente en actividades de divulgación de la ciencia, con charlas, materiales impresos y audiovisuales, monitores/as y talleres en diversos eventos tales como la Semana Nacional de la Ciencia y el Día Nacional de la Astronomía, y también coopera en una serie de eventos públicos y educativos, especialmente en las regiones de Antofagasta, Coquimbo y Metropolitana, alcanzando cada año decenas de miles de personas.

Hacer un aporte y tener presencia en espacios de gran valor cultural y educativo como son museos y planetarios, también es una manera muy efectiva de entregar contenidos al gran público y de contribuir al enriquecimiento de la oferta cultural del país. Mediante estos **aportes a exposiciones permanentes, ESO llega, anualmente, a unas 650.000 personas**. Sumando aquellas iniciativas que intervienen espacios públicos de alto flujo, este número asciende a varios millones de personas.





La Gran Nube de Magallanes corona el cielo nocturno en Paranal.

Colaboración para un desarrollo sostenible

Los desafíos planteados por las ciencias astronómicas impulsarán en Chile el desarrollo tecnológico y el crecimiento de capital humano especializado.

Un nuevo capítulo de la astronomía desde la Tierra está empezando a escribirse y Chile seguirá siendo protagonista. Una nueva generación de grandes telescopios entrará en operaciones hacia fines de esta década, en las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo. Para cosechar todo el potencial de sus instalaciones existentes y futuras, ESO enfrenta numerosos desafíos. Para ello, establece valiosas alianzas y cooperaciones que involucran y benefician a Chile.

Industria 4.0, Astronomía 4.0

El ELT y algunos aspectos operativos del conjunto CTA Sur serán integrados con el VLT en el Observatorio Paranal, lo que sería inviable bajo el modelo de funcionamiento actual. Para que esta integración sea factible, se necesita incorporar herramientas y métodos de Industria 4.0 (I4.0), tales como: Inteligencia Artificial (IA), aprendizaje automático, aprendizaje profundo, Internet de las Cosas (IdC) así como sistemas y máquinas inteligentes.

Esto requiere de una inversión importante en dispositivos IdC, computación en la nube y capacitación de personal de las áreas de ciencia e ingeniería. Para ello, ESO ha establecido colaboraciones con universidades chilenas y empresas como Microsoft Chile y MetricArts que, junto con el personal de ESO, están utilizando el VLT como laboratorio I4.0, para posibilitar la llamada "Astronomía 4.0".

En el marco de esta colaboración, Microsoft Chile recibió, el 28 de agosto de 2019, el premio "Transformación digital e Industria 4.0" de la Asociación Chilena de Empresas de Tecnología de la Información.

La capacitación en I4.0 está incorporándose al programa de pasantías de ingeniería en Paranal. Estos programas, junto con más proyectos de Innovación y Desarrollo (I+D) se verán potenciados considerablemente por el Acuerdo de Cooperación del ELT.

Diversidad e inclusión

Abordar problemas complejos requiere trabajo en equipo para integrar diferentes capacidades y perspectivas. Desde sus valores organizacionales, ESO está comprometida a fomentar la diversidad en su fuerza de trabajo.

Como punto de partida, el 30 de enero de 2020, ESO y ONU Mujeres firmaron un memorando de entendimiento. ESO está trabajando para incluir los principios de empoderamiento de la mujer de ONU Mujeres para estructurar y medir el progreso de sus acciones de diversidad e inclusión.

Esta cooperación con ONU Mujeres tiene como objetivos evaluar la brecha de género en carreras STEM y establecer una estrategia de reclutamiento para alcanzar una mayor equidad en los futuros puestos de ingeniería relacionados a la construcción y operación del ELT.

Además de promover las carreras de ciencias e ingeniería entre las jóvenes de Chile, ESO y ONU Mujeres unirán fuerzas para ofrecer oportunidades de formación a aquellas mujeres que no han podido terminar su educación formal, especialmente en la Región de Antofagasta.

ESO aporta con:

La promoción del STEM entre las jóvenes mediante iniciativas de divulgación con las astrónomas e ingenieras de ESO.

Programa piloto de pasantías conjuntas con Laboratorio, organización sin fines de lucro centrada en formar jóvenes mujeres de bajos recursos económicos como programadoras y expertas en desarrollo web, para impulsar su inserción laboral en el sector digital.



◀ María Noel Vaeza, Directora Regional de ONU Mujeres para las Américas y el Caribe, y Xavier Barcons, Director General de ESO, firmaron un memorando de entendimiento entre ambas organizaciones, el 30 de enero de 2020.

Sustentabilidad

ESO reconoce el valor de construir y operar sus sitios de observación astronómica desde un lugar con condiciones tan únicas como las que ofrece el desierto de Atacama. La protección del medio ambiente es un componente sumamente importante y constituye un valor añadido a nuestros proyectos y operaciones.

ESO está trabajando en la elaboración e implementación de una estrategia ambiental global, con el propósito de reducir la huella de carbono de la Organización a mediano plazo.

Por ello, ESO ha implementado una serie de iniciativas para trabajar de la forma más sustentable posible, con el propósito de reducir el impacto de sus operaciones en el medioambiente.

- + **Planta fotovoltaica La Silla.** Construida y operada por ENEL Green Power e inaugurada en 2016 y con una capacidad instalada de 1,7 MW, evita la emisión de aproximadamente 2.000 toneladas de CO₂ por año. El 50% de la energía producida en el sitio es destinada al consumo energético del observatorio astronómico, mientras que el resto es inyectado al Sistema Interconectado Central.
- + **Planta fotovoltaica Armazones-Paranal y sistema de acondicionamiento de energía.** Se comenzará a instalar el próximo año en el sitio del ELT. Las operaciones de ambos sistemas comenzarán en dos años. Estas instalaciones suministrarán energía renovable al Observatorio Paranal (que incluye el ELT).
- + **Oficinas de Vitacura.** Autos eléctricos y contenedores de reciclaje se suman a la gestión de la recolección de agua lluvia para regar las grandes extensiones de áreas verdes.
- + **Recambio gradual de flota a vehículos eléctricos y política cero plástico en Paranal.** Otras iniciativas del Observatorio Paranal incluyen: la incorporación de autos eléctricos para ir reemplazando gradualmente el 75% de los vehículos con gasolina en los próximos 10 años; el reciclaje y la gestión de materiales peligrosos como baterías, productos químicos, aceites, etc.; el manejo de residuos orgánicos de los alimentos y la eliminación de las botellas de plástico utilizadas para dispensar agua en todo el sitio. Además, se incluye el mejoramiento de la planta de aguas residuales, la eliminación del uso de calentadores de gas y mejoras logísticas generales para reducir la huella de carbono de las operaciones.



Contaminación lumínica: ayudando a la protección de la oscuridad de los cielos

El futuro de Chile como capital mundial de la astronomía depende de la preservación de los cielos oscuros. La contaminación lumínica es un problema global que constituye la principal amenaza para la calidad de cielos que son únicos en el mundo, además de afectar seriamente los ecosistemas y la salud física y mental de las personas.

La preservación de la oscuridad de los cielos del norte como laboratorios naturales constituye la base de la continuidad de las operaciones astronómicas en el país, para el astroturismo y para todas las actividades científicas, económicas y de difusión en torno a la astronomía. ESO participa activamente en iniciativas para apoyar la implementación de la normativa lumínica en el país.

Oficina de Protección de la Calidad del Cielo del Norte de Chile. ESO es parte del convenio que permitió su creación en el año 2000 y contribuye a su financiación, junto al entonces Comité Nacional del Medio Ambiente, a la Asociación de Universidades para la Investigación en Astronomía, y los Observatorios Carnegie, a los que recientemente se sumó el Telescopio Magallanes Gigante. Actualmente, también participan como socios el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, el Ministerio de Medio Ambiente y el Ministerio de Relaciones Exteriores. El aporte anual de ESO asciende a CLP \$66 millones (equivalentes a EUR €72 mil).

Fundación Cielos de Chile. ESO es parte del directorio de esta institución sin fines de lucro creada en 2019.





Astroturismo

Otra oportunidad que ofrece la consolidación de la astronomía en Chile es el desarrollo del turismo en torno a esta ciencia, conocido como astroturismo, abriendo posibilidades de liderazgo mundial para el país en este sector. ESO considera que el astroturismo puede generar una industria sostenible a su alrededor, con múltiples beneficios para la comunidad. ESO ha apoyado esta orientación estratégica a través de la iniciativa Astroturismo Chile, programa que cuenta además con el apoyo de la Subsecretaría de Turismo, el Comité de Inversiones Extranjeras de Chile, Turismo Chile, Associated Universities, Inc., la Pontificia Universidad Católica de Chile y la Fundación Planetario, entre otras instituciones.



Impresión artística del ELT en Cerro Armazones, Región de Antofagasta.

Mirando al futuro

ESO seguirá trabajando para colaborar con todos los sectores interesados en Chile con el propósito de difundir los beneficios de la ciencia y la astronomía a toda la sociedad.

Los desafíos que ESO enfrentará en cuanto a transformación digital, diversidad e inclusión, y a la necesidad urgente de actuar para detener el cambio climático se superponen a los retos globales que se plantean para las próximas décadas.

En este sentido, es preciso desarrollar una relación más cercana con las comunidades regionales con las que ESO convive en vecindad en sus sitios, para asegurar que éstas se beneficien directamente de la presencia de ESO en el país.

La creación de la oficina de relaciones regionales de ESO a fines de 2019 es una clara señal del compromiso de la Organización por fortalecer su presencia y diálogo con las comunidades de Antofagasta y Coquimbo. También se está redefiniendo la estructura de gestión de los fondos de cooperación regional aportados por ESO para involucrar a estas dos regiones en el proceso de toma de decisiones, buscando consolidar las relaciones de cooperación.



Nebulosa de la Llama en la constelación de Orión, tomada por el telescopio VISTA en el Observatorio Paranal.





www.eso.org - www.eso.cl



@ESO_Chile



@ESO.Chile



@esoastronomy



European Southern Observatory (ESO)

Alonso de Córdova 3107,
Vitacura, Santiago de Chile
contacto@eso.org

Karl-Schwarzschild-Str. 2, 85748
Garching bei München, Germany
information@eso.org