



Universidad de Chile
Instituto de la Comunicación e Imagen
Escuela de Periodismo

Desarrollo de la astroingeniería y astroinformática en Chile durante la
última década

VALENTINA DEL PILAR ORTIZ HERRERA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE PERIODISTA

Categoría: Escrita, Reportaje

Profesor guía: Laureano Checa De Laguna

Santiago de Chile
Marzo, 2022

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Bruna y Roberto, por el sacrificado y cariñoso esfuerzo que realizaron día a día para educarme y permitir que hoy me encuentre a punto de graduarme de la universidad.

A mi abuelita Dolores, quién partió en medio del desarrollo de esta tesis, por transmitirme el amor por la lectura.

Al profesor Laureano Checa, por sus consejos, paciencia y minucioso trabajo de edición que sacaron adelante este reportaje.

Y a todos las y los entrevistados que colaboraron en esta investigación y que con mucho entusiasmo y generosidad me compartieron sus experiencias y conocimientos, a pesar del contexto pandémico.

ÍNDICE

I.	EL DESARROLLO DE LA ASTROINGENIERÍA Y ASTROINFORMÁTICA CHILENA: IMPOSIBLE SIN LA INSTALACIÓN DE OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS EN EL NORTE DE CHILE	5
I. 1.	EL DESIERTO DE ATACAMA: UN LABORATORIO NATURAL PARA EL DESARROLLO ASTRONÓMICO	10
I. 2.	ANTECEDENTES DEL DESARROLLO ASTRONÓMICO EN CHILE	13
I. 3.	PRIMERA OLA DE INSTALACIÓN DE TELESCOPIOS.....	14
I. 4.	NUEVAS LUCES EN EL DESIERTO: SEGUNDA OLA DE INSTALACIÓN DE TELESCOPIOS (Y RADIOTELESCOPIOS).....	16
I. 5.	EL FUTURO DE LA ASTRONOMÍA: TERCERA OLA DE INSTALACIÓN DE OBSERVATORIOS.....	17
I. 6.	PARTES DE UN TELESCOPIO ÓPTICO Y DE UN RADIOTELESCOPIO	18
II.	ASTROINGENIERÍA Y ASTROINFORMÁTICA HECHA EN CHILE.....	20
II. 1.	LABORATORIO DE ONDAS MILIMÉTRICAS Y SUBMILIMÉTRICAS DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE ..	20
II. 2.	ALMA-UTFSM GROUP EN LA UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA Y EL OBSERVATORIO VIRTUAL CHILENO	23
II. 3.	LABORATORIO DE ASTROINFORMÁTICA DEL CENTRO DE MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE	25
II. 4.	CENTRO DE ASTROINGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA	27
II. 5.	ASTROINGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LA SERENA	30
II. 6.	UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN- LABORATORIO DE ASTRO-INGENIERÍA Y MICROONDAS (LAIM)	31
II. 7.	GRUPO ASTRO DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INFORMÁTICA DE LA UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE	32
II. 8.	ÁREA DE ASTROINGENIERÍA DEL CENTRO DE EXCELENCIA DE MODELACIÓN Y COMPUTACIÓN CIENTÍFICA DE LA UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA	34
II. 9.	CENTRO PARA LA INSTRUMENTACIÓN ASTRONÓMICA DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN	35
II. 10.	LABORATORIO DE ASTROINGENIERÍA DEL DESIERTO DE ATACAMA DE LA UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA.....	37
II. 11.	UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO Y EL NÚCLEO DE FORMACIÓN PLANETARIA	38
II. 12.	ASTROINGENIERÍA EN LA UNIVERSIDAD AUSTRAL.....	39
II. 13.	LA IMPORTANCIA DE UNIÓN DE LOS ASTROINGENIEROS Y LA RED CHILENA DE INSTRUMENTACIÓN ASTRONÓMICA (CHAIN)	40
III.	DESARROLLO DE LA ASTROINGENIERÍA Y ASTROINFORMÁTICA: TECNOLOGÍA DE FRONTERA Y CAPITAL HUMANO AVANZADO PARA CHILE.....	43
III. 1.	TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA DESDE LAS UNIVERSIDADES	45
III. 2.	UNIDAD DE DATA SCIENCE DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN.....	47
III. 3.	<i>BEYOND DATA</i> : EMPRESA DEDICADA A LA TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA.....	48
III. 4.	NO TODO LO QUE BRILLA ES ORO: PROBLEMAS DE LA TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA	49
III. 5.	CAPITAL HUMANO AVANZADO: ¿EN QUÉ TRABAJAN LOS ASTROINGENIEROS Y LOS ASTROINFORMÁTICOS?.....	52
III. 6.	LOS CHILENOS DEL OBSERVATORIO ALMA	52
III. 7.	ASTRÓNOMOS COMO CIENTISTAS DE DATOS	56
IV.	FINANCIAMIENTO DE LA ASTROINFORMÁTICA Y LA ASTROINGENIERÍA	60
IV.1.	FINANCIAMIENTO A CORTO PLAZO	60
IV. 2.	FINANCIAMIENTO A LARGO PLAZO	63
IV. 3.	CREACIÓN DE LA FUNDACIÓN DATA OBSERVATORY	64
IV. 4.	EL DATA OBSERVATORY HOY.....	69
IV. 5.	CONSIDERACIONES FINALES EN TORNO AL FINANCIAMIENTO	71

V.	PROYECCIONES SOBRE EL DESARROLLO DE LA ASTROINGENIERÍA Y DE LA ASTROINFORMÁTICA	73
V. 1.	DESARROLLO DE LA ASTROINGENIERÍA Y ASTROINFORMÁTICA EN CHILE: IMPOSIBLE SIN LOS OBSERVATORIOS	73
V. 2.	CONTAMINACIÓN LUMÍNICA.....	75
V. 3.	ÁREAS DE INTERÉS CIENTÍFICO PARA LA OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA	77
V. 4.	CONTAMINACIÓN LUMÍNICA: EFECTO EN LA SALUD HUMANA Y EN LA BIODIVERSIDAD.....	79
V. 5.	POSIBILIDADES DE LA ASTROINGENIERÍA Y LA ASTROINFORMÁTICA: ASPECTOS A MEJORAR	80
VI.	PALABRAS FINALES: LA CIENCIA QUE NO VEMOS	84
VII.	BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN	86
VII. 1.	ENTREVISTAS.....	86
VII. 2.	INVESTIGACIONES ACADÉMICAS	88
VII. 3.	LEGISLACIONES	88
VII. 4.	LIBROS	89
VII. 5.	ESTUDIOS E INFORMES ESPECIALIZADOS	89
VII. 6.	ARTÍCULOS PERIODÍSTICOS.....	89
VII. 7.	SITIOS WEB	92

I.

El desarrollo de la astroingeniería y astroinformática chilena: Imposible sin la instalación de observatorios astronómicos en el Norte de Chile

En el año 2030 Chile albergará un 55,6% de la capacidad astronómica del mundo, según un cálculo¹ realizado por Eduardo Unda-Sanzana, director del Centro de Astronomía de la Universidad de Antofagasta. Esa cifra se obtiene sumando a la lista de telescopios ya instalados en el país, a los proyectos de última generación que próximamente verán sus primeras luces, como el Telescopio Gigante de Magallanes y el Telescopio Extremadamente Grande.

Atraídos por los cielos despejados del Desierto de Atacama, distintos consorcios internacionales como el Observatorio Europeo Austral (ESO por sus siglas en inglés), la Asociación de Universidades para la Investigación en Astronomía (AURA) y la Institución Carnegie para la Ciencia, entre otros, han emplazado importantes instalaciones astronómicas, como el Observatorio Paranal y el radiotelescopio Alma (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*), en Chile, impulsando notablemente el desarrollo de la actividad en el país.

Esto también ha beneficiado a los astrónomos que trabajan en instituciones nacionales. Estos profesionales han aprovechado la instalación de los instrumentos, ya que existe una norma propiciada por el Estado de Chile que obliga a que se les otorgue un 10% de tiempo de observación en cada uno de los telescopios. A cambio, los organismos extranjeros obtienen beneficios como exenciones tributarias, estatus diplomático y concesiones de tierras que facilitan su establecimiento.

¹ Cálculo de la capacidad astronómica instalada en Chile. Eduardo Unda-Sanzana, Universidad de Antofagasta, 14 de mayo de 2020.

Gracias al acceso asegurado a los telescopios, la astronomía local se ha desarrollado con fuerza en las últimas décadas. Según el último catastro de la Sociedad Chilena de Astronomía, realizado en mayo de 2020, veintiún universidades realizan investigación en el área. “La astronomía está súper bien posicionada porque es la principal ciencia de Chile, por lejos. Es la principal ciencia en términos de generación de *papers* (artículos académicos), de investigación, de resultados, de impacto en la comunidad internacional. Eso es porque los grandes proyectos astronómicos desde hace 30 años se han instalado acá, por nuestros privilegiados cielos en el norte. Entonces todo ese interés internacional por desarrollar la astronomía que se ha instalado en el país se ha propagado y ha permeado hacia la astronomía chilena”, explica David Rebolledo², astrónomo del equipo de operaciones de Alma.

El crecimiento de la astronomía como disciplina científica no ha sido el único efecto de la instalación de los observatorios. También ha posibilitado en la última década el advenimiento de ciencias afines a esta como la astroingeniería y la astroinformática, lo que ha abierto la puerta al desarrollo tecnológico de punta en universidades chilenas, siendo un punto de partida, por ejemplo, para el avance de la ciencia de datos. “El crecimiento de la astroingeniería es valorado positivamente, sobre todo viéndolo como un motor para el desarrollo del país”, expresa María Argudo³, presidenta de la Sociedad Chilena de Astronomía.

La astroingeniería es una disciplina que combina conceptos ingeniería y astronomía para el desarrollo de infraestructura astronómica⁴, incluyendo el diseño y elaboración de componentes eléctricos, mecánicos y ópticos de los telescopios, mientras que la astroinformática tiene relación con la parte informática de estos⁵.

Rebolledo asevera que la explosión de la astroingeniería en el país puede explicarse debido a que los proyectos que se han instalado en Chile son cada vez más grandes y complejos: “Por eso se necesita mano de obra; se necesita cerebro. Se empezó a abrir un

² David Rebolledo fue entrevistado el 8 de septiembre de 2021 vía Zoom.

³ María Argudo fue entrevistada el 27 de agosto de 2021 vía Zoom.

⁴ Definición obtenida del sitio web de Alma “Mesa Redonda de Astroingeniería – “Astroingeniería: el impacto de la astronomía en la sociedad chilena, más allá de la ciencia»” publicado el 2 de octubre de 2015.

⁵ Es importante mencionar que astroingeniería y astroinformática son conceptos que se empezaron a ocupar recién durante la última década, por lo que aún carecen de definiciones más elaboradas y estandarizadas.

nicho que quizás antes existía, pero a mucha menor escala de esta relación entre ingeniería y astronomía. De ahí surgió esta palabra bien bonita que se llama la astroingeniería”, explica.

Amelia Bayo⁶, directora del Núcleo de Formación Planetaria y académica de la Universidad de Valparaíso, considera que para potenciar esta ciencia el país debe involucrarse en la infraestructura: “Los telescopios vinieron y se instalaron. Durante años se generó el conocimiento dentro de Chile para que la gente pudiera explotar de la mejor manera posible las posibilidades de esos telescopios y ahora se está dando el siguiente paso que es tener injerencia en las nuevas infraestructuras que se vayan a establecer”, afirma.

Durante la última década, distintas universidades a lo largo de Chile han comenzado a desarrollar proyectos de astroingeniería y astroinformática en sus departamentos de Ingeniería y Astronomía, mediante la colaboración con observatorios instalados en Chile y otras universidades extranjeras asociadas también a estos. Chile pasó de ser solo el anfitrión que alojaba a los telescopios, a ser un colaborador en el desarrollo tecnológico, en la mantención y operación del equipamiento.

Ricardo Bustos, director del Laboratorio de Astroingeniería y Microondas de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, cuenta que a inicios de los 2000 llegaron al Valle de Chajnantor los primeros radiotelescopios y que estos contaban con financiamiento universitario, como, por ejemplo, el *Atacama Cosmology Telescope Project* (ACT), de la Universidad de Princeton, o *The Cosmic Background Imager*, del Instituto Tecnológico de California (Caltech). Como tenían menos recursos que los observatorios instalados por grandes consorcios, optaron por colaborar con universidades chilenas en busca de personal calificado.

“Así es como alguna camada de ingenieros empezamos a trabajar en estos radiotelescopios y ahí empezamos a aprender el funcionamiento, la ciencia, y -en el fondo- hicimos un doctorado con ellos. Esa fue la primera formación de capital humano avanzado⁷, pero luego nos contrataron en las universidades donde armamos laboratorios de

⁶ Amelia Bayo fue entrevistada el 19 de agosto de 2021 vía Zoom.

⁷ El capital humano avanzado consiste en personas con estudios de postgrado que “favorecen el desarrollo de la ciencia y la tecnología”, según la definición de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (Anid).

astroingeniería y ahora estamos formando una nueva generación de ingenieros”, explica Bustos⁸.

Fernando Cortés⁹, ingeniero del Centro para la Instrumentación Astronómica (CePIA) de la Universidad de Concepción, aclara que el laboratorio del que es parte surgió de una necesidad que tenían en los centros astronómicos de instrumentación complementaria requerida para la operación de los telescopios. Por ejemplo, en CePIA desarrollaron un radiómetro de vapor de agua a 183 GHz, un instrumento que sirve para medir el vapor de agua que interfiere con las señales de los radiotelescopios.

“En la instalación de los telescopios en el Norte, mucha de la instrumentación viene ya hecha o comprada desde afuera, pero también hay un nicho en el que nosotros podemos hacer algo. Entonces, en vista de las necesidades que tienen los telescopios se crean estos instrumentos que pueden solventar y resolver algún problema”, explica Cortés.

Tanto la astroingeniería como la astroinformática tienen amplias posibilidades de transferencia tecnológica a otras áreas, como la agricultura, la minería o la medicina. Rolando Dunner¹⁰, subdirector del Centro de Astro-Ingeniería UC, piensa que esto se da porque “la astronomía tiene la gran virtud de ser una ciencia muy exigente técnicamente, y eso significa que los telescopios son instrumentos que siempre están engrosando el límite del conocimiento humano en términos de técnicas”.

En la misma línea, Rodrigo Reeves¹¹, académico de la Universidad de Concepción y director de CePIA, advierte que, si la astroingeniería recibiera un financiamiento amplio para potenciar su desarrollo, podría revolucionar la industria del país. A su juicio, no es algo que las autoridades consideran.

“Desde el punto de vista político: ¿Qué es lo que aparece? Que están estos observatorios, que son grandes, que vienen hartos extranjeros y que se generan imágenes que son bonitas. Pero hay mucho más que eso. Bien financiada desde el punto de vista del desarrollo tecnológico, esta disciplina podría revolucionar la forma en la cual se hace la

⁸ Ricardo Bustos fue entrevistado el 26 de agosto de 2021 vía Zoom.

⁹ Fernando Cortés fue entrevistado el 2 de septiembre de 2021 vía Zoom.

¹⁰ Rolando Dunner fue entrevistado el 9 de julio de 2021 vía Zoom.

¹¹ Rodrigo Reeves fue entrevistado el 17 de junio de 2021 vía Zoom.

industria. Por ejemplo, si uno toma la tecnología de frontera¹² que se está trabajando para poder detectar las señales cósmicas y la implanta en la industria, va a haber una revolución industrial pero esas cosas no sé si son tan visibles”, explica.

La astroinformática también ha tenido una explosión como área científica debido a que la forma en que se hace astronomía ha cambiado, transformándose en una ciencia principalmente de grandes volúmenes de datos.

“Antiguamente, los astrónomos tomábamos los datos que cabían en un disco y trabajábamos en el computador sin molestar a nadie. Estoy hablando de diez, quince años atrás. Ahora, los observatorios son proyectos grandes que producen tantos datos que un astrónomo por sí solo no es capaz de procesar, y por eso se generan grandes equipos, lo que dio surgimiento a la astroinformática. Es decir, tenemos ingenieros computacionales especialistas en temas de astronomía que producen software especializado para procesar datos de alto volumen”, explica Rebolledo.

María Argudo concuerda con esa visión. “Uno puede pensar al astrónomo como la persona que está mirando en el telescopio, todo el día mirando el cielo. Ese modelo de astronomía no es el que existe ahora; es la visión romántica. Actualmente, está el astrónomo observacional¹³, está el astrónomo teórico¹⁴, pero también está el astrónomo que, en conjunto con ingenieros, desarrolla software y programas para analizar datos y también instrumentación. Inevitablemente, la astronomía se tiene que expandir a otras áreas y las que están más ligadas son obviamente la astroingeniería y la astroinformática. Estamos entrando en la era de los grandes datos y es necesario desarrollar nuevas herramientas para poder analizar la física detrás de todas las observaciones”, explica.

¹² Las tecnologías de frontera son “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”. (Definición obtenida del informe Capacidades y Oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile del año 2012 del Ministerio de Economía).

¹³ El astrónomo observacional es el que trabaja con datos captados de los telescopios (Definición entregada por Pamela Paredes Sabando, Licenciada en Ciencias Físicas en el Área de Astronomía de la Universidad de Concepción). Fue entrevistada el 14 de diciembre de 2021 vía Zoom.

¹⁴ El astrónomo teórico es el que trabaja en base a la teoría y a las simulaciones astronómicas, sin usar datos reales (Definición entregada por Pamela Paredes Sabando, Licenciada en Ciencias Físicas en el Área de Astronomía de la Universidad de Concepción).

En este contexto, a fines del 2016 la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) puso en marcha el Programa de Astroingeniería en el que estudió las posibilidades que tenía el país de capitalizar esta ciencia. La iniciativa dio paso en 2019 a la creación del Data Observatory, una fundación público-privada que tiene como objetivo el almacenaje, procesamiento y poner a disposición grandes volúmenes de datos de distintos orígenes, teniendo como punto de partida los datos astronómicos a los que tienen acceso gracias a la cercanía con los observatorios.

Cabe destacar que el desarrollo de la astronomía, astroingeniería y astroinformática no se hubiese dado si no contáramos en el país con uno de los sitios con los cielos más oscuros del mundo: el Desierto de Atacama.

I. 1. El Desierto de Atacama: Un laboratorio natural para el desarrollo astronómico

El Desierto de Atacama es un lugar idóneo para las observaciones astronómicas debido a que es considerado el lugar no polar más seco del mundo. Esta sequedad minimiza la absorción de vapor de agua, lo que disminuye la nubosidad, por lo que se generan al menos 300 noches utilizables para esta actividad científica. Además, la Corriente de Humboldt y el Anticiclón del Pacífico reducen la formación de nubes.

Sin embargo, los cielos oscuros del desierto hoy se encuentran amenazados por la contaminación lumínica derivada del crecimiento de las ciudades y la instalación de faenas mineras. La mitigación de este tipo de contaminación se convierte en un tema importante al tomar en cuenta que muy pocos lugares del planeta cumplen con las condiciones idóneas para llevar a cabo la astronomía. Además del Desierto de Atacama, otras locaciones privilegiadas para la disciplina son la cima del extinto volcán Mauna Kea en Hawaii, Estados Unidos, las Islas Canarias en España, Sudáfrica y ciertos puntos de la Antártica.

Por estas únicas condiciones, el desierto es catalogado como un laboratorio natural. Es decir, “un sitio de características geográficas únicas (o difícilmente replicables) que permiten ventajas competitivas para el avance de la ciencia y la tecnología en una escala global”, según la definición entregada en el artículo de investigación “Laboratorios naturales como política para el aprendizaje tecnológico y la creación de capacidad institucional: El caso de

astronomía chileno”¹⁵ realizada por José Guridi, actual Jefe de la Unidad de Futuro y Adopción Social de la Tecnología del Ministerio de Economía; Julio Pertuzé, actual Subsecretario de Economía, y Sebastián Pfothenauer, Co-Director del Centro de Tecnología en la Sociedad de Múnich.

Guridi explica¹⁶ que los laboratorios naturales son “una manera de pensar el desarrollo científico y tecnológico de Chile sin tratar de copiar a otros” y agrega: “El desierto te marca un ancla, hay que desarrollarlo porque hay un interés del mundo en eso”.

Otra definición que se ha levantado en el país sobre laboratorio natural es la que entregan José Miguel Aguilera, académico del Departamento de Ingeniería Química y Bioprocesos de la Universidad Católica, y Felipe Larraín, Doctor en Economía de la Universidad de Harvard, en el libro “Laboratorios Naturales para Chile”. Ellos plantean que un laboratorio natural “es una coincidencia de ubicaciones y condiciones únicas de clima, ecosistemas, desarrollo humano pasado, biodiversidad, desastres naturales, etc., que crean oportunidades incomparables para el avance científico y que puede atraer investigación multidisciplinaria desde todo el mundo”¹⁷.

Durante el año 2011, la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (Conicyt) propuso el término laboratorio natural para referirse al Desierto de Atacama y sus excepcionales condiciones geográficas para el desarrollo astronómico. Realizó una importante difusión por el país en el año 2013 a través del programa EXPLORA, poniéndolo como tema central.

Para esa instancia, Conicyt propuso 10 laboratorios naturales chilenos: extremófilos, Antártica y glaciares, sismos y volcanes, estudio del poblamiento, energías renovables, bosques y líquenes, plantas nativas para aplicaciones alimentarias y medicinales, oceanografía, mega-ciudades y astronomía.

¹⁵ GURIDI, J. A.; PERTUZE J. A.; PFOTENHAUER, S.M. (2020). Natural laboratories as policy instruments for technological learning and institutional capacity building: The case of Chile’s astronomy cluster. P. 1.

¹⁶ José Guridi fue entrevistado el 6 de octubre de 2021 en las dependencias del Ministerio de Economía.

¹⁷ AGUILERA, J.M.; LARRAÍN, F. (2018). Laboratorios naturales para Chile: Ciencia e innovación con ventaja. Ediciones UC. P. 20.

Luego, el 2021 la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID), abrió un concurso llamado Nodo Laboratorios Naturales, que busca caracterizar los laboratorios naturales del territorio nacional y trazar una hoja de ruta para el desarrollo de cada uno de ellos. Planteó la caracterización dentro de las categorías de: océano, montaña, cielo, desierto, región subantártica y Antártica. Esto con el fin de empezar a crear una política científica que tenga como punto de partida los laboratorios naturales.

Al respecto, Guridi explica: “Tenemos muchas particularidades geográficas y si realmente las aprovechamos para el desarrollo científico, tecnológico y las posicionamos como la identidad de Chile con la que desarrollamos ciencia y tecnología, yo creo que existe una oportunidad muy buena de posicionarnos y de cambiar la economía, generar más ciencia de la que ya generamos”.

En su investigación, Guridi, Pertuzé y Pfothauer describen una serie de efectos indirectos (o *spillovers*) ocurridos en el país derivados de la instalación de observatorios astronómicos en el Desierto de Atacama. Identifican externalidades institucionales, económicas, sociales, y también mencionan la generación de conocimiento y de infraestructura tecnológica.

Respecto a los *spillovers* institucionales, se refieren a cambios o creación leyes o asignaciones presupuestarias, como la regla del 10% del tiempo de observación para instituciones chilenas o el Fondo Quimal para el desarrollo de instrumentación. Sobre la generación de conocimiento, destacan la creación de una base tecnológica local expresada en el desarrollo de laboratorios de astroingeniería en las universidades. Respecto a la creación de infraestructura tecnológica resaltan la Fundación Data Observatory. En lo económico mencionan la creciente confianza que tienen los observatorios en las empresas chilenas para adquirir productos y en el capital social hablan sobre la percepción pública de la astronomía.

En el apartado del efecto indirecto de conocimiento, puntualizan que una de las formas en que Chile podría aprovechar la ventaja de tener a los observatorios astronómicos en su territorio es desarrollando tecnologías para estos cuando necesitan ser actualizados, poniendo como ejemplo a Gemini Sur, que ya ha sustituido 10 instrumentos desde que empezó a operar en 2000.

“El susto es que al final estos observatorios estén acá pero no dejen nada acá. Eso es lo que se tiene que tratar de evitar. Con el 10% que se logró a nivel científico nos permitió

formar astrónomos y participar en ciencia, pero no basta. Un paso importante es que nos dejen participar en la astroingeniería”, dice Guridi.

Aguilera y Larraín coinciden con lo manifestado en la mencionada investigación y en su libro plantean que: “Los laboratorios naturales deberían generar externalidades en su entorno (spillovers), tales como un incremento en el capital humano, tecnológico y social, desarrollo de universidades y otros centros de investigación, intercambio de experiencias de transferencia tecnológica, creación de nuevos emprendimientos y desarrollo del turismo, entre otras”¹⁸

En ese contexto, este reportaje abordará algunos de los efectos indirectos que ha generado la instalación de telescopios en Chile. Profundizará en el auge de la astroingeniería y la astroinformática en distintas universidades del país que, a su vez, generó el desarrollo de tecnología de frontera, la creación de capital humano avanzado y las posibilidades de transferencia tecnológica.

Pero ¿cómo el Desierto de Atacama se convirtió en uno de los sitios más prominentes para la astronomía?

I. 2. Antecedentes del desarrollo astronómico en Chile

El desarrollo de la astronomía en Chile comienza en 1849, cuando una misión científica perteneciente a la Armada de Estados Unidos y liderada por el teniente James Melville Gilliss llega a nuestro país e instala el primer observatorio astronómico en el Cerro Santa Lucía. Su objetivo inicial era la observación de Venus y Marte.

En 1852, el gobierno de Manuel Montt decidió comprar los instrumentos del observatorio, y estableció el Observatorio Astronómico Nacional (OAN), quedando en manos del Ministerio de Instrucciones Públicas y convirtiéndose en uno de los primeros observatorios de Latinoamérica. Durante esa época realizó importantes trabajos como la localización geográfica de Valparaíso y la participación en la producción de un catálogo de estrellas, organizado por la Conferencia Internacional de Astronomía.

¹⁸ AGUILERA, J.M.; LARRAÍN, F. (2018). Laboratorios naturales para Chile: Ciencia e innovación con ventaja. Ediciones UC. P. 30.

Cuatro años más tarde, el OAN fue trasladado a Quinta Normal y posteriormente a Lo Espejo, escapando de las luces del centro de la ciudad. Después, en 1927 pasa a formar parte de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y en 1959 es transferido al Cerro Calán, lugar donde aún está albergado.

Paralelamente, en 1903 se instaló el Observatorio Lick en el Cerro San Cristóbal, el cual era un homólogo al Lick Observatory con sede en California, Estados Unidos. La misión estaba encabezada por William Wallace Campbell y tenía como propósito “medir las velocidades radiales de las estrellas brillantes del sur”¹⁹.

Sin embargo, los astrónomos californianos del Lick tenían la intención de instalar un observatorio en el hemisferio sur de forma permanente. Por esta razón, el astrónomo Heber D. Curtis, quién comenzó a trabajar en el Lick en 1905, recorre Atacama buscando lugares propicios para el trabajo astronómico.

Como resultado de su viaje, redactó “El Informe Curtis”, conocido por ser el primer documento que da cuenta de las excepcionales condiciones del cielo del norte de Chile. En el escrito el astrónomo detalla que se maravilló con la vista desde las montañas Copiapó, pero que veía como problemática la camanchaca.

En 1929, la Pontificia Universidad Católica decidió comprar el Observatorio Lick y renombrarlo como Observatorio Foster, manteniéndolo en operaciones hasta 1995, cuando la contaminación lumínica hizo muy complicada la observación astronómica en Santiago. En el 2010 fue declarado monumento histórico.

I. 3. Primera ola de instalación de telescopios

Federico Ruttlant, quien fue director del Observatorio Astronómico Nacional entre 1950 y 1963, impulsó una campaña internacional para atraer la instalación de observatorios internacionales en el Desierto de Atacama. Las excepcionales condiciones geográficas del

¹⁹ SILVA, B. (2019). Estrellas desde el San Cristóbal. La singular historia de un observatorio pionero en Chile (1903–1995) (julio 2019 ed.). Editorial Catalonia. P.33.

lugar atrajeron a fines de los años 60 una primera gran ola de instalación de observatorios en el país.

Así, en 1967 la Asociación Internacional de Universidades para la Investigación en Astronomía (AURA) estableció el Observatorio Interamericano Cerro Tololo (CTIO), en colaboración con la Universidad de Chile. Allí opera desde 1995 el Telescopio Víctor M. Blanco, que tiene 4 metros de diámetro. En 2012 se le colocó una Cámara de Energía Oscura (DECAM), convirtiéndose así en un instrumento de rastreo óptico de campo amplio, que permitió realizar un importante estudio sobre la materia oscura²⁰ que puso en jaque la teoría de relatividad de Einstein²¹.

En 1969, el Observatorio Europeo Austral (ESO) instaló en Atacama el Observatorio la Silla, que alberga al *New Technology Telescope* (NTT). Se trata de un telescopio de 3,58 metros de diámetro, que fue el primero en el mundo en tener un espejo principal controlado por un computador, lo que es conocido como óptica activa.

En la Silla además está el Telescopio ESO, de 3,6 metros, que hospeda actualmente a *High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher* (HARPS), un instrumento considerado como el más importante para la búsqueda de planetas extrasolares.

También en 1969 la Institución Carnegie de Washington instaló el Observatorio Las Campanas, donde se encuentran telescopios reflectores de 1, 2,5 y 6 metros de diámetro.

Otros importantes aportes de Federico Ruttlant para la astronomía nacional fue la instalación del Radio Observatorio de Maipú en 1959, en colaboración con la Institución Carnegie de Washington. Su inauguración convirtió a Chile en el primer país latinoamericano en incursionar en la radioastronomía. Al científico también se le atribuye la creación de la Estación Astronómica de Cerro El Roble en 1967, en colaboración con la Academia Nacional de Ciencias de la ex URSS, donde se instaló el Telescopio Astrógrafo Maksutov.

²⁰ La materia oscura conforma el 80% de la materia del universo. Es invisible, sin embargo, los astrónomos descubrieron su existencia porque distorsiona la luz de estrellas lejanas. (Definición adquirida de la nota “El fascinante mapa de la materia oscura que revela un enigma cósmico (y desafía la teoría de la relatividad de Einstein)” de la BBC, publicada el 27 de mayo de 2021.

²¹ “El fascinante mapa de la materia oscura que revela un enigma cósmico (y desafía la teoría de la relatividad de Einstein)”. BBC News. 27 de mayo de 2021.

En 1965, la Universidad de Chile creó el Departamento de Astronomía, transformándose en el primer plantel en tener formación en el área y ofreciendo una licenciatura. Luego, en 1976 inauguran el programa de Magíster.

Durante la dictadura militar encabezada por Augusto Pinochet (1973-1990), se vivió una época donde se paralizó la instalación de observatorios y los tratados internacionales, y el Desierto de Atacama se convirtió en un escenario de violaciones de Derechos Humanos.

I. 4. Nuevas luces en el desierto: Segunda ola de instalación de telescopios (y radiotelescopios)

Luego de 20 años de operación de los tres grandes observatorios internacionales instalados en Chile, se empezaron a desarrollar nuevos proyectos de instrumentación más potentes, pasando de telescopios de cuatro metros a otros de ocho. Esto se da luego de que en 1998 el Gobierno de Chile declarara el Llano de Chajnantor como punto central para el desarrollo astronómico y le da a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (Conicyt) una concesión de 5 años para su administración, la cual fue renovada en 2005.

Por otro lado, en 1996 Conicyt y ESO establecen como garantía el 10% del tiempo de observación en los telescopios de ESO para los astrónomos de instituciones chilenas, acuerdo que luego se extendió a todos los demás observatorios y que hoy sigue vigente.

Así, la ESO en 1998 instaló el *Very Large Telescope* (VLT) en el Observatorio Paranal, que consta de cuatro telescopios unitarios de 8,2 metros de diámetro y cuatro telescopios auxiliares de 1,8 metros de diámetro, que pueden funcionar conjuntamente gracias a la interferometría, una técnica que permite unir la luz de diferentes telescopios.

Por otro lado, la Institución Carnegie para la Ciencia construyó los Telescopios Magallanes, dos instrumentos de 6,5 metros en el Observatorio Las Campanas: El telescopio Walter Bade, finalizado en el año 2000, y el telescopio Landon T. Clay, en el 2002.

En el año 2000, el Consorcio Gemini puso en operaciones el Observatorio Gemini, que está constituido por dos telescopios ópticos-infrarrojos gemelos de 8 m., uno ubicado en Mauna Kea en Hawái (Gemini Norte) y otro en el Cerro Pachón (Gemini Sur). Están administrados por AURA en colaboración con la Fundación Nacional de Ciencias de Estados

Unidos (NSF, por sus siglas en inglés) y su objetivo científico es acceder a imágenes del cielo en su totalidad.

Luego, comienza en Chile la instalación de radiotelescopios, es decir, instrumentos que captan ondas de radio provenientes de cuerpos celestes. En 2004, empezó a operar en Pampa la Bola, cerca de Chajnantor, el *Atacama Submillimeter Telescope Experiment* (ASTE), cuya implementación estuvo a cargo del Observatorio Astronómico Nacional de Japón (NAOJ, por sus siglas en inglés). En 2005, la ESO inauguró el *Atacama Pathfinder Experiment* (APEX), y en el 2007, la Universidad de Princeton con financiamiento de la Fundación Nacional de Ciencias de Estados Unidos (NSF) instaló el *Atacama Cosmology Telescope* (ACT).

En el año 2011, comenzó a operar el *Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array* (ALMA), el radiotelescopio más grande del mundo, compuesto por 66 antenas de precisión. Su instalación se generó gracias a la colaboración entre Europa (ESO), Asia del Norte (NAOJ) y Norteamérica (NRAO) y a una concesión que hizo el gobierno chileno por 50 años por un área de 18 hectáreas aproximadamente en el Llano de Chajnantor.

Finalmente, en el año 2012 empezó a operar en el Llano de Chajnantor, el *Polarbear Experiment*, un instrumento instalado en el Telescopio Simons Array que tiene como objetivo la medición de la polarización del Fondo Cósmico de Microondas (CMB por sus siglas en inglés), que corresponde a radiación emitida durante el Big Bang, por lo que constituye un estudio muy importante para comprender los orígenes del universo. Fue fundado por la NRAO (National Radio Astronomy Observatory).

En el año 2013, se creó el Parque Astronómico Atacama, un espacio de 36.347 hectáreas ubicado en el Llano de Chajnantor que el Ministerio de Bienes Nacionales le entregó a CONICYT, en una concesión por 50 años para gestionar la instalación de observatorios astronómicos.

I. 5. El futuro de la astronomía: Tercera ola de instalación de observatorios

Actualmente, se espera la puesta en marcha de importantes telescopios en Chile, lo que configuraría una tercera ola de instalación con renovadas tecnologías e instrumentos que generarán grandes cantidades de datos. Por ejemplo, el *Vera C. Rubin Observatory* en el

Cerro Pachón, que empezaría a operar el 2022, y que consta de un espejo de 8,4 metros de diámetro, un diseño único de tres espejos y una cámara de 3.2 gigapíxeles, creando un campo de visión excepcionalmente amplio, que en pocos días podría capturar todo el cielo visible.

También el *Extremely Large Telescope* (ELT) de ESO instalado en el Cerro Armazones y que tiene previsto empezar a operar en 2024 o 2025. Tiene un diámetro de 39 metros, convirtiéndose en el más grande a nivel mundial. Uno de los mayores desafíos científicos planteados para el instrumento es el estudio del proceso de expansión del universo.

Finalmente, el *Giant Magellan Telescope* (GMT) de la Institución Carnegie que se instalará en el Observatorio Las Campanas y que tiene un diámetro de 24,5 metros total, ya que está compuesto de 7 espejos de 8,4 metros, y que se destaca porque tendrá una resolución 10 veces mayor al Telescopio Espacial Hubble. Esta claridad nunca vista, permitirá estudiar los orígenes de los elementos que constituyen a nuestro planeta.

I. 6. Partes de un telescopio óptico y de un radiotelescopio²²

Para la comprensión del presente reportaje, es necesario describir las principales partes de un telescopio óptico y las de un radiotelescopio. Lo primero es establecer la diferencia entre un telescopio óptico de un radiotelescopio, que radica en la longitud de onda de la radiación absorbida. Así, mientras el primero capta luz visible, el segundo percibe ondas de radio.

Para captar la radiación de objetos astronómicos distantes, un telescopio óptico ocupa un espejo y/o lente, mientras que un radiotelescopio ocupa un plato reflector ubicado en una antena. Luego, la radiación es dirigida hacia un receptor que mide los niveles de ésta.

Respecto a los telescopios ópticos, es importante destacar que estos se subclasifican en reflectores, que son los que captan la luz a través de espejos; refractores, que son los que trabajan con lentes y catadióptricos, que son los que mezclan espejos y lentes.

Luego, existen subdivisiones de cada uno dependiendo de cómo están dispuestos los espejos y lentes. El más conocido es el reflector de Newton, compuesto por un espejo

²² Esta clasificación se realizó con la ayuda de Pamela Paredes Sabando, Licenciada en Ciencias Físicas en el Área de Astronomía de la Universidad de Concepción. También se usaron como recursos el “Manual de Radioastronomía Alma en la Escuela” y el sitio web de Alma.

primario y uno secundario. El espejo primario es el que se encarga de coleccionar toda la luz y luego esta rebota hacia el secundario, que se encarga de enviar la señal a la CCD, el sensor que recibe la señal y la envía a los computadores.

Algo importante de mencionar es que los telescopios ópticos pueden medir la intensidad de la luz, conocida como la técnica de la fotometría; pero también pueden captar el espectro (lo que se obtiene al descomponer la luz), a través de la espectroscopia, integrando un instrumento llamado espectrógrafo.

El espectro es la “huella digital” de los objetos astronómicos, ya que ninguno es igual a otro y al captarlo se obtiene información valiosa como la composición química, la temperatura y densidad de estos.

Los radiotelescopios captan las ondas de radio a través de los platos reflectores ubicados en las antenas y la radiación captada es dirigida hacia un detector llamado *Front End* que mide los niveles de esta.

En el caso del radiotelescopio Alma, su *Front End* está dividido en diez bandas receptoras, que se encargan de captar diferentes longitudes de las ondas de radio. Finalmente, los sistemas de *Back End* de los radiotelescopios, convierten las señales análogas recibidas por el *Front End* en digitales y las envían a los computadores. Alma, por su parte, cuenta con un supercomputador, llamado correlacionador.

II.

Astroingeniería y Astroinformática hecha en Chile

En el año 2012, el Ministerio de Economía decidió estudiar las oportunidades que tenían la industria y la academia en las actividades derivadas de la astronomía, y para eso elaboró un informe²³ en el que contabilizaron seis laboratorios universitarios de astroingeniería y/o astroinformática funcionando en el país: dos en la Universidad de Chile, uno en la Universidad Católica, uno en la Universidad Técnica Federico Santa María, uno en la Universidad de Concepción y otro en la Universidad de Valparaíso.

Casi una década después, la situación respecto a los laboratorios universitarios de astroingeniería y astroinformática ha cambiado bastante, ya que los grupos que existían se consolidaron y crecieron, y, por otro lado, seis planteles crearon nuevos grupos de trabajo, alcanzando de esta forma los doce laboratorios -descritos a continuación- en los que se desarrollan estas ciencias afines a la astronomía.

II. 1. Laboratorio de Ondas Milimétricas y Submilimétricas de la Universidad de Chile

El primer laboratorio de astroingeniería en Chile surgió en la Universidad de Chile, al alero del Departamento de Astronomía, en el año 2005 y lleva el nombre de “Laboratorio de Ondas Milimétricas y Submilimétricas”.

Su primer objetivo fue modernizar el Telescopio Milimétrico de 1.2 Metros, apodado como MINI, un radiotelescopio que operaron desde los años ochenta junto a la Universidad de Columbia en el Cerro Tololo. El instrumento observa en un rango específico que permite mirar la molécula de monóxido de carbono. Fue trasladado al Observatorio Astronómico Nacional, en el Cerro Calán, entre los años 2009 y 2010, lugar que lo alberga hasta hoy.

²³ MINISTERIO DE ECONOMÍA DE CHILE, DIVISIÓN DE INNOVACIÓN. (2012). Capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile. Adere Consultores.

El siguiente gran proyecto del Laboratorio de Ondas Milimétricas y Submilimétricas, fue su colaboración en la construcción de la Banda 1 de Alma, en la que participaron en el sistema óptico de la banda, es decir, en el lente y la antena de bocina. Esto fue, en parte, gracias al financiamiento que obtuvieron a través del fondo basal del Centro de Astrofísica y Tecnologías Afines (CATA).

Finalmente construyeron los lentes y las antenas de bocina de los 66 receptores de Alma y durante el curso del proyecto se graduaron 4 doctorados y 9 magíster, según cuenta Leonardo Bronfman, doctor en Astrofísica, investigador y fundador del laboratorio.

En la iniciativa participaron también Taiwán, Japón, Estados Unidos y Canadá que se encargaron de la construcción de las demás partes de la banda.

El proyecto de la Banda 1 de Alma es uno de los trabajos de astroingeniería más relevantes que se han realizado en el país y uno de los pioneros: “Era tecnología de punta, tecnología que no se había desarrollado todavía y nosotros teníamos ya experiencia en esa banda, luego de haber trabajado en el radiotelescopio *The Cosmic Background Imager* del Instituto Tecnológico de California (Caltech). Los primeros ingenieros que se graduaron en Chile en el área de astronomía instrumental se graduaron bajo el alero de Caltech. Entonces con este conocimiento que ya teníamos y con el apoyo del fondo basal del CATA, logramos convencer al proyecto Alma, que es el radiotelescopio más grande del mundo, de que pudiéramos nosotros trabajar en este proyecto”, cuenta Bronfman²⁴.

Ricardo Finger²⁵, académico e ingeniero del laboratorio destaca también la importancia de la colaboración con ALMA: “Hace 20 años parecía imposible que un laboratorio de una universidad construyera buena parte de un receptor del radiotelescopio Alma. O sea, Alma era algo que venía como de otro mundo, una tecnología inalcanzable, una cosa que estaba fuera de lo que nosotros como chilenos pensábamos que podíamos contribuir. Y aquí lo tenemos. Entonces estas cosas ya están pasando, tenemos grupos en Chile que no tienen nada que envidiarles a los mejores grupos de investigación científica y tecnológica del mundo”.

²⁴ Leonardo Bronfman fue entrevistado el 16 de junio de 2021 vía Zoom.

²⁵ Ricardo Finger fue entrevistado el 10 de septiembre de 2021 vía Zoom.

Luego, el Laboratorio de Ondas Milimétricas se incorporó también al trabajo de la Banda 2+3 de Alma, en la que también colaboraron en el sistema óptico.

Actualmente, el laboratorio está trabajando en el receptor nodo 66 para el *Long Latin American Millimeter Array* (Llama), un telescopio que se va a fabricar en Argentina con la colaboración de Brasil. Esta vez el laboratorio está construyendo el receptor por completo, es decir, el sistema óptico, electrónico y el de radiofrecuencia.

También están llevando a cabo el Proyecto Arte, la construcción de un radiointerferómetro en el Cerro Calán que permitirá la detección de eventos de muy corta duración y muy intensos en emisión llamados Fast Radio Burst (FRB): “Son transientes cortos de radio, es decir, flashes de radio que ocurren en el cielo cada cierto tiempo y que son muy difíciles de detectar por los telescopios estándar”, explica Finger.

Los FRB “son de reciente descubrimiento y todavía no se sabe lo que son. Se han observado viniendo de galaxias lejanas y lo que nosotros queremos hacer es detectarlos en nuestra galaxia”, comenta Bronfman.

El instrumento consta de dos tecnologías: la de radiofrecuencia y la de procesamiento de datos ultrarrápido en tiempo real, en este caso el uso de Field Processing Gate Array (FPGA). “Es otra de las ramas que se desarrolló en el laboratorio. Además del trabajo en radiofrecuencia, se desarrolló el área digital de detección de datos”, explica Bronfman.

En septiembre de 2021, la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) dio a conocer que el Centro de Astrofísica y Tecnologías Afines (CATA) había renovado el fondo basal de financiamiento por diez años más, con una revisión a los cinco años.

Al respecto, Finger destaca que la renovación de este centro “son muy buenas noticias para la astronomía y la ingeniería nacional, ya que el CATA creó la instrumentación astronómica nacional. Antes no existía este concepto de astroingeniería en el país, no había ningún laboratorio en Chile que hiciera instrumentos para los telescopios. Recibíamos los telescopios de afuera como una caja negra. Los astrónomos usábamos los telescopios, pero nadie tenía idea de cómo funcionaban. Ahora nosotros estamos haciendo un aporte al país en el diseño y construcción de telescopios”.

II. 2. ALMA-UTFSM Group en la Universidad Técnica Federico Santa María y el Observatorio Virtual Chileno

El desarrollo de la astroinformática en la Universidad Técnica Federico Santa María empezó el año 2004, cuando estudiantes de ingeniería fueron al Observatorio La Silla a hacer prácticas. Mauricio Araya, actualmente académico del Departamento de Electrónica de la universidad, fue uno de esos practicantes cuando cursaba la carrera de Ingeniería en Informática. “Fui de la tercera o cuarta generación que fue a hacer la práctica, y de ahí salió la idea de hacer una colaboración más importante, que consistía en hacer el software para ALMA, que se iba a construir en el 2010, pero el software había que desarrollarlo seis años antes”, cuenta.

De esta manera surge el ALMA-UTFSM *Group*, que, gracias al financiamiento de un Fondo ALMA-CONICYT, elaboró exitosamente un software llamado *ALMA Common Software* (ACS), el cual permite que las 66 antenas de ALMA funcionen de manera coordinada²⁶.

“Trabajamos en eso varios años y viajamos al lugar donde se estaba desarrollando el radiotelescopio. La mayoría de la gente de ese grupo se fue a trabajar al observatorio (ALMA) después. Fue una gran oportunidad para trabajar con dispositivos de primer nivel mundial”, explica Araya.

Luego, la UTFSM realizó otra importante colaboración con el Observatorio ALMA, que consiste en la creación del Observatorio Virtual Chileno (ChiVO, por su sigla en inglés), fundado el año 2012 gracias al financiamiento del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondef) e inaugurado formalmente el 2015²⁷. Forma parte de la *International Virtual Observatory Alliance* (IVOA) y se encarga de almacenar, procesar y estandarizar los datos astronómicos que se generan en Chile, entre ellos los de Alma.

En la fundación de ChiVO participaron la Universidad Técnica Federico Santa María -dirigiendo el proyecto-, la Universidad de Chile, la Universidad Católica, la Universidad de

²⁶ USM implementará software para el proyecto astronomico más grande del mundo. 13 de mayo de 2010. Portal de noticias de la USM.

²⁷ Nace ChiVO: El primer observatorio astronómico virtual. 24 de abril de 2015. Portal de noticias de la USM.

Concepción, la Universidad de Santiago, y actualmente colabora también la Universidad de Valparaíso.

“Es el único nodo que pone los datos de Alma a disposición del resto de la comunidad científica. Provee los datos del radiotelescopio de forma estandarizada, es decir, uniforme, para así poder ser analizados por todos de forma sencilla. Por lo tanto, tiene esa importancia”, explica Mauricio Solar²⁸, director del proyecto y académico del Departamento de Informática de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Amelia Bayo, académica de la Universidad de Valparaíso, quien también participa en ChiVO y en la *International Virtual Observatory Alliance* (IVOA), explica que esta última es “un conglomerado de investigadores en distintos países que piensan que tenemos que compartir los datos astronómicos de una manera eficiente. Eficiente quiere decir que todos preguntemos sobre los datos de la misma manera y así estandarizarlos”, explica.

“En otras áreas como la biología es prácticamente imposible porque hay problemas de privacidad de la información, pero en astronomía no hay ninguna razón por la que esto no se pueda llevar a cabo”, concluye.

Respecto al mismo tema, Mauricio Solar explica que los datos tomados por los observatorios están reservados para los astrónomos mientras realizan y publican la investigación para la que los solicitaron, tras lo cual pasan a ser de dominio público. “El dato queda ahí pero no es fácil encontrarlo, ya que cada observatorio tiene los datos en sus propios formatos”, explica Solar.

ChiVO cuenta con un *data center* para el almacenamiento que fue comprado gracias a una colaboración con la Academia de Ciencias de China. “Es el *data center* con mayor capacidad de almacenamiento en Chile y a nivel latinoamericano, e inicialmente, en el 2015, en el mundo”, cuenta Solar.

Además, colaboran con la Red Universitaria Nacional (REUNA) que se encarga de proveer conexión a internet permanente y a un estándar adecuado para facilitar el acceso a los datos astronómicos por parte de los investigadores.

²⁸ Mauricio Solar fue entrevistado el 17 de junio de 2021 vía Zoom.

Actualmente se encuentran trabajando en otra etapa del proyecto en la que están desarrollando herramientas astroinformáticas a partir de los datos que almacenan. Por ejemplo, técnicas de inteligencia artificial para clasificar galaxias y aprendizaje de máquinas para la detección de líneas moleculares.

Otro logro del grupo de la UTSM a destacar es su participación en el consorcio del *Cherenkov Telescope Array* (CTA), el observatorio de rayos gamma más grande y sensible del mundo, el cual contará con dos conjuntos de telescopios: uno en el hemisferio sur, en el Cerro Paranal, en Chile, y el otro en el hemisferio norte, en la Isla de la Palma, en España.

“Es una novedad en Chile porque el país siempre ha prestado el terreno a cambio de tiempo de observación. En el CTA, nosotros como grupo de científicos chilenos somos parte del consorcio, participamos de las decisiones políticas y económicas, de cómo se construye y dónde se construye”, explica Mauricio Araya²⁹.

II. 3. Laboratorio de Astroinformática del Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile

Por otro lado, la Universidad de Chile en su Centro de Modelamiento Matemático fundó el año 2009 un Laboratorio de astroinformática dedicado al estudio de datos astronómicos y el uso de herramientas de *big data* para resolver problemas de la astronomía.

“Surgió porque algunos jóvenes querían hacer su doctorado en el tema entre la interfaz entre matemática, computación y astronomía. Organizamos varias escuelas y congresos, y de esta forma fuimos agarrando vuelo”, cuenta Jaime San Martín³⁰, doctor en Estadísticas e investigador del Centro de Modelamiento Matemático (CMM).

El primer gran proyecto del laboratorio fue HiTs (*The High Cadence Transient Survey*) que tenía como objetivo detectar supernovas en tiempo real utilizando la *Dark Energy Camera* (DECam) instalada en el Telescopio de 4 metros de Observatorio Cerro Tololo.

²⁹ Mauricio Araya fue entrevistado el 5 de octubre de 2021 vía Zoom.

³⁰ Jaime San Martín fue entrevistado el 16 de junio de 2021 vía Zoom.

“Las supernovas son importantes porque son como marcadores que te permiten decidir a qué distancia está un objeto y eso está basado en ciertos modelos. Hay un supuesto detrás que te permite hacer este cálculo. Esto tiene un impacto importante de cosmología. Ya que sabemos que el universo está en expansión, y si uno logra detectar estos objetos lejanos y medirlos con algún grado de exactitud, tú puedes saber a qué velocidad se está expandiendo esa parte del universo”, explica San Martín.

El siguiente proyecto del laboratorio fue ALeRCE (Automatic Learning for the Rapid Classification of Events), un *broker* astronómico, es decir, un sistema que recibe la información de los telescopios en forma de alertas y la clasifica utilizando inteligencia artificial. Actualmente está recibiendo datos de un telescopio en Estados Unidos que se llama *Zwicky Transient Facility* (ZTF).

Guillermo Cabrera, miembro fundador del Laboratorio de Astroinformática del CMM e ingeniero parte del proyecto explica³¹: “ALeRCE fue una idea que tuvimos junto a Francisco Forster, un astrónomo del CMM aproximadamente en el 2017. Se llama *broker* porque es básicamente un intermediario entre los datos que se van produciendo y los usuarios finales, que incluso pueden ser incluso otros sistemas”.

Agrega que “ALeRCE compara en tiempo real imágenes del cielo del momento con una imagen anterior. Cada vez que aparece algo nuevo en la comparación, se emite una alerta. Luego recolectamos todas estas alertas que son del orden de cientos de miles por noche y las clasificamos automáticamente. Por ejemplo, podemos detectar rápidamente la explosión de una estrella. Seguido a eso, otros astrónomos o grupos pueden tomar estas alertas que ya están clasificadas, y pueden observarlas con un telescopio específico para seguirlas”.

En agosto de 2021 ALeRCE fue escogido como uno de los *brokers* oficiales del Observatorio Vera Rubin³², junto a otros que fueron diseñados por instituciones europeas y estadounidenses. Esto marca un hito en el desarrollo de la astroinformática chilena: “Hemos demostrado que podemos ser competitivos a nivel internacional en un proyecto científico muy desafiante. En el llamado a postulación se presentaron quince y al final terminaron

³¹ Guillermo Cabrera fue entrevistado el 13 de septiembre de 2021 vía Zoom.

³² Proyecto astronómico chileno es elegido para procesar datos del nuevo observatorio Vera C. Rubin. La Tercera. 9 de agosto de 2021.

siendo siete los elegidos, de los cuales uno somos nosotros, y competimos con grandes universidades”, cuenta Cabrera.

“Cuando el Observatorio Vera Rubin esté en funcionamiento se estima que va a captar del orden de 10 millones de objetos astronómicos por noche al menos. Entonces, el *broker* ayuda a los astrónomos a reducir este volumen de información enorme a una cantidad razonable”, puntualiza Jaime San Martín.

Según los cálculos del Laboratorio de Astroinformática del CMM, el Vera Rubin captará aproximadamente 10 o 100 veces más datos que el *Zwicky Transient Facility* (ZTF). Por lo tanto, toda la infraestructura de ALERCE debe escalar en esa misma cantidad para ser capaz de procesar la información.

Este desarrollo se da en el contexto de la nueva generación de telescopios en el que la forma de hacer astronomía está cambiando: “Antiguamente el astrónomo iba al telescopio con la intención de observar objetos en específico, ponía al instrumento a mirar ese objeto y luego tomaba los datos y los analizaba. Hoy en día, los telescopios están produciendo muchos datos, lo que permite de alguna forma automatizar el proceso. Ya no estamos viendo solamente un objeto, sino que estamos viendo miles y millones de objetos de manera simultánea. No podríamos pasarle cada uno de estos objetos a un astrónomo para que los estudie y por eso necesitamos algoritmos que sean capaces de tomar todos estos datos y analizarlos de manera automática”, explica Cabrera.

II. 4. Centro de Astroingeniería de la Universidad Católica

En el 2009 también se fundó el Centro de Astroingeniería de la Universidad Católica que une al Instituto de Astrofísica de la casa de estudios con la Escuela de Ingeniería, específicamente la carrera de Ingeniería Eléctrica.

Una de las áreas de investigación del centro es la de óptica adaptativa, en la que están desarrollando técnicas de monitoreo de turbulencias atmosféricas para los observatorios Paranal y Gemini Sur. Un ejemplo de ello es el instrumento portátil llamado FASS (*Full Aperture Scintillation Sensor*) que se usará para medir las turbulencias a través del fenómeno de centelleo de estrellas.

Por otro lado, han trabajado fuertemente en el área de la construcción de espectrógrafos. Uno de sus proyectos más destacados es FIDEOS (*Fibre Dual Echelle Optical Spectrograph*), un espectrógrafo que se instaló en el Observatorio La Silla en el 2016 y que marca un hito, ya que es el primer instrumento diseñado y fabricado completamente por un equipo chileno e instalado en un observatorio internacional³³.

Los espectrógrafos sirven para dividir la luz de los objetos astronómicos en las distintas longitudes de ondas que la componen, lo que permite estudios muy sensibles.

También estuvieron trabajando en el diseño de TARdYS, un espectrógrafo que se instalará en el *Tokyo Atacama Observatory* (TAO), un telescopio de 6,5 metros de diámetro que se hospedará en el Cerro Chajnantor.

En la misma línea, el Centro de Astroingeniería UC es parte de un consorcio formado por instituciones de 14 países que está desarrollando HIREs, un espectrógrafo de alta resolución para el ELT (*Extremely Large Telescope*) que permitirá la búsqueda de signos de vida en exoplanetas similares a la Tierra.

También están involucrados junto a distintos laboratorios europeos en el proyecto MOONS (*Multi Object Optical and Near-infrared Spectrograph*), un espectrógrafo multiobjeto e infrarrojo cercano para el *Very Large Telescope* (VLT), que permitirá el estudio del universo de una nueva forma, ya que captará la luz de un gran número de objetos del cielo al mismo tiempo.

“Un espectrógrafo es un instrumento muy grande que tiene pequeñas fibras y cada una de ellas apunta a un objeto en el cielo. Esas fibras hay que moverlas con una precisión súper alta, posicionándolas en el instrumento con unos brazos robóticos. Desarrollamos un algoritmo, un método computacional para poder determinar con mucha precisión la posición de estos pequeños brazos robóticos”, explica Felipe Rojas³⁴, ingeniero del Centro de Astroingeniería de la UC.

³³ Histórico: Astro Ingeniería elabora e instala el primer instrumento chileno en un observatorio internacional. Portal de noticias de la UC. 13 de julio de 2016.

³⁴ Felipe Rojas fue entrevistado el 23 de septiembre de 2021 vía Zoom.

MOONS se financió en parte entre 2016 y 2019 con el Proyecto Anillo ACT 1417: “Instrumentación Chilena para Sondeos Astronómicos”³⁵ que corresponde a un fondo que Conicyt les entregó a través del método de financiamiento Anillos de Investigación en Ciencia y Tecnología que busca entregar recursos a proyectos de investigación interdisciplinarios.

Otra importante área de desarrollo del laboratorio es la de cosmología experimental, en la que están participando en los proyectos *Atacama Cosmology Telescope* (ACT), *POLARization of the Background Radiation* (POLARBEAR) y *Cosmology Large Angular Scale Surveyor* (CLASS), que son distintos instrumentos internacionales instalados en Chile que sirven para medir la radiación del fondo cósmico en busca de evidencia de ondas gravitacionales producidas por el Bing Bang. De esta forma se pretende entender el origen del universo.

En el marco de esa colaboración desarrollaron algoritmos para el procesamiento de datos de los telescopios recién mencionados. “Estos instrumentos generan toneladas de datos que tienen que ser procesados. Nosotros tenemos copia de estos datos en la universidad y hemos desarrollado técnicas para procesarlos de forma eficiente”, cuenta Dunner.

Además, desarrollaron una técnica para calibrar el ACT basada en el uso de la fotogrametría, una técnica que consiste en hacer reconstrucciones de los objetos usando imágenes en 3D.

Respecto a la fotogrametría, Felipe Rojas explica: “El telescopio está en el desierto a temperaturas brutales, por lo que va sufriendo deformaciones con el tiempo. Una vez al año medíamos la forma de los espejos para ver si era consistente con el diseño original usando la técnica de la fotogrametría. Eso te dice, por ejemplo, que el espejo primario está deformado en cierta parte en un milímetro y luego hay que corregirlo. Después de corregirlo, tomábamos nuevamente las mediciones y comparábamos para ver cómo quedó”.

Por último, están haciendo simulaciones electromagnéticas para los telescopios cosmológicos ACT, CLASS, *Cerro Chajnantor Atacama Telescope* (CCAT) Simons Observatory. “Estamos trabajando con súper computadores, clusters de muchos

³⁵ Finaliza Proyecto Anillo relacionado con instrumentación astronómica. Portal de noticias de Astro UC. 24 de enero de 2019.

computadores que hacen simulaciones para comprender, por ejemplo, la evolución que tienen objetos astronómicos”, puntualiza Dunner.

II. 5. Astroingeniería de la Universidad de La Serena

Si bien la Universidad de La Serena no tiene establecido un laboratorio de astroingeniería, ha participado de algunos proyectos desde su carrera de Astronomía. En el año 2014, tras ganarse un Fondo Quimal, realizaron el proyecto “Hogar de estrellas” que consistió en la adquisición de un equipo CNC, es decir, una máquina de control numérico. Se usa para construir placas de aluminio para sostener uno de los telescopios del proyecto *Sloan Digital Sky Survey*, llamado Telescopio Du Pont, que tiene 2,5 metros de diámetro y está ubicado en el Observatorio Las Campanas, en el Desierto de Atacama.

“La universidad contribuyó en todo el desarrollo de las placas que eran necesarias para poner el telescopio. Unas placas de aluminio de 70 cm de diámetro. Había que poner los agujeros para las fibras ópticas que van a ser montadas en el telescopio y eso hay que hacerlo con alta precisión”, cuenta Rodolfo Barba³⁶, director de la carrera de Astronomía de la Universidad de La Serena.

Actualmente se encuentran desarrollando metodologías para el monitoreo de la contaminación lumínica con validación científica. “Respecto a la contaminación, tenemos que cuantificar cuánto de la luz que emiten las ciudades se va al cielo y cómo influye eso en función de los patrones climatológicos. También si influye, por ejemplo, el color de las luces; es decir, si es lo mismo las luces de sodio, que las luces led blancas o las luces amarillas. Hay que hacer ese análisis a través del tiempo. La idea es generar un sistema de monitoreo que sea validado desde el punto de vista científico que nos dé una idea concreta del impacto de la contaminación y saber cómo va cambiando en el tiempo”, cuenta Barba.

³⁶ Rodolfo Barba fue entrevistado el 14 de septiembre de 2021 vía Zoom.

II. 6. Universidad Católica de la Santísima Concepción- Laboratorio de Astro-Ingeniería y Microondas (LAIM)

El Laboratorio de Astro-Ingeniería y Microondas (LAIM) fue fundado en el año 2015³⁷ por el profesor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de la Santísima Concepción y Doctor en Ciencias de la Ingeniería, Ricardo Bustos, quien aún permanece en la dirección. En él participan también Mauricio Araya, profesor asistente de la universidad y Doctor en Informática y, ocasionalmente, Francisco Espinoza, ingeniero civil eléctrico, quien también fue estudiante de la facultad.

Además, colaboran con estudiantes de Ingeniería Eléctrica, quienes se acercan al laboratorio por interés propio luego de conocer durante la carrera los distintos espacios de investigación de la facultad, y también porque tienen cursos de astroingeniería durante la carrera.

El principal proyecto del LAIM es la construcción del radiotelescopio MIST (*Mapper of the IGM Spin Temperature*), financiado por un Fondo Quimal del año 2018, que tiene como principal objetivo la detección de la señal de hidrógeno neutro de 21 cm. emitida en la época de reionización del universo. Su construcción se está llevando a cabo en Canadá, pero será instalado en el Desierto de Atacama.

“Es un radiotelescopio que sirve para hacer una observación bien específica. No es como un radiotelescopio de tipo general, que puede hacer observaciones a distintas cosas. Está enfocado en observar una señal en particular que es muy débil, que viene desde la época en la que se formaron las primeras estrellas”, explica Bustos.

En el año 2018 el radiotelescopio EDGES (*Experiment to Detect the Global EoR Signature*) en Australia detectó la misma señal que pretende captar el MIST, pero la comunidad científica determinó que hacen falta análisis independientes que confirmen su existencia, ya que el descubrimiento generó muchas dudas porque difiere de los modelos teóricos actuales. Por eso se volvió necesario que otros instrumentos pudieran comprobar la existencia de la señal cósmica, y de ahí surgió la idea para crear el MIST.

³⁷UCSC inaugura primer laboratorio de Astro- Ingeniería del sur de Chile. Portal de noticias de la UCSC. 11 de diciembre de 2015.

“MIST es un instrumento que, en palabras simples, usa el mismo concepto de un receptor de la radio del auto. Posee una antena, un receptor para amplificar la señal, una etapa digitalizadora y un computador para el procesamiento y guardado de datos. Sin embargo, a diferencia de la radio del auto, la señal que pretendemos detectar es tan pequeña que el sistema debe estar bien calibrado y caracterizado para descontar ruidos tales como la interferencia de radio como: canales de TV, radio FM, satélites, ruidos atmosféricos, ruido galáctico y ruidos instrumentales”, explica Mauricio Díaz³⁸, ingeniero del LAIM.

El laboratorio también realizó colaboraciones con el *Cosmology Large Angular Scale Surveyor* (CLASS). Francisco Espinoza cuando era estudiante realizó su práctica en ese telescopio gracias a este acuerdo, y luego trabajó como ingeniero de soporte durante la pandemia del coronavirus, ya que el equipo estadounidense a cargo del instrumento no podía viajar a Chile.

Otro proyecto que están realizando es la instalación de estaciones meteorológicas y estudio de imágenes satelitales para el *Cerro Chajnantor Atacama Telescope* (CCAT), un radiotelescopio que se encuentra en etapa de construcción. “Es importante poder conocer el viento que hay, la radiación y todo el sistema meteorológico para poder tener observaciones buenas a futuro”, explica Espinoza³⁹.

Por otro lado, también están monitoreando meteorológicamente las características de algunos sitios en particular que creen que pueden ser de interés para la construcción de nuevos radiotelescopios. Espinoza participó en esto buscando un sitio para el MIST y cuenta que encontraron un lugar en Paso de Jama, cerca de la frontera de Chile y Argentina. “En ese sitio no había radios FM, ni existía interferencia de televisión”, explica el ingeniero.

II. 7. Grupo Astro del Departamento de Ingeniería Informática de la Universidad de Santiago de Chile

El Grupo Astro del Departamento de Ingeniería Informática de la Universidad de Santiago de Chile empezó a funcionar el año 2015 cuando Miguel Cárcamo, actual profesor de Sistemas Complejos de la casa de estudios, se encontraba haciendo su tesis de Magíster en

³⁸ Mauricio Díaz fue entrevistado el 13 de julio de 2021 vía correo electrónico.

³⁹ Francisco Espinoza fue entrevistado el 12 de julio de 2021 vía Zoom.

Ingeniería Informática. Junto a los académicos Pablo Román y Fernando Rannou realizaron un proyecto de síntesis de imágenes para el radiotelescopio ALMA.

La síntesis de imágenes consiste en el desarrollo de un software que sirve para reconstruir imágenes capturadas por el radiotelescopio. Cárcamo⁴⁰ explica cómo funciona el proceso:

“Un ejemplo simple que te puedo dar es que tú ves una sombra y quieres saber de qué persona es la sombra. El tema es que esa sombra puede ser de muchas personas. Pasa lo mismo en la radioastronomía, uno tiene los datos y tiene muchas imágenes que pueden ajustarse al mismo problema. Y para eso se usa un algoritmo de optimización y se ponen regularizaciones. En el ejemplo de la sombra, podría ser: la persona tiene el pelo largo o tiene mochila. Así voy poniendo restricciones hasta llegar a una solución lo más parecida a la óptima”, asegura.

“La idea es desarrollar un software que permita al astrónomo flexibilizar todos los procesos. Es decir, que el astrónomo, programando por Python pueda importar módulos y que pueda hacer lo que él quiera con los datos. Que pueda elegir las regularizaciones que quiere, elegir modificar parámetros, tratar de hacer el código flexible para eso. Pero también hacer el código legible, o sea, que si el astrónomo ve el código entienda lo que está pasando ahí”, explica.

También en el grupo se encuentran realizando simulaciones del proceso físico de discos protoplanetarios que forman parte de eventuales sistemas planetarios en formación. Es un área muy competitiva de la astrofísica, debido a que nos permite saber cómo se formó el Sistema Solar. Al simular el proceso físico de cómo se forma este disco protoplanetario es esencial para comparar la teoría con los datos. Uno hace el modelamiento físico de este disco y después se observa con ALMA y compara si la teoría calza con la realidad”, explica Cárcamo.

En marzo de 2021, la Universidad de Santiago lanzó el Centro de Estudios Interdisciplinarios en Astrofísica y Exploración Espacial (CIRAS) desde donde se pretende desarrollar la astroinformática y otras ciencias afines a la astronomía, como la astrobiología y la astroquímica. En el centro convergen el Departamento de Física, la Facultad de Química y

⁴⁰ Miguel Cárcamo fue entrevistado el 25 de agosto de 2021 vía Zoom.

Biología, el Departamento de Ingeniería Informática, y el Departamento de Matemática y Ciencia de la Computación.

En septiembre de 2021, la universidad también inauguró la carrera de Astrofísica con mención en Ciencia de Datos, entregando así un enfoque astro-informático a la carrera⁴¹.

II. 8. Área de Astroingeniería del Centro de Excelencia de Modelación y Computación Científica de la Universidad de la Frontera

En el 2015 también se fundó en la Universidad de la Frontera el Área de Astroingeniería del Centro de Excelencia de Modelación y Computación Científica. Patricio Galeas, académico de la universidad y Doctor en Ciencias de la Computación, asumió la dirección del centro inspirado en una visita que él y otros académicos hicieron al Observatorio ALMA. Luego, la universidad comenzó a colaborar con el observatorio permitiendo que los estudiantes de la Facultad de Ingeniería realizaran sus prácticas o memorias de título en el lugar. Por otro lado, empezaron a trabajar con el Observatorio Paranal.

“Hicimos varios talleres en la universidad donde nos explicaban cómo funcionaba todo el sistema de Alma, la parte más informática. Tuvimos un par de *workshop*, hemos realizado varias actividades”, comenta Galeas⁴².

Actualmente, están trabajando junto a Alma en la actualización del sistema de control del radiotelescopio, que fue diseñado hace más de diez años y que en dos o tres años más va a quedar obsoleto, según explica Patricio Galeas. Para financiar este proyecto se ganaron un Fondo Quimal de ANID el año 2020⁴³.

En virtud de la colaboración con Paranal, realizaron simulaciones en realidad virtual del funcionamiento del telescopio y el siguiente paso del proyecto, que pretenden reanudar

⁴¹ Astrofísica con mención en Ciencia de Datos: a la vanguardia de los cambios de la Astronomía en Chile.9 de septiembre de 2021. Portal de noticias de la USACH.

⁴² Patricio Galeas fue entrevistado el 13 de julio de 2021 vía Zoom.

⁴³ UFRO evaluará para ALMA alternativas de sistemas de control de antenas. Sitio web de Alma. Enero 2020.

luego de que finalice la pandemia de coronavirus, es la creación de un ambiente de realidad virtual interactivo sobre el instrumento.

Además, gracias a la adjudicación de un fondo temático de la ANID, están elaborando un dron meteorológico que mide turbulencias junto a Paranal y a una empresa suiza de drones.

“La atmósfera genera turbulencias. Cuando uno mira el pavimento cuando hace calor, se ve una turbulencia que distorsiona la imagen. Eso mismo le pasa al telescopio. Mientras más turbulencia exista, peor es la imagen de lo que uno mira en el espacio. Nosotros propusimos que en vez de medirlo con los instrumentos que ellos tienen ahí, que son fijos, sumamente caros y no tan precisos, usar drones para medir la turbulencia a diferentes alturas cerca del telescopio y con eso hacer mejores predicciones”, explica Patricio Galeas.

II. 9. Centro para la Instrumentación Astronómica de la Universidad de Concepción

En la Universidad de Concepción empezó a operar en el 2016 el Centro para la Instrumentación Astronómica (CePIA), un laboratorio enfocado principalmente en la radioastronomía. Cuenta con la participación de profesores y estudiantes de pregrado, magíster, doctorado y posdoctorado de diversas áreas: astronomía, física, ingeniería mecánica e ingeniería electrónica, principalmente.

Su mayor proyecto es un radiómetro de vapor de agua precipitable a 183 GHz, un instrumento para medir el vapor de agua que interfiere con las señales de los radiotelescopios: “El vapor de agua es un contaminante de las señales. Cuando hay mucha agua, las antenas ‘quedan ciegas’, es decir, se produce mucha interferencia. Este instrumento va a permitir estimar la cantidad de vapor de agua para luego corregir la calidad de la señal o decidir mover el momento de la observación”, explica Fernando Cortés, integrante de CePIA.

Este radiómetro está siendo desarrollado por un estudiante de doctorado y también financiado por un proyecto Fondef. Por otro lado, un estudiante de magíster está creando un radiómetro de 22 GHz que cumple el mismo objetivo, pero sirve para ser usado en altitudes menores y así apoyar a otros centros de observación del norte de Chile. Cortés comenta:

“Alma está a 5000 metros de altura, pero si bajamos a los 3000 metros necesitamos usar otro radiómetro, y ese es el de 22 GHz”.

En CePIA además están colaborando con el *Large Latin Millimeter Array* (Proyecto LLAMA), un radiotelescopio con una antena de 12 metros de diámetro que está construyendo un consorcio argentino-brasileño en la provincia de Salta, en Argentina. La contribución consiste en la creación de cargas de calibración a distintas frecuencias, calientes y frías: “Los instrumentos de estas antenas miden una cierta radiación, pero tienen que calibrarse a través de estas cargas”, explica Cortés.

Otro proyecto que están llevando a cabo en colaboración con el Instituto Tecnológico de California (Caltech) y la Universidad Normal de Shanghai es traer y operar en Chile, en el Llano de Chajnantor, una antena del radiotelescopio *Caltech Submillimeter Array* (CSO). Esta estaba ubicada en Mauna Kea en Hawaii, pero que tiene que ser retirada del lugar debido a que: “Hawaii hace algunos años sacó una ley que indica que esa montaña (Mauna Kea) es sagrada para sus habitantes y, por lo tanto, están impidiendo la instalación de nuevos proyectos. Los que se están acabando tienen que retirar sus instrumentos y dejar el sitio impecable”, cuenta Cortés.

Cuando el radiotelescopio sea instalado en Chile, recibirá el nombre de *The Leighton Chajnantor Telescope* (LCT). Rafael Rodríguez⁴⁴, ingeniero del grupo de Astroingeniería de la Universidad Austral, valora la instalación de este radiotelescopio en Chile, ya que sería la primera vez que una universidad compartiría la propiedad de un instrumento en partes iguales con otras instituciones, en lugar de ser solo un asociado. “Como la Universidad de Concepción es dueña de un tercio puede llegar y decir: ‘Yo voy a hacer esto, díganme cuándo lo puedo hacer’. No va a tener que pedir ‘el favor’ de hacerlo. Eso yo creo que abre realmente la puerta al desarrollo tecnológico”, explica Rodríguez.

Cortés agrega que “todos los radiómetros de vapor de agua que se están haciendo se están enfocando también en LCT. Seríamos la primera universidad en tener un radiotelescopio, ya que podremos operar y tener tiempo definitivo de observación”.

Finalmente, otro proyecto que están desarrollando es la creación de una cámara de vacío en temperaturas criogénicas, es decir, muy bajas. “Será la única cámara de vacío en el

⁴⁴ Rafael Rodríguez fue entrevistado el 6 de agosto de 2021 vía Zoom.

Sur de Chile y estará disponible para que cualquier universidad pueda probar instrumentos en condiciones criogénicas, ya que vamos a llegar a 4 kelvin de temperatura, lo que es una cosa impresionante”, cuenta Cortés.

II. 10. Laboratorio de Astroingeniería del Desierto de Atacama de la Universidad de Antofagasta

En el 2016 surgió al alero del Centro de Astronomía en la Universidad de Antofagasta, el Laboratorio de Astroingeniería del Desierto de Atacama y tiene la particularidad de haber fundado Ckoirama, el primer observatorio del Estado chileno en el norte del país, que tiene como finalidad generar investigación, educación y vinculación.

Otro de sus proyectos más importantes es el desarrollo de telescopios pequeños con fines turísticos, en conjunto con los habitantes de la región. Mediante consultas, se involucró a la comunidad en el desarrollo de la tecnología y también se proyecta incluir a las pymes del sector para que puedan encargarse del mantenimiento de los telescopios en un futuro.

“La idea es que el trabajo que hacemos en astronomía no sea una cuestión que se perciba a puertas cerradas o completamente inalcanzable, sino que la gente se empiece a involucrar más en estos temas”, afirma Eduardo Unda-Sanzana⁴⁵, astrónomo y director del Centro de Astronomía de la Universidad de Antofagasta.

Respecto al capital humano especializado en astroingeniería que se ha formado en la universidad, se realizó un diplomado financiado por un Fondo FIC-R. Unda-Sanzana cuenta al respecto: “Tuvimos un par de casos de éxito. Hubo una persona que tras terminar el diplomado se fue a trabajar a Paranal y otra que se fue a trabajar a Alma...Este diplomado les sirvió como puente para conocer más el mundo astronómico y también llegar con algunas competencias que no tenían a esos nuevos trabajos, de manera que pudieron enfrentar mucho mejor los desafíos de integrarse de lleno a la vida del observatorio”.

Luego de la experiencia con el diplomado, crearon el Magíster en Astronomía, que tiene hasta el día de hoy una mención en astroingeniería.

⁴⁵ Eduardo Unda-Sanzana fue entrevistado en dos oportunidades vía Zoom: el 14 de julio de 2021 y el 18 de octubre del mismo año.

II. 11. Universidad de Valparaíso y el Núcleo de Formación Planetaria

La Universidad de Valparaíso se encuentra colaborando en ALeRCE y el Observatorio Virtual Chileno, proyectos mencionados anteriormente. Además, lidera el Núcleo de Formación Planetaria.

El Núcleo Milenio de Formación Planetaria es un proyecto dirigido por Amelia Bayo, Doctora en Astrofísica y académica de la Universidad de Valparaíso. Forma parte de la Iniciativa Científica Milenio de la Agenda Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) que se encarga de financiar investigaciones que están en la frontera del conocimiento, en las que participan equipos de 30 a 60 personas, durante un período de 3 años, que es posible renovar por tres años más.

En el caso específico del Núcleo de Formación Planetaria, participan en colaboración la Universidad de Valparaíso y la Universidad Técnica Federico Santa María, y en octubre de 2020 renovaron el financiamiento por tres años más⁴⁶. Juntas están estudiando a nivel teórico la formación de planetas en el Sistema Solar y la evolución de otros sistemas susceptibles a la formación de planetas.

El proyecto también tiene un área de desarrollo tecnológico en la que están realizando espejos de fibra de carbono ultraligeros para el *Planet Formation Imager* (PFI), un instrumento de observación internacional que estudiará la formación de planetas. En su diseño están colaborando universidades estadounidenses, europeas y australianas.

Los espejos de fibra de carbono reemplazarían los usuales espejos de vidrio que se ocupan en los telescopios, que suelen ser muy pesados. Estos son negros y están cubiertos por una capa de aluminio para que se comporten como un espejo normal, pero de menor peso. “Si un espejo de vidrio pesa dos kilos, un espejo de fibra de carbono del mismo tamaño pesa 100 gramos”, explica Amelia Bayo.

“Mucha gente piensa: los espejos son de vidrio porque el vidrio refleja. Pero el vidrio no refleja, un vaso de vidrio no refleja. Lo que refleja un espejo en nuestras casas es que tiene una capa de aluminio sobre el vidrio. Además, el vidrio tiene la propiedad de que cuando

⁴⁶Astronomía de la UV se adjudica nuevos recursos para Núcleos Milenio. 19 de octubre de 2020. Portal de noticias de la UV.

cambian las temperaturas en el desierto, donde pasamos de tener 40 grados durante el día a 5 grados en la noche, no se contrae ni se comprime tanto. Por eso los espejos de los telescopios se hacen de vidrio. En esta colaboración lo que estamos pensando es: ¿Qué pasaría si hubiera un material que se comporte de forma similar pero que fuera mucho más liviano?”, agrega.

Sin embargo, Bayo dice que han enfrentado muchas limitaciones para el desarrollo del proyecto: “El acceso a infraestructura es terrible en las universidades. De hecho, los espejos los estamos haciendo en unas condiciones que no son las que deberíamos tener, el espacio no cuenta con las condiciones ambientales. La Universidad Técnica Federico Santa María lleva cuatro años de retraso para darnos el laboratorio que nos prometieron”, reclama.

II. 12. Astroingeniería en la Universidad Austral

En la Universidad Austral comenzó a desarrollarse la astroingeniería en el 2017, cuando el académico del Instituto de Electricidad y Electrónica, Daniel Lühr, se adjudicó un fondo de la Academia de Ciencias de China para colaborar con la Universidad China de Hong Kong en la elaboración de un polarímetro para el radiotelescopio *Atacama Submillimeter Telescope Experiment* (ASTE). Los polarímetros sirven para medir la polarización de haces de luz u ondas electromagnéticas y el proyecto consiste en generar la posibilidad de hacer mediciones polarimétricas utilizando la cámara TES del telescopio.

A la Universidad Austral se le asignó la tarea de crear el software de control del instrumento, que también tendrá la oportunidad de ser probado en el *Telescopio James Clerk Maxwell* (JCMT) y se usará como base para el diseño del polarímetro del Telescopio Leighton Chajnantor (LCT), el instrumento que trasladará la Universidad de Concepción desde Mauna Kea al Desierto de Atacama.

En el 2018, la universidad decidió incorporar a un nuevo académico para potenciar la astroingeniería y colaborar en la investigación del polarímetro: Rafael Rodríguez, Doctor en Ingeniería Eléctrica, quien realizó el posgrado en el Laboratorio de Ondas Milimétricas de la Universidad de Chile.

En el 2021, se creó el Magíster en Electrónica y Electricidad Aplicada y “una de las áreas que contempla es la de instrumentación astronómica, tanto en la parte óptica como en radioastronomía. Yo abordo la parte radioastronómica”, cuenta Rodríguez.

“Claro está que el nivel de capacitación que podamos lograr es distinto a otras instituciones porque un equipo de alta gama de instrumentación cuesta 80 mil dólares, y la idea es tener varios equipos. Para armar un laboratorio decente puedes llegar a necesitar un millón de dólares. Claramente esa es una cosa compleja, que toma tiempo. Ahí es donde están más fuertes los laboratorios que partieron antes, como en Santiago o Concepción, que llevan más de 10 años, y que ya tienen un posicionamiento porque han podido adquirir equipamiento paulatinamente”, explica.

II. 13. La importancia de unión de los astroingenieros y la Red Chilena de Instrumentación Astronómica (ChAIn)

Distintos ingenieros coinciden que uno de los problemas del desarrollo de la astroingeniería en el país es que el trabajo lo han llevado a cabo las instituciones de manera separada, y que generar instancias de colaboración sería la opción más fructífera.

Rafael Rodríguez, académico e integrante del grupo de Astroingeniería de la Universidad Austral, considera que es complicado que el desarrollo de la instrumentación astronómica lo pueda abordar una institución sola y cree que es importante generar una buena comunidad.

“Los instrumentos para trabajar cuestan una brutalidad y no tiene sentido tener de a dos en Chile porque nadie los va a financiar. Por ejemplo, si yo necesito algo súper específico que cuesta un millón de dólares para usarlo solo una vez y lo tienen en el laboratorio de Antofagasta, no voy a comprarlo, se lo podría pedir si colaboramos. No podemos pelearnos por los recursos porque son limitados y todos queremos hacer instrumentación”, explica Rodríguez.

Ricardo Bustos, director Laboratorio de Astro-Ingeniería y Microondas (LAIM) de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, coincide y piensa que es importante que la comunidad de astroingenieros se una en torno a un desafío mayor: “El crecimiento de la astroingeniería en Chile es propio de una generación de laboratorios que no lleva más de 10 años. Por ahora hemos ido colgándonos de distintos proyectos que han venido a Chile, dando soporte y generando nuevas iniciativas, pero los desafíos van a ir creciendo y es necesario que la comunidad que es pequeña también logre de alguna manera ponerse una meta común para hacer un desafío más grande”.

Amelia Bayo, directora del Núcleo de Formación Planetaria, opina que es positivo que existan polos de desarrollo sobre temáticas específicas en torno a la astroingeniería, pero que deben ser complementarios. “Así tendríamos gente especializada en distintas cosas, pero trabajando de manera coordinada a lo largo del país. Pero si todos seguimos peleando por los mismos fondos, yo creo que no se va a llegar a un lugar tan bueno como se podría”, explica.

En ese contexto, el CePIA de la Universidad de Concepción creó en 2018 la Red Chilena de Instrumentación Astronómica (ChAIN, por sus siglas en inglés) con el fin de reunir a ingenieros chilenos dedicados a la creación de instrumentación astronómica de los diferentes laboratorios con representantes de los observatorios instalados en el país, para así generar oportunidades de colaboración.

“ChAIN agrupa a las personas que hacen instrumentación y a los centros astronómicos que necesitan esta instrumentación. Entonces, si un telescopio detecta un problema y necesita una solución, podemos ayudar. Así, en vez de preguntar universidad por universidad quién puede ayudar, se empieza a crear esta red de colaboración para poder sacar juntos estos desafíos adelante porque son tan grandes que no se pueden desarrollar por una sola institución o persona. Necesitamos una colaboración más gigantesca”, explica Fernando Cortés, ingeniero de CePIA.

En diciembre del 2018 tuvieron su primera reunión⁴⁷, en la que los laboratorios universitarios de astroingeniería del país pudieron exponer sobre sus trabajos. Contaron también con la presencia del profesor Sheng-Cai Shi de la Academia de Ciencias de China y Thijs de Graauw, quien fue director del Observatorio Alma.

Al finalizar este mapeo de los diferentes laboratorios de astroingeniería y astroinformática, se puede concluir que el desarrollo de estas ciencias a fines a la astronomía ha aumentado considerablemente en Chile durante los últimos años y que, si bien muchos de los proyectos que desarrollan las universidades se generan en colaboración con los observatorios astronómicos instalados en el Norte del país, los centros de investigación han proliferado en casas de estudios de diversos rincones del país, de Norte a Sur.

⁴⁷ CePIA Organiza el Primer Wokshop ChAIN. Diciembre de 2018. Portal de noticias de Cepia, Universidad de Concepción.

De esta forma, la amplia distancia física que existe en algunas ocasiones entre los observatorios astronómicos y los laboratorios de astroingeniería y astroinformática no ha sido impedimento para la colaboración entre ambos y, en consecuencia, la expansión de estas áreas de conocimiento.

III.

Desarrollo de la Astroingeniería y Astroinformática: Tecnología de frontera y Capital humano avanzado para Chile

Cuando Francisco Espinoza, Ingeniero Civil Eléctrico de la Universidad Católica de la Santísima Concepción llegó a trabajar a la Minera Valle Central, a sus compañeros y compañeras de trabajo les pareció extraño que su anterior experiencia laboral haya sido en el radiotelescopio *Cosmology Large Angular Scale Surveyor* (CLASS): “Pero ¿qué hacías ahí?”, le preguntaron en repetidas ocasiones.

Tras pasar por el Laboratorio de Astroingeniería y Microondas (LAIM) de la casa de estudios donde se formó, el ingeniero trabajó en el radiotelescopio CLASS, lugar en el que realizó un análisis de calidad de suministro eléctrico y luego trasladó ese conocimiento a la minera para conseguir una certificación en una normativa de gestión de energía.

“Todo lo que yo aprendí en el laboratorio y en el radiotelescopio, en el tema de calidad y suministro eléctrico, lo llevé a lo minero. En los observatorios es muy importante que la energía eléctrica sea súper pura para no tener problemas de contaminación en los datos. Y este conocimiento fue muy útil en la minería”, explica Espinoza.

El caso de Francisco puede considerarse como un proceso de transferencia de conocimiento desde la astroingeniería a la minería. A diferencia de la astronomía como ciencia básica, la astroingeniería y la astroinformática tienen amplias posibilidades de generar transferencia de tecnología a otras industrias y así lo consigna un informe del Ministerio de Economía del 2012⁴⁸.

⁴⁸ MINISTERIO DE ECONOMÍA DE CHILE, DIVISIÓN DE INNOVACIÓN. (2012). Capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile. Adere Consultores.

“De acuerdo con la experiencia mundial, la astronomía tiene pocos impactos directos y éstos se consiguen en períodos muy largos. Sus resultados no son apropiables 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 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”⁴⁹, indica el estudio.

Eduardo Unda-Sanzana, director del Centro de Astronomía de la Universidad de Antofagasta, explica, que en los proyectos de astroingeniería se capacitan personas en tecnologías innovadoras que podrían ser útiles en industrias que tienen retornos económicos altos:

“En estos proyectos, que son muy desafiantes, están las oportunidades de ganar experticia de alto nivel que finalmente nos habilite para estar en otros sectores de la economía que tienen retornos más altos. Poder insertar a estas personas es una ventaja porque van a conocer el estado del arte del desarrollo de software y de sistemas de control; van a haber visto probablemente los problemas más avanzados en la Tierra, y los van a tener que aplicar en un área que ahora sí es económicamente productiva”, detalla.

Patricio Galeas, director del Grupo de Astroingeniería de la Universidad de la Frontera, enfatiza que se debe aprovechar la cercanía que tenemos en Chile con los observatorios astronómicos para aprender sobre su tecnología y así poder posteriormente transferirlo a otras industrias:

“Por suerte, los telescopios están en Chile y tenemos que aprovecharlos. Debemos aprender cómo funcionan porque después lo podemos aplicar en otro ámbito de la industria. Son la última línea en tecnología, es decir, lo más moderno está ahí y los equipos son los más avanzados. Entonces, si nosotros no nos sumamos a este carro de aprendizaje con ellos, es una pérdida enorme para el desarrollo de la ingeniería en Chile”, asevera.

⁴⁹ MINISTERIO DE ECONOMÍA DE CHILE, DIVISIÓN DE INNOVACIÓN. (2012). Capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile. Adere Consultores. P. 158.

III. 1. Transferencia tecnológica desde las universidades

En este contexto, los distintos laboratorios de astroingeniería y astroinformática han llevado adelante diversos proyectos de transferencia tecnológica. Por ejemplo, en el Laboratorio de Ondas Milimétricas y Submilimétricas crearon un detector en tiempo real de señales de teléfonos celulares basado en ondas milimétricas que es capaz de atravesar paredes o incluso la nieve, y que serviría para buscar a personas que estén enterradas tras una avalancha.

“Utilizamos las técnicas que aprendimos mediante la interferometría con el telescopio Alma. El detector, en el fondo, es un Alma en miniatura. Es una de las aplicaciones más interesantes que hemos patentado, y en estos momentos está en desarrollo para su comercialización”, cuenta Leonardo Bronfman, investigador del laboratorio.

Otro proyecto que realizaron en el laboratorio son sensores que sirven para prevenir derrumbes en los relaves mineros, es decir, pozas donde se decantan desechos provenientes de la minería. “Hemos desarrollado un aparato que consiste en una estaca que está llena de sensores que detecta el nivel de agua y de inclinación del material, para asegurar la estabilidad del relave”, explica Bronfman. El instrumento también serviría para prevenir aluviones.

“Este proyecto lleva un par de años en desarrollo y todavía no hemos llegado al producto final. Cuando tengamos un instrumento que tenga un buen desempeño, podría aumentar en un 1% la eficiencia de la extracción de cobre, lo que se convierte en millones de dólares inmediatamente. Eso no solo tiene un impacto económico grande, sino que también en materia de seguridad. En todo el mundo los tanques de relave se desestabilizan y han ocurrido catástrofes muy grandes. Hace pocos años, en Brasil un tanque inundó un valle completo y murieron 300 personas”, explica Ricardo Finger, director del Laboratorio de Ondas Milimétricas y Submilimétricas.

Por otro lado, el Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile, en conjunto con el Centro de Astrofísica y Tecnologías Afines (CATA), desarrollaron en el contexto de la pandemia del coronavirus un aparato que sirve para medir la concentración de

CO2 en ambientes cerrados⁵⁰. Este determina si los espacios están correctamente ventilados, algo fundamental para evitar la propagación del virus. Al mismo tiempo capta parámetros de temperatura y humedad.

Si bien ya existían otros detectores de CO2, este tiene varias virtudes. La principal es que está conectado a un sistema de red que habían desarrollado anteriormente para la operación de radiotelescopios y que permite tener los datos en tiempo real en una nube. De esta forma, se podrá monitorear la ventilación de salas de clases, donde será probado, y así poder saber cuándo es apropiado cerrar un establecimiento educacional. Otra ventaja que tiene es el valor, ya que el aparato podría llegar a ser cinco veces más barato que otros que cumplen el mismo propósito.

En el Observatorio Virtual Chileno (ChiVO) están desarrollando un repositorio de imágenes médicas para la industria de la salud, en el que están ocupando los mismos sistemas que emplean para almacenar y procesar los datos del Observatorio Alma. Podría utilizarse para “hacer búsquedas por imágenes del tórax, ahora que estamos en medio de la pandemia del Covid. Se pondría la imagen que se le tomó a algún paciente y para conocer su diagnóstico se buscaría en el sistema todas las imágenes que se parecen, lo que indicaría si la persona está sana o si tiene Covid”, explica Mauricio Solar, director del Observatorio Virtual Chileno (ChiVO).

Solar advierte que han enfrentado una complejidad en el proyecto, debido a que los datos de los pacientes están protegidos; por lo tanto, deben pedirles permiso poder divulgar su información de salud como dato público. “La ley en Chile te obliga a que si uno analiza los datos y descubre que la persona tiene cáncer, debemos ser capaces de volver atrás y contarle a la persona de su diagnóstico, por lo que sería una pseudo anonimización”, afirma.

Otros proyectos de transferencia tecnológica que están llevando a cabo en ChiVO es el desarrollo de un repositorio de datos de la minería usando *machine learning* (aprendizaje de máquinas) y un repositorio de imágenes geoespaciales tomando datos de satélites para ser analizadas posteriormente.

⁵⁰ Científicos de la Universidad Chile generan dispositivo para combatir la pandemia. 5 de junio. Portal de noticias del Departamento de astronomía de la Universidad de Chile.

Mientras tanto, en el Laboratorio de Astroingeniería y Microondas (LAIM) de la Universidad Católica de la Santísima Concepción están desarrollando técnicas y dispositivos para la detección de humedad en muestras de madera, usando ondas electromagnéticas con el fin de optimizar procesos industriales. “También hay otras industrias en las que se podría usar este dispositivo, como la de reciclaje, la de fardos de papel, incluso también para la industria de alimentos”, explica Ricardo Bustos, director del LAIM.

En el Núcleo de Formación Planetaria tienen un proyecto para hacer heliostatos, que son condensadores de sol y sirven para captar la energía solar usando espejos de fibra de carbono -que desarrollaron originalmente para telescopios- en vez de espejos de vidrio. “Serían muy eficientes, ya que el polvo se adhiere menos a ellos”, explica Amelia Bayo, académica de la Universidad de Valparaíso y directora del Núcleo Milenio de Formación Planetaria.

Por otro lado, en la Universidad de La Serena están ocupando un método de reconocimiento de vehículos a través de las cámaras que se basa en un sistema de procesamiento de imágenes que se usa en astronomía para la clasificación de galaxias. Esto en un proyecto que están desarrollando junto con la Municipalidad de La Serena, gracias a la adjudicación de un Fondo de Inversión Regional (FIC-R).

“Cuando la municipalidad la comience a utilizar, le va a sacar mucho provecho porque puede usarlo incluso como un elemento para el tema de ordenamiento vehicular. El tráfico de la ciudad es bastante caótico, ya que el parque automotor ha crecido el doble en menos de quince años y no se han abierto muchas más calles”, cuenta Rodolfo Barba, director del Departamento de Astronomía de la Universidad de La Serena.

III. 2. Unidad de Data Science de la Universidad de Concepción

Guillermo Cabrera, académico de la Universidad de Concepción e ingeniero del Proyecto AleRCE, creó la Unidad de Data Science, un grupo dedicado exclusivamente a realizar transferencia tecnológica desde la astroinformática a la industria.

En la página web de la agrupación explican que su misión es “abordar y solucionar desafíos productivos para empresas en la zona sur de Chile, desarrollando soluciones que intervienen el manejo, análisis, e interpretación de datos, aumentando la productividad”⁵¹

Actualmente, se encuentran realizando un sistema de mantención predictiva aplicable a diversas áreas: “Si una empresa tiene una máquina o una planta muy grande, esta puede ser sensorizada y se puede predecir si es que va a fallar para poder reparar el error antes de que ocurra”, explica Cabrera.

Cabrera agrega que no ha sido fácil el trabajo, ya que hay que generar la confianza en la industria en torno a que se puede hacer transferencia desde la universidad. “A nosotros nos ha ido muy bien y esto podría escalar de manera mucho más amplia. En otros países es algo obvio que si tú estudias astronomía puedes dedicarte directamente en la industria después, porque todos los conocimientos que se generan en torno a la astroinformática son directamente aplicables a varios problemas de esta”, concluye.

III. 3. *Beyond Data*: Empresa dedicada a la transferencia tecnológica

Felipe Rojas, candidato a doctor en Ciencias de la Computación e integrante del Centro de Astroingeniería de la Universidad Católica, fundó, junto a un amigo, una empresa llamada *Beyond Data*. Ellos se dedican a resolver problemas de la industria utilizando inteligencia artificial, conocimiento que Rojas adquirió realizando proyectos de astroingeniería.

Uno de los desafíos a los que se han enfrentado es la clasificación de uvas de una viña. “Cada uva tiene su historia. Hay uvas que han crecido en zonas más áridas, otras en zonas más húmedas. Con cada una se produce un vino distinto y tienen un precio distinto”, explica Rojas. Él y su socio desarrollaron un clasificador basado en inteligencia artificial, similar a los que se usan en astronomía para clasificar estrellas y galaxias. “No era un problema desconocido para nosotros”, concluye.

También trabajaron con una empresa que se dedica a la tronadura minera, que es la detonación de rocas para la extracción de minerales. En este caso, aplicaron técnicas de

⁵¹ Extracto del sitio web de la Unidad de Data Science de la Universidad de Concepción.

inteligencia artificial para determinar la naturaleza de la roca y así hacer el proceso final más eficiente.

“El proceso de detonar una roca tiene una ciencia súper interesante detrás, porque una vez que el explosivo hace su trabajo, la roca resultante debe tener un tamaño en particular, y el tamaño depende de muchas cosas: de la potencia del explosivo, del tiempo de detonación entre cada una de las cargas, entre otras”, cuenta Rojas.

El ingeniero explica que la astroingeniería permite tener otras perspectivas dentro de la industria, ya que los desafíos propios de la ciencia son nuevos y complejos: “Podemos entregar una visión más profunda de los problemas, que a veces requieren unos giros de tornillos para poder llegar a la solución y la formación que aporta la astronomía permite: un pensamiento tangencial, pensar un poco fuera de la caja, como se dice a veces. La ciencia te ayuda a eso. Te entrenas para pensar soluciones para problemas complicados”.

III. 4. No todo lo que brilla es oro: Problemas de la transferencia tecnológica

Uno de los problemas de la transferencia tecnológica en las universidades es que los proyectos enfocados en ella no se convierten en publicaciones científicas, lo que retrasa el desarrollo de la carrera académica de los astroingenieros. Ricardo Finger, director del Laboratorio de Ondas Milimétricas y Submilimétricas de la Universidad de Chile, advierte que “hacer transferencia tecnológica tiene un pro y un contra. El pro es evidente: llevar la tecnología a la sociedad y a la industria. El contra es que en los ambientes universitarios no se convierte en artículo y solo en ocasiones se convierte en una patente. Actualmente la universidad está intentando mejorar eso considerando indicadores de transferencia tecnológica como válidos para el desarrollo de una carrera académica”.

Sin embargo, Finger destaca que hay algunas excepciones. Por ejemplo, en el Laboratorio de Ondas Milimétricas y Submilimétricas existen algunos incentivos para generar transferencia tecnológica, ya que la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID) les pide presentar indicadores en esa área para la renovación del fondo que les entregan a través del Centro de Astrofísica y Tecnologías Afines (CATA).

Otro problema que enfrenta la transferencia de tecnología es el alto costo que implica para las empresas, en especial en el área de la astroinformática. Guillermo Cabrera, investigador de la Unidad de Data Science de la Universidad de Concepción, relata que en ocasiones “llegan empresas pequeñas o medianas y nos dicen que quieren desarrollar inteligencia artificial o que quieren analizar ciertos datos. Pero son proyectos caros y ellos no tienen la espalda financiera para pagar por estos proyectos y eso es un gran problema. En la unidad estamos compitiendo con los sueldos de Google, que son gigantes. Entonces, armar un proyecto es caro y, en general, solo las empresas más grandes tienen la capacidad de acceder a esto. A uno le gustaría que todas las empresas en Chile tuvieran acceso a esta transferencia tecnológica, pero no existen incentivos para que esto ocurra”.

Cabrera guarda su esperanza de generar más transferencia de tecnología desde la astroinformática con incentivos estatales como, por ejemplo, la iniciativa de la Corporación de Fomento de la Producción (Corfo) llamada “Programa Tecnológico de Reactivación Económica: Inteligencia Artificial para la Transformación de la Economía”⁵². Esta consiste en un financiamiento de un 60% del total del valor de proyectos enfocados en implementar la inteligencia artificial en procesos productivos de empresas de diversos sectores, como el silvoagropecuario, minero, pesca, construcción, transporte, telecomunicaciones, entre otros.

Roberto González⁵³, astrónomo y autor de un estudio sobre formación de capital humano en el campo de la astroinformática⁵⁴, explica que, para generar más transferencia tecnológica, sería necesario que exista un tercer actor a nivel gubernamental que opere como intermediario entre la industria y la academia. “El gobierno debe articular iniciativas de colaboración a largo plazo, ya que los concursos y programas aislados son insuficientes”, explica.

⁵² Corfo lanza convocatoria para impulsar la inteligencia artificial en las empresas. 16 de agosto de 2021. Portal de noticias de Corfo.

⁵³ Roberto González fue entrevistado el 14 de septiembre de 2021 vía Zoom.

⁵⁴ El estudio mencionado es GONZÁLEZ, R.; ÁLVAREZ, M.I.; BORDON, P.; ESCALA, A.; FÖSTER, F.; PRIETO J. (2020). Programa de Formación para la Competitividad. Diagnóstico de la situación actual de formación de capital humano en Data Science en el campo de la astroinformática.

De hecho, en el informe del 2012 del Ministerio de Economía⁵⁵, mencionado anteriormente, se sugiere como política pública la creación de una oficina de enlace para “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”.

En el mismo documento, se propone la creación de “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”.⁵⁶

González explica que otra dificultad de la transferencia tecnológica es que los programas de formación universitaria están orientados a la productividad científica en general y que hay poco incentivo para aprender herramientas para interactuar con la industria: “Es muy raro ver que un académico le diga a un estudiante que, en vez de hacer una investigación científica, haga una pasantía en una industria”, explica.

No obstante, Leonardo Bronfman, investigador del Laboratorio de Ondas Milimétricas y Submilimétricas de la Universidad de Chile destaca que, a pesar de las dificultades, la transferencia de tecnología desde la astroingeniería y astroinformática es importante, ya que potencia el desarrollo de tecnología nacional.

“Hemos demostrado que la tecnología que producimos para la astronomía es capaz de derivarse hacia la solución de problemas de interés nacional. Eso implica que no tenemos que comprar la tecnología afuera para resolver los problemas, sino que podemos desarrollarla con nuestras propias capacidades. Nuestras competencias son bien altas porque el nivel de nuestros ingenieros en Chile es muy alto, es comparable al nivel de los mejores países. Entonces, si tenemos buenos ingenieros y tenemos proyectos que solucionar con financiamiento para hacerlo... esas tres cosas son un trío virtuoso”, enfatiza.

⁵⁵ MINISTERIO DE ECONOMÍA DE CHILE, DIVISIÓN DE INNOVACIÓN. (2012). Capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile. Adere Consultores. P. 194.

⁵⁶ MINISTERIO DE ECONOMÍA DE CHILE, DIVISIÓN DE INNOVACIÓN. (2012). Capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile. Adere Consultores. P. 194.

III. 5. Capital humano avanzado: ¿En qué trabajan los astroingenieros y los astroinformáticos?

De acuerdo con lo descrito anteriormente, la astroingeniería y la astroinformática son dos áreas científicas que tienen amplias posibilidades de transferencia a la industria, y, por lo tanto, es natural que el capital humano que se forma alrededor ellas también tengan su inserción en el sector productivo.

Ricardo Finger, director del Laboratorio de Ondas Milimétricas y Submilimétricas, cuenta que los estudiantes que pasan por el laboratorio para hacer estudios de Magíster o de Doctorado, al momento de desarrollar sus proyectos de tesis realizan avances tecnológicos en el área astronómica que se encuentran en el estado del arte, es decir, que nunca se habían hecho antes, y que son muy útiles en la industria. Por lo tanto, luego de egresar de los programas, si bien algunos se van a trabajar a los observatorios, otros desembarcan en las empresas.

“Los estudiantes que se titulan habiendo pasado por el laboratorio se pueden considerar sin ningún problema capital humano avanzado, y la industria se ha dado cuenta de eso. De hecho, nuestros titulados van a la industria antes de que terminen sus memorias o sus tesis. Tenemos titulados nuestros que están trabajando en empresas de desarrollo de chips y de desarrollo de electrónica digital para computadores”, explica.

Respecto al capital humano, se descubrieron dos casos interesantes: los astroingenieros chilenos que trabajan en el Observatorio Alma y los astrónomos que trabajan como científicos de datos fuera de la academia.

III. 6. Los chilenos del Observatorio Alma

La formación en astroingeniería y astroinformática a la que han podido acceder los ingenieros y astrónomos chilenos gracias a la proliferación de estas áreas en las universidades, ha permitido que algunos de ellos tengan la posibilidad de trabajar en lugares como el Observatorio Alma.

Incluso, el 80% del personal del radiotelescopio es chileno y, si bien no entregan cifras sobre la cantidad exacta de ingenieros y astrónomos nacionales, destacan que “muchos

de los cargos requieren una formación profesional y habilidades técnicas avanzadas, y el observatorio ofrece una valiosa capacitación y oportunidad de aprendizaje laboral”⁵⁷.

Es el caso de José Luis Ortiz⁵⁸, Ingeniero Electrónico de la Universidad Católica, quien en el 2009 llegó al observatorio para participar en el ensamblaje de la parte electrónica del radiotelescopio y para ponerla en marcha. Tras la inauguración en el 2013, pasó a formar parte del equipo de mantención, que se encarga de que el instrumento siga funcionando correctamente de acuerdo con los requerimientos científicos. Hace un año se convirtió en el líder técnico de sistemas digitales, desde donde coordina y mantiene subsistemas electrónicos, en coordinación con equipos de ingenieros internacionales de la ESO que desde afuera también entregan soporte técnico.

Ortiz cuenta que el día a día trabajando en Alma no es fácil. Las 66 antenas que componen el radiotelescopio se encuentran aproximadamente a 5000 metros sobre el nivel del mar, en el Llano de Chajnantor, por lo que debe usar un tanque de oxígeno para poder respirar correctamente estando allí. Por otro lado, cumple sus labores en sistema de turnos, que constan de ocho días en el observatorio y seis días de descanso, lo que, explica, trae costos personales y familiares.

Sin embargo, asegura que trabajar en Alma “es un desafío profesional súper grande y es muy entretenido. Hay mucho que aprender y aportar todavía. Son dispositivos muy complejos y mucha de la ingeniería que está involucrada, es la primera vez que se hace. Por más que Alma se haya instalado hace 10 años, seguimos aprendiendo y encontrando cosas nuevas y tenemos que seguir adaptándonos para poder seguir manteniendo en operaciones este observatorio”.

Ortiz elaboró en colaboración con la Universidad Adolfo Ibáñez un dispositivo electrónico que predice y detecta fallas en las antenas del observatorio antes de que estas queden fuera de operación por algún problema. También se encuentra trabajando en un proyecto para aumentar la cantidad de decisiones de mantenimiento que se toman en base a los datos de funcionamiento de las antenas, como temperatura, voltaje, corriente, entre otras cosas.

⁵⁷Extraído del sitio web del Observatorio Alma: Formación de recursos humanos avanzados y tecnología.

⁵⁸ José Luis Ortiz fue entrevistado el 16 de septiembre de 2021 vía Zoom.

El ingeniero electrónico destaca que la mayor parte del equipo que trabaja en Alma son chilenos: “Tanto los ingenieros electrónicos que trabajan conmigo, como los ingenieros del área de software... son casi todos chilenos”, cuenta.

De hecho, la inserción de los ingenieros chilenos en Alma es continua. Por ejemplo, José Ogalde⁵⁹, Ingeniero Electrónico de la Universidad de Chile, comenzó a trabajar como integrante del grupo de mantenimiento del instrumento hace dos años, luego de haber participado en la construcción de un satélite de investigación aeroespacial llamado SUCHAI, en el Laboratorio de Exploración Espacial y Planetaria de su casa de estudios.

Ogalde no tenía conocimiento sobre lo que implicaba trabajar en un radiotelescopio antes de llegar a Alma, pero estaba familiarizado con los sistemas tecnológicos complejos y también conocía el trabajo en equipo multidisciplinario, gracias a su experiencia en la construcción del satélite.

“Tuve que estudiar mucho para aprender cómo mantener este observatorio, que es bastante complejo, pero haber pasado por este otro proyecto satelital me sirvió para hacer un tránsito mucho más efectivo y rápido hacia el mundo de la radioastronomía”, explica.

Respecto a sus labores, explica que se dedica a mantener el correlador, “que es un centro de procesamiento, un computador muy grande que toma la información de todas las antenas y las procesa. Como cualquier máquina, presenta problemas en ciertos períodos y nuestra misión como grupo es mantener la máquina funcionando dentro de las especificaciones”, cuenta.

En relación con la inserción de ingenieros en los telescopios y radiotelescopios del Norte, Patricio Galeas, cuenta que en la Universidad de la Frontera tienen cursos para preparar a los estudiantes para trabajar en observatorios como Alma, ayudándolos en este paso clave en su vida laboral.

“Tenemos una asignatura que creamos hace poco que se llama Programación Distribuida, en la que enseñamos una tecnología que se ocupa en Alma y otros observatorios. La aplicamos en el aula para que los alumnos que eventualmente hagan una práctica en el observatorio ya sepan cómo funciona el sistema. En Alma, se demoran como un año en

⁵⁹ José Ogalde fue entrevistado el 21 de septiembre de 2021 vía Zoom.

preparar a cada ingeniero que ingresa para que pueda hacer algo realmente productivo. La idea es poder acortar esa brecha de conocimiento haciendo algunas cosas ya en la universidad”, explica Galeas.

Rolando Dunner, subdirector del Centro de Astro-Ingeniería UC, comenta que la cantidad de ingenieros capacitados para trabajar en observatorios ha aumentado en los últimos años y que esto es ventajoso para los grandes consorcios astronómicos:

“Si uno compara la cantidad de chilenos capacitados hoy con la cantidad que teníamos hace 20 años atrás, la verdad es que ha crecido muchísimo. Hemos pasado de casi nada a tener bastante, pero todavía es un área escasa en recursos humanos. Si hay una gran demanda de chilenos, es justamente por el hecho de que los telescopios están en Chile. Tener personas chilenas trabajando en los telescopios tiene una ventaja respecto gente de otros países, dado que generalmente es más caro traer a una persona de Europa, con otros estándares, a trabajar acá”, explica Dunner.

Francisco Espinoza, integrante del Laboratorio de Astro-Ingeniería y Microondas (LAIM) de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, dice que es importante dar a conocer en los colegios el trabajo que se hace en los observatorios, para así atraer al capital humano que se necesitará en los próximos años:

“Falta más difusión de parte de la gente que trabaja en astroingeniería. Debemos llevarle esta información a los colegios, quizás a los más vulnerables porque no tienen la oportunidad realmente de saber lo que se está haciendo en Chile con los observatorios. Hay proyectos que van a necesitar capital humano. Hoy puedo trabajar en un observatorio, pero en 30 años más ya no voy a poder porque la altura influye mucho: 5.500 metros sobre el nivel del mar cansa mucho. El cuerpo no te da para trabajar allí a los 60 años”, advierte.

En la misma línea, Mauricio Solar explica que es importante que se siga formando capital humano también en el área de la astroinformática, debido a la pronta instalación de observatorios, como el Vera C. Rubin, que producirán grandes cantidades de datos: “Se requiere tener gente capacitada tanto para la captación de las imágenes, como para el procesamiento de éstas, y en la parte de operación. El Vera Rubin estará en dos años más aquí, o sea a la vuelta de la esquina, entonces se va a requerir esa capacidad”.

III. 7. Astrónomos como científicos de datos

Debido a la que la astronomía se ha convertido en un campo científico en el que tener habilidades de manejo y procesamiento de grandes volúmenes de datos es muy relevante, los astrónomos se han abierto puertas en industrias donde este conocimiento es valioso, destacándose por tener incluso más aptitudes que ingenieros informáticos que se han formado fuera de ambientes astronómicos.

Por ejemplo, en MetricArts, una empresa que se dedica a la consultoría en ciencia de datos, decidió en el 2016 contratar a astrónomos, en vez de informáticos, ya que necesitaban trabajar en un programa que analizaba videos de cámaras. Se dieron cuenta que los astrónomos tenían competencias más amplias de análisis de imágenes que los ingenieros informáticos (los que no tienen experiencia en astroinformática). Fue así como Roberto González, astrónomo y ex investigador del Centro de Astroingeniería UC, llegó a trabajar a la empresa para desarrollar proyectos que incluían videonalítica e inteligencia artificial.

Luego, MetricArts empezó a colaborar con Microsoft en diversos trabajos para la empresa. Y, después de un tiempo, decidieron levantar su primer proyecto en astroinformática que fue presentado en el contexto de la Conferencia *Astronomical Data Analysis Software & Systems* (ADASS), que tuvo lugar en Chile por primera vez en el 2017. “Desarrollamos un algoritmo de detección de galaxias usando las técnicas que habíamos aplicado en la industria y generamos un impacto bastante grande. De hecho, tuvimos un premio en la conferencia y desde ahí surgió la idea de colaborar con los observatorios”, cuenta González.

Fue así como Microsoft decidió financiar una prueba de concepto para generar una solución a algún problema presente en los observatorios astronómicos del Norte. Por este motivo, González se puso en contacto con el Observatorio Paranal de ESO y desarrolló un sistema para integrar la inteligencia artificial en las operaciones del telescopio. “Consistía en un sistema para calibrar el instrumento de forma automática ocupando técnicas de visión computacional y de inteligencia artificial. Antes esto lo hacían de forma manual”, cuenta.

En el 2019 la Asociación Chilena de Empresas de Tecnología de la Información (ACTI) entregó a MetricArts el premio “Transformación digital e industria 4.0”⁶⁰ por el proyecto recién mencionado.

Luego, el mismo año MetricArts fue comprada por Ernst & Young (EY), una empresa de consultoría internacional con presencia en más de 150 países que entrega servicios relacionados a la auditoría y a las finanzas. González sigue trabajando allí y destaca que “internamente en EY dicté algunos cursos y de esta forma ampliamos el conocimiento interno sobre la importancia de la astroinformática”. Además, cuenta que siguen ocupando las mismas tecnologías que aplicaron en el Observatorio Paranal en otros proyectos de EY.

En este caso particular, surgió un proyecto de astroinformática dentro una empresa que no abarcaba el área, algo que no es habitual. Como se vio en el capítulo anterior, la tendencia es la inversa, siendo el traspaso desde las universidades o los observatorios hacia la industria. Esta nueva dinámica podría considerarse como una consecuencia de la inserción de astrónomos como científicos de datos en la industria.

Mauricio Solar, director del Observatorio Virtual Chileno (ChiVO), cuenta que por el proyecto que dirige han pasado aproximadamente 250 alumnos de pregrado y de posgrado, y que muchos de estos estudiantes han trabajado en el área informática de observatorios de la ESO ubicados en Chile y el extranjero. Pero también ha habido casos de estudiantes que se han ido a trabajar a Amazon y a Spotify. “Las capacidades que obtienen en el trabajo que han desarrollado en ChiVO les ha permitido conocer todas las tecnologías asociadas a la astronomía y de ahí van a otras industrias que, al igual que la astronomía, requieren procesamiento de grandes volúmenes de datos”, relata.

Mauricio Araya, integrante del grupo de astro-informática de la Universidad Técnica Federico Santa María, explica que hay una sobrepoblación de astrónomos para cargos académicos y que por esa razón muchos egresados de la carrera están optando por dedicarse a la ciencia de datos, ya que la astronomía les entrega vastos conocimientos en el área.

“Hay mucha formación de astrónomos porque la carrera se hizo algo popular acá en Chile. Algunos astrónomos jóvenes están optando por la carrera de científico de datos, y eso

⁶⁰ La asociación entre Microsoft Chile, MetricArts y ESO recibe el premio "Transformación digital e industria 4.0. 6 de septiembre de 2019. Portal de noticias de la ESO.

es porque las competencias en la astronomía tienen mucho que ver con exactamente eso: limpieza y visualización de datos. Son áreas en las que un informático generalmente no tiene las capacidades para desenvolverse, ya que se dedica a hacer bases de datos y, probablemente, un algoritmo que los detecta. Pero la visualización y la comprensión de los datos, es algo que generalmente está fuera de su dominio”, explica.

Amelia Bayo, directora del Núcleo Milenio de Formación Planetaria, agrega que “educar estudiantes en este ambiente les abre las puertas a muchas otras cosas. No tienen por qué cerrarse a ser el astrónomo clásico que va a terminar siendo profe en una universidad. Eso es muy importante porque no hay suficientes puestos de trabajo para ese tipo de astrónomo”.

En el informe “Diagnóstico de la situación actual de formación de capital humano en Data Science en el campo de la astroinformática”, del año 2019, encargado por la Corporación de Fomento y la Producción (Corfo), se realizó una encuesta exploratoria sobre la comunidad en torno a la astroinformática en Chile. Respecto a la situación laboral de los 577 entrevistados se concluyó que un 55% trabaja en el sector privado, un 29% en la academia, un 9% en el sector público, un 3% en observatorios, un 2.5% en centros de investigación privados y un 2% en otras instituciones⁶¹.

El informe también destaca cómo la transformación digital de la industria podría verse beneficiada por el capital humano formado en astroinformática:

“La transformación digital, la digitalización y automatización transversal de procesos, permite el aumento de la eficiencia y productividad del sector industrial, comercial y público. Para que esto ocurra se necesita la incorporación de nuevas tecnologías asociadas a ciencia de datos, lo cual requiere de capital humano avanzado con nuevas capacidades técnicas y organizacionales, escasamente reflejadas en los planes de formación educacional del país. Por

⁶¹ El estudio mencionado es GONZÁLEZ, R.; ÁLVAREZ, M.I.; BORDON, P.; ESCALA, A.; FÖSTER, F.; PRIETO, J. (2020). Programa de Formación para la Competitividad. Diagnóstico de la situación actual de formación de capital humano en Data Science en el campo de la astroinformática. P.4.

esta razón, la Astronomía y la Astroinformática ofrecen una ventaja estratégica, con el objetivo de acelerar la transformación digital del país”⁶²

Roberto González, director del informe recién mencionado, dice que se podría considerar que los astroinformáticos especializados en Chile tendrían un “valor agregado” por tener la posibilidad de trabajar y aprender en los observatorios astronómicos.

“Así como con el vino se dice que ‘*si es chileno, es bueno*’, uno podría trasladar eso al capital humano en astroinformática. Ya no se trata solo de una persona que sabe sobre el tema, sino que se especializó en Chile, y eso tiene un *plus*: no solo aprendió cosas que puede aprender en cualquier parte del mundo, sino que tuvo la ventaja de trabajar en los observatorios, y manejar aquí mismo estos grandes volúmenes de datos”, reflexiona.

Tras haber revisado las posibilidades de transferencia tecnológica de la astroingeniería y la astroinformática junto a las oportunidades laborales del capital humano que se forma en torno a estas áreas del saber, se puede concluir que estas ciencias afines a la astronomía otorgan amplias oportunidades de desarrollo tecnológico al país en diversas industrias, más allá de solamente expandir el conocimiento astronómico.

⁶² El estudio mencionado es GONZÁLEZ, R.; ÁLVAREZ, M.I.; BORDON, P.; ESCALA, A.; FÖSTER, F.; PRIETO, J. (2020). Programa de Formación para la Competitividad. Diagnóstico de la situación actual de formación de capital humano en Data Science en el campo de la astroinformática. P. 2.

IV.

Financiamiento de la astroinformática y la astroingeniería

La astroingeniería y la astroinformática en Chile desarrollada en los laboratorios universitarios ha sido financiada con fondos estatales principalmente, pero también con algunos provenientes de los observatorios astronómicos. Además, en el año 2016 el Estado se aventuró a crear una iniciativa a largo plazo relacionada con la astroinformática: la Fundación Data Observatory.

Es importante mencionar que el financiamiento a estas ciencias se da en un contexto en el que el Estado chileno invierte solo un 0.35% del Producto Interno Bruto (PIB) en Investigación y Desarrollo, muy lejos del promedio de los países que integran la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) que es de un 2.38%⁶³

Sin embargo, David Rebolledo, astrónomo del Observatorio Alma explica que, si bien la inversión en ciencia en el país es poca, la astronomía y las ciencias afines a esta ocupan un lugar privilegiado: “El Estado chileno no es un estado científico; nunca la ciencia ha sido prioridad para algún gobierno. Aquí la inversión en ciencia, tecnología y desarrollo es muy pequeña comparada con países que tienen un producto interno bruto similar al nuestro. Dentro de este contexto, la astronomía está bien posicionada, porque es la principal ciencia del país”.

IV.1. Financiamiento a corto plazo

Existen distintas iniciativas de financiamiento. Por un lado, están los fondos para proyectos acotados en el tiempo. Entre estos se cuentan el Fondo ALMA-ANID, disponible desde 2005, y el Fondo GEMINI-ANID, desde el 2006, otorgados por los observatorios Alma y Gemini Sur respectivamente, pero administrados por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), ex Conicyt. Ambos están pensados para el desarrollo astronómico de forma amplia, incluyendo proyectos de astroingeniería y astroinformática, y entregan

⁶³ Últimas cifras entregadas por el Observatorio del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (OBSERVA) del Ministerio de Ciencias.

recursos que deben ser utilizados durante un año. Los montos pueden alcanzar los 90 millones de pesos, en el caso del ALMA-ANID, y hasta 10 millones, con GEMINI-ANID.

En 2012 la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (Conicyt), empezó a entregar el Fondo Quimal “para el Desarrollo de Tecnologías para la Astronomía Nacional”. Este es el primer y único fondo dedicado exclusivamente al desarrollo de astroingeniería y astroinformática, enfocado “en el diseño y construcción de instrumentación astronómica, el desarrollo de tecnologías afines al quehacer astronómico para realizar investigación de frontera y en procesos de transferencia tecnológica de punta”⁶⁴.

El monto entregado por el Fondo Quimal es de un máximo de 200 millones de pesos, que pueden distribuirse en un período de tres años máximo.

La primera entrega de este fondo estuvo acompañada por la presentación de la “Hoja de Ruta de la Astronomía en Chile”, elaborada por Conicyt, la que concluye que “se necesita un aumento de la financiación significativamente por encima de los niveles actuales para que Chile pueda dar un paso audaz y visible hacia la instrumentación astronómica de clase mundial”⁶⁵.

Eduardo Unda-Sanzana, director del Centro de Astronomía de la Universidad de Antofagasta, considera que este fondo ha permitido el avance de la astroingeniería, pero que el monto es muy acotado. Además, explica que los fondos ALMA-ANID y GEMINI-ANID no son adecuados para el desarrollo de esta ciencia.

“El Quimal ha permitido que los grupos chilenos se aventuren a hacer algunos proyectos de astroingeniería, que de otro modo habrían sido difíciles o imposibles con las líneas de financiamiento que existían antes del fondo, ya que estas no eran adecuadas para desarrollar la infraestructura necesaria. Sin embargo, yo aumentaría el monto. Es decir, Chile debería asumir que son proyectos caros y que no necesariamente tienen un retorno económico inmediato, pero son buenas inversiones a largo plazo”.

⁶⁴ Descripción entregada en el sitio web de Conicyt.

⁶⁵ COMISIÓN NACIONAL DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA (CONICYT). (2012). Astronomy, technology, industry: Roadmap for the fostering of Technology Development and Innovation in the Field of Astronomy in Chile. P. 4.

EN la misma línea, Rolando Dunner, subdirector del Centro de Astroingeniería UC, explica que el Fondo Quimal no permitiría construir un telescopio completo:

“El Quimal es el más grande para desarrollar instrumentación, pero son 200 millones repartidos en dos años. En dólares, son como trescientos mil, algo así. Y los proyectos grandes cuestan decenas o incluso cientos de millones de dólares. Ese es el fondo que se requiere para construir un telescopio competitivo. Estamos muy lejos de poder construir un telescopio propio con los fondos que existen en Chile”, asevera.

Unda Sanzana, coincide: “Si yo me gano un proyecto de astroingeniería grande en Chile, un Quimal, gano 200 millones de pesos; y tengo que sentarme en la mesa a conversar con un colega de Estados Unidos, que va con un proyecto pequeño de 10 millones de dólares (8 mil millones de pesos)”.

Otro fondo al que han podido acceder la Universidad de La Serena y la Universidad de Antofagasta para financiar proyectos relacionados con astroingeniería, astroinformática y transferencia tecnológica, es el Fondo de Innovación para la Competitividad Regional (FIC-R), que busca fortalecer las capacidades regionales de investigación, desarrollo e innovación.

Unda-Sanzana dice que el Fondo FIC-R no es apropiado para financiar proyectos científicos por la forma en que opera: “Con un fondo Quimal, la plata normalmente está en la cuenta del investigador que dirige el proyecto. Si detecta una oportunidad y la necesita aprovechar rápidamente, la puede gastar y listo. Ese fue todo el trámite. En media hora puede tener lo que necesita. Con los fondos del gobierno regional, entre todas las autorizaciones y los visados de contraloría, tranquilamente puede pasar un año en la tramitación, y no es una exageración. Además, hay que tratar de convencer de las gestiones a muchas personas que no son de tu área, sino que son ejecutivos, a los que además les cuesta mucho lidiar con un idioma extranjero cuando se trata de documentos, lo cual es natural en astronomía, pero para ellos no”.

En contraposición, Amelia Bayo, directora del Núcleo Milenio de Formación Planetaria, explica que el nivel de burocracia es excesivo en todo tipo de fondos, ya que “lo que sobra es burocracia, pero por todos lados. Da mucha pena. Sé que soy afortunada por tener tantos proyectos, pero el 80% de mi día lo paso haciendo papeleos. Es muy contraproducente no poder avanzar en mi trabajo porque tengo que estar mirando si la factura tiene tres cotizaciones exactas o si una dice una cosa un poco distinta y me la podrían

rechazar. No es nada personal, pero uno tiene la sensación de que el sistema de rendiciones está basado en la desconfianza. Está basado en que buscan pillarnos, porque piensan que estamos usando los fondos en otras cosas”.

IV. 2. Financiamiento a largo plazo

La astroingeniería y la astroinformática también se ha sustentado con fondos que entrega ANID a trabajos científicos de diversas áreas por períodos más extensos, como la Iniciativa Científica Milenio que financia el Núcleo de Formación Planetaria desde el 2018; el Programa de Financiamiento Basal para Centros Científicos y Tecnológicos de Excelencia, que costea al Centro de Astrofísica y Tecnologías Afines desde 2011, y el Programa Anillos de Investigación, que entre el 2016 y 2019 apoyó el Proyecto Instrumentación Chilena para Sondeos Astronómicos en el Centro de Astroingeniería UC.

Amelia Bayo valora la entrega de este tipo de financiamiento: “Creo que la Iniciativa Científica Milenio es de las mejores cosas que tiene el gobierno chileno, ya que genera la posibilidad de que las ciencias básicas hagan cosas riesgosas y puedan hacer transferencia tecnológica”.

Leonardo Bronfman, investigador del Laboratorio de Ondas Milimétricas y Submilimétricas -institución financiada por Centro de Astrofísica y Tecnologías Afines (CATA)-, coincide: “Pienso que el Estado reconoció la importancia del desarrollo de la astroingeniería mediante la entrega de financiamiento a través del CATA, que ya lleva diez años funcionando. Cuando postulamos a la renovación del proyecto invocamos a todos los méritos que hemos obtenido, como la exitosa incorporación del país al proyecto ALMA, en su parte instrumental, y el aporte que hemos hecho a la transferencia tecnológica”.

Sin embargo, Bayo explica que hacen falta fondos intermedios que se ubiquen entre los métodos de financiamiento recién mencionados y el Fondo Quimal: “El problema que veo es que, o tienes un proyecto muy chico, o tienes la suerte de ganarte uno de estos. Pero cosas intermedias no hay. Y para que realmente haya transferencia en temas de tecnología y de informática, necesitas financiar diversos proyectos para que alguno de ellos finalmente culmine en algo”.

Respecto a iniciativas de mayor envergadura, en el año 2016 el gobierno decidió dirigir sus esfuerzos hacia la astroinformática, y estableció finalmente el año 2020 la Fundación Data Observatory, una institución público-privada que busca generar desarrollo de capacidades de ciencia de datos, a partir de la astronomía, pero transferirlas a otras industrias. Pese a la importancia de esta iniciativa, su gestación e implementación no estuvieron exentas de dificultades.

IV. 3. Creación de la Fundación Data Observatory

La Fundación Data Observatory es una asociación pública, privada y académica. Fue fundada por el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación; el Ministerio de Economía, Turismo y Fomento; Amazon Web Services; y la Universidad Adolfo Ibáñez. Tiene como objetivo principal almacenar, procesar y disponibilizar grandes volúmenes de datos generados por instituciones públicas y privadas, tanto astronómicas como de otras áreas, con el fin de favorecer el desarrollo científico y tecnológico.

La iniciativa surgió en 2016 en la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), ya que buscaban fomentar la economía tomando como activo la instalación de los observatorios astronómicos en el Norte. En ese contexto, calcularon que para el 2025 los instrumentos hospedados constituirán una inversión de seis billones de dólares⁶⁶.

De esta forma se creó el Programa AstroData y Demián Arancibia, Ingeniero Industrial de la Universidad de Chile -quien trabajó también en el Observatorio Alma y el Observatorio Nacional de Radioastronomía (NRAO)-, asumió como director ejecutivo. Este programa fue financiado por el Fondo de Inversión Estratégica (FIE).

En 2017 se constituyeron dos comités. En el primero participaron los astrónomos nacionales María Teresa Ruiz y Mario Hamuy; Massimo Tarenghi, ex director de Alma; Bob Williams, ex director de la Asociación Astronómica Internacional; Peter Queen, director del Centro Internacional de Investigación de Radio Astronomía (ICRAR); Chris Smith, director del Observatorio Astronómico Cerro Tololo; Juan Rada, quien en ese momento era asesor de

⁶⁶ Según datos entregados en el Sitio Web de Data Observatory: Historia del DO.

CORFO; y Gabriel Rodríguez, quien tenía el cargo de director de Energía, Ciencia y Tecnología del Ministerio de Relaciones Exteriores.

Por otro lado, convocaron a un comité compuesto por expertos nacionales en astroingeniería, astroinformática, y áreas afines de distintas universidades, compuesto por Mauricio Araya (UTSFM); Amelia Bayo (Universidad de Valparaíso); Guillermo Cabrera (Universidad de Concepción); Francisco Forster (Universidad de Chile); Roberto González (Universidad Católica); Juan Carlos Maureira (Universidad de Chile); Maisa Rojas⁶⁷(Universidad de Chile); y Mauro San Martín (Universidad de La Serena).

Durante el año 2017 ambos comités se reunieron junto a Demián Arancibia, director Ejecutivo del Programa de Astroinformática y actual jefe de Asesores del Equipo Futuro del Ministerio de Ciencias en diferentes ocasiones, y definieron que la “misión del programa es hacer crecer la economía digital chilena, utilizando herramientas centradas en datos de astronomía”⁶⁸ y así decidieron crear la Fundación Data Observatory.

“Concluimos que por las líneas de fibra óptica nacional iban a pasar los datos astronómicos más importantes para la humanidad. Estados Unidos, Europa y Asia no podrían con el trabajo de procesarlos todos. Entonces, hay un espacio para Chile”, cuenta Arancibia⁶⁹.

El ingeniero reconoce que en la astroingeniería el mercado es pequeño: “Basta con que existan dos laboratorios capaces de pulir espejos de ocho metros para telescopios en el mundo porque no hay tanta demanda”, concluye. Esta sería una de las razones por las que Corfo habría decidido finalmente potenciar la astroinformática.

Arancibia explica que dentro del gobierno existía la presunción “de que la astronomía no sirve para nada de negocios”, y que luego de identificar las oportunidades del proyecto junto a los comités, “a la Corfo no le pareció tanto y el fondo bajó desde los mil millones de pesos, a los 350 millones. Lo cortaron”.

⁶⁷ Maisa Rojas fue designada como ministra del Medio Ambiente para el gobierno de Gabriel Boric en enero de 2022.

⁶⁸ Definición del texto “The Data Observatory, a vehicle to foster digital economy using natural advantages in astronomy in Chile” (2020). P.3, originado tras las discusiones.

⁶⁹ Demián Arancibia fue entrevistado el 6 de octubre de 2021 en su oficina en el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Luego, le encargaron un estudio a Ernst & Young (EY) para constatar las posibilidades de que la astroinformática se convierta en un vehículo para el desarrollo nacional. En febrero de 2018, la compañía entregó el reporte en el que explicó que la astronomía está adelantada en 5 o 10 años en análisis de *big data* respecto a otras industrias. También dio cuenta de las posibilidades de transferencia tecnológica de la astroinformática a otras industrias, destacando la exploración minera, la agricultura de precisión, y el comercio⁷⁰.

Cuando Sebastián Piñera asumió su segundo mandato como presidente de Chile, en marzo de 2018, Julio Pertuzé, quien estaba a cargo de la Unidad de Economía del Futuro, vio el proyecto. Como él había estado investigando sobre las externalidades (o spillovers) que genera la astronomía en el país⁷¹, decidió mover el proyecto desde la Corfo al gabinete del Ministerio de Economía, recuerda Arancibia.

“En la administración anterior había mucho escepticismo sobre el proyecto. Eso a mí me hizo trabajar mucho para que la propuesta fuera robusta, pero para esta administración estaba lo suficientemente robusto”, relata Arancibia.

En este período se decidió que la fundación no sería solamente estatal, sino que incluiría al sector privado, siguiendo la teoría de la triple hélice, que indica que la unión del Estado, la academia y la industria fomenta el crecimiento económico y las posibilidades de transferencia tecnológica.

Luego, Arancibia y su equipo elaboraron el plan de implementación del Data Observatory (DO), y, finalmente, el 27 de diciembre de 2018 el presidente Piñera firmó el decreto para la creación de la fundación al alero del Ministerio de Economía, constituyéndose como una persona jurídica de derecho privado sin fines de lucro. La misión del DO, descrita en el documento, es “adquirir, procesar y almacenar en medios digitales los conjuntos de datos generados por instituciones de carácter público o privado y que por su volumen, naturaleza y complejidad requieren una curaduría, exploración, visualización y análisis que

⁷⁰ Datos sacados del sitio web de la fundación.

⁷¹ Julio Pertuzé fue uno de los investigadores del estudio “Natural laboratories as policy instruments for technological learning and institutional capacity building: The case of Chile’s astronomy cluster” citado en el primer capítulo.

faciliten la disponibilidad de dichos datos para fines del desarrollo de la ciencia, tecnología, innovación, conocimiento y sus aplicaciones en la economía”⁷².

En enero de 2019 se hizo un llamado a propuestas de valor a personas naturales o jurídicas que quisieran ser fundadores del Data Observatory, con la condición de que colaboraran con aportes de dinero, capacidad para almacenar datos o personal. Tras el cierre de la convocatoria, se seleccionó a la Universidad Adolfo Ibáñez (representando a la academia), y a Amazon Web Services (mundo privado).

Sin embargo, en septiembre del mismo año, la Contraloría General de la República frenó la creación de la fundación afirmando que la selección de los fundadores había sido vía trato directo sin una licitación pública de por medio, e indicó que “no se detallan en el acto en examen los motivos que condujeron a la selección de la Universidad Adolfo Ibáñez, considerando especialmente que esta institución no cuenta con un área educativa de astronomía”⁷³.

En el documento también se advierte que se “ha conferido a los particulares intervinientes un privilegio significativo en relación con terceros que puedan encontrarse en similares o mejores condiciones que aquellos para celebrar el contrato en cuestión, vulnerando con ello la igualdad de oportunidades que debe asegurar el Estado a todas las personas”.

Arancibia explica que solo la Universidad Adolfo Ibáñez y Amazon presentaron propuestas admisibles, ya que ponían a disposición de la fundación la suma de dinero que se solicitaba, que eran cinco millones de dólares. “No hubo que hacer una selección, solo juntamos a las dos que eran admisibles, y les preguntamos si les interesaba juntarse”.

El trato generó molestia en el resto de las universidades. Mauricio Araya, integrante del grupo de astro-informática de la Universidad Técnica Federico Santa María, explica: “la colaboración entre universidades era muy fructífera, estábamos trabajando todas juntas: la

⁷²GOBIERNO DE CHILE (27 de diciembre de 2018). Decreto Supremo N° 164-2018 que designa conforme lo dispuesto en el artículo 47 de la Ley 21.050 al ministro de Economía, Fomento y Turismo para que constituya una persona jurídica de derecho privado sin fines de lucro.

⁷³GOBIERNO DE CHILE (3 de septiembre de 2020). Decreto N° 14-2020 del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo que aprueba constitución de Fundación Data Observatory (3 de septiembre de 2020).

Chile, la Católica, la Santa María, la de Concepción, y de repente nos dejaron a todas fuera y se hizo algo completamente privado. Estuvo mal liderado en última instancia”. Sin embargo, es optimista y concluye: “Las personas a cargo tienen nuestras impresiones y se espera que puedan rectificar el rumbo en algún minuto”.

En mayo de 2020 la Contraloría le da luz verde a la fundación, permitiendo finalmente que la Universidad Adolfo Ibáñez y Amazon Web Services fueran los socios fundadores. Sin embargo, puso como condición para el establecimiento de la institución, que el Gobierno hiciera otro llamado para aportantes simples o estratégicos, “pudiendo éstos últimos participar en el Consejo de Aportantes Estratégicos en las mismas condiciones en que participarán los socios fundadores privados, ya sea mediante la transferencia de conocimiento y talento, uso y análisis de bases de datos estratégicas, instrumentación e infraestructura – como servicios en la nube, laboratorios e informática de alto rendimiento– y también financiamiento para proyectos de innovación”⁷⁴.

La convocatoria fue realizada y el 30 de noviembre de 2021, la Fundación Data Observatory dio a conocer a través de un comunicado publicado en su sitio web⁷⁵ el resultado de esta. En el documento se detalla que la única propuesta para constituirse como aportante de la fundación fue presentada por la Universidad Técnica Federico Santa María, quienes postularon con su Observatorio Virtual Chileno (ChiVO).

Sin embargo, el panel evaluador compuesto por profesionales designados por el Ministerio de Economía, Fomento y Turismo y el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación sugirió declarar inadmisibles las propuestas, ya que no cumplían con la cantidad de puntaje suficiente en el criterio “alineación estratégica”. La dirección de la fundación decidió acoger la recomendación, por lo que la UTFSM no pudo convertirse en aportante estratégico de la institución. Por lo tanto, actualmente la fundación mantiene su composición original.

⁷⁴ Según el comunicado de prensa del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación del 4 de mayo de 2021 publicado en su sitio web: “Contraloría da luz verde al decreto de la fundación Data Observatory”.

⁷⁵ Comunicado de prensa de la Fundación Data Observatory publicado el 30 de noviembre de 2021 en su sitio web: “Llamado a propuestas de valor para constituirse como aportante de la Fundación Data Observatory”

Arancibia concluye que la fundación “desde el Estado debiese avanzar a ser un laboratorio nacional, o sea un bien público en el que todos tienen acceso. Pero en realidad se ha convertido en el laboratorio de una universidad apoyado por una empresa tecnológica que compite con las otras universidades. En eso lo hemos convertido las chilenas y chilenos. Nos vamos a hacer responsables”.

El Data Observatory tiene una inversión asegurada de cinco años, y logró levantar 22 millones de dólares. Arancibia agrega que “(el financiamiento) fue exitoso. Lo que está en juego ahora es que es si va a hacer lo que diseñamos que iba a ser, o se va a transformar en otra cosa”, concluye.

IV. 4. El Data Observatory hoy

Si bien el Data Observatory partió como una iniciativa desde la astroinformática, está pensado actualmente para desarrollar ciencia de datos para cualquier área que lo requiera, incluida la astronomía. Por ejemplo, en sus primeros cinco años tiene proyectado trabajar con datos del Observatorio Alma, el Observatorio Vera Rubin y el Conjunto de Telescopios Cherenkov (CTA).

Además, la fundación colaboró con el ALeRCe⁷⁶, entregando infraestructura para procesar la inmensa cantidad de datos del proyecto. Carlos Jerez⁷⁷, director ejecutivo de Data Observatory y académico de la Universidad Adolfo Ibáñez, cuenta también que Amazon le entregó aportes en dinero al equipo de ALeRCe para que pudieran crear prototipos.

“Sin el apoyo del Data Observatory, este proyecto no podría haber obtenido el rol de *broker* internacional. Esto demuestra que sin una institución como esta es imposible hacer ciencia de gran tamaño”, explica Jerez.

Respecto a proyectos de otras áreas, Data Observatory se encuentra colaborando con CSIRO (Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth Australiano), en la creación de un Cubo de Datos Abiertos (*Open Data Cube*) que tomará datos satelitales del territorio chileno y los pondrá a disposición para que diferentes

⁷⁶ Proyecto ALeRCE firma alianza con DATA Observatory para posicionar a Chile como broker internacional en astronomía. 30 de septiembre de 2020. Portal de noticias del Instituto Milenio de Astrofísica

⁷⁷ Carlos Jerez fue entrevistado el 5 de octubre de 2021 vía Zoom.

instituciones e investigadores accedan fácilmente a ellos y posteriormente puedan realizar trabajos relacionados con el cuidado del medio ambiente, como el combate a la sequía y a la marea roja.

En ese contexto, CSIRO junto a Data Observatory y la Fuerza Aérea de Chile, realizaron a principios de 2021 un evento llamado “Hackatón FACH”⁷⁸, en el que convocaron a investigadores a proponer proyectos para mitigar el cambio climático utilizando en el proceso imágenes satelitales y herramientas de la ciencia de datos. Las ideas que resultaron ganadoras son iniciativas dedicadas a estudiar la sequía en el Humedal del Yali y la Cuenca del Maipo.

Uno de los desafíos más importantes de la fundación fue crear el sistema de datos de la pandemia del Covid-19 para el Ministerio de Ciencias. “Actualmente, el ministerio administra el sistema, pero fue financiado y realizado por ingeniería del Data Observatory”, cuenta Jerez.

A nivel general, el Data Observatory está trabajando bajo la premisa de democratizar los datos, ya que la infraestructura para almacenarlos, procesarlos y disponibilizarlos no es accesible para todo tipo de instituciones.

“Si se tiene una base de datos fragmentada, con formatos no compatibles, es necesario un súper computador para procesar todo eso, y no todos tienen esa posibilidad. Pero si existe una fundación como el Data Observatory, que agarra todo eso y hace el trabajo, se genera valor y dinamismo”, explica Jerez.

En el área de la infraestructura, la fundación está trabajando con el sistema de “computación en la nube de pago por uso”, un modelo donde terceras partes entregan servicios de almacenamiento y procesamiento de uso flexible en el que se puede ampliar la capacidad según sea necesario, utilizando el modelo de “pago por uso”, sin poseer centros de datos por completo. En este caso, Amazon Web Services es el proveedor del sistema.

“Si alguien quiere tener acceso a datos del espacio, debe tener un ancho de banda gigantesco y no puede hacer mucho desde su computador, está limitado por la infraestructura.

⁷⁸ Ganadores Hackaton Virtual FACH 2020 aplicaron data science para enfrentar el cambio climático. 4 de enero de 2021. Portal de noticias de la Universidad Adolfo Ibañez.

Pero la fundación puede hacer el trabajo en la nube para que puedan generar valor a partir de eso”, explica Jerez.

Además, cabe destacar que el Data Observatory utiliza la lógica de datos abiertos: “Lo que queremos fortalecer es que haya más datos de acceso abierto, ya que los datos generan más valor cuando se comportan como bienes públicos. Mientras más usuarios puedan acceder al dato e interactúen con él, más valor se genera. Por eso es súper importante para la fundación que se sumen otras empresas, otras industrias, porque mientras más jugadores tengamos compartiendo información, es mejor”, explica Jerez.

“Un dato por sí mismo, generalmente vale muy poco. Pero si yo junto un dato con otro dato, puedo empezar a obtener modelos y hacer más sofisticado mi entendimiento de la realidad”, concluye.

IV. 5. Consideraciones finales en torno al financiamiento

Si bien la astroinformática y la ciencia de datos en general tienen posibilidades de continuar desarrollándose en la Fundación Data Observatory, la astroingeniería carece aún de una iniciativa estatal de tal magnitud a largo plazo. Esto, a pesar de que en el informe “Capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile” del año 2012, encargado por el Ministerio de Economía, se recomienda “impulsar una incubadora de astroingeniería, con la participación de los observatorios norteamericanos y europeos con una apertura amplia a todas las universidades y a todas las empresas de base tecnológica”.

Ricardo Finger, director del Laboratorio de Ondas Milimétricas de la Universidad de Chile, es optimista, y destaca que, si bien los fondos dedicados a la astroingeniería no son altos, han mejorado en los últimos 15 años.

“Los fondos concursables que están en Chile son mucho menores a los que tienen un grupo similar en Europa o en Estados Unidos. Hay que adaptarse a esa realidad y buscar nichos donde uno pueda hacer aportes reales, ya que el capital humano existe. Trabajar hoy día en instrumentación astronómica es mucho mejor de lo que era trabajar hace 10 o 15 años atrás. Con ellos uno no va a poder construir un telescopio, que vale decenas o cientos de millones de dólares, pero para lo que nosotros estamos haciendo ahora, que es el desarrollo

de instrumentos y el desarrollo de técnicas de procesamiento digital de señales y contribuciones de nicho en general, hay fondos”, reflexiona.

Eduardo Unda-Sanzana, director del Centro de Astronomía de la Universidad de Antofagasta, recalca que es clave que las inversiones en astroingeniería se hagan en el momento en que las tecnologías a crear son nuevas, tal como ha sido en Estados Unidos o Europa, donde el desarrollo de esta ciencia ha sido fructífero. Explica que “lo que pasó en estos lugares, donde las comunidades de astroingeniería actualmente son experimentadas y autosuficientes, es que recibieron inyecciones de recursos a tiempo. Por lo tanto, tuvieron la oportunidad de posicionarse rápidamente. Ellos miran con curiosidad a Chile en este tema, pero encuentran que estamos un poco tarde”.

El astrónomo también realza la importancia de que se tome conciencia en el país en torno a que las ciencias básicas son tan relevantes como las aplicadas, y que estas deben ser financiadas: “Uno de los riesgos que hay es que la astronomía, como una ciencia básica que no tiene una aplicación directa, pudiera ser vista como algo que no aporta mucho a la sociedad, y que luego pase lo mismo con la astroingeniería. Pero si solo genera interés la ciencia aplicada que tiene un efecto directo en las personas, la verdad lo que estás haciendo es dejar del árbol solamente la parte que da frutos y cortar las raíces pensando en que no sirven de nada estando bajo la tierra”.

V.

Proyecciones sobre el desarrollo de la astroingeniería y de la astroinformática

V. 1. Desarrollo de la astroingeniería y astroinformática en Chile: Imposible sin los observatorios

Como se ha explicado en capítulos anteriores, la instalación de observatorios astronómicos en el Norte de Chile ha sido clave para el desarrollo de la astroingeniería y la astroinformática, debido a las alianzas a las que han podido acceder los laboratorios universitarios con los consorcios internacionales, lo que ha potenciado fuertemente el desarrollo de estas áreas científicas.

David Rebolledo, integrante del equipo de operaciones del Observatorio Alma, resalta que “los observatorios han sido el factor que gatilló el desarrollo de la astroingeniería. Si no estuviera Alma o los otros proyectos grandes, sería muy difícil tratar de empujar este tipo de iniciativa porque no habría demanda. A nadie le interesaría en Chile hacer un proyecto de astroingeniería si no hubiese dónde instalarlo. Alma hace posible que se genere conocimiento en Chile. El hecho de que hayamos tenido ingenieros trabajando en una nueva banda de observación, por ejemplo”, explica.

Además, en los próximos años, se instalarán en el país nuevos e importantes telescopios, como el Observatorio Vera Rubin, el *Extremely Large Telescope* (ELT) y el *Giant Magellan Telescope* (GMT), que podrían acelerar aún más este desarrollo.

Roberto González, ex investigador postdoctoral del Centro de Astroingeniería UC, proyecta que “en un par de años, van a estar totalmente operativos varios telescopios de última generación, que van a tener gran impacto mundial, y eso va a traer nuevos conocimientos y habilidades. Sobre todo, ahora con la astronomía en tiempo real que va a traer el Observatorio Vera Rubin. Vamos a observar el cielo casi como una película,

escaneándolo por completo cada cierto período. Entonces el cambio que se viene es importante”.

En la misma línea, Fernando Cortés, investigador del Centro para la Instrumentación Astronómica (CEPIA) de la Universidad de Concepción, dice que mientras continuemos hospedando en el país observatorios astronómicos, el desarrollo de la astroingeniería chilena va a continuar y que “es importante formar una comunidad y hacer integración de conocimiento para seguir desarrollando tecnología porque constantemente va a haber un problema que detectar y resolver. Tenemos la capacidad, pero tenemos que creernos el cuento”.

No obstante, Rodolfo Barba, director del Departamento de Astronomía de la Universidad de La Serena, advierte que es importante trabajar para seguir generando un buen capital humano en las áreas de astronomía, astroinformática y astroingeniería, ya que la cercanía con los observatorios astronómicos por sí sola no asegura el éxito en estas ciencias.

“En Chile se están desarrollando proyectos astronómicos que van a ser líderes en el mundo y emblemáticos del siglo XXI, como el GMT, el ELT y el Vera Rubin. Eso va a permitir que una generación de personas dedicadas a la astronomía va a poder acceder a un laboratorio astrofísico del más alto nivel. Estamos en una situación de privilegio respecto a todos los países del mundo, incluso Estados Unidos, Japón o China. Sin embargo, aunque estén los instrumentos acá, tenemos que ser competitivos desde el punto de vista del manejo de instrumentos y de habilidades de astrofísica. No porque las cosas estén en nuestro patio trasero, nos van a dar el acceso así no más”.

Sin embargo, los telescopios instalados en el país viven una constante amenaza: la contaminación lumínica. Al respecto, Rodrigo Reeves, integrante de la Comisión Asesora de Áreas de Interés Científico para la Observación Astronómica, explica que hay que frenar “una posible fuga de capitales y de capacidades observacionales producto de este tipo de contaminación para que se siga dando el desarrollo exponencial que ha tenido la astronomía en Chile, tanto del punto de vista científico, pero además ahora de forma incipiente por el lado de la instrumentación astronómica. Desde el país nos hemos ido acoplado a las instancias de desarrollo tecnológico alrededor de los observatorios y es importante que eso se siga dando”.

V. 2. Contaminación lumínica

Según la definición de la Fundación Cielos de Chile, la contaminación lumínica es “la introducción por innecesaria de luz artificial en el medio ambiente, y se debe a la emisión de luz en intensidades, direcciones y colores inadecuados; afectando particularmente el brillo natural de cielo, los espacios naturales y paisajes sensibles, la flora, la fauna y a la salud de las personas”⁷⁹.

En el 2016 el Atlas Mundial de la Contaminación Lumínica determinó que menos del 1% de la población de Chile vive en zonas con cielos oscuros y que el 39,7% vive en lugares que están bajo el intenso brillo de la luz artificial. Esto nos convierte en el segundo país más contaminado de Sudamérica, después de Argentina⁸⁰.

Este tipo de contaminación afecta fuertemente a las observaciones astronómicas, razón por la cual el Estado chileno se ha preocupado de frenar su expansión en el Norte del país a través de diversos decretos.

El primero es la Norma de Emisión para la Regulación de la Contaminación Lumínica (Decreto 686) de 1998 del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, creado para “prevenir la contaminación lumínica de los cielos nocturnos de la II, III y IV regiones, de manera de proteger la calidad astronómica de dichos cielos, mediante la regulación de la emisión lumínica”⁸¹.

Luego, la normativa fue actualizada y reemplazada en el 2012 por el Decreto 43, creado esta vez por el Ministerio de Medio Ambiente. Este incorpora procedimientos de medición para nuevas tecnologías de iluminación como las lámparas de estado sólido (LED), que, si bien son eficientes porque tienen una amplia durabilidad, pueden ser muy contaminantes al ser usadas en el exterior, en especial las de tonalidades frías.

⁷⁹ Definición entregada en el Sitio Web de la Fundación Cielos de Chile: Qué es la contaminación lumínica.

⁸⁰ Información recopilada de “Así es el nuevo atlas de contaminación lumínica: Un tercio del mundo no ve la Vía Láctea.” 13 de junio de 2016. Portal de noticias de la Radio Bio. Y también del sitio web del Ministerio del Medio Ambiente: Contaminación lumínica en Chile y el mundo.

⁸¹GOBIERNO DE CHILE (7 de diciembre de 1998). Decreto N° 686- 1998 que establece Norma de Emisión para la Regulación de la Contaminación Lumínica.

La nueva norma se aplica en las mismas regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo, y entrega indicaciones para diversos tipos de alumbrados: ambiental (plazas y parques), funcional (calles y rutas), ornamental y decorativo, industrial, deportivo y letreros luminosos.

El decreto indica que las luminarias deben instalarse en ángulo recto apuntando hacia abajo, para así evitar todo tipo de emisión hacia el cielo. Además, se restringen las luces del espectro azul, por ser las más contaminantes, y se pide que se utilicen de tonos cálidos.

La norma entró en vigor el 4 de mayo de 2014 y la Superintendencia del Medio Ambiente informó que entre el 2016 y 2019 realizó alrededor de 100 actividades de fiscalización y que “los procedimientos sancionatorios por incumplimiento han sido iniciados en contra de municipios, centros comerciales y recintos deportivos”.⁸²

Eduardo Unda-Sanzana, astrónomo y coordinador del Grupo de Trabajo para la Contaminación Lumínica de la Sociedad Chilena de Astronomía (Sochias), considera que la aplicación de la ley ha sido “pobre”. “Esto me trae sensaciones encontradas porque el decreto es bueno. No es perfecto, pero está bien. Y si se hubiera implementado y traducido en instancias de fiscalización y en sanciones, seguramente en diez años habríamos visto cambios muy significativos en cómo la gente está haciendo las cosas”, critica.

El astrónomo explica que una de las razones del fracaso es que las mineras son las mayores culpables de la contaminación lumínica y que la multa que contempla -que va de 1 a 2.500 Unidades Tributarias Anuales- no es lo suficientemente alta para evitar que estas empresas sigan contaminando: “La multa máxima es a penas de 150 millones de pesos y si lo comparamos con las ganancias de muchos millones de dólares que tienen, la verdad es que la sanción no es muy intimidante”.

“El efecto de las empresas mineras que se instalan en el desierto y actúan con ese mismo desdén por las normas, termina siendo más preocupante que el efecto de las ciudades”, concluye Unda-Sanzana.

⁸² Información extraída del Tercer Informe del Estado del Medioambiente de 2020. Capítulo 11, Contaminación Lumínica.

Otros problemas que ve el científico en la aplicación de la norma es que la fiscalización no suele ser activa ni permanente, sino que se tienen que presentar denuncias ante la Superintendencia del Medioambiente para que se realice la fiscalización y que el proceso es bastante lento.

El astrónomo guarda sus esperanzas respecto a la mitigación de la contaminación lumínica en la creación de Áreas de Interés Científico para la Observación Astronómica por parte del Ministerio del Medio Ambiente, una iniciativa que busca proteger anticipadamente de este tipo de contaminación las zonas donde el desarrollo astronómico es o puede ser prominente.

V. 3. Áreas de Interés Científico para la Observación Astronómica

La idea en torno a la creación de Áreas de Interés Científico para la Observación Astronómica es que cada proyecto que se quiera instalar en estas áreas delimitadas ya sea minero o de otro tipo, debe presentar un Estudio de Impacto Ambiental que dé cuenta de la contaminación lumínica que emitiría una vez construido.

El ministerio creó en octubre de 2020 una comisión asesora para designar las zonas a proteger⁸³, liderada por el mismo Unda-Sanzana e integrada también por María Teresa Ruiz (astrónoma y Premio Nacional de Ciencias), Amelia Ramírez (astrónoma y decana de la Facultad de Ciencias de la Universidad de La Serena), Manuela Zoccali (académica del Departamento de Astronomía y Astrofísica de la Universidad Católica), Rodrigo Reeves (director del Centro para la Instrumentación Astronómica de la Universidad de Concepción) y Ricardo Bustos (director Laboratorio de Astro-Ingeniería y Microondas de la Universidad Católica de la Santísima Concepción).

Reeves explica que los criterios que se levantaron para determinar las zonas fueron principalmente tres: las capacidades observacionales astronómicas del lugar, el nivel de producción científica y la relación con el medio nacional de los proyectos instalados (como, por ejemplo, la contratación y entrenamiento de capital humano chileno).

⁸³ Comisión científica busca proteger zonas de observación astronómica de la contaminación lumínica. 9 de octubre de 2020. Portal de noticias del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

A la fecha, el documento con las zonas que se protegerán no es público y por ese motivo ninguno de los dos entrevistados del comité consultados (Rodrigo Reeves y Eduardo Unda-Sanzana) tienen autorización para mencionarlas. Sin embargo, Reeves explica que estas “se encuentran en el Norte de Chile: segunda, tercera y cuarta región, que es dónde están los centros astronómicos más importantes, que se han convertido en motor de entrenamiento de capacidades humanas avanzadas”.

Reeves concuerda con Unda-Sanzana respecto a que el emplazamiento de empresas mineras en el desierto es uno de los factores que generan la contaminación lumínica en el Norte: “En la segunda región se aprecia que las mineras contaminan a un nivel comparable con los núcleos urbanos como Antofagasta. Si bien no hay tanta gente allí, se genera una gran cantidad de contaminación lumínica por la forma en la que se está iluminando, dada la actividad económica que hay en el lugar”.

Al respecto, Unda-Sanzana, manifiesta que uno de los temores respecto a los resultados de las Áreas Protegidas es que exista influencia de las empresas mineras en la decisión que finalmente tome el gobierno sobre las áreas que se deben resguardar: “Puede que tras bambalinas las mismas mineras a las que esto les podría afectar en el futuro puedan estar haciendo lobby acercándose al Ministerio de Minería. Siempre estamos lidiando con esas sospechas porque nos estamos enfrentando a grandes intereses económicos y es un tema que no podemos desconocer. Mientras, los científicos estamos velando por aquello que sabemos que finalmente es un beneficio para la humanidad. Así que esperamos que en el gobierno prime una mayor valoración de las recomendaciones desde el mundo de la ciencia”.

Reeves advierte de los peligros que el aumento de la contaminación lumínica generaría en el desarrollo astronómico en el país: “El mayor riesgo es que estemos en una situación en que nuevos observatorios no quieran venir a Chile por la situación de contaminación lumínica, lo que nos coarta en desarrollo y lo que sería peor es que observatorios que ya están instalados se empiecen a ir, lo que sería grave dada la inversión hecha en estas instalaciones”.

V. 4. Contaminación lumínica: Efecto en la salud humana y en la biodiversidad

Cabe destacar que la contaminación lumínica no solo afecta las observaciones astronómicas, sino que también se han visto efectos negativos sobre la salud humana debido a que la exposición a esta disminuye la producción de la melatonina, la hormona encargada de regular nuestros momentos de sueño y vigilia (ciclo circadiano). También se ha estudiado que diversos cánceres, como el de mama y próstata, se desarrollan con más rapidez en personas que viven en lugares altamente iluminados, así lo indicó Mario Motta, cardiólogo de la *American Medical Association* (AMA) en el congreso Cielos oscuros y tranquilos para la Ciencia y la Sociedad organizado por la Unión Astronómica Internacional del 2020⁸⁴.

Asimismo, los animales se ven perjudicados por este tipo de contaminación. Por ejemplo, las aves migratorias se desorientan debido al deslumbramiento y no llegan a su destino. Esto ha provocado que en el Norte mueran cada año más de 20 mil golondrinas de mar negras, por lo que la especie fue declarada “en peligro” por el Ministerio del Medio Ambiente⁸⁵.

En este contexto, el 4 de marzo de 2022, Javier Naranjo, quien entonces era ministro de Medio Ambiente, anunció una modificación de la Norma Lumínica vigente que incluye principalmente la extensión del alcance territorial de ésta a lo largo de todo país - y ya no solo a las tres regiones del Norte- y la incorporación del cuidado de la salud humana y la biodiversidad como objetos de protección.

Desde el Ministerio del Medio Ambiente declararon en un comunicado,⁸⁶ que solo faltaba la firma del presidente de la República y la aprobación de la Contraloría para que la actualización de la norma entrara en vigor. Además, explicaron que ésta incluía una “mejora

⁸⁴ “El exceso de luz artificial aumenta el riesgo de cáncer, alertan científicos”. 7 de octubre de 2020. Efe Verde.

⁸⁵ Información extraída del Sitio Web de la Fundación Cielos de Chile: Consecuencias de la contaminación lumínica.

⁸⁶ “Ministro Naranjo anuncia nueva norma lumínica que protegerá los cielos de todo Chile”. 4 de marzo de 2022. Sitio web del Ministerio del Medio Ambiente.

el control preventivo de la norma, mediante controles en comercialización y etapa de proyecto”.

Al respecto, Unda-Sanzana sostiene que es necesario que exista un cambio cultural y toma de conciencia respecto a los daños que produce la contaminación lumínica, más que solo el abordaje legal del problema. “Mientras solo controlemos la situación a nivel de leyes, siempre va a haber un abogado capaz de encontrar un vacío legal para que la empresa pueda hacer lo que quiera. En la medida en que la gente sienta cada vez más que esto es moralmente algo malo, tal vez las mismas personas que trabajan en las empresas no querrán ver su imagen asociada a algo que se percibe tan mal”, afirma.

V. 5. Posibilidades de la astroingeniería y la astroinformática: Aspectos a mejorar

Para finalizar este capítulo sobre las proyecciones de la astroingeniería y la astroinformática en el país, se presentan opiniones de ingenieros y astrónomos que actualmente desarrollan estas ciencias.

Astroingeniería

Respecto al trabajo realizado en instrumentación astronómica, Leonardo Bronfman, investigador del Laboratorio de Ondas Milimétricas y Submilimétricas de la Universidad de Chile, explica que en la última década se ha alcanzado un alto desarrollo del área.

“En la parte de radiofrecuencia y de instrumentación astronómica, en 10 años fuimos capaces de posicionarnos internacionalmente. Es un mercado pequeño en el que hay muy pocos integrantes, es decir, son algunas instituciones internacionales que desarrollan este tipo de tecnología en conjunto con universidades, con centros de investigación, tal como el nuestro. En este tiempo hemos logrado ponernos al nivel de instituciones internacionales de mucho prestigio. No hemos generado el mismo volumen de trabajo, pero sí de igual calidad. Es muy importante para mí que se nos reconozca como un país que es capaz de producir tecnología de buena calidad y confiable”, asegura.

En la misma línea, Ricardo Finger, director del Laboratorio de Ondas Milimétricas de la Universidad de Chile, explica que la renovación del Fondo Basal del Centro de Astrofísica

y Tecnologías Afines que financia el desarrollo de instrumentación astronómica en la Universidad de Chile, Universidad Católica y Universidad de Concepción, es muy relevante para continuar trabajando en el área y proyecta importantes avances.

“La confirmación de que vamos a tener 10 años de financiamiento a través del CATA, es una muy buena noticia para la instrumentación astronómica. Me atrevería a decir que sin la renovación del fondo todo esto hubiese desaparecido. Por eso, veo con optimismo la próxima década desde el punto de vista de la instrumentación astronómica. Yo creo que vamos a empezar a hacer cosas más grandes y tomaremos posiciones de liderazgo en las colaboraciones con los observatorios. Incluso, podríamos llegar a ser líderes de instrumentos nuevos a ser instalados en Chile o el mundo. Pienso que esto se puede lograr si es que las tres universidades trabajamos en conjunto”, reflexiona.

Pese a lo anterior, Finger explica que uno de los problemas que ve en el desarrollo de la astroingeniería es la poca sincronía que hay entre las personas que se dedican a la instrumentación astronómica y los astrónomos “puros”, es decir, aquellos que se dedican a la teoría y estudio del universo.

“En Chile hace falta una mejor interacción con la comunidad científica de astrónomos puros. Los que hacemos instrumentación astronómica estamos pensando en el desarrollo de instrumentos y eso es lo que nos gusta hacer: la tecnología, la ingeniería... Por otro lado, están los astrónomos, que están pensando exclusivamente en usar estos grandes telescopios y hacer descubrimientos puramente científicos sin veta tecnológica. Ese divorcio entre el desarrollo tecnológico y el desarrollo puramente científico es mucho más grande en Chile que en el resto del mundo. En otras partes, cuando uno llega a un departamento de astronomía no ve esa diferencia, sino que todos están un poco en todo. Todos están empujando para mover la vara tecnológica y crear nuevos instrumentos para así hacer descubrimientos científicos”, observa.

Respecto a las causas del problema, Finger explica que: “A Chile le ocurrió que le llegaron todos los telescopios de afuera como un regalo, y quedó con este enorme capital del 10% de observación, lo que es fabuloso, pero a veces la abundancia también genera problemas. Era tal la cantidad de telescopios, que la instrumentación astronómica se desarrolló más lento y, por lo tanto, no se creó una cultura de interacción entre astrónomos e

instrumentalistas. A mí me gustaría que nuestros desarrollos tuvieran que ver con ideas de experimentos que ellos (astrónomos) quisieran hacer”, concluye.

Por otro lado, Mauricio Araya, investigador del grupo de astroinformática de la Universidad Técnica Federico Santa María, explica que es importante forjar una institucionalidad en torno a la astroingeniería. Explica, por ejemplo, que es necesaria la creación de un centro nacional del área, ya que en las universidades los académicos tienen problemas de visibilidad académica:

“Generalmente los *journal*, los lugares donde uno puede publicar de astroingeniería, no tienen tantas citas y no son tan reconocidos. En realidad, a los grandes observatorios no les va ni les viene tener publicaciones, ya que ellos tienen financiamiento estable y solo quieren hacer buena ingeniería. En ese sentido es complicado para los académicos desarrollar esta ciencia en las universidades, porque nos solicitan publicar. Falta que exista un centro, como funciona en todo el mundo, que pueda juntar y potenciar los pequeños avances que hay por todos lados en el área a nivel nacional. No es que falte trabajo de mis colegas, es que falta institucionalidad. Por eso nosotros mirábamos con buenos ojos al Data Observatory al principio, cuando era un centro de astroingeniería en general, público y genérico”, precisa.

Finalmente, Rolando Dunner, subdirector del Centro de Astro-Ingeniería UC, concluye que para que la astroingeniería se siga desarrollando en Chile, es importante que, en paralelo, se generen capacidades industriales tecnológicas.

“No se puede separar la astroingeniería de otros temas igualmente importantes como es la ingeniería y la industria. En un país que tiene una industria electrónica consolidada con ingenieros y técnicos, la astroingeniería funciona mejor. Por ahora, el trabajo que podemos hacer está ligado con nuestras conexiones internacionales, ya que el ambiente industrial y tecnológico del país dificulta el poder estar liderando estas cosas. Tenemos un tremendo potencial, pero siempre va a ir ligado al desarrollo del país y de su economía”, advierte.

Astroinformática

Respecto a la astroinformática, Amelia Bayo recalca que el país tiene muchas oportunidades de seguir desarrollándola, debido a la gran cantidad de datos que captarán observatorios como el Vera Rubin.

“Chile en astroinformática puede competir porque va a ser un centro de datos muy importante. Uno no quiere mover la data de un sitio a otro porque se pierde mucho tiempo. Entonces, el hecho de que los datos se vayan a coleccionar en La Serena, por ejemplo, para el Vera Rubin, es claramente una ventaja que habría que explotar”.

José Luis Ortiz, ingeniero del Observatorio Alma, coincide y también ve amplias posibilidades para Chile en la astroinformática, debido a que en el radiotelescopio para el que trabaja se ha formado bastante capital humano en torno al área.

“La astroinformática en Chile la hemos desarrollado mucho. La mayor parte de los ingenieros de software que tiene Alma son ingenieros chilenos, que trabajan estrechamente con ingenieros de otros países y continentes, pero las operaciones del día a día de Alma están soportadas principalmente por ingenieros chilenos. Creo que se vienen muchas oportunidades que confío vamos a saber aprovechar para poder crecer en torno al desarrollo de los nuevos telescopios”, dice optimista.

En la misma línea, Jaime San Martín, investigador del Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile (CMM), destaca iniciativas en el área astroinformática como Alerce y afirma que Chile podría seguir prosperando en el tema, ya que es menos costoso que la astroingeniería y que solo es cuestión de “crearse el cuento”.

“No hay nada que nos impida desarrollar tecnología e innovación. Talentos hay, solo que existe un aspecto cultural que nos trava: no creernos el cuento. Nuestra dirigencia no se cree el cuento de que Chile podría ser un aporte, de que podamos desarrollar y exportar soluciones propias. Alerce es un muy buen ejemplo. Alerce está compitiendo de igual a igual en el mundo y podría haber muchos Alerces. Chile podría ser un país muy muy avanzado, pero hay que hacer la inversión. En este *boom* de los datos tenemos alguna chance porque la inversión no es tan alta como en otras áreas de las ciencias”, lamenta.

En cuanto al análisis expuesto de diversos ingenieros y astrónomos, es posible concluir que la astroinformática y la astroingeniería tienen amplias posibilidades de seguir desarrollándose en el país, siempre y cuando se mantenga la preocupación por la contaminación lumínica, se generen instituciones entorno a ellas, se fortalezca la comunidad científica y se mantengan los sistemas de financiamiento.

VI.

Palabras finales: La ciencia que no vemos

Si bien la divulgación de la astronomía ha tomado fuerza durante los últimos en la prensa y el interés de las personas por conocer sobre esta ciencia ha crecido ⁸⁷, los conceptos de astroingeniería y astroinformática no son referidos frecuentemente por el periodismo científico. De hecho, a la fecha, existe solo un breve texto de marzo de 2017 de *La Tercera* titulado “El acelerado desarrollo de la astroingeniería y la astroinformática en el país”⁸⁸ en el que se mencionan algunos aspectos del trabajo que se ha desarrollado en torno a las disciplinas.

El presente reportaje da cuenta del trabajo en estas ciencias que se ha llevado a cabo en Chile e indaga en quiénes son las personas e instituciones que lo llevan a cabo. Tras conocer los proyectos que llevan adelante doce casas de estudio, se pudo deducir que efectivamente el desarrollo de la astroingeniería y astroinformática se dio de forma rápida a lo largo del país en la última década.

Una de las primeras conclusiones que se puede extraer de esta investigación es que el desarrollo de la astronomía, astroingeniería y astroinformática en Chile hubiese sido imposible sin la instalación de los grandes observatorios astronómicos internacionales en el Norte. Gracias a la cercanía existente entre estos y los centros de investigación chilenos, las disciplinas han podido financiarse en parte y también se ha generado una importante transferencia de conocimiento.

Por otro lado, este texto identifica las posibilidades de transferencia tecnológica que existen desde la astroingeniería y la astroinformática a la industria. Esto se torna especialmente valioso considerando que en estas disciplinas suelen desarrollar avances tecnológicos de punta, lo que podría ayudar al país a modernizar la industria e incluso repensar su matriz productiva.

⁸⁷ El interés de las personas en saber más sobre astronomía se ve retratado por ejemplo cuando seis mil personas asistieron a la presentación del libro “Marte, la próxima frontera” de José Maza en la Medialuna de Rancagua en 2018, la que se convirtió en la charla de difusión científica más grande de la historia del país.

⁸⁸ “El acelerado desarrollo de la astroingeniería y la astroinformática en el país”. 17 de marzo de 2017. Publicación en La Tercera.

También se subraya que el capital humano formado en las áreas de astroingeniería y astroinformática, además de destacar investigando dentro de su propia zona de conocimiento, sobresale también cumpliendo labores de operación y mantención de importantes telescopios y radiotelescopios como Alma y, por otro lado, ejecutando tareas en estados avanzados de la ingeniería informática.

No tan alentador es el panorama del financiamiento. Si bien el Estado ha tomado en cuenta la importancia del desarrollo de las ciencias a fines a la astronomía con iniciativas como la creación del Fondo Quimal, es lamentable que la instauración de la Fundación Data Observatory no se haya dado en los mejores términos y que haya estado rodeada de irregularidades. Su objetivo final de generar transferencia tecnológica desde la astroinformática a otras industrias es una muy buena oportunidad para el país y debería darse en el contexto más favorable posible.

En el último capítulo se aborda el tema de la contaminación lumínica. Como se explicó recién, el desarrollo de la astronomía, astroinformática y astroingeniería nacional no sería posible sin la instalación de observatorios astronómicos internacionales, y por eso se vuelve fundamental proteger los cielos oscuros que han atraído por décadas a los consorcios extranjeros para preservar, de esta forma, el laboratorio natural del Desierto de Atacama.

Finalmente, es primordial mencionar que tomando en cuenta que la presencia de la astroingeniería y la astroinformática en los laboratorios universitarios ha permitido la creación de tecnología de frontera y ha propiciado la formación de capital humano formado en áreas avanzadas de la ingeniería, es sustancial que el Estado continúe participando en la elaboración de condiciones adecuadas para que estas ciencias sigan desarrollándose.

Tal como la astroingeniería y la astroinformática, en Chile posiblemente estén proliferando otras ciencias que a simple vista no vemos, por lo que es relevante que el periodismo científico las tome en cuenta y las visibilice, para así empujar la creación de políticas públicas en torno a ellas y, en consecuencia, el desarrollo del país.

VII. BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

VII. 1. Entrevistas

ARANCIBIA, DEMIAN: jefe de Asesores del Equipo Futuro del Ministerio de Ciencias y director ejecutivo del Programa de Astro-informática de CORFO.

ARAYA, MAURICIO: Doctor en Informática, integrante del grupo de astro-informática de la Universidad Técnica Federico Santa María.

ARGUDO-FERNÁNDEZ, MARÍA: astrofísica, académica del Instituto de Física PUCV y presidenta de la Sociedad Chilena de Astronomía.

BARBA, RODOLFO: Doctor en Astronomía y director del Departamento de Astronomía de la Universidad de La Serena.

BAYO, AMELIA: Doctora en Astrofísica, académica de la Universidad de Valparaíso integrante del grupo de Astroestadística de la casa de estudios y directora del Núcleo Milenio de Formación Planetaria (proyecto que cuenta con una arista de instrumentación astronómica).

BRONFMAN, LEONARDO: Doctor en astrofísica, investigador del Laboratorio de Ondas Milimétricas y Submilimétricas de la Universidad de Chile (lugar donde se realizan proyectos de astroingeniería).

BUSTOS, RICARDO: Doctor en Ciencias de la Ingeniería y director Laboratorio de Astro-Ingeniería y Microondas (LAIM) de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

CABRERA, GUILLERMO: Doctor en Ciencias de la Computación de la Universidad de Chile, académico de la Universidad de Concepción y co-investigador del Proyecto Alerce, seleccionado como broker oficial del Telescopio Vera Rubin.

CÁRCAMO, MIGUEL: Ingeniero Informático y estudiante de doctorado de Astrofísica, académico e integrante del grupo de astroingeniería de la Universidad de Santiago de Chile (USACH).

CORTÉS, FERNANDO: Astrónomo y Magíster en Ciencias con mención en Física. Investigador en Centro para la Instrumentación Astronómica (CEPIA) de la Universidad de Concepción.

DÍAZ, MAURICIO: Ingeniero Civil Eléctrico. Integrante del Laboratorio de Astro-Ingeniería y Microondas (LAIM) de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

DUNNER, ROLANDO: Ingeniero Civil Electricista, Doctor en Astrofísica y subdirector del Centro de Astro-Ingeniería UC.

ESPINOZA, FRANCISCO: Ingeniero Civil Eléctrico, integrante del Laboratorio de Astro-Ingeniería y Microondas (LAIM) de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

GALEAS, PATRICIO: Doctor en Ciencias de la Computación y director del Grupo de Astroingeniería de la Universidad de la Frontera (UFRO).

FINGER, RICARDO: Ingeniero Eléctrico y Físico. Director del Laboratorio de Ondas Milimétricas y Submilimétricas de la Universidad de Chile.

GONZÁLEZ, ROBERTO: Doctor en astrofísica y ex investigador postdoctoral del Centro de Astroingeniería UC, gerente en analítica avanzada en la empresa EY donde desarrolla proyectos de astroinformática (anteriormente en la empresa MetricArts) y coautor del informe “Diagnóstico de la situación actual de formación de capital humano en Data Science en el campo de la astro-informática”.

GURIDI, JOSÉ: Jefe de FAST del Ministerio de Economía y autor de la investigación Natural laboratories as policy instruments for technological learning and institutional capacity building: The case of Chile 's astronomy cluster.

JEREZ, CARLOS: Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias Universidad Adolfo Ibáñez y director del Data Observatory.

OGALDE, JOSÉ: Ingeniero Electrónico de la Universidad de Chile, ingeniero integrante del Grupo Mantenimiento del Arreglo del Observatorio Alma y ex integrante del Laboratorio de Exploración Espacial y Planetaria.

ORTIZ, JOSÉ LUIS: Ingeniero Electrónico de la Universidad Católica y líder del Grupo de Backend y Central LO del Observatorio Alma. Coinvestigador de un algoritmo que permite el procesamiento automático de datos con los cuales se pueden predecir fallas en el sistema de amplificación de las antenas de Alma.

PAREDES SABANDO, PAMELA: Licenciada en Ciencias Físicas en el Área de Astronomía de la Universidad de Concepción.

REBOLLEDO, DAVID: Doctor en Astronomía e integrante del equipo de operaciones del Observatorio Alma.

REEVES, RODRIGO: Doctor en Ingeniería Eléctrica. Integrante de la Comisión Asesora de Áreas de Interés Científico para la Observación Astronómica y director del Centro para la Instrumentación Astronómica de la Universidad de Concepción.

RODRÍGUEZ, RAFAEL: Doctor en Ingeniería Eléctrica con mención en Ingeniería Eléctrica, académico e integrante del grupo de Astroingeniería de la Universidad Austral.

ROJAS, FELIPE: Astrónomo, Candidato a Doctor en Ciencias de la Computación de la Universidad Católica, integrante del Centro de Astroingeniería de la Universidad Católica y fundador de empresa que genera transferencia tecnológica desde la astroingeniería.

SAN MARTÍN, JAIME: Doctor en Estadística, investigador asociado del Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile, que cuenta con un laboratorio de Astroingeniería.

SOLAR, MAURICIO: Doctor en Computación y Sistemas, académico del Departamento de Informática en la UTFSM y director del Observatorio Virtual Chileno.

UNDA SANZANA, EDUARDO: director del Centro de Astronomía de la Universidad de Antofagasta, lugar donde se desarrollan proyectos de astroingeniería. Representante de la Sociedad Chilena de Astronomía en el Consejo Asesor de Áreas de Interés científico para la Observación Astronómica.

VII. 2. Investigaciones académicas

ARANCIBIA, D.; BAYO, A.; CABRERA-VIVES, G.; FÖSTER, F.; GONZÁLEZ, R.; HAMUY, R.; MAUREIRA, J.C.; QUEEN, P.; RADA, J.; RODRÍGUEZ, G.; SANTANDER-VELA, J.; TARENGUI, M.; RUIZ, M.T.; SAN MARTÍN, M.; WILLIAMS, R. (2020). “The Data Observatory, a vehicle to foster digital economy using natural advantages in astronomy in Chile”.

GURIDI, J. A.; PERTUZE J. A.; PFOTENHAHUER, S.M. (2020). Natural laboratories as policy instruments for technological learning and institutional capacity building: The case of Chile’s astronomy cluster.

VII. 3. Legislaciones

GOBIERNO DE CHILE (7 de diciembre de 1998). Decreto N° 686- 1998 que establece Norma de Emisión para la Regulación de la Contaminación Lumínica.

GOBIERNO DE CHILE (17 de diciembre de 2012). Decreto N° 43-2012 que establece Norma de Emisión para la Regulación de la Contaminación Lumínica, elaborada a partir de la revisión del Decreto N° 686, de 1998, del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo.

GOBIERNO DE CHILE (27 de diciembre de 2018). Decreto Supremo N° 164-2018 que Designa conforme lo dispuesto en el artículo 47 de la Ley 21.050 al ministro de Economía, Fomento y Turismo para que constituya una persona jurídica de derecho privado sin fines de lucro.

GOBIERNO DE CHILE (3 de septiembre de 2020). Decreto N° 14-2020 del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo que aprueba constitución de Fundación Data Observatory (3 de septiembre de 2020).

VII. 4. Libros

AGUILERA, J.M.; LARRAÍN, F. (2018). Laboratorios naturales para Chile: Ciencia e innovación con ventaja. Ediciones UC.

SILVA, B. (2019). Estrellas desde el San Cristóbal. La singular historia de un observatorio pionero en Chile (1903–1995) (julio 2019 ed.). Editorial Catalonia.

VII. 5. Estudios e informes especializados

COMISIÓN NACIONAL DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA (CONICYT). (2012). Astronomy, technology, industry: Roadmap for the fostering of Technology Development and Innovation in the Field of Astronomy in Chile

GONZÁLEZ, R.; ÁLVAREZ, M.I.; BORDON, P.; ESCALA, A.; FÖSTER, F.; PRIETO, J. (2020). Programa de Formación para la Competitividad. Diagnóstico de la situación actual de formación de capital humano en Data Science en el campo de la astroinformática.

MINISTERIO DE ECONOMÍA DE CHILE, DIVISIÓN DE INNOVACIÓN. (2012). Capacidades y oportunidades para la industria y academia en las actividades relacionadas o derivadas de la astronomía y los grandes observatorios astronómicos en Chile. Adere Consultores.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE DE CHILE (2020). Tercer Informe del Estado del Medioambiente. Capítulo 11, Contaminación Lumínica.

OBSERVATORIO ALMA (2015). Manual de Radioastronomía Alma en la Escuela.

UNDA-SANZANA, E. (2020). Cálculo de la capacidad astronómica instalada en Chile. Universidad de Antofagasta.

VII. 6. Artículos periodísticos

CHARPENTIER, D. “Así es el nuevo atlas de contaminación lumínica: Un tercio del mundo no ve la Vía Láctea”. Publicación en *Bio Bio Chile*, 13 de junio de 2016.

CORPORACIÓN DE FOMENTO DE LA PRODUCCIÓN. “Corfo lanza convocatoria para impulsar la inteligencia artificial en las empresas”. Publicación 16 de agosto de 2021. Sitio Web:

https://www.corfo.cl/sites/cpp/sala_de_prensa/nacional/16_08_2021_inteligencia_artificial;jsessionid=vLxW3RhNosEq_XwSrurVkartz8QrusIwfxCa_rEhEulng8XoO_dc!2107087254!1728908599

EFE VERDE. “El exceso de luz artificial aumenta el riesgo de cáncer, alertan científicos”. Publicación 7 de octubre de 2020.

EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY. “La asociación entre Microsoft Chile, MetricArts y ESO recibe el premio "Transformación digital e industria 4.0". Publicación 6 de septiembre de 2019. Sitio Web:

<https://www.eso.org/public/chile/announcements/annlocal19004-es-cl/>

FUNDACIÓN DATA OBSERVATORY. “Llamado a propuestas de valor para constituirse como aportante de la Fundación Data Observatory”. Publicación 30 de noviembre de 2021. Sitio Web: <https://www.dataobservatory.net/2021/11/30/llamado-a-propuestas-de-valor-para-constituirse-como-aportante-de-la-fundacion-data-observatory/>

GOSH, P. “El fascinante mapa de la materia oscura que revela un enigma cósmico (y desafía la teoría de la relatividad de Einstein)”. Publicación en *BBC News*, 27 de mayo de 2021.

INSTITUTO DE ASTROFÍSICA UC. “Finaliza Proyecto Anillo relacionado con instrumentación astronómica”. Publicación 24 de enero de 2019. Sitio Web: <https://astro.uc.cl/en/item-3-menu-izquierdo-2/459-finaliza-proyecto-anillo-relacionado-con-instrumentacion-astronomica>

INSTITUTO MILENIO DE ASTROFÍSICA. “Proyecto ALerCE firma alianza con DATA Observatory para posicionar a Chile como broker internacional en astronomía”. Publicación 30 de septiembre de 2020. Sitio Web: <https://www.astrofisicamas.cl/proyecto-alerce-firma-alianza-con-data-observatory/>

LA TERCERA. “Proyecto astronómico chileno es elegido para procesar datos del nuevo observatorio Vera C. Rubin”. Publicación 9 de agosto de 2021.

LA TERCERA. “El acelerado desarrollo de la astroingeniería y la astroinformática en el país”. Publicación 17 de marzo de 2017.

MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA, CONOCIMIENTO E INNOVACIÓN. “Comisión científica busca proteger zonas de observación astronómica de la contaminación lumínica”. Publicación 9 de octubre de 2020. Sitio Web: <https://www.minciencia.gob.cl/noticias/comision-cientifica-busca-protger-zonas-de-observacion-astronomica-de-la-contaminacion-luminica/>

MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA, CONOCIMIENTO E INNOVACIÓN. “Contraloría da luz verde al decreto de la Fundación Data Observatory”. Publicación 4 de mayo de 2021. Sitio Web: <https://prod.minciencia.gob.cl/noticias/contraloria-da-luz-verde-al-decreto-de-la-fundacion-data-observatory/>

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. “Ministro Naranjo anuncia nueva norma lumínica que protegerá los cielos de todo Chile”. Publicación 4 de marzo de 2022. Sitio web: <https://mma.gob.cl/ministro-naranjo-anuncia-nueva-norma-luminica-que-protegera-los-cielos-de-todo-chile/>

OBSERVATORIO ALMA. “Mesa Redonda de Astroingeniería – Astroingeniería: el impacto de la astronomía en la sociedad chilena, más allá de la ciencia”. Publicación 2 de octubre de 2015. Sitio Web: <https://www.almaobservatory.org/es/anuncios/mesa-redonda-de-astroingenieria/>

OBSERVATORIO ALMA. “UFRO evaluará para ALMA alternativas de sistemas de control de antenas”. Publicación 2 de enero de 2020. Sitio web: <https://www.almaobservatory.org/es/anuncios/ufro-evaluara-para-alma-alternativas-de-sistemas-de-control-de-antenas/>

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE. “Histórico: Astro Ingeniería elabora e instala el primer instrumento chileno en un observatorio internacional”. Publicación 13 de julio de 2016. Sitio Web: <https://www.uc.cl/noticias/historico-astro-ingenieria-elabora-primer-instrumento-chileno-instalado-en-un-observatorio-internacional/>

UNIVERSIDAD ADOLFO IBAÑEZ. “Ganadores Hackaton Virtual FACH 2020 aplicaron data science para enfrentar el cambio climático”. Publicación 4 de enero de 2021. Sitio Web: <https://noticias.uai.cl/ganadores-hackaton-virtual-fach-2020-aplicaron-data-science-para-enfrentar-el-cambio-climatico/>

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN. “UCSC inaugura primer laboratorio de Astro- Ingeniería del sur de Chile”. Publicación 11 de diciembre de 2015. Sitio Web: <https://www.ucsc.cl/noticias/ucsc-inaugura-primer-laboratorio-de-astro-ingenieria-del-sur-de-chile/>

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN. “CePIA Organiza el Primer Workshop ChAIN”. Publicación 25 de septiembre de 2019. Sitio web: <http://cepia.udec.cl/node/51>

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO. “Astrofísica con mención en Ciencia de Datos: a la vanguardia de los cambios de la Astronomía en Chile”. Publicación 9 de septiembre de 2021. Sitio Web: <http://vrae.usach.cl/astrofisica-con-mencion-en-ciencia-de-datos-la-vanguardia-de-los-cambios-de-la-astronomia-en-chile>

UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO. “Astronomía de la UV se adjudica nuevos recursos para Núcleos Milenio”. Publicación 19 de octubre de 2020. Sitio web: <https://www.uv.cl/pdn/?id=11717>

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA. “USM implementará software para el proyecto astronómico más grande del mundo”. 13 de mayo de 2010. Sitio Web: <https://noticias.usm.cl/2010/05/13/usm-implementara-software-para-el-proyecto-astronomico-mas-grande-del-mundo/>

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA. “Nace ChiVo: el primer observatorio astronómico virtual chileno”. Publicación 24 de abril de 2015. Sitio Web: <https://noticias.usm.cl/2015/04/24/nace-chivo-el-primer-observatorio-astronomico-virtual-chileno/>

VII. 7. Sitios web

Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo. Capital humano. Sitio web: <https://www.anid.cl/capital-humano/>

Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT). Fondo Astronomía Quimal para el Desarrollo de Tecnologías de la Astronomía Nacional. Convocatoria 2019. Sitio Web: <https://www.conicyt.cl/astronomia/2019/03/26/fondo-astronomia-quimal-para-el-desarrollo-de-tecnologias-de-la-astronomia-nacional-convocatoria-2019/>

Fundación Cielos de Chile. Consecuencias de la contaminación lumínica: Flora y fauna. Sitio Web: <https://cieloschile.cl/consecuencias-de-la-contaminacion-luminica/>

Fundación Cielos de Chile. Qué es la contaminación lumínica. Sitio Web: <https://cieloschile.cl/que-es-la-contaminacion-luminica/>

Fundación Data Observatory. Historia del DO. Sitio Web: <https://www.dataobservatory.net/por-que-el-do/historia-del-do/>

Ministerio del Medio Ambiente. Contaminación lumínica en Chile y el mundo. Sitio Web: <https://luminica.mma.gob.cl/contaminacion-luminica-en-chile-y-el-mundo/>

Observatorio Alma. Formación de recursos humanos avanzados y tecnología. Sitio web: <https://www.almaobservatory.org/es/formacion-de-recursos-humanos-avanzados-y-tecnologia/>

Observatorio del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. Gasto en I+D respecto al PIB. Sitio Web: <https://observa.minciencia.gob.cl/indicadores/comparacion-internacional/gasto-en-id-respecto-al-pib>

Universidad de Concepción. Unidad de Data Science. Sitio web: <https://uds.udec.cl/>