

Revista Chilena de

INGENIERIA

ISSN 0370 - 4009 / N° 507 / Abril 2026

Anales del Instituto de Ingenieros

Vol. 138, N° 1 / ISSN 0716 - 2340

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Fundado en 1888

Miembro de la American Society of Civil Engineers (ASCE)

JUNTA EJECUTIVA

Presidente

José Orlandini Robert

Primer Vicepresidente

Juan Carlos Barros Monge

Segundo Vicepresidente

Jorge Yutronic Fernández

Secretaria

Alejandra Acuña Villalobos

Prosecretario

Mauro Grossi Pasche

Tesorero

Ricardo Nicolau del Roure G.

Protesorero

Cristian Hermansen Rebolledo

DIRECTORIO 2026

Alejandra Acuña Villalobos

Elías Arze Cyr

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Alex Chechilnitzky Zwicky

Pablo Daud Miranda

Rodrigo Fernández Aguilera

Álvaro Fischer Abeliuk

Javier García Monge

Jorge Gironás León

Mauro Grossi Pasche

Gloria Henríquez Díaz

Cristian Hermansen Rebolledo

Viviana Meruane Naranjo

Germán Millán Valdés

Claudio Muñoz Zúñiga

Ricardo Nanjarí Román

Luis Nario Matus

Christian Nicolai Orellana

Ricardo Nicolau del Roure G.

José Orlandini Robert

Jorge Pedrals Guerrero

Humberto Peña Torrealba

Daniela Pollak Aguiló

Miguel Ropert Dokmanovic

Mauricio Sarrazín Arellano

Alejandro Steiner Tichauer

Perla Valdés Calquín

Scarlett Vásquez Paulus

Jorge Yutronic Fernández

Secretario General

Carlos Gauthier Thomas

SOCIEDADES ACADÉMICAS MIEMBROS DEL INSTITUTO

ASOCIACIÓN CHILENA DE SISMOLOGÍA
E INGENIERÍA ANTISÍSMICA, ACHISINA.

Presidente: Mario Lafontaine T.

ASOCIACIÓN INTERAMERICANA
DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL –
CAPÍTULO CHILENO, AIDIS.

Presidente: Alexander Chechilnitzky Z.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA
HIDRÁULICA, SOCHID.

Presidente: Jorge Gironás L.

SOCIEDAD CHILENA
DE GEOTECNIA, SOCHIGE.

Presidente: Rafael Iglesias A.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA
DE TRANSPORTE, SOCHITRAN.

Presidenta: Paola García T.

SOCIEDAD CHILENA DE EDUCACIÓN
EN INGENIERÍA, SOCHEDI.

Presidente: Rodrigo Herrera V.

COMISIONES DEL INSTITUTO

Resiliencia del Sector Eléctrico Chileno.

Presidente: Cristian Hermansen R.

Antecedentes y Reflexión sobre el Mercado Laboral Chileno en Ingeniería.

Presidente: Mauro Grossi P.

Hacia la Sociedad del Conocimiento.

Presidente: Alejandro Steiner T.

Situación y Desarrollo de la Ingeniería en las Instituciones del Estado.

Presidente: Humberto Peña T.

Desregulación de Permisos para Materializar Proyectos de Inversión e Infraestructura (Ad-hoc).

Presidente: Pablo Daud M.

De Mantenimiento y Conservación de Puentes (Ad-hoc).

Presidente: Ricardo Nicolau del Roure G.

Ingenieros en la Historia Presente.

Presidente: Miguel Ropert D.

CONSEJO CONSULTIVO

Renato Agurto Colima

Raquel Alfaro Fernandois

Iván Álvarez Valdés

Elías Arze Cyr

Dante Bacigalupo Marió

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Bruno Behn Theune

Sergio Bitar Chacra

Francisco Brieva Rodríguez

Mateo Budinich Diez

Juan Enrique Castro Cannobbio

Alex Chechilnitzky Zwicky

Silvana Cominetti Cotti- Cometti

Raúl Demangel Castro

Álvaro Fischer Abeliuk

Eduardo Frei Ruiz-Tagle

Roberto Fuenzalida González

Alejandro Gómez Arenal

Tomás Guendelman Bedrack

Diego Hernández Cabrera

Jaime Illanes Piedrabuena

Sergio Lavanchy Merino

Nicolás Majluf Sapag

Jorge Mardones Acevedo

Carlos Mercado Herreros

Rodrigo Muñoz Pereira

Ricardo Nanjarí Román

Luis Nario Matus

Andrés Navarro Haeussler

Ricardo Nicolau del Roure G.

Guillermo Noguera Larraín

Humberto Peña Torrealba

Luis Pinilla Bañados

José Rodríguez Pérez

Rodolfo Saragoni Huerta

Mauricio Sarrazín Arellano

Alejandro Steiner Tichauer

Raúl Uribe Sawada

Luis Valenzuela Palomo

Ximena Vargas Mesa

Andrés Weintraub Pohorille

Jorge Yutronic Fernández



Credit: NSF-DOE Vera C. Rubin Observatory.

Nuestra portada

El Observatorio Rubin revolucionará nuestro entendimiento del universo variable y nos entregará un censo sin precedentes de 37 mil millones de objetos. Grandes volúmenes de datos presentan un enorme desafío, pero también una gran oportunidad para el desarrollo de la astronomía, computación y entrenamiento de nuevas herramientas de inteligencia artificial. Zonas con gas y polvo (imagen presentada en la conferencia del Sr. Francisco Förster).

REVISTA CHILENA DE INGENIERÍA N° 507, abril de 2026

Dirección: San Martín N° 352, Santiago
Teléfonos: (+56) 22696 8647 – (+56) 93736 0656
e-mail: secretaria@institutedeingenierosdechile.cl
www.iing.cl

DIRECTOR

Javier García M.

CONSEJO EDITORIAL

Álvaro Fischer A.
Roberto Fuenzalida G.
Tomás Guendelman B.
Jaime Illanes P.
Mauricio Sarrazin A.

REPRESENTANTE LEGAL

José Orlandini Robert

SECRETARIO GENERAL

Carlos Gauthier T.

SECRETARÍA

Patricia Núñez G.

DIAGRAMACIÓN

versión productora gráfica SpA

EDITORIAL.

Pág. 2

OBSERVATORIO VERA C. RUBIN. UNA VENTANA AL UNIVERSO DINÁMICO Y UNA NUEVA ERA EN LA ASTRONOMÍA Y LA ASTROFÍSICA.

Pág. 3

Conferencia de Sr. Francisco Förster Burón, Director del Instituto Milenio de Astrofísica (MAS).

PANORAMA DE INVERSIONES. CARTERA DE PROYECTOS 2025-2030.

Pág. 27

Conferencia de Sr. Orlando Castillo, Gerente General de la Corporación de Bienes de Capital – CBC.

PLAN NACIONAL SUMO PRIMERO.

Pág. 45

Conferencia de la Sra. Salomé Martínez Salazar, Directora del Laboratorio de Educación Matemática del Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile.

Se inicia el año 2026, el Instituto cumplirá 138 años y una nueva Junta Ejecutiva, recientemente electa y presidida por el Ing. don José Orlandini Robert, dirigirá la institución. Los agradecimientos a los miembros de Junta Ejecutiva saliente, dirigida por el Ing. don Juan Carlos Barros Monge, quienes desempeñaron fielmente sus cargos por dos periodos anuales. También hacemos propicia la oportunidad para agradecer al Ing. don Tomás Guendelman Bedrack por su valiosa y continua dedicación en la redacción de la editorial de la Revista, labor que desempeño ininterrumpidamente por más de diez años.

En esta edición de la Revista Chilena de Ingeniería se reproducen, inextenso, las presentaciones de las conferencias de los señores Francisco Förster Buron, Director del Instituto Milenio de Astrofísica (MAS); de Orlando Castillo, Gerente General de la Corporación de Bienes de Capital (CBC); y de la señora Salomé Martínez Salazar, Directora del Laboratorio de Educación Matemática del Centro de Modelamiento Matemático (CMM) de la Universidad de Chile.

La primera de estas conferencias, “**Observatorio Vera C. Rubín. Una ventana al universo dinámico y una nueva era en la Astronomía y la Astrofísica**”. Relata la historia del desarrollo y materialización de este extraordinario y peculiar observatorio astronómico, recientemente puesto en operación en el norte de Chile. Explica luego, con gran detalle, los objetivos científicos que persigue y cómo los inconmensurables datos que recolecta cada noche son procesados y distribuidos a los distintos centros de investigación, en Chile y el mundo, para su estudio y análisis por los científicos y especialistas.

La segunda conferencia, “**Panorama de Inversiones. Cartera de Proyectos 2025-2030**”, presenta, explica y comenta, la evolución de la cartera de proyectos de inversión en el país, información que está en la gran base de datos de proyectos de inversión que monitorea y actualiza permanentemente la Corporación de Bienes de Capital. Su análisis permite visualizar los cronogramas de ejecución, sus plazos y los montos de las inversiones previstas en cada proyecto y los montos agregados, previstos para los próximos años. Así, constituye una inapreciable fuente de información para las proyecciones económicas del país, así como para los distintos actores que participan en su materialización (Ingeniería, Construcción, Financiamiento, Proveedores, etc.)

En la tercera conferencia, “**Plan Nacional Sumo Primero**”, la expositora muestra con claridad meridiana por qué avanzar en la enseñanza y comprensión de la matemática, desde edades tempranas, es urgente y vital para el futuro de Chile, para que nuestros jóvenes alcancen las competencias mínimas necesarias, para no quedar marginados, y así poder participar en la sociedad moderna. De no alcanzarlas, las evidentes carencias detectadas impactan negativamente en el potencial de crecimiento y desarrollo del país. En la conferencia se detallan los planes y las acciones que se han implementado a nivel nacional para estos fines, con el plan Sumo Primero, los textos asociados, las estrategias de formación y desarrollo docente y los sistemas de evaluación.

OBSERVATORIO VERA C. RUBIN. UNA VENTANA AL UNIVERSO DINÁMICO Y UNA NUEVA ERA EN LA ASTRONOMÍA Y LA ASTROFÍSICA

*Sr. Francisco Förster Burón,
Director del Instituto Milenio de Astrofísica (MAS)*

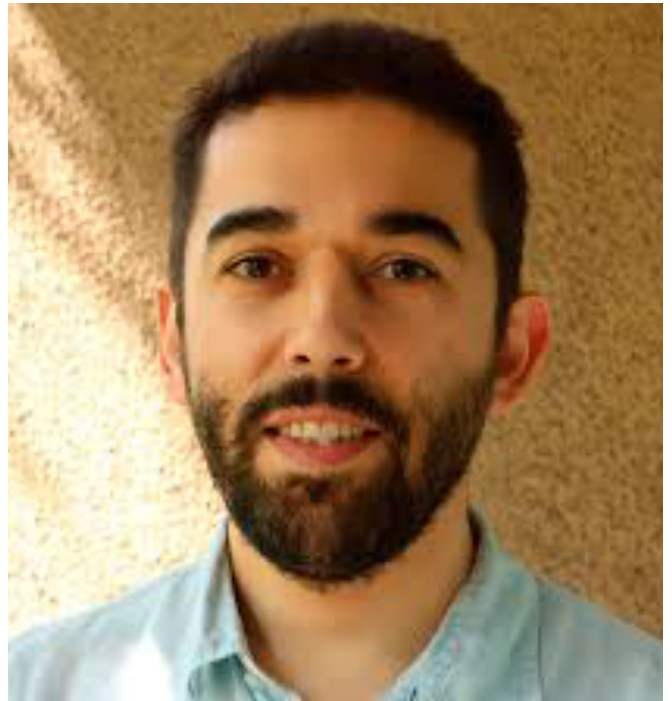
El pasado 25 de septiembre de 2025 se realizó la conferencia del Sr. Francisco Förster, director del Instituto Milenio de Astrofísica, quien expuso sobre el tema “Observatorio Vera C. Rubin. Una ventana al universo dinámico y una nueva era en la Astronomía y la Astrofísica. Impacto científico, características técnicas y el rol de Chile en su construcción, operación y explotación científica”.

Francisco Förster Burón es profesor titular de la Universidad de Chile y académico de la Iniciativa de Datos e Inteligencia Artificial (IDIA) de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la misma universidad, director del Instituto Milenio de Astrofísica (MAS), Investigador Asociado del Centro de Modelamiento Matemático (CMM) e Investigador Asociado del Centro de Astrofísica y Tecnologías Afines (CATA).

Realizó sus estudios de pregrado en Astronomía e Ingeniería Civil en la Universidad de Chile (2004) y un doctorado en la Universidad de Oxford (2009) estudiando los progenitores de supernovas de tipo Ia.

El Sr. Förster lideró la instalación de un telescopio robótico en Cerro Tololo (CTIO) en 2011, el proyecto High Cadence Transient Survey (HiTS) entre 2012 y 2018 que fue pionero en la detección de supernovas en tiempo real usando la cámara Dark Energy Camera (DECam), y el proyecto ALeRCE entre 2019 y 2024, un broker astronómico seleccionado como broker comunitario para el Observatorio Vera C. Rubin y que está en la interfaz entre ciencia de datos, inteligencia artificial y astronomía para filtrar decenas de millones de alertas por noche generadas por el Observatorio Rubin.

A continuación, su exposición.



Sr. Francisco Förster.

Sr. Miguel Ropert, Director IICH.

—Buenos días a todos y todas, muchas gracias por asistir a esta conferencia del Instituto de Ingenieros de Chile. Les doy el saludo de parte de nuestro presidente don Juan Carlos Barros, que está conectado, pero tuvo una pequeña dificultad en el audio, así que me pidió iniciar esta conferencia.

Hoy tenemos el agrado de ofrecerles la conferencia “Observatorio Vera C. Rubín. Una Ventana al Universo Dinámico y una Nueva Era en la Astronomía y la Astrofísica”. La conferencia tiene impacto científico, veremos sus características técnicas y el rol de Chile en su construcción, operación y explotación científica.

Tenemos el agrado de tener con nosotros al ingeniero Francisco Förster Burón. Francisco es Astrónomo de la Universidad de Chile e hizo un doctorado en astronomía en la Universidad de Oxford. Además, en su trayectoria ha tenido trabajo en Estados Unidos, Suecia y Reino Unido, y en Chile de todas maneras. Es profesor asociado en el Departamento de Astronomía de la Universidad de Chile y además director del Instituto Milenio de Astrofísica, MAS.

Es también investigador asociado del Centro de Astrofísica y Tecnologías Afines, CATA. Autor de innumerables publicaciones, fruto de su labor como investigador de estos ámbitos.

En este tema nos dio el año pasado Francisco una conferencia justamente en el Instituto sobre este importante desarrollo a nivel nacional. Al profesor Förster lo hemos invitado a darnos una conferencia sobre el Observatorio Vera C. Rubín, que tuvo su inicio de actividades hace muy poco tiempo atrás.

Ha estado muy ligado a esta iniciativa para la astronomía a nivel global y que proporcionará un nivel de volumen de datos sin precedentes, explorando temas de interés científico a nivel global. Este proyecto consolida a nuestro país como centro relevante de la astronomía mundial.

Estimados presentes en esta conferencia, las preguntas que tengan las contactaremos al final de la conferencia y las pueden hacer en el ícono que está en la pantalla, Preguntas y Respuestas.

Agradecemos nuevamente la presencia del profesor Francisco Förster y lo invitamos a dar la conferencia. Muchas gracias, Francisco, adelante.

Sr. Francisco Förster.

—Gracias a todos los presentes por estar acá, me invitaron a hacer una charla sobre el Observatorio Vera Rubín. Yo no soy parte del proyecto Rubín, sí soy usuario, voy a ser usuario de los datos y tenemos acuerdos para usar los datos, y muchas de las cosas que voy a contar lo son desde una persona externa del proyecto y posiblemente haya cosas que no están del todo correctas, así que les pido disculpas si es así. Voy a contarles la visión que tenemos básicamente como usuarios de este Observatorio.

Soy profesor en la Universidad de Chile, de la Iniciativa de Datos e Inteligencia Artificial, soy parte del Centro de Modelamiento Matemático y actualmente director del Instituto Milenio de Astrofísica al que, básicamente, le queda un mes de vida en este momento (Figura 1).



Figura 1

Voy a partir hablando un de datos astronómicos, voy a poner esto en contexto; ¿por qué es tan importante el Observatorio Vera Rubín? (Figura 2).

¿Qué tipo de datos astronómicos existen? Los más típicos son imágenes, básicamente lo que más conocemos. Uno puede tomar imágenes pequeñas, de gran campo, en distintos colores o bandas, y uno puede extraer flujos, posiciones, formas de muchísimos objetos, y con eso armar catálogos. De esto vamos a hablar un poco hoy.



Figura 2

Hay telescopios que también pueden tomar espectros, en que básicamente pasa la luz por un prisma, o algo parecido a un prisma, y puedes descomponer la luz en longitudes de onda y puedes entender de qué está compuesto el objeto, su temperatura, densidad, etcétera.

Y también están las antenas, las correlaciones de antenas, o por ejemplo el Observatorio ALMA, donde, básicamente se mira la Transformación de Fourier de una imagen, y a través de un método de inversión, puede construir imágenes y espectros.

Hoy día voy a hablar un poco de un telescopio que toma imágenes, que es el Vera Rubin (Figura 3).

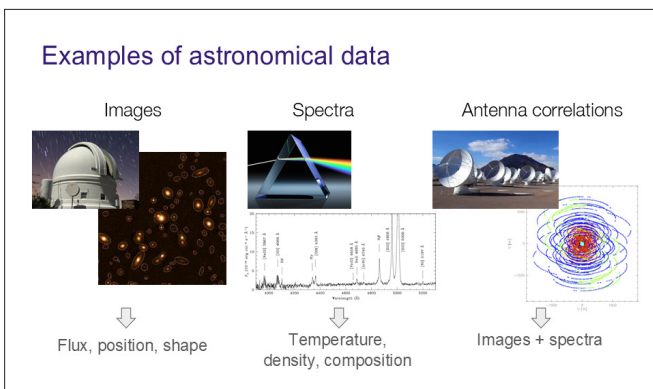


Figura 3

Para poner también en contexto, estos son los grandes telescopios y observatorios en el mundo, que están construidos o en construcción, y acá uno ve que hay telescopios de muchos tamaños. Los que están en color más oscuro ya

están contruidos, los que están en color más claro están en construcción, o están en planificación.

Pero todo lo que está en verde está o va a estar en Chile. Claramente, primero se observa que Chile está en una posición muy privilegiada: hay acceso a los más grandes telescopios del mundo y los más avanzados.

Y en este gráfico se ve el Observatorio de Rubin, que aparece como verde claro, pero en realidad ya está funcionando, que no es particularmente grande como pueden ver, es un telescopio que tiene un diámetro de 8 metros, pero tiene otras características que lo hacen muy interesante (Figura 4).

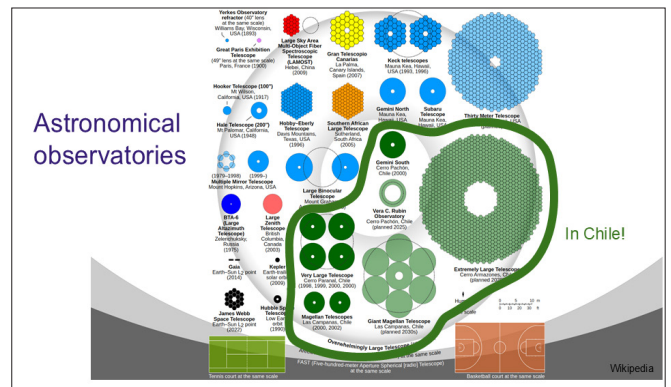


Figura 4

Acá hay un telescopio precursor a Rubin, se podría decir, que es el telescopio blanco en Cerro Tololo, un telescopio de 4 metros, que hace como 20 años se le puso una cámara que lo modernizó y lo convirtió en un precursor para los telescopios de survey, de levantamiento, que son capaces de observar grandes volúmenes de datos en una sola toma (Figura 5).

Obviamente también está ALMA, compuesto por antenas que miran correlaciones en ondas de radio, submilimétricas y milimétricas; están en Chile a gran altitud porque básicamente tratan de reducir la cantidad de vapor de agua en la misma edición (Figura 6).

Está el telescopio en construcción como el GMT, que está en las campanas, son estos 7 espejos como de 8 metros cada uno (Figura 7).



Figura 5

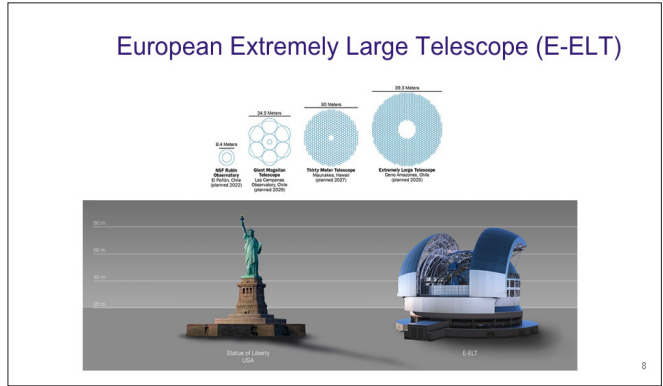


Figura 8



Figura 6

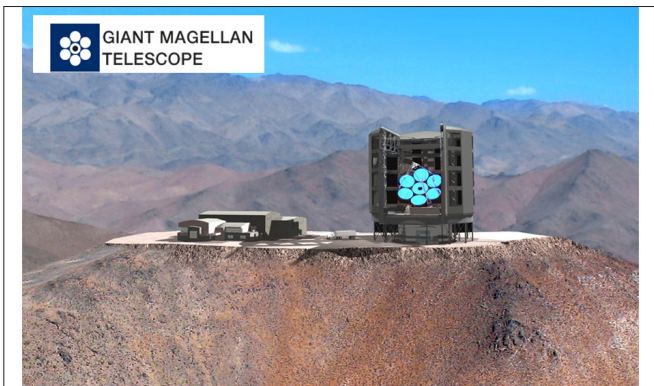


Figura 7

Y está el EELT, el European Extremely Large Telescope, que es extremadamente grande, acá se ve una comparación con la Estatua de la Libertad, tiene un espejo de 39 metros y realmente es una obra de ingeniería increíble. Ya está muy avanzada la construcción, el domo ya está funcionando y en unos años más va a estar operando (Figura 8).

Esta es la historia de los telescopios, del crecimiento de los espejos, pero en paralelo hay otra historia que se está desarrollando, la ley de Moore: la miniaturización de los transistores, que todos conocen básicamente, esto es, cada 18 meses más o menos se duplica el número de transistores y esto ha tenido un impacto, ha cambiado básicamente la digitalización de la sociedad y también ha tenido impacto en la astronomía (Figura 9).

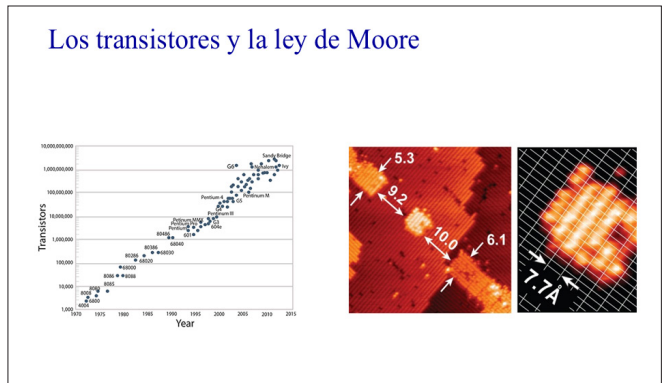


Figura 9

Y acá se puede ver directamente en este gráfico varias cosas. Por un lado, se ve el crecimiento exponencial del área colectora de los telescopios en celeste, que acá parece que fuera lento, pero esto es una escala logarítmica, así que realmente es muy rápido. Pero se ve también cuántas galaxias han sido observadas cada año y cómo eso ha evolucionado en el tiempo.

Y se ve también que el crecimiento exponencial ya es muy rápido. Y en amarillo se ve la ley de Moore, el número de

transistores por segundo. Entonces se ve es que el número de galaxias observadas por año se parece mucho a la ley de Moore.

Y eso no es casualidad, básicamente las cámaras digitales se están construyendo cada vez más grandes y permiten con un mismo telescopio observar más galaxias y de eso se trata el Observatorio Rubín (Figura 10).

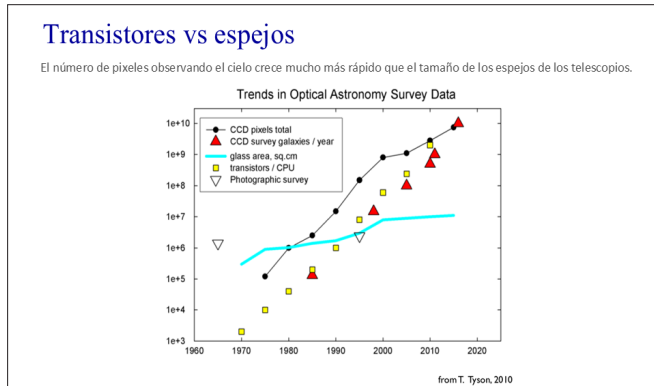


Figura 10

Acá muestro una colección de telescopios. Se aprecia el campo de visión de nuevo en escala logarítmica, el área colectora en escala logarítmica; y el producto entre el campo de visión y el área colectora es el tamaño de estos círculos. Eso se llama Etendue, que da una idea del volumen que se puede observar, que es muy profundo y ancho.

Entonces el LSST, que es el Legacy Survey of Space and Time, que es básicamente el survey que va a llevar a cabo el Vera Rubin Observatory, realmente domina completamente este gráfico. Y acá está la comparación con otros telescopios. Se aprecia el LSST o Rubín, y el ZTF que está en el norte, pero es un telescopio mucho más chico, y ese es el tamaño de la luna. Entonces como para darse una idea de cuánto puede abarcar en una sola toma estos telescopios, es realmente un área enorme del cielo (Figura 11).

Acá se puede ver con más detalle. Entonces el LSST va a tener una cámara de 9,6 grados cuadrados y 3.000 millones de píxeles. Realmente le gana por lejos a todos los otros telescopios en número de píxeles, y también en Etendue, que es esta combinación de campo de visión con área colectora (Figura 12).

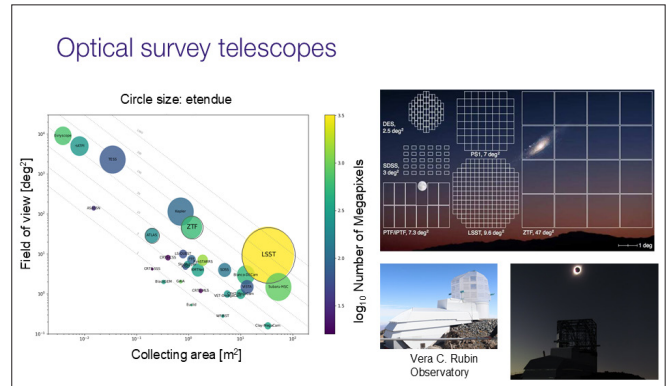


Figura 11

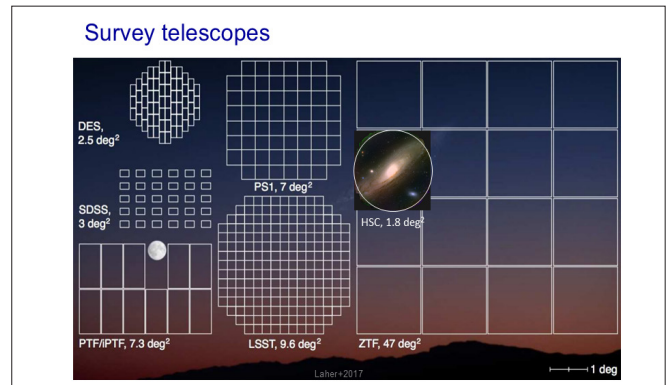


Figura 12

Entonces el Vera Rubin Observatory tiene un telescopio de 8,4 metros y tiene una cámara de 3.200 millones de píxeles. Básicamente, va a observar todo el cielo cada tres noches, pero no lo va a observar como una cámara cualquiera, sino con calidad científica, para hacer ciencia. Va a tomar exposiciones cada 15 segundos, sin parar todas las noches.

Básicamente, va a observar cada objeto en el cielo unas 800 veces, y va a tener un catálogo de casi 40.000 millones de objetos. Esta es la primera vez en astronomía que vamos a construir catálogos que tienen más filas que personas en el planeta. Y cada noche va a conectar del orden de 15 a 20 terabytes de datos.

Y acá se ve la cámara del telescopio, que se parece un poco a las cámaras que uno usa, porque tienen básicamente un gran campo (Figura 13).

Acá les voy a mostrar un video del telescopio:

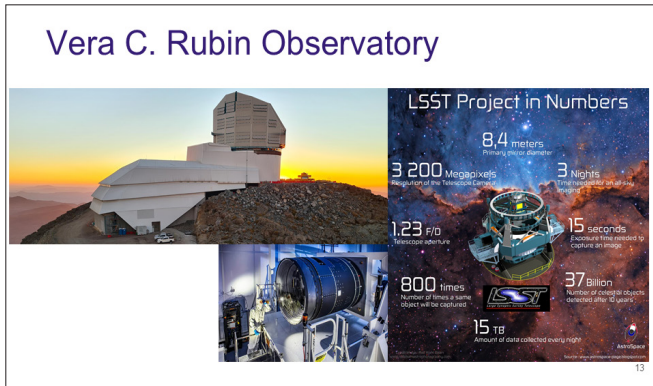


Figura 13



Figura 14

Video: El cielo nocturno, nuestra ventana al universo más allá, inmenso, misterioso, poderoso, silenciosamente hermoso. Eventos cósmicos al borde de nuestra imaginación se desenvuelven en la oscuridad, listos para ser descubiertos.

Cuando miramos al cielo nocturno, vemos hacia el pasado. Historias sin contar, llevadas a través del espacio por la luz, la gran historiadora del cosmos. La tecnología ha evolucionado a lo largo de los siglos, permitiéndonos llegar más lejos, al borde de nuestro horizonte.

Inventamos telescopios para explorar y cámaras para capturar estos mensajes itinerantes. Sin embargo, el cosmos cambiante permanece oculto. Un nuevo telescopio abre su ojo y lo captura todo.

Los objetos que se mueven y aquellos que destellan, incluso aquellos que no podemos ver con nuestros ojos, cubren el cielo cada noche, encontrando todo lo que ha cambiado. Y dentro de minutos, cada pieza de información es llevada alrededor de la Tierra, a cualquiera que esté esperando para explorarla. ¿Qué descubrirás tú que nadie ha visto antes? Es hora de averiguarlo (Figura 14).

Bueno, ese es el video promocional que básicamente muestra cómo la evolución de los telescopios se está convirtiendo cada vez más en máquinas, no solamente como sistemas ópticos, sino también como sistemas computacionales de grandes volúmenes de datos que requieren de una capacidad de procesamiento, de una capacidad de análisis, que no escala con las capacidades humanas. Vamos a tener que usar nuevas herramientas de inteligencia artificial, muy probablemente, de procesamiento masivo de datos, etcétera.

Veamos unos números:

El área total del cielo es del orden de 40.000 grados cuadrados y el campo de visión de Rubin es como del orden de 10. Entonces la mitad del cielo es del orden de 20.000 grados, que más o menos corresponde como a 2.000 campos de visión de LSST. Básicamente esto quiere decir que, con 2.000 tomas, LSST es capaz de observar todo el cielo del sur.

Las exposiciones son 2 de 15 y 30 segundos. Luego, se debe leer eso o moverse a otro lado. Son del orden de 40 segundos por cada exposición. Eso da del orden de 800 exposiciones por noche. Entonces, básicamente, con cerca de 3 noches puedes cubrir todo el cielo.

Por otro lado, el levantamiento va a durar 10 años, en 6 bandas o colores. U, G, R, I, Z, Y; son los nombres que se usan en astronomía. Vamos a tener del orden de 2,5 millones de tomas, cada una con 3.200 millones de píxeles.

De esta forma, si uno divide estos 2,5 millones por los 2.000 campos, más o menos da como 1.000 visitas por lugar del cielo, y un número de visitas típico cada 3 días. Si les interesa más la astronomía, la profundidad a la que uno va en magnitud astronómica, esto es un sistema de unidades bien raro, son 24,5 magnitudes, y si uno toma en cuenta que son 250, va a llegar a una magnitud, una profundidad de 27 o 28, a lo largo de 10 años. Esos son los números de Rubín (Figura 15).

También es interesante notar que hace un tiempo hicimos un estudio con la Sociedad Chilena de Astronomía, que hablaba del Etendue, el producto del campo de visión por el área colectora del telescopio. Si uno toma en cuenta

cuánto Etendue hay distribuido entre los telescopios del mundo, se da cuenta que cuando empiece Rubín, ahora en 2025, básicamente Chile tendrá casi un 60% del Etendue mundial, así que realmente tiene un impacto enorme en la astronomía (Figura 16).

10 años, se llama el Legacy Survey of Space and Time, el LSST (Figura 17).

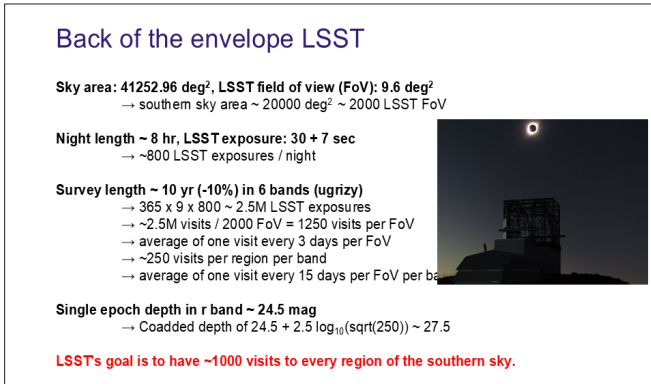


Figura 15

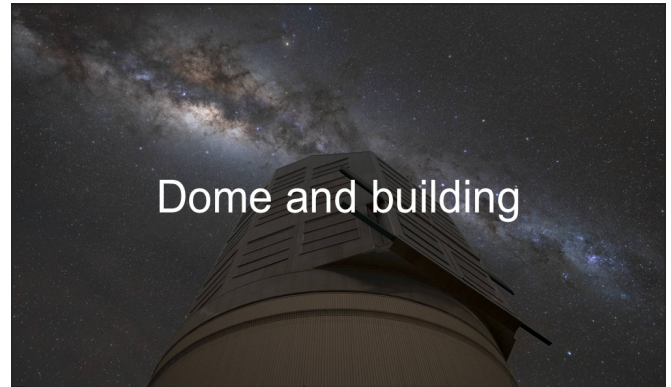


Figura 17

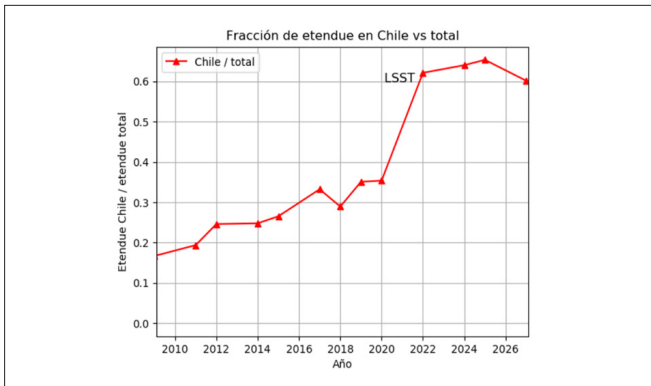


Figura 16

La idea partió hace casi 30 años, y estos son los primeros diseños conceptuales de cómo iba a ser el telescopio. Primero se dieron cuenta de que, por el tamaño de la cúpula, y el viento predominante debían rotar un poco el edificio que originalmente eran como unas casitas que estaban pegadas al telescopio (Figura 18).

Voy a referirme un poco al telescopio mismo, las características que lo hacen especial, y voy a partir hablando del domo y el edificio que aloja el telescopio.

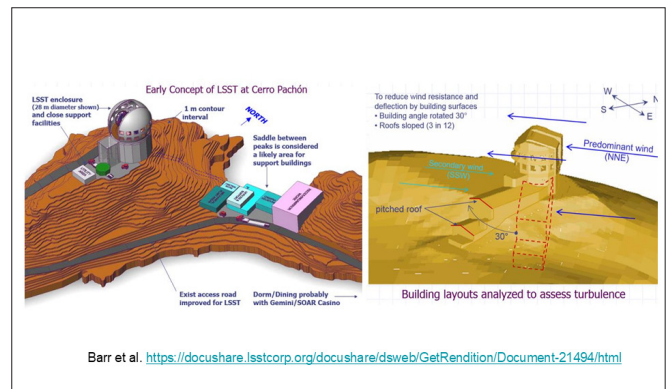


Figura 18

Entonces, antes debería decir que el Observatorio, como sistema con todo lo que incluye, se llama Vera Rubín, en honor a la astrónoma Vera Rubín. El telescopio mismo se llama Simonyi Survey Telescope, en honor a una de las personas que donó dinero para que ocurriera, del orden de 20 millones de dólares, junto con Bill Gates, que donó 10 millones de dólares. Este proyecto es del orden de mil millones de dólares, pero mencioné lo que da el punto inicial. Y el programa de observaciones, que va a ser de

Básicamente este es el telescopio. Tiene un primer nivel que es enorme y está fijo y todo lo que está encima puede rotar para, básicamente, mirar distintas direcciones, mientras se protege el telescopio del viento y otras cosas. Se puede ver que hay placas para proteger del viento y de la luz; hay una puerta de acceso trasera, tiene ventilación para que la temperatura interior y exterior sean lo más parecida posible y haya poca turbulencia, tiene una grúa interna y

tiene muchos sistemas de protección para que no llegue luz exterior, se llaman Light Baffles. Entonces si uno visita el telescopio se da cuenta que está lleno de estas cosas negras por todos lados, que lo protegen de la contaminación de rayos de luz que vengan de otras direcciones (Figura 19).

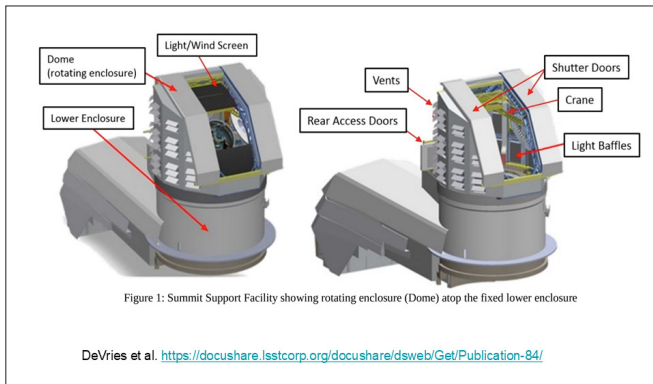


Figura 19

Y esta es la primera contribución chilena, y esto lo saqué de la página de Arcadis, donde dice:

“Un equipo compuesto por ingenieros de la oficina de Arcadis en Chile, con colaboración del arquitecto Guillermo Hevia, fue responsable del diseño y supervisión de la construcción del Observatorio Vera C. Rubín.

Uno de los principales desafíos del diseño fue darle una forma aerodinámica a la cubierta del edificio para conseguir un flujo laminar de viento y así evitar turbulencias que puedan distorsionar las imágenes. Esto explica la forma tan novedosa que tiene este edificio que lo distingue de otros Observatorios.”

Entonces, lo mostrado no se parece es nada al diseño original y esta fue la contribución de esta empresa que el equipo en Chile desarrolló. Y acá dice:

“Haber contribuido como Arcadis al diseño e ingeniería de este centro astronómico es una muestra del valor que puede aportar la ingeniería chilena en proyectos de impacto mundial. Sus hallazgos marcarán un antes y después en la forma que la humanidad observará el cosmos. Concluyó Juan Carlos Pozo”.

Entonces acá hay el primer estudio, la contribución a la construcción del telescopio (Figura 20).



Figura 20

Ahora voy a hablar de la montura del Telescope Mount Assembly o TMA. Esta montura es muy especial, porque a diferencia de otros telescopios, es muy cortita y tiene que ver con la distancia focal de este telescopio, que debe ser muy corta para tener un gran campo de visión, que lo hace un telescopio muy compacto. Y aparte de eso, tiene que moverse muy rápido.

Este telescopio se puede mover con velocidades de hasta 10 grados por segundo, que es extremadamente rápido para un telescopio de este tamaño. Esta estructura pesa unas 450 toneladas y aloja un espejo que pesa 16 toneladas, una cámara que pesa 3 toneladas, y tiene que moverse con precisión de segundos de arco en el cielo. Y también pueden ver que este telescopio, a diferencia del telescopio Blanco por ejemplo, si alguno de ustedes ha tenido la suerte de ir a Cerro Tololo, no tiene una montura ecuatorial, es decir, el eje no está alineado con el eje de rotación de la Tierra.

Cuando tienes una montura ecuatorial, el eje del telescopio está alineado con el eje de rotación de la Tierra, lo que hace mucho más fácil seguir objetos en el cielo. Pero tener una montura que sea más alta azimutal como esta, da más rapidez, más flexibilidad y se puede construir un sistema más compacto, con un domo más pequeño. Esto fue construido en España, en Asturfeito.

Acá se ve el equipo muy orgulloso entregando el telescopio (Figura 21).

Acá voy a mostrar un vídeo de cómo se mueve esta montura. Y esto es en tiempo real.



Figura 21

Explica Video: Se puede ver que es extremadamente rápida. Y esto, recuerden, es unas 450 toneladas moviéndose con una precisión increíble.

Y acá se puede ver cómo se movió el telescopio, pero no tenía el espejo ni la cámara montadas todavía.

Acá pueden ver un eje de elevación, el que está acá, y el que está sobre el piso, hacia el cénit, es el eje de azimut (Figura 22).

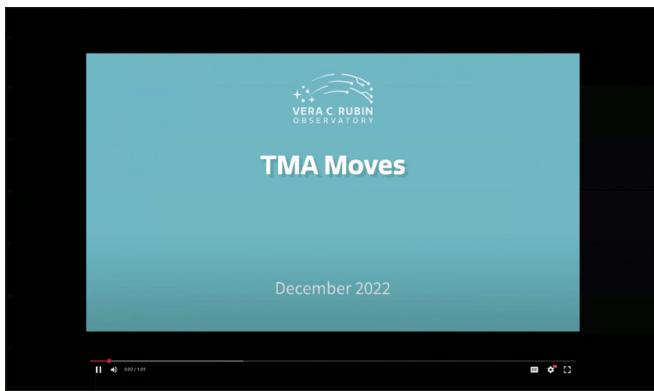


Figura 22

Una montura altazimutal¹ tiene esta ventaja, que puedes moverte de forma compacta, eficiente, pero tiene un problema. Acá lo puse en una simulación. Si miro un lugar del cielo y empiezo a exponer, en la medida que la Tierra rota,

¹ Soporte que permite mover un telescopio en dos ejes perpendiculares (nota del editor).

lo que está observando va a empezar a rotar en apariencia. Este campo de estrellas es súper exagerado, pero se ve que está rotando debido a la rotación de la Tierra.

Entonces, cuando yo construyo mi cámara, también tengo que corregir esto y tengo que incluir un rotador en la cámara. Es el precio que uno paga por tener una montura altazimutal (Figura 23).

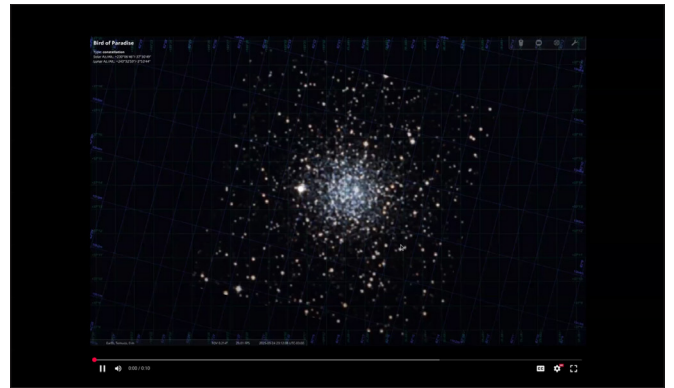


Figura 23

Ahora voy a hablar del sistema óptico y de la cámara (Figura 24).

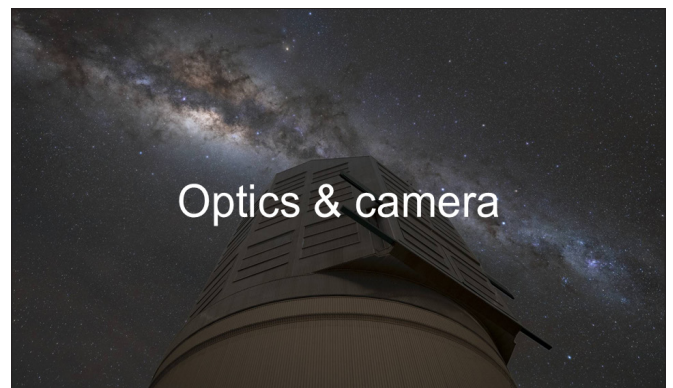


Figura 24

El sistema óptico funciona, básicamente, con tres espejos principales, 1, 2 y 3. Los espejos 1 y 3, son básicamente la misma pieza. Tienen un anillo por fuera con M2 y M3 en la parte interior, y luego pasa por tres lentes, o sea, son tres espejos y tres lentes que, básicamente, logran corregir el frente de ondas de luz y logran aplanarlo y que llegue a

una cámara que es perfectamente plana, a 15 micrones de precisión en todo un gran campo de visión, de 3,5 grados en cada dirección (Figura 25).

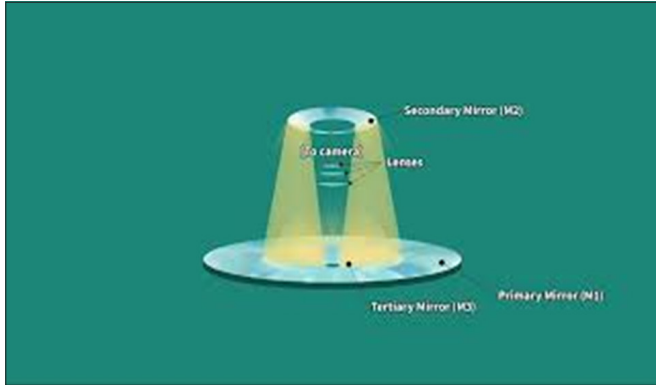


Figura 25

Entonces, acá está el M1 que tiene 8,4 metros de diámetro; un anillo M2, de 3,4 metros, que este está colocado en la montura arriba. Entonces, se tiene que poder alinear con el telescopio, se necesita un sistema de alineación.

M3 está fijo a M1, entonces, no hay problema, no hay que alinearlo. Pero luego tienen los lentes y la cámara, que también tienen que alinearse para que esto funcione perfectamente.

Básicamente, estos son 0,6 segundos de arco. Eso es como el tamaño aparente de las estrellas en una muy buena noche en el norte de Chile. Y las aberraciones a 1,75 grados del centro son mucho menores a este tamaño de 0,6.

Básicamente, está dominado por la turbulencia atmosférica. Y esto se hace trazando haces de luces que pasan por este sistema óptico (Figura 26).

Acá está una foto del telescopio principal, que fue construido en Arizona, en Tucson.

Y acá está una persona muy especial para el telescopio, que es John Anthony Tyson, que fue la persona que tuvo la idea inicial hace como 30 años. Traté de buscar la foto de la servilleta donde tuvo la primera idea, pero no la logré encontrar. Pero él realmente es el autor intelectual de este telescopio (Figura 27).

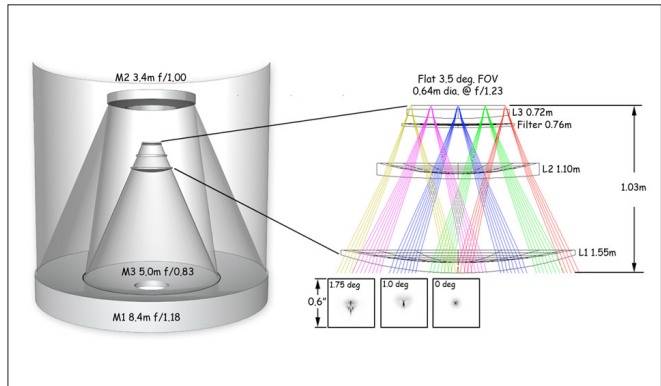


Figura 26

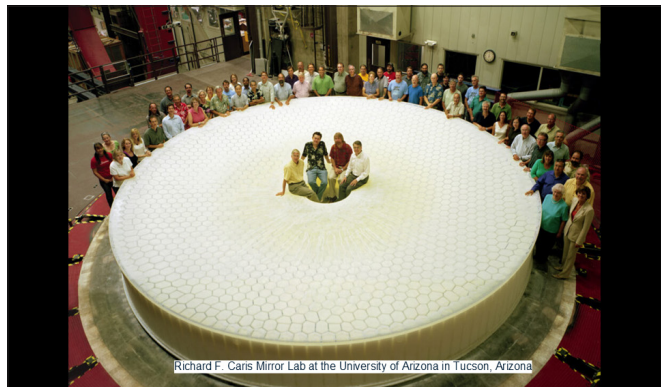


Figura 27

Acá se ve el espejo principal siendo transportado al norte de Chile. Y acá está pasando por un túnel que está por el lado del embalse Puclaro, que no sé si saben, pero es un túnel que está hecho para los Observatorios. Es un túnel que está ensanchado a más de 8 metros para que puedan pasar estos telescopios.

Y básicamente define el ancho de los espejos que se pueden usar en estos telescopios si es que uno quiere transportarlos de esta forma (Figura 28).

Acá también se ve la cámara para el aluminizado del telescopio, que en realidad ya no se aluminizó en este caso, sino que se usó una mezcla con plata para que sea más sensible al infrarrojo cercano. Y acá se puede ver el túnel Puclaro (Figura 29).

Esta es una foto del espejo principal ya aluminizado o emplatado, no sé cómo se dice, con la cámara de aluminización. Y

acá está el equipo de personas que fue responsable de hacer este proceso y están muy felices en este momento porque se ve precioso el espejo, recién aluminizado (Figura 30).



Figura 28



Figura 29



Figura 30

Entonces pasemos a la cámara.

La cámara, como les decía, es un sistema que tiene tres lentes, uno, dos y tres. Además, tiene un obturador, que básicamente, lo abre y cierra y se demora un segundo en abrir y cerrar. Tiene un sistema para cambiar filtros, porque este telescopio tiene seis filtros, que se ubican justo adelante de la cámara, ahí se ve la cámara, de 3.200 millones de píxeles.

Y esto está todo en un sistema super enfriado, en criostato y, además, montado sobre un rotador para corregir la rotación de la Tierra. Y tiene un dispositivo que se llama el hexapod, que básicamente alinea todo este sistema para que las imágenes estén enfocadas (Figura 31).

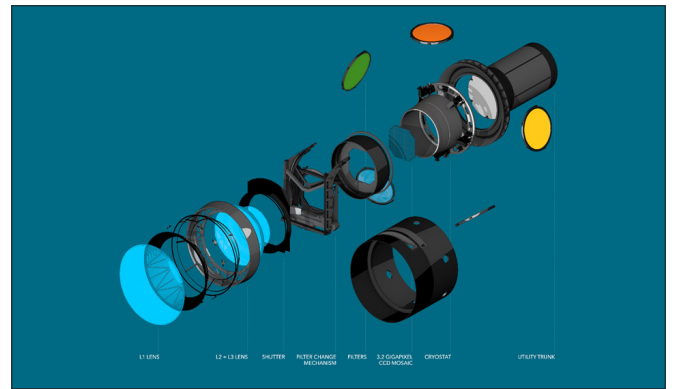


Figura 31

Este es un diagrama de la cámara digital, que la pueden ver acá.

Fue construida en SLAC, en National Accelerator Laboratory en Estados Unidos. Y esta cámara es muy especial por el gran número de píxeles, y básicamente tiene sensores de dos empresas diferentes, ITL y e2v. En naranja y en azul.

Y acá en la esquina se pueden ver que hay otros sensores, que les voy a explicar para qué sirven. Acá están los que se llaman Wavefront Sensors, que son cámaras, o detectores, que están ligeramente por encima del plano de la cámara, y ligeramente por debajo del plano de la cámara para que, intencionalmente, estén fuera de foco. Y también están los Guider Star Sensors, que son cámaras muy rápidas, que van a ser capaces de detectar estrellas que básicamente

tienen que fijar en el centro en cada toma, para mantener el tracking del telescopio bien alineado con el cielo y que no se muevan las imágenes (Figura 32).

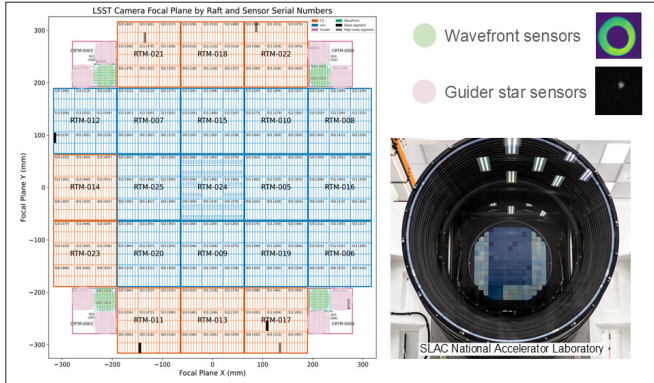


Figura 32

Acá se puede ver un poquito mejor el plano focal del LST, o de Rubin. Acá van a estar estos raft de 9 science CCDs, que forman los 3.200 millones de pixeles. Y acá están en las esquinas los Wavefront Sensors, que son estos dos, y acá pueden ver que están por encima del plano focal y por debajo del plano focal, para que estén fuera de foco; y los Guide Sensors, que son cámaras de muy rápida lectura, para ser sensibles a estas estrellas y mantenerlas fijas en el centro (Figura 33).

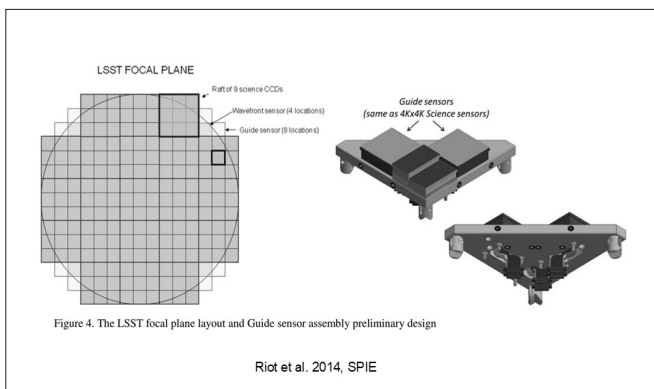


Figura 33

Entonces, ¿para qué son estos Wavefront Sensors? La idea es que, si la cámara está en el foco, y tú pones un detector ligeramente por encima del plano focal, y otro detector ligeramente por debajo y a la misma distancia del plano

focal, deberías ver las estrellas como donuts. Y los donuts, por arriba y por abajo, tienen que ser del mismo tamaño cuando está exactamente enfocado. Además, permite corregir cuando el telescopio no está perfectamente alineado, porque una cosa es que esté por encima y por abajo, pero además tiene que estar en el mismo eje óptico.

Entonces, ¿cómo se implementó esto? Estas imágenes se pasan por una red neuronal, que ya está operando, y funciona increíblemente bien, y predice, básicamente, cuál es la corrección que se tiene que aplicar en estos coeficientes de Zernike, que son polinomios en un círculo, y funciona mucho mejor que los sistemas anteriores. Entonces, con Deep Learning, está en producción hoy día, operando la alineación y enfoque del telescopio (Figura 34).

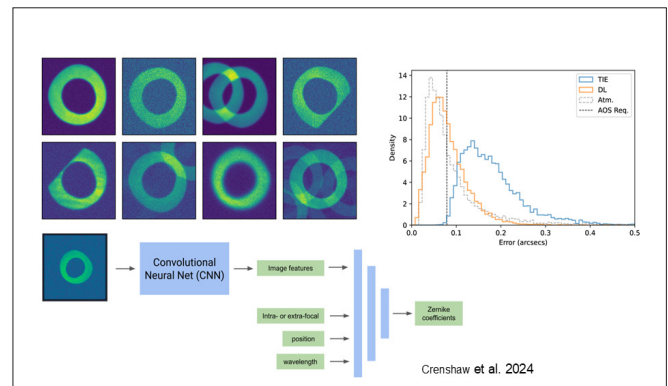


Figura 34

Video: Este es el sistema de cambio de filtros. Como pueden ver, los filtros están montados alrededor del detector principal, y acá van a ver cómo se ponen delante de la cámara, y esto se hace también en muy poco tiempo, muy rápido. Acá está, ahora se ve en cámara lenta. La idea es que se pone acá por debajo, y va a poder cambiar entonces entre un filtro, en este caso el filtro R o el filtro G, etc., para ver distintos rangos espectrales de los objetos de onda.

Y todo esto debería ser ensamblado con los lentes, con el shutter (el obturador), con el detector, etc. El sistema pesa unas 3 toneladas (Figura 35).

Acá pueden ver la sensibilidad en función de la longitud de onda, entonces, respecto de la eficiencia cuántica de los fotones que tienen esta longitud de onda, ¿qué porcentaje de ellos son efectivamente detectados?, y se ve que los dos

tipos de detectores que se usaron son ligeramente diferentes, dependiendo de la empresa en donde se construyó.

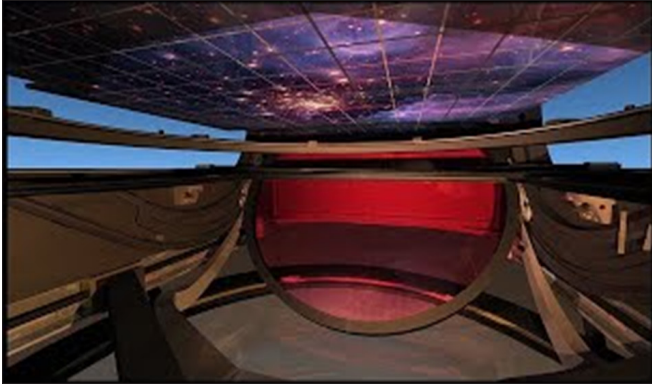


Figura 35

Y además, acá se ve la respuesta después de poner cada uno de los 6 filtros U, G, R, I, Z e Y. Este es más o menos el rango que uno puede observar con el ojo humano, y entonces esto va un poquito más allá de lo que ve el ojo humano, se acerca al infrarrojo cercano (Figura 36).

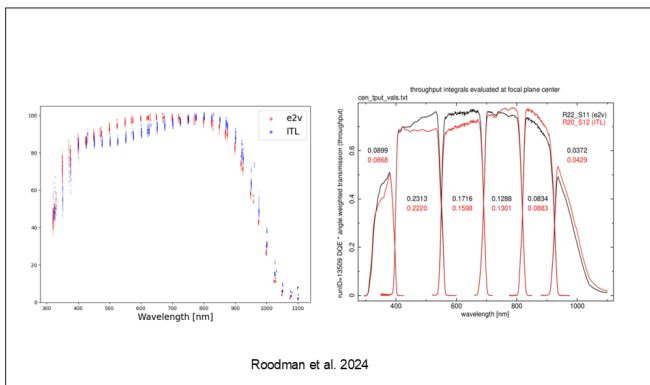


Figura 36

Y acá verán una animación, una foto y un video del shutter, también en cámara lenta. Lo voy a acelerar un poquito; ahí se ve qué son estas placas que se van moviendo, y en menos de un segundo tienen que cerrar el detector. Eso, tomando en cuenta que las exposiciones son del orden de 15 segundos, por lo que un segundo puede tener un impacto también sobre lo que se mide (Figura 37).



Figura 37

¿Cómo alinear todo esto? Les había dicho que el espejo secundario, situado arriba, está montado sobre este hexápodo, y la cámara también. Y, básicamente, son estos sistemas que tienen mucho grado de libertad y permiten la rotación en todos los ejes que se quiera mover, y con eso es posible alinear (Figura 38).

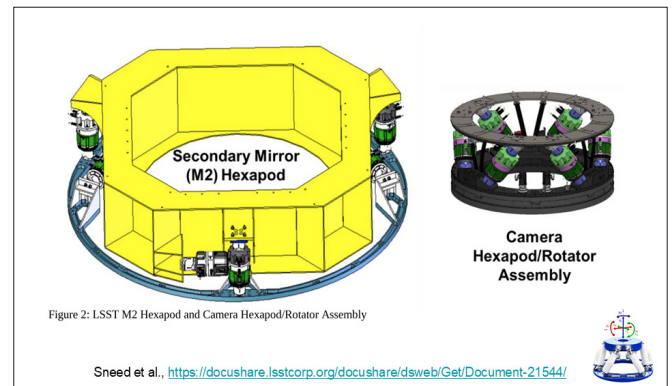


Figura 38

Y acá se ve una foto del sistema real que, además, tiene montado un rotador para corregir la rotación de la tierra (Figura 39).

Entonces, pasemos ahora a los objetivos científicos del telescopio, y voy a hablar muy brevemente de esto, porque falta tiempo en realidad, y hay mucho que contar (Figura 40).

Básicamente son cuatro grandes áreas.

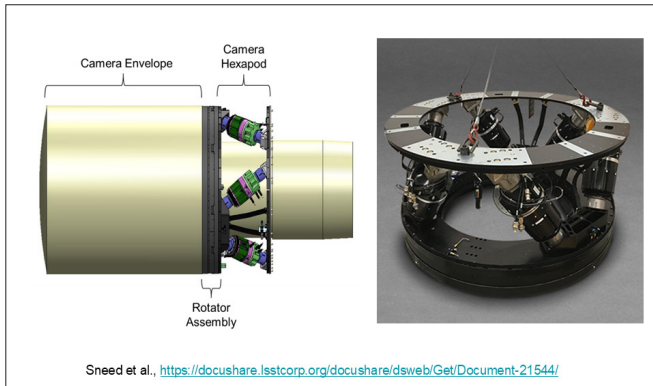


Figura 39



Figura 40

La principal razón para la construcción de este telescopio es para hacer el inventario del Sistema Solar; todos los planetas del Sistema Solar, incluyendo aquellos cuerpos que podían representar un riesgo para la Tierra.

También para entender la naturaleza de la materia oscura, energía oscura. Como saben, la materia que conocemos, la materia que podemos tocar y medir, es apenas un 5% de la energía del Universo. El 20%, el 25% es algo que se conoce como materia oscura, que no sabemos qué es exactamente, pero sabemos que está ahí porque podemos medir su efecto gravitacional.

Más aún, si uno mira la historia de expansión del Universo hacia el pasado, ve que el 70% de la energía es algo aún más misterioso, que básicamente está causando que la expansión del Universo sea acelerada. Y esto se puede medir a través de la comprensión de la estructura a gran escala de las galaxias, la medición de las supernovas, explosiones de estrellas a grandes distancias. Básicamente, son las grandes

preguntas astrofísicas en este momento, y que todavía no hemos podido contestar.

Otro objetivo es mapear la Vía Láctea, es decir, todas las estrellas, la estructura de nuestra galaxia, cómo se formó, entender cómo se distribuyen las estrellas en la galaxia. Esto lo vamos a poder hacer básicamente a distancias mucho mayores que los límites más lejanos de la galaxia, vamos a poder medir estrellas individuales, vamos a poder medir estrellas que están pulsando, y con ellas medir distancias y hacer un mapa en tres dimensiones.

Y esta es la parte que me interesa en particular a mí, la exploración de objetos que cambian de posición o de brillo. En particular me interesan las explosiones de supernovas, los objetos que cambian su brillo en escala de tiempo humanas (Figura 41).

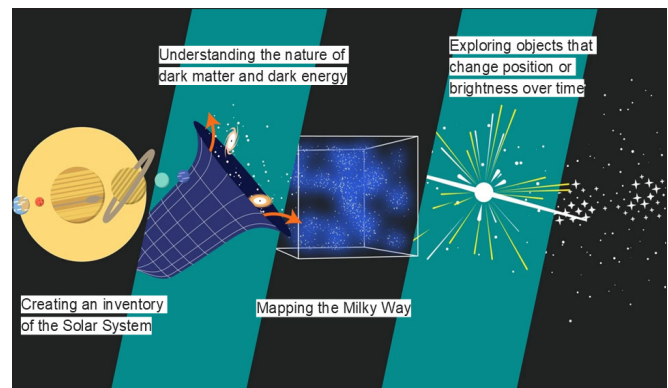


Figura 41

Entonces, para contestar estas grandes preguntas, el Observatorio Rubín ha diseñado básicamente ocho colaboraciones científicas donde los chilenos podemos participar, junto a todos los socios del telescopio; básicamente, es un telescopio financiado por Estados Unidos, pero con socios en algunos grupos en Francia, en Reino Unido y Chile como país anfitrión.

Y, a diferencia de otros telescopios, donde Chile tiene acceso al 10% del tiempo de observación de forma exclusiva, en este caso nosotros vamos a tener acceso al 100% de los datos, pero de forma no exclusiva, es decir, vamos a estar en igualdad de condiciones con el resto del mundo, de los usuarios de este telescopio. Eso representa una tremenda oportunidad, pero también un riesgo de que no podamos competir (Figura 42).

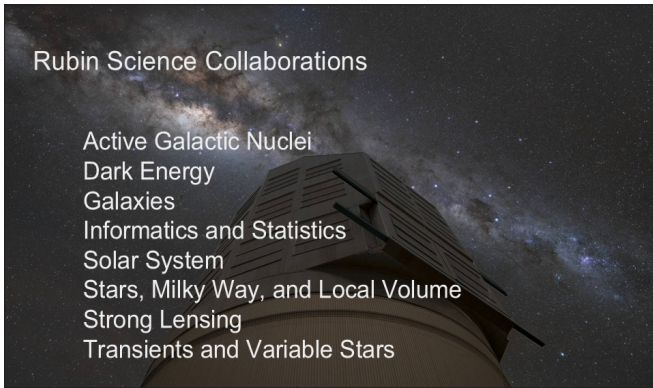


Figura 42

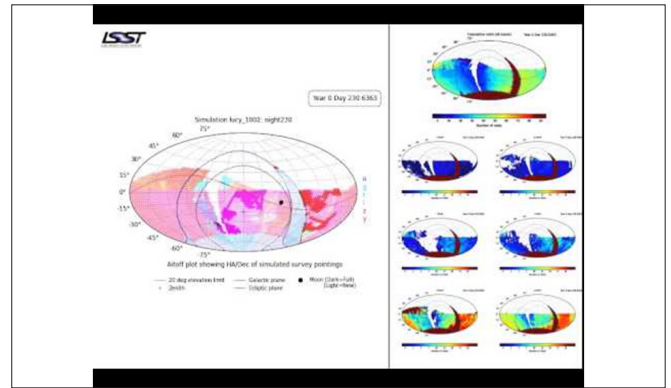


Figura 44

Entonces me voy a enfocar un poquito en la parte de dominio temporal (Figura 43).

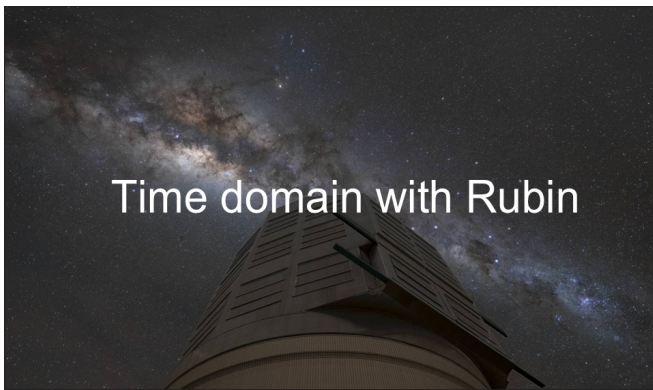


Figura 43

Esta es una simulación de cómo observa el telescopio durante la noche. Acá se ve que está observando con el filtro Z, recorre el cielo, trata de mapear. Recorrerá el cielo cada tres noches, y va cambiando pocas veces de filtro durante la noche porque hay una limitación al número de cambios en esta rueda de cambio de filtro que les había mencionado (Figura 44).

Cada toma del telescopio obtiene 3.000 millones de píxeles, que se comparan con unas imágenes de referencia y van a dar del orden de 10.000 eventos o alertas de cosas que están cambiando. Tres variables, objetos del sistema solar, supernovas, AGN o cosas que no son reales.

Eso da del orden de 10 millones de eventos o alertas por noche (Figura 45).

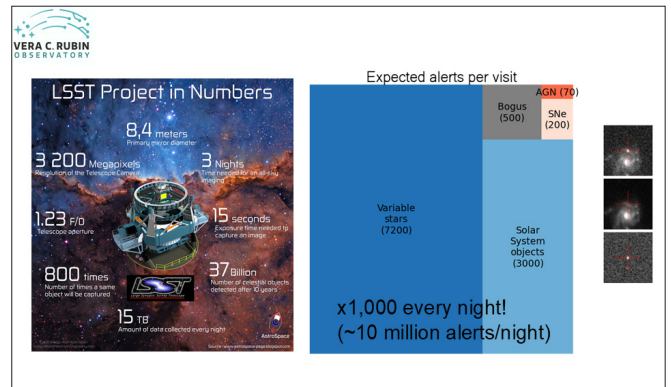


Figura 45

¿Qué va a pasar con este telescopio? Básicamente vamos a tener un Rubín y otros telescopios observando el cielo y generando estos grandes volúmenes de alertas. Habrá sistemas de brokers astronómicos, que recibirán estas alertas y las van a clasificar, procesar y entregar a otros sistemas de brokers y de manejo de telescopios para, finalmente, hacer seguimiento con otros telescopios e informarlo a la comunidad de usuarios (Figura 46).

Y acá tenemos una gran oportunidad para Chile, por la enorme cantidad de telescopios que tiene instalados, por lo que está en una excelente posición para hacer seguimiento de los objetos más interesantes que se descubran (Figura 47).

Y, por ejemplo, acá hay un ejemplo de una kilonova, que era la contraparte de una onda gravitacional detectada hace unos años, y acá se puede ver que, en 1,5 días, 2,5 días, 3,5 días, en muy pocos días ya había desaparecido. Entonces, uno tiene que ser capaz de reaccionar rápidamente

para descubrir estas cosas que en muchos casos son raras (Figura 48).

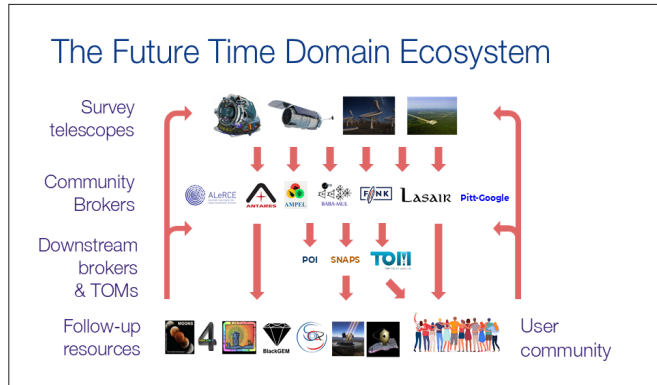


Figura 46



Figura 47

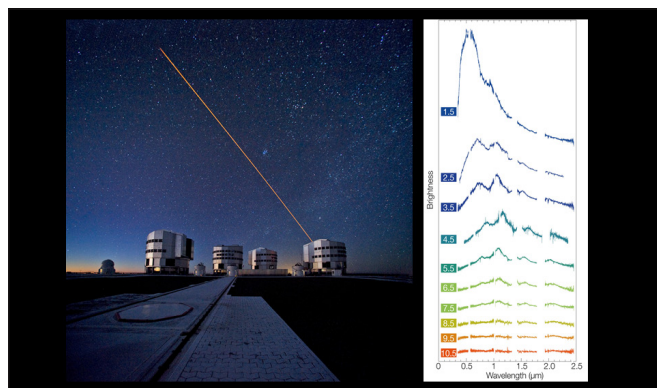


Figura 48

Entonces, ¿cuáles son las herramientas que se necesitan? Herramientas de adquisición, de clasificación, de priorización y la interpretación física, es decir, lo que finalmente lleva a la publicación científica. Y acá, en particular, estamos contribuyendo desde Chile, desarrollando uno de los brokers que fueron oficialmente aceptados por este telescopio (Figura 49).

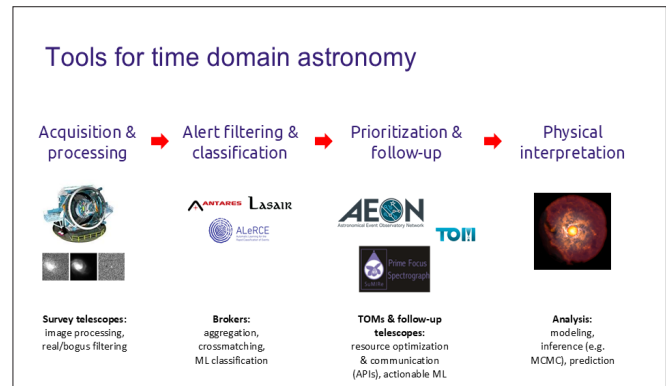


Figura 49

Entonces la idea es que el telescopio va a generar este stream de 10 millones de alertas por noche, a través de sistemas interconectados, con streams a través de Kafka.

Los brokers van a estar conversando con otros telescopios, con la comunidad, y van a estar haciendo seguimiento (Figura 50).

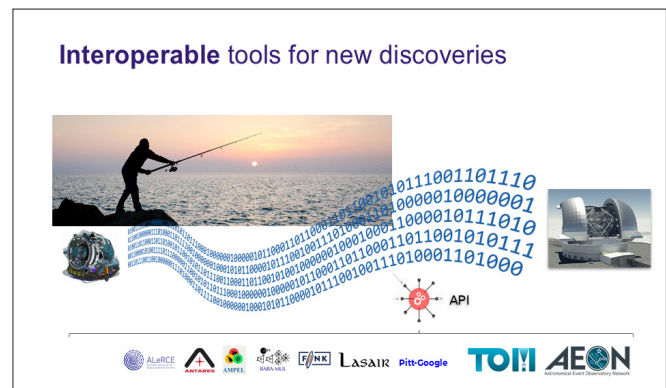


Figura 50

¿Cómo fue seleccionado ALeRCE? Hubo una competencia internacional en 2019, y en 2021 siete brokers fueron seleccionados. Y de aquí, cuando empiece la operación del telescopio a fines de este año, hasta 2027, la única forma de acceder a los datos de Rubin va a ser a través de los brokers. Así que vamos a estar en una posición muy interesante para hacer ciencia (Figura 51).



Figura 51

Solamente me resta por decir que tiene un tremendo impacto, tiene usuarios en 139 países, somos el número 3 en el mundo de más supernovas reportadas, etc. Tenemos estadísticas increíbles (Figura 53).

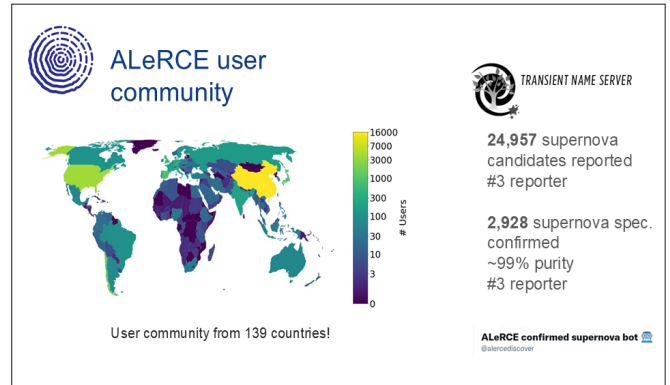


Figura 53

Voy a saltar un poquito esto, pero ALeRCE es un proyecto que lleva desde 2019 operando, con un equipo de 9 ingenieros, tiempo completo, financiado por el Centro de Modelamiento Matemático, Instituto Milenio de Astrofísica, Data Observatory y la Universidad de Concepción. El 50% del financiamiento venía del Instituto Milenio de Astrofísica, pero se acaba en un mes, así que estamos en algunos problemas justo al comienzo de la operación del telescopio (Figura 52).

Y bueno, ¿cómo se accede a los datos de Rubin? (Figura 54).



Figura 54

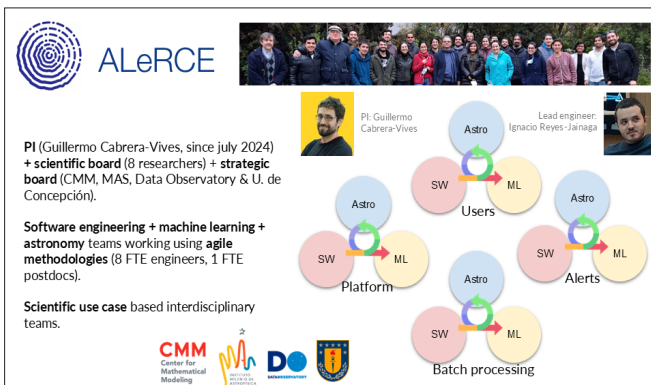


Figura 52

Bueno, acá están algunos números de los que ya les había contado, pero reitero que se puede comparar el número de detecciones de Rubin y compararlo con los otros telescopios, realmente es otra escala, otro nivel de magnitud (Figura 55).

¿Y cómo se transfieren todos estos datos? Bueno, hay conexiones dedicadas entre Chile, Estados Unidos, usando RedClara, y entre Estados Unidos y Europa, donde van a fluir datos a 100 gigabit por segundo para ser capaces de procesar todos estos datos (Figura 56).

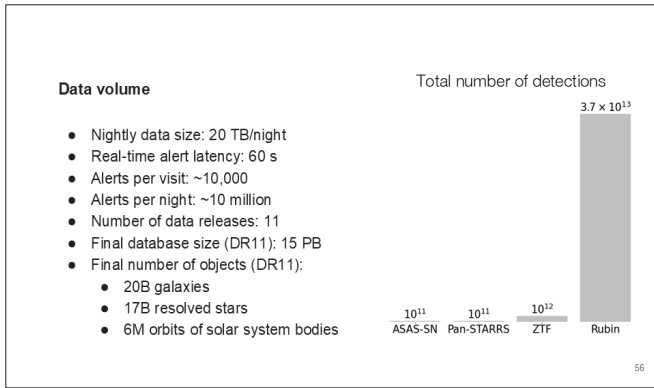


Figura 55

Y la red en particular en Chile es Reuna, que es clave, porque permite sacar esos datos y llevarlos a las redes internacionales. Es otra contribución importante de Chile desde Reuna (Figura 58).

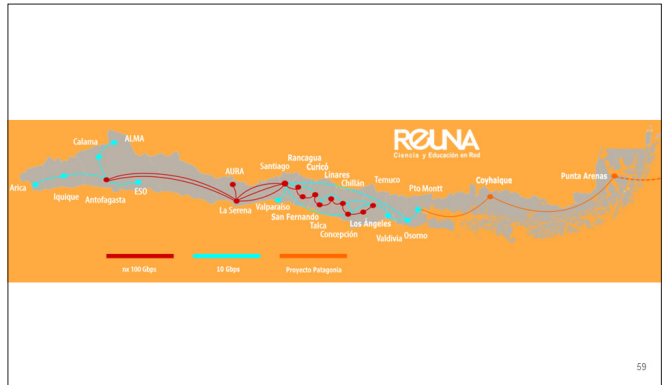


Figura 58

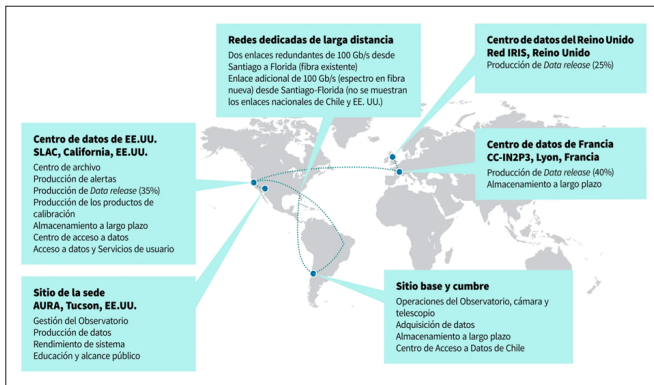


Figura 56

¿Y cómo se accede a los datos? (Figura 59).

Acá se ve RedClara, que va a salir básicamente desde San Pablo a Miami, después a un SLAC para ser procesados (Figura 57).

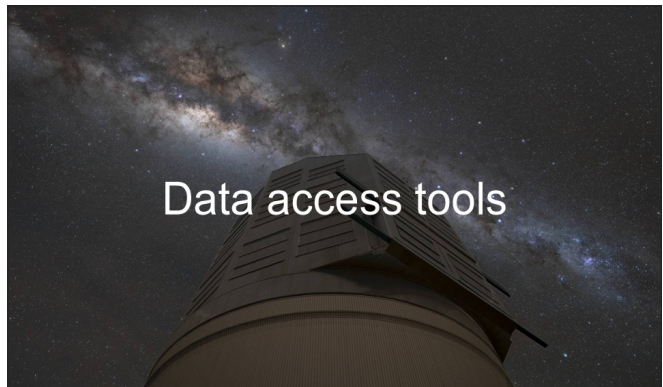


Figura 59



Figura 57

Básicamente uno ya va a dejar de trabajar en el computador, va a trabajar en la nube. Y existe el Rubin Science Platform, donde hay distintas herramientas para el acceso y las cargas de Jupyter Notebooks, etcétera.

Y vas a procesar tus datos en la nube, no tienes que descargar esos catálogos gigantes en tu laptop (Figura 60, Figura 61, Figura 62, Figura 63).



Figura 60

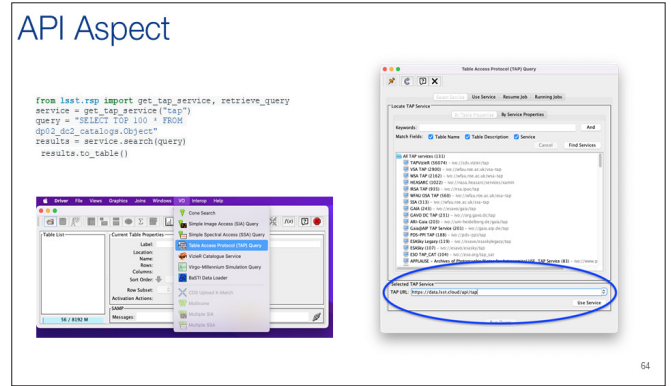


Figura 63

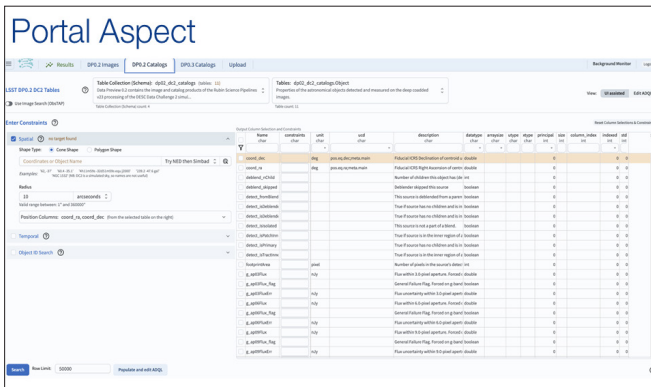


Figura 61

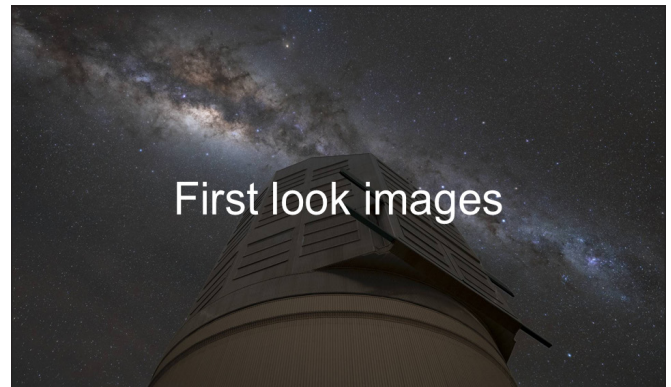


Figura 64

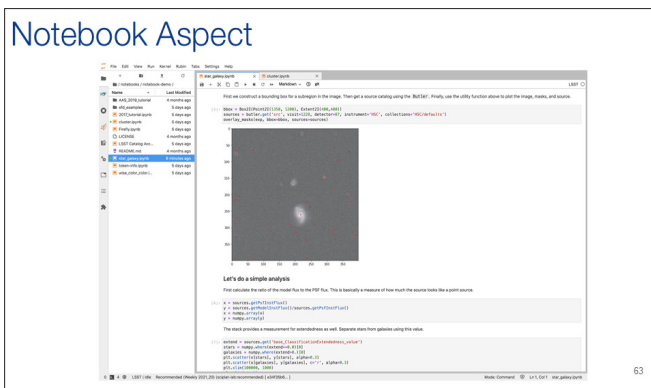


Figura 62

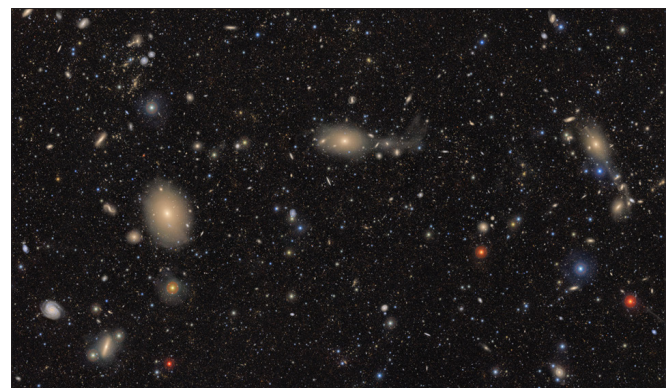


Figura 65

Y bueno, para terminar, voy a mostrar las primeras imágenes que han salido (Figura 64).

No hay forma de explicar realmente el tamaño de estas imágenes. Este es un pedacito de una toma de Rubin en distintos colores (imagen de colores). Pero en realidad una

toma de Rubin equivale a 400 pantallas de alta definición. Entonces no hay forma de que por zoom les pueda contar el tamaño de esta imagen, pero, son realmente enormes.

Uno puede explorarla y puede estar ahora mirando. Es fascinante (Figura 65).

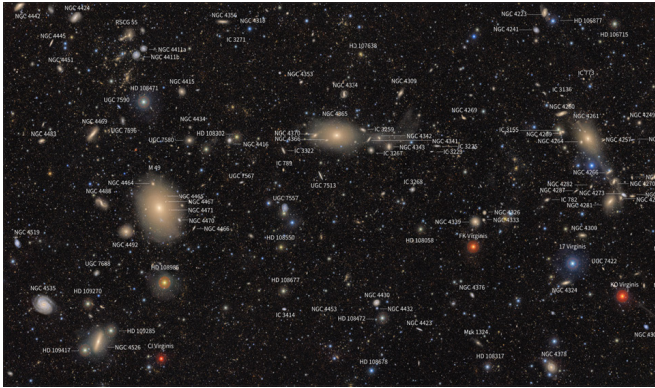


Figura 66



Figura 68



Figura 67

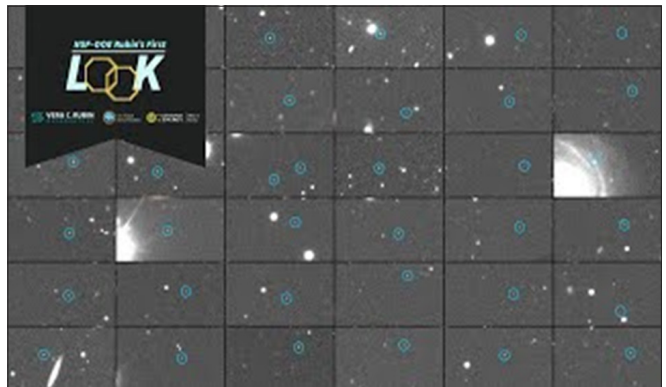


Figura 69

Acá está anotado un pedacito de una imagen de Rubín, con toda la galaxia y de todos los objetos que se conocen (Figura 66).

Acá hay otra imagen. Se pueden ver estructuras muy tenues, que antes no se podían ver. Solo se pueden ver ahora gracias a la profundidad que tiene Rubín (Figura 67).

Zonas con gas y polvo. No le puedo hacer justicia a estas imágenes porque son realmente bellas (Figura 68).

Y acá hay otra cosa interesante. Como tiene esta capacidad de observar en el tiempo, acá se muestran algunas imágenes de la fase de commissioning que se llama.

Reproduciendo video: Ahí pueden ver los asteroides moviéndose.

Y después de una semana se pueden grabar datos. Esto es lo que se ve. Básicamente está plagado de asteroides. Un campo de Rubín, en la primera noche 355 descubrimientos. La segunda noche, 1.358.

La tercera noche, 1.698. Así, 2.000 asteroides nuevos en solo 4 o 5 noches de observación.

En realidad, el futuro de esto es increíble (Figura 69).

Para concluir. El Observatorio Rubín va a comenzar sus operaciones en unos meses. Su montura rápida, sistemas ópticos, gran apertura y campo, y cámaras de 3.200 millones de píxeles son claves (Figura 70).

Y bueno, voy a dejar hasta aquí la presentación. Muchas gracias a todos.

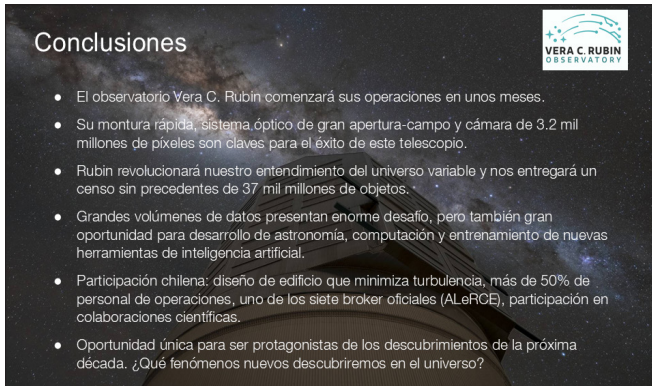


Figura 70

A continuación, el Sr. Förster responde consultas y comentarios. Modera don Miguel Ropert.

Sr. Miguel Ropert.

—Muchas gracias, Francisco. Muy interesante, muy completo. Has mostrado en su totalidad este tremendo Observatorio.

Sr. Erich Wenderoth.

—El nombre del telescopio honra a la astrónoma Vera Rubin. ¿Nos podrías contar algo de lo que ella aportó a la astronomía que la hacen merecedora a este honor?

Sr. Francisco Förster.

—Sí, Vera Rubin fue una de las primeras personas que encontró esta evidencia de que algo pasaba, algo estaba mal con nuestro modelo de la materia que está en las galaxias. Básicamente ella estudió las curvas de rotación de las galaxias. Cómo la velocidad a la que se movían las estrellas en las partes más externas de la galaxia, y se dio cuenta de que se movían mucho más rápido de lo que deberían, asumiendo que la materia que uno ve es la materia que existe.

Y esa fue su principal contribución. Antes de ella también había una persona que se llamaba Fritz Zwicky, que se dio cuenta de otra forma también de esta evidencia de materia oscura, mirando cómo se movían las galaxias en cúmulos de

galaxias. Entonces, Fritz Zwicky se dio cuenta de que algo pasaba en los cúmulos de galaxias; ellos proporcionaron las dos grandes líneas de evidencia de la existencia de materia oscura, que todavía no sabemos lo que es.

Sr. Tania Berres.

—¿Es verdad que solamente la Universidad de Talca tiene acceso a los datos de Vera Rubin?

Sr. Francisco Förster.

—Todas las instituciones chilenas tienen acceso a Rubin.

En este caso al 100% en el caso de Rubin. Al Rubin Science Platform, por ejemplo.

Y en particular, ALeRCE que es uno de los siete sistemas que tendrán acceso a las alertas, porque el flujo de datos es tan grande que se debió seleccionar un número finito de sistemas para acceder a esos datos. Entonces, los primeros en recibir los datos van a ser los brokers, ALeRCE es uno de ellos, y luego los Data Release, i.e., se puede acceder a todos los datos, todas las noches, a través del Rubin Science Platform.

Sr. Miguel Ropert.

—¿El acceso a la información del broker es libre para los académicos?

Sr. Francisco Förster.

—Es libre para todo el mundo. De hecho, las alertas son libres para todo el mundo.

Los datos restantes, aquellos que se acceden a través de la plataforma de Rubin, son solamente accesibles para los miembros de la colaboración donde están todas las instituciones chilenas. Pero, en particular, esperábamos que, por ejemplo, hubiese un gran número de usuarios desde China. En este momento, estamos observando que nuestro principal número de usuarios viene de China.

Y eso abre otras preguntas. Lo interesante que tiene ALerCE es que fuimos uno de los primeros grupos en que realmente aplicó Machine Learning a todo esto. Desde 2019 estamos aplicándolo con telescopios precursores. Y estamos liderando realmente en el mundo, somos uno de los dos o tres brokers que lideran el área de aplicación de inteligencia artificial, de ciencia de datos en este problema. Entonces, por ejemplo, nosotros hacemos llegar a este stream de alertas usando herramientas de procesamiento masivo, les damos un contexto, los clasificamos, los ponemos en la base de datos, y tenemos distintos clasificadores que te dicen cuál es la clase más probable de cada objeto. Entonces, cada grupo después puede ir a seleccionar su muestra de objetos de una clase particular y hacer la ciencia que le interesa.

Porque uno no puede estar trabajando con este catálogo de 40.000 millones de objetos, es demasiado. Debes tener un filtro inicial. Entonces, ese es un poco nuestro rol.

Es importante decir que en este momento el PI es Guillermo Cabrera, que está en la Universidad de Concepción. Hasta el año pasado fui yo, pero nos vamos a ir alternando.

Sr. Miguel Ropert.

—Sí, yo te felicito. La verdad que hemos tenido la oportunidad de conocer esto más de cerca. Es un tremendo desarrollo a nivel chileno. Y habla de que en Chile se pueden hacer las cosas a medida que haya la forma de financiarlos.

Tenemos posibilidades de hacer cosas muy importantes en datos.

Sr. Francisco Förster.

—Sí, lo único que hay que decir es que la mitad del proyecto ALerCE es financiado por el Instituto Milenio de Astrofísica que no se renovó, lamentablemente. Hicimos todo lo que pudimos. Trabajamos dos años en esa postulación y lamentablemente no fue seleccionado.

La verdad, hay mucha ciencia buena en Chile y lamentablemente este proyecto no fue seleccionado. Estamos buscando formas de mantener el equipo de ingenieros, porque es lo caro de financiar acá. O sea, 8 o 9 ingenieros.

Sr. Miguel Ropert.

—Sobre ese tema yo voy a dejar después a nuestro presidente Juan Carlos Barros que nos haga un comentario. El Instituto está preocupado de esta materia y lo estamos viendo en una comisión incluso. Así que terminando un par de preguntas más voy a dejar a nuestro presidente que comente ese último punto que tocaste.

La gente se pregunta siempre, sobre todas estas inversiones en astronomía ¿estamos liderando a nivel global todos estos Observatorios en Chile? ¿Estamos mirando más del 60% de lo que se observa hacia afuera?, ¿y qué más aporta en nuestro país? Es la pregunta que siempre se hace la gente. Además del aporte a la ciencia obviamente, pero es la típica pregunta práctica.

Yo mirando tu conferencia hoy día me doy cuenta, por ejemplo, del tema de los datos, la transmisión de datos. Nuestro país está liderando en ello. Me gustaría que nos contaras un poco de eso. Estar informando a nivel global esta tremenda base de datos que entrega el Observatorio ha significado un avance para el país tremendo. Es un ejemplo. Pensaba en la construcción. Tú mencionaste ahí a Arcadis. ¿Cuánta tecnología de línea, de punta se está recibiendo en Chile aprovechando la participación en estos proyectos? Y termino con otro ejemplo. El tema de la ingeniería sísmica. Esta gente estudia los proyectos en países donde no tienen temas sísmicos. Y en Chile tenemos la obligación de revisarlos y dejarlos adecuado a nuestra realidad. Así que son tres ejemplos. Me gustaría que profundizaras un poco más en esto, Francisco. Que para Chile no solo es la ciencia. Que además hay un aporte real.

Sr. Francisco Förster.

—Bueno, en el caso de los datos hay un rol de REUNA, que fue una decisión estratégica en su momento clave. Nos permite tener internet académico de alta velocidad, muy competitivo. Y al final también demostró ser importante para que estos proyectos sean más probables que se instalen en Chile. Porque existe esa capacidad para mover esos datos, gracias a REUNA.

Y en el tema de los datos yo pienso que esto es una herramienta para formar capital humano avanzado. Más del 50% del personal en Rubín es chileno. Y están expuestos

a problemas que de otra forma no lo estarían. Entonces, es muy fácil pensar que esta gente después podría salir de esa industria y moverse a otra industria. Y aplicar lo aprendido.

En el caso de nosotros en el desarrollo de AlerCE hemos ya formado más de 30 ingenieros en el equipo que tienen muy alta rotación. Los formamos y después de dos años son muy empleables. Y ganan el doble en la industria. Entonces, nos ha pasado varias veces y es normal y es nuestro rol también. No sé, el caso de Notco, de Karim Pichara que fue investigador del MAS. Él partió estudiando datos astronómicos y las herramientas que usan en Notco son las mismas herramientas que usaban en astronomía también. Entonces, no es tan evidente, pero existe una conexión real entre la astronomía y la industria el desarrollo y la industria chilena.

Otro ejemplo interesante es del CATA, Centro de Astrofísica y Tecnología de Afines que están haciendo aplicaciones para llevar el conocimiento que tienen estos laboratorios para desarrollar instrumentación astronómica a aplicaciones reales. Ese es otro ejemplo súper interesante.

Yo creo que Chile tiene que aprovechar esta veta y sacarle el jugo. Realmente el país está expuesto a una tecnología y capacidades que no cualquier país las tiene.

Sr. Miguel Ropert.

—*Exactamente, lo has definido muy bien, muchas gracias.*

Este proyecto, ¿cuánto tiempo duró desde el inicio a su puesta en marcha? Y creo que mencionaste el monto de 10.000 millones de dólares. El monto final de la inversión, por favor.

Sr. Francisco Förster.

—Sí, no tengo el monto exacto, pero es del orden de 1.000 millones de dólares. Es como el típico monto de estos telescopios grandes. El telescopio espacial James Webb cuesta 10.000 millones de dólares. Es como el factor 10 de diferencia típicamente entre el espacio y la tierra.

Ahora, el proyecto se concibió hace 30 años más o menos. Eso es más o menos la escala de tiempo que es bien típica

de estos proyectos. Entre la idea y la operación pasan cerca de 30 años. Entonces básicamente es la vida académica de mucha gente que ponen toda su energía y conocimiento para que estos proyectos ocurran y sean exportados por la siguiente generación.

Sr. Miguel Ropert.

—*Estupendo, muchas gracias, Francisco.*

Le doy la palabra a nuestro presidente, Juan Carlos Barros, por favor, gracias.

Sr. Juan Carlos Barros.

—Muchas gracias, Miguel. Muchas gracias, Francisco.

Nosotros, en el Instituto, vemos con preocupación esto que tú comentaste, que no es un caso aislado, sino que ya hemos tenido varias presentaciones, hemos tenido conversaciones con académicos que han desarrollado tecnologías que tienen un impacto importante y que son reconocidas a nivel mundial incluso y que de repente se les termina el financiamiento y llegan hasta ahí solamente. Entonces, a raíz de esto, nosotros tomamos una decisión en el último directorio del Instituto de partir con una comisión de trabajo que va a liderar Alejandro Steiner que, precisamente, va a abordar estos temas. Es decir, vamos a hacer desarrollo, vamos a hacer innovación, pero tiene que haber una cierta continuidad y tiene que haber productos claros, pero también tenemos que darles a los investigadores, a los especialistas la seguridad de que va a haber una continuidad.

Ahora, si bien parte del rol que tiene usted Francisco es formar profesionales, al final están formando profesionales para el mundo y cuando no hay financiamiento la verdad es que se desarmen los equipos de trabajo y cuesta mucho armarlos. Así que nosotros estamos preocupados y ocupados de esta situación.

Quería transmitírte eso solamente y reiterarte nuestro agradecimiento por la presentación y felicitaciones por todo el trabajo que has hecho.

Sr. Francisco Förster.

—Muchas gracias por el apoyo. Sí, yo creo que en otros países existen, está bien que haya sistemas competitivos, está bien que haya votación en el financiamiento, pero lo que otros países tienen y nosotros no tenemos es una herramienta con la pregunta de ¿a qué se le da continuidad? Porque en el fondo podemos darle un foco y con una fracción del costo del proyecto financiar solamente esta parte que es lo que debería continuar. O lo otro, darle un fin no tan brusco porque si antes se corta el financiamiento de golpe

y tenemos que despedir gente, es lo mismo que le pasa a otros centros. Ojalá que solucionemos esos problemas en el futuro. Pero cuesta dinero.

Sr. Juan Carlos Barros.

—Bueno, muchas gracias a Francisco y a todos los asistentes.

Fin de la conferencia.

PANORAMA DE INVERSIONES. CARTERA DE PROYECTOS 2025-2030

*Sr. Orlando Castillo,
Gerente General de la Corporación de Bienes de Capital – CBC.*

El 29 de octubre de 2025 se realizó —vía zoom Reuna— la exposición del Gerente General de la Corporación de Bienes de Capital, don Orlando Castillo, con el tema “Panorama de Inversiones. Cartera de Proyectos 2025-2030”. En la ocasión, se contó con variados asistentes del ámbito académico y empresarial.

El Sr. Castillo es Ingeniero Civil en Minas de la Universidad de la Serena, y Magister en Innovación Tecnológica y Emprendimiento.

Desarrollo profesional ligado principalmente a la Industria Minera nacional, tanto en el ámbito público como privado, con competencias adquiridas en planificación estratégica, gestión de activos, dirección de equipos multidisciplinarios y construcción de networking para el cumplimiento de objetivos y metas. En el ámbito productivo, se destaca la experiencia adquirida en 11 años de trabajo en Codelco Chile División Chuquicamata; ingresando como Ingeniero en entrenamiento hasta desempeñar funciones en los cargos de Ingeniero Geomecánico, Ingeniero de Planificación Mina, Ingeniero Jefe de Operaciones Mina Sur; Jefe de Departamento de Gestión Operativa de la Gerencia de Gestión de Riesgos, Medio Ambiente, Calidad y Jefe de Departamento de Gestión Operativa Mina Chuquicamata.

En el área de Gerencia Pública se destaca el trabajo desempeñado en las funciones de secretario regional Ministerial de Planificación y Coordinación en la Región de Antofagasta, de director regional de CORFO y subdirector de Minería e Infraestructura de INNOVA Chile de CORFO.

En el ámbito privado desde el año 2008 desempeña el cargo de Gerente General en la Corporación de Bienes de Capital (CBC), institución ligada a servicios de información para la inteligencia de negocios y el desarrollo tecnológico de la industria local.

A continuación, su exposición.



Sr. Orlando Castillo.

Sr. Juan Carlos Barros, Presidente IICH.

—Muy buenos días a todos y todas. Como presidente del Instituto de Ingenieros de Chile, les quiero dar la más cordial bienvenida a esta conferencia que hemos titulado “Panorama de Inversiones. Cartera de Proyectos 2025-2030”.

El Instituto de Ingenieros de Chile es una corporación sin fines de lucro que desde hace 137 años se ocupa de hacer aportes a la excelencia de la ingeniería, a su enseñanza y al desarrollo del país.

En este contexto, periódicamente realizamos foros, seminarios o charlas que se ocupan de temas que por su relevancia para el país requieren ser expuestos ante la comunidad. El día de hoy quiero darles la bienvenida a nuestra conferencia del mes de octubre, que está dedicada a un tema muy relevante para el país, que es el “Panorama de Inversiones” y específicamente la Cartera de Proyectos para los próximos cinco años.

Agradecemos la participación de esta conferencia de Orlando Castillo, quien es gerente general de la Corporación de Bienes de Capital, CBC, y también de Silvana Cominetti, past president del IICH y directora de la Corporación de Bienes de Capital, quien se va a encargar de canalizar las preguntas y administrar las preguntas y respuestas que hagan ustedes.

Al final de las presentaciones ustedes van a tener la posibilidad de plantear consultas que quieran hacer a Orlando Castillo y también les solicitamos que puedan responder a una breve encuesta que realizamos para estos efectos.

Quiero expresar finalmente nuestro agradecimiento a Reuna que hace posible esta transmisión.

Orlando Castillo, como dije, es gerente general de la Corporación de Bienes de Capital, es un referente en todo lo que tiene que ver con inversiones. La información que recopila la Corporación de Bienes de Capital es utilizada por diferentes instancias gremiales e instancias gubernamentales para hacer las proyecciones de inversión para los próximos años. La información que obtiene la Corporación que nos va a indicar Orlando se genera directamente de quienes están realizando inversiones y nos da una buena anticipación de los proyectos que vienen.

Sin más, quiero dejar con ustedes a Orlando Castillo. Muchas gracias por participar en esta conferencia. Orlando, tienes la palabra.

Sr. Orlando Castillo.

—Muchas gracias, Juan Carlos. Muchas gracias, Silvana. Muy buenos días a todas y a todos.

Como lo indicaba Juan Carlos, la Corporación de Bienes de Capital es una institución dedicada al monitoreo permanente de los proyectos de inversión que se realizan en Chile, en todos sus sectores económicos y también hemos incorporado información de Perú y Argentina; en estos dos países particularmente en los sectores de minería y energía.

En el caso de Chile hacemos seguimiento en todos los sectores económicos, catastrando la cartera de proyectos de inversión en toda minería, energía, obras públicas, tanto privadas como estatales, en el área de puertos, de industria no minera y también en el área de tecnología.

La Corporación es una entidad sin fines de lucro, ya con 59 años de historia, lo que nos ha permitido pasar por todos los ciclos económicos y políticos que ha tenido el país. Por lo tanto, es una institución de carácter independiente que desde su inicio ha monitoreado la evolución de las carteras de proyectos que se van gestando en el país, que nos permite hoy día tener una base de datos histórica muy potente para entender cómo se mueven estas carteras de proyectos de inversión y cómo se van generando también las oportunidades para los distintos actores que se vinculan con los proyectos.

En particular hoy día voy a ir haciendo algunas alusiones a cómo se van generando también algunos desafíos y oportunidades para la ingeniería en Chile, que está muy bien instalada en el proceso de diseño y construcción de proyectos en Chile (Figura 1).

Para hacer esta presentación voy a usar y voy a compartir con ustedes ahora un panel en Power BI que nos permite tener la información prácticamente en línea.

El objetivo básico de la corporación es recopilar información de los proyectos, analizarla, procesarla y entregársela

a más de 200 empresas socias. El catastro CBC es uno de los más importantes a nivel nacional ya que se conecta directamente con los proyectos de inversión y también de manera indirecta con el ecosistema de proveedores e instituciones a fines, registrando especialmente lo que está ocurriendo en torno a la ingeniería y la construcción de estos proyectos.



Figura 1

Esta información también la entregamos a entidades del Estado, como decía Juan Carlos, particularmente al Ministerio de Hacienda, al Banco Central, al Ministerio del Trabajo, al INE, al INVEST Chile, a la Cámara Chilena de la Construcción, y a otros más, por lo que constituye una información que es referente respecto a qué está ocurriendo con las carteras de inversión en Chile.

Hoy tenemos en nuestra base de datos catastrados más de 2.000 proyectos y voy a indicar inmediatamente que nosotros hacemos una gran diferencia en la clasificación de estos proyectos; están aquellos en los cuales nosotros tenemos conocimiento del cronograma de construcción de cada uno, versus los que no tienen un cronograma definido de construcción, es decir, no se conoce cuándo podría partir la construcción ni su término.

Todas las cifras que yo les voy a mostrar inicialmente van a estar referidas a la parte de la base de datos que corresponde a proyectos que están con cronograma de construcción, ya sea que hayan partido hace un par de años o un par de meses atrás, o proyectos que van a partir en algunos meses más o en algunos años más, pero en los cuales se conoce o está estimado cuándo debería ocurrir ese inicio o fin de construcción.

Al final me voy a referir a los proyectos sin cronograma de construcción porque son muy importantes también. Son los proyectos que en los próximos trimestres van a ir probablemente modificando la cartera, particularmente con los que vayan ingresando y también reemplazando a los que van terminando.

Entonces, para eso voy a usar este panel. Me voy a referir primero a la cartera que está con cronograma de construcción y con una fotografía de la cartera que nosotros tomamos al 30 de junio de este año. Es decir, esta información que ustedes van a conocer conmigo está relacionada con todos los proyectos que al 30 de junio se conocían o estaban estimados su inicio o fin de construcción.

Eso corresponde a 869 proyectos de los 2.000 de todo el catastro, que implican para los próximos cinco años, considerando hasta 2029, 74.000 millones de dólares de inversión. Inmediatamente les indicaré cuán buenos o malos son los 74 mil millones de dólares en la fotografía de lo que tenemos catastrado al 30 de junio (Figura 2).

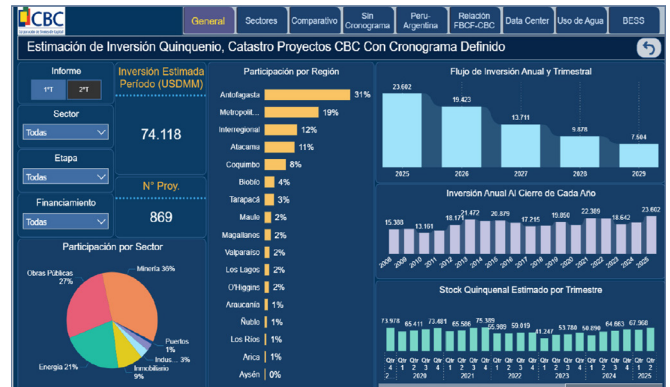


Figura 2

Aquí, cada barrita de color verde del gráfico inferior derecho muestra lo que estimamos para el quinquenio en cada uno de los trimestres anteriores, desde 2020 a la fecha y se puede observar que el stock actual de 74.000 millones de dólares para el próximo quinquenio corresponde a un stock levemente superior al promedio observado los cinco años anteriores.

Por otro lado, en el gráfico superior derecho, con barras en color celeste, se observa cómo se distribuye anualmente el gasto de estos proyectos con cronograma de construcción.

Dado que corresponde a una fotografía de la cartera al 30 de junio, no está considerando proyectos que podrían ingresar en los próximos tres meses o años siguientes, por lo que esa distribución representa el backlog de gasto de los proyectos con cronograma al 30 de junio,

En una perspectiva histórica (Figura 3), el stock más alto lo tuvimos en la época del boom minero, entre 2012 y 2013, donde llegamos a una cartera de proyectos que sumó gasto quinquenal del orden de 100.000 a 120.000 millones de dólares.

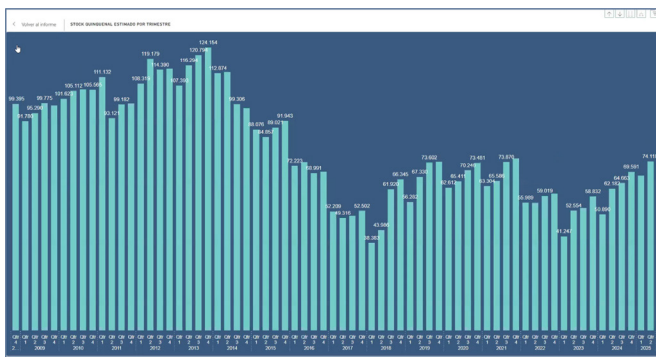


Figura 3

También puedo indicarles que cuando tuvimos el boom minero, una vez que se gastó esa cartera, no se recuperó rápidamente en los trimestres y años siguientes, sino que caímos incluso hasta el nivel más bajo que se ha tenido en la historia, en torno a 2018, porque no hubo reposición de inversión en proyectos mineros, equivalente o superior a lo que se estaba terminado de construir.

Lo que sí tuvimos después fue el inicio y la compensación que ocurrió a partir del proceso de inversión en energía ERNC. Y yo diría que ahora estamos viviendo un nuevo ciclo, de buen nivel de inversión en el sector de minería, que voy a explicar con mayor detalle en los paneles siguientes.

Y lo primero, es indicar que el 36% de estos 74.000 millones de dólares corresponde a minería, con una inversión estimada del orden de 26.500 millones de dólares (Figura 4). Eso es bastante alto. Minería normalmente tiene del orden del 30%, ha vivido un momento entre el 25% al 30%, pero el 36% es un valor bastante alto en la historia, por lo menos en la historia de los últimos diez años.

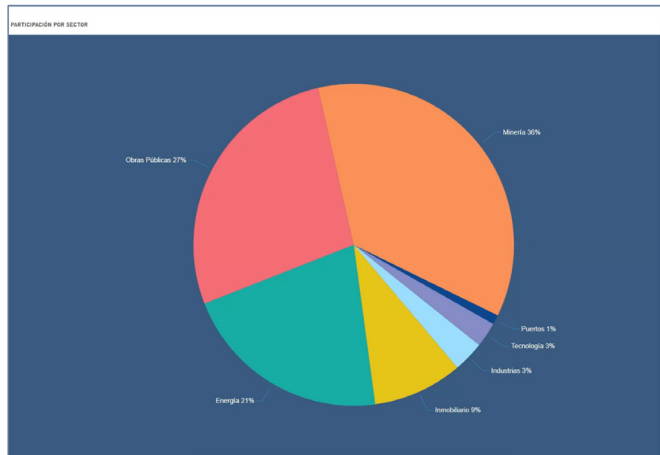


Figura 4

Y esto quedó bastante bien aspectado en términos de la incorporación de proyectos con cronograma, una vez que se resolvió el tema del Royalty Minero en este gobierno, por ahí por agosto del año 2023. A partir de ese momento, diría que la definición de cronograma de los proyectos de minería ha sido continua, y lo vamos a observar después con algún grado de detalle cuando me refiera directamente a este sector.

El otro elemento importante es la inversión que está estimada para los próximos cinco años en obras públicas, que tiene un peso en el catastro quinquenal de 27%, con más de 20.000 millones de dólares. Estos dos son los grandes pilares de la inversión de los próximos cinco años, y con una participación bien relevante nuevamente para este quinquenio del sector de energía y, particularmente, con proyectos vinculados a generación y almacenamiento de ERNC, con cerca de 16.000 millones de dólares y una participación cercana al 21%.

Por lo tanto, cuando nosotros vemos que minería, obras públicas y energía, concentran un poco más del 80% de la inversión quinquenal, se puede decir que esta es la configuración estructural de la inversión en Chile para los próximos cinco años, en la cual tenemos dos sectores muy fuertes, que varían muy poco una vez que definen sus cronogramas de construcción, y un tercer sector que está recuperando su capacidad de inversión respecto a la que tuvo los últimos dos o tres años, donde había tenido una baja.

Desde el punto de vista del resto de los sectores, uno puede observar inmediatamente que tienen una proporción menor, y por lo tanto se transforman en un desafío inmediato para el futuro de Chile.

Vale decir, por un lado, tenemos sectores muy fuertes como minería, obras públicas (estatales o privadas concesionadas), y el sector de energía. Pero estamos con un nivel de inversión en el sector inmobiliario todavía bastante bajo, del orden de 6.000 a 7.000 millones de dólares, siendo que en los momentos buenos esta cifra era el doble, en 2015 o 2016.

El sector industrial no minero, más bien vinculado a la industria manufacturera, industria agroalimentaria, está con el orden de los 2.000 millones de dólares para el quinquenio y un peso de un 3%, lo que lo hace ser básicamente un sector bastante resiliente, pero con un nivel de crecimiento casi nulo.

En tecnología, particularmente para este quinquenio, de acuerdo con este catastro, todavía está con un nivel bajo respecto a lo que se pudo hacer en los últimos tres años. Estamos con niveles cercanos a los 2.000 millones de dólares, pero cuando se implementó todo el sistema 5G, en el quinquenio anterior, tuvimos valores cercanos a los 4.000 millones de dólares. Por lo tanto, esperamos que también este sector en algún momento pueda retomar ese ritmo de inversión de años anteriores.

Finalmente, observamos que hay una debilidad bastante grande, asociada al sector de puertos, porque dentro del catastro del quinquenio, al 30 de junio, estamos con una inversión cercana al 1% y con la identificación de proyectos pequeños y el más grande, el de San Antonio, está más bien con flujos que van posteriores al año 2029, y que no alcanzan a ser recogidos en este quinquenio.

Entonces, como resumen de esta parte inicial, estamos con un stock de tamaño medio, del orden de 74.000 millones de dólares, pero que tiene la potencialidad de seguir creciendo, porque lo ha venido haciendo sostenidamente desde los últimos dos años, y es probable que en los próximos trimestres podamos ir constatando que esta tendencia sigue al alza y está fundamentado en sectores bastante fuertes, como minería, obras públicas y la recuperación del área de energía. Pero tiene la debilidad que los otros sectores todavía están a la baja y, particularmente, los sectores

inmobiliarios, industria y tecnología y puertos, están muy bajos respecto a años anteriores (Figura 4).

Ahora, el otro elemento que me interesa recalcar inmediatamente es la distribución regional, que es bien distintiva de este quinquenio. Los 74.000 millones de dólares de inversión distribuidos regionalmente muestran la mayor concentración en la región de Antofagasta.

Fijense que un tercio, prácticamente, de toda la inversión nacional que debería ocurrir en el quinquenio va a ocurrir en la región de Antofagasta. Este es un dato no menor e, inmediatamente, impone o desata oportunidades, pero también va a imponer ciertos desafíos sobre cómo gestionar adecuadamente esa concentración de recursos así como la simultaneidad de proyectos, con todo lo que eso significa en términos logísticos, concentración de mano de obra, mucha de ella temporal y también, en algunos momentos, la provisión de ciertos bienes que podrían ser, a lo mejor, no necesariamente cubiertos de manera total por la oferta existente y que podrían generar algunos incrementos de costos o cuellos de botella.

La región Metropolitana es la segunda región con mayor concentración, por dos efectos. En primero lugar, porque Antofagasta está muy alto. Normalmente, Antofagasta, en los mejores momentos, ha sido igual o levemente mayor que la Metropolitana. En segundo lugar, porque la Metropolitana también ha bajado su participación, particularmente por la baja del sector inmobiliario, que la ha afectado mucho. Y es esperable que eso pueda cambiar en los próximos trimestres de manera progresiva, pero no necesariamente para poder alcanzar a la región de Antofagasta y configurar un marco parecido a lo que teníamos en quinquenios anteriores, donde la Metropolitana definitivamente era la región que más concentraba inversión.

Los proyectos interregionales que involucran más de una región, considerando incluso las anteriores, están con una concentración de un 12%, pero también es distintivo que la tercera posición la ocupe la región de Atacama, después de Antofagasta y Metropolitana, que normalmente no está en estos niveles hoy día, justamente por efectos de proyectos mineros y energéticos. También está tomando un rol bien importante y un lugar que no lo veíamos hace muchos, muchos años atrás. Hace más de 10 años que Atacama no tenía un nivel de participación tan alto. Lo mismo en la región de Coquimbo.

Y ustedes pueden observar que regiones que han sido tradicionalmente más altas en inversión, como Biobío o Valparaíso, hoy día en el catastro están con participaciones menores. Fundamentalmente, porque han crecido mucho Antofagasta, Atacama y Coquimbo y, particularmente, porque se ha ido concentrando esta inversión en esas regiones en temas mineros y energéticos (Figura 5).

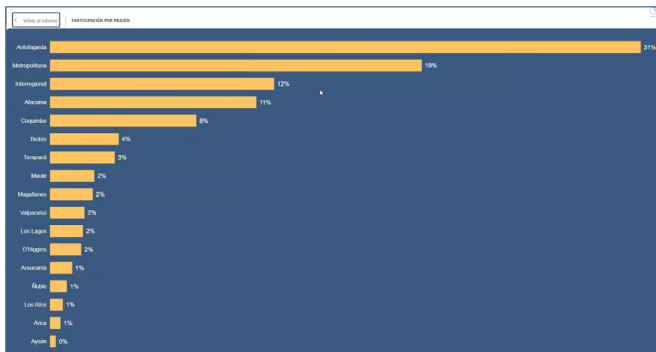


Figura 5

Me voy a volver al informe y solamente voy a mencionar cómo se distribuyen estos 74.000 millones de dólares en términos anuales.

Tal como se los comentaba recién, el modelo que nosotros usamos nos permite ir contrastando trimestralmente la variación de información. Nosotros nos preocupamos de la identificación de los proyectos y después en su seguimiento.

Para nosotros es muy importante conocer el cronograma del proyecto y la etapa en la cual se encuentra, porque eso nos permite aplicar un modelo econométrico que le asigna un flujo de gasto al proyecto. Es decir, cuando sabemos que el proyecto está en ingeniería, dependiendo la tipología del proyecto, sabemos más o menos cuánto debería estar gastando en ingeniería y, dependiendo la longitud del cronograma de la ingeniería, se distribuye en uno o dos años.

Adicionalmente, después sabemos cuándo parte y termina la construcción, también por el tipo de tipología del proyecto, podemos hacer distribución del gasto del proyecto en esa etapa de construcción o en la compra del equipamiento. Por lo tanto, nos permite después ir asignando flujos de gasto por año, por cada tipología y para cada proyecto.

Esa configuración con cierre trimestral del catastro nos permite que al trimestre siguiente podamos comparar y observar la evolución en el tiempo

Con esa metodología, podemos observar que para el año 2025, el año en curso, estamos estimando un gasto cercano a los 23.600 millones de dólares (Figura 6). Y ese es un gasto bastante alto. Mayor respecto a lo que se gastó el año pasado y particularmente respecto de lo que se gastó al año antepasado. Por lo tanto, estamos en un nivel de recuperación de inversión anual en proyectos bastante alto y con tendencia al alza.



Figura 6

Respecto al próximo año, estamos estimando del orden de los 19.500 millones de dólares. Y aquí falta incorporar los proyectos que estarían ingresando ahora con cronograma a este trimestre, más los que deberían ingresar el próximo trimestre, vale decir, el último del año y después, al menos los dos primeros trimestres o tres primeros trimestres del próximo año.

Entonces, la probabilidad de que estos 19.500 millones alcancen a los 23.600 y los superen, es bastante alta, porque normalmente las carteras van evolucionando y van creciendo en la medida que van avanzando los trimestres del año.

Entonces, podemos decir hoy que el próximo año 2026 es probable que tenga un gasto al menos similar a este año, incluso con una buena probabilidad de superarlo.

Ahora, el año 2027 tiene casi 14.000 millones de dólares, es decir, faltan 10.000 millones de dólares para cubrir una brecha respecto a los 23.600, uno puede inferir que

es probable que podamos tener esos 10.000 millones de dólares apareciendo como gasto anual en los próximos trimestres, considerando los dos que quedan de este año, más los cuatro en próximos años, más incluso tres o cuatro del año subsiguiente, por lo que de acuerdo a nuestra historia, observamos que es altamente probable, que el año 2027 también sea un año de nivel alto de inversión en proyectos.

Por lo tanto, en nuestras presentaciones hemos estado planteando, que con los datos que tenemos hoy día, con cronogramas, más los datos observados de los que están sin cronogramas, que podrían integrarse en los próximos trimestres, es bien probable que tengamos un nivel de inversión significativamente bueno para el próximo año, y al menos para el subsiguiente.

Cuando miramos los gastos de los años 2028 y 2029, también de alguna manera estamos viendo que están con una base de inicio bastante buena, por lo tanto, uno podría indicar también, observando los proyectos que están sin cronograma, que pudiese haber un buen potencial para completar el quinquenio y tengamos una inversión final cercana a los 100.000 millones de dólares, o incluso mayor, sumando todos los años y los probables proyectos que deberían ingresar en los trimestres siguientes.

Por lo tanto, diría que hay una buena noticia, sobre todo cuando estamos hoy día en un proceso eleccionario, y de cambio de gobierno a principios del próximo año, por lo cual uno podría decir que el próximo gobierno tiene una buena base de proyectos, una cartera de proyectos bastante potente para lo que viene y que su materialización va a depender de su capacidad de gestión y facilitación de estos proyectos, porque hay una buena base, que está en crecimiento (Figura 6).

Me voy a ir ahora por sector, voy a ir recorriendo los sectores de manera rápida, pero entregando los datos principales para cada uno de ellos.

Vamos a ir primero al sector de minería, ya habíamos indicado que minería concentraba el 36% de la inversión quinquenal con información al 30 de junio y alcanzaba el orden de los 26.500 millones de dólares.

Hay 74 proyectos, por lo tanto, estamos hablando de que son 74 proyectos grandes que están con cronograma dentro de este quinquenio y donde la mitad de lo que está

ocurriendo en minería en Chile, el 52%, ocurre en la región de Antofagasta (Figura 7).

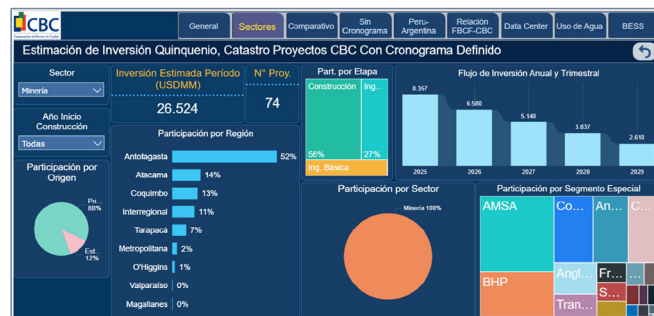


Figura 7

Por otra parte, la mitad de los proyectos de energía que están ocurriendo en el país también se ubican en la región de Antofagasta. Eso es un dato muy relevante y habría que observar cuáles son los efectos positivos y negativos, que se generan cuando hay una concentración tan alta de proyectos en dos sectores que son bastante complementarios, en los cuales hay ciertos niveles de disputa en términos de recursos o podrían ser conflictuados por recursos que se requerirán por ambos y que se van a dar en un mismo territorio (Figura 8).

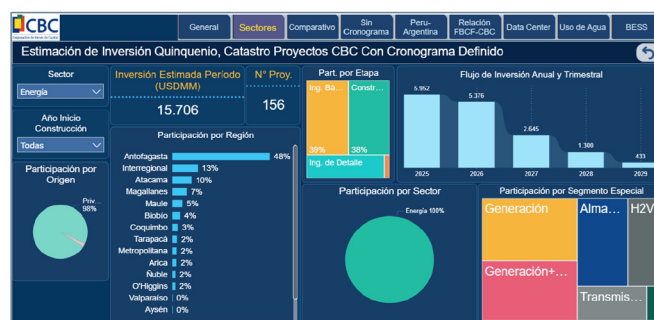


Figura 8

Voy a volver al tema minero, ya que quiero remarcar ese punto con el tema de Antofagasta. Fijense que el 88% de la inversión en proyectos de minería es privado y el 12% es estatal, básicamente de CODELCO. Particularmente este quinquenio, una vez que se resolvió el tema del Royalty, la inversión privada inmediatamente definió muchos cronogramas de proyectos que probablemente iban a tener que hacerse de todas maneras, porque nuestra cartera hoy

día de proyectos todavía está muy marcada por proyectos del tipo Brownfield, es decir, que están sobre operaciones existentes, particularmente reposiciones grandes de capacidades y ampliaciones de capacidades de proyectos existentes (Figura 9).

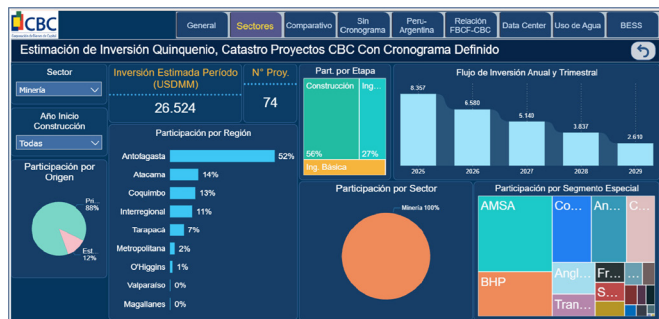


Figura 9

Otro elemento importante corresponde a los actores que están detrás de estos 26.000 millones de dólares.

En este catastro, AMSA, Antofagasta Minerals, es el actor más relevante, con una participación cercana a un cuarto de lo que se está haciendo en minería hoy, con casi 7.000 millones de dólares.

Le sigue BHP Billiton, con un 15% de participación y alrededor de 4.000 millones de dólares. Luego sigue siendo muy importante Codelco, con más de 3.000 millones de dólares.

En general todas las Compañías están en procesos de inversión relevantes, Angloamerican, con su participación, particularmente en los Bronces Integrados. Capstone, en el norte también, con inversiones del orden de los 2.000 millones de dólares; Anglo Glencore, en Collahuasi. SQM continúa como un actor permanente de inversión para este quinquenio.

Yo haría solamente el alcance de que es probable que BHP Billiton vaya incrementando su participación de manera progresiva en los próximos trimestres y años, porque la empresa había anunciado a fines del año pasado un programa de inversión por sobre los 13.000 millones de dólares, que nosotros hemos ido hasta ahora catastrando de acuerdo a cómo se han ido distribuyendo estos 13.000 millones de dólares, en distintos tipos de iniciativas. Por lo tanto, en

la medida que esa cartera vaya definiendo cronogramas, es probable que vaya incrementando la participación de BHP Billiton en la proyección de inversión de los próximos cinco años.

Y algo parecido debería pasar con CODELCO, que viene con un nivel de inversión muy alto que hizo posible su continuidad operacional, particularmente en Chuquibambilla, Teniente, Andina, y es probable que en los próximos trimestres y años vuelva a ejecutar un ciclo de inversión alta, no sólo en estas mismas divisiones, sino que también en otras operaciones que requieren mantener o ampliar capacidad (Figura 10).

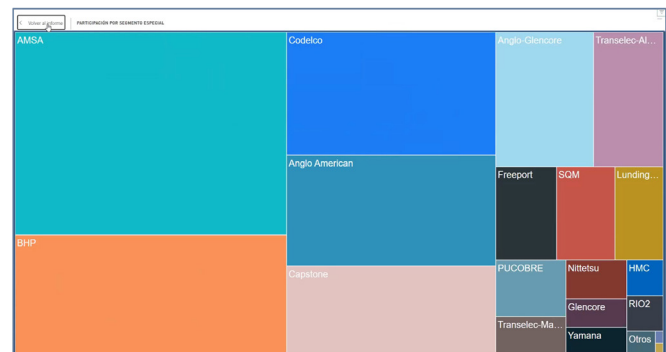


Figura 10

La información está también con nivel de detalle en los proyectos, pero yo creo que no nos da el tiempo para que los revisemos todos; particularmente es el modelo con el cual nosotros trabajamos, que siempre visualizamos cada proyecto e identificamos la inversión total. Pero también para nosotros es muy importante identificar la inversión del período más que la inversión total, porque el proyecto puede estar terminando y si le sumamos la inversión total, más de la mitad de ese gasto ya está ejecutado y podría generar confusión y eso hace la diferencia con otro tipo de información que pueda circular de otras fuentes.

Para nosotros es muy importante entender cuándo está programado el inicio y el fin de la construcción, porque eso justamente define la simultaneidad de los proyectos. No es lo mismo analizar una cartera total sin saber si el proyecto está terminando, o está partiendo o cuánto le queda, porque después analizamos los traslapes de proyectos que es muy importante para definir con mayor certeza los requerimientos de mercado, tanto de la ingeniería

como también después de los contratos de construcción y abastecimiento de bienes y servicios para ese proceso, e incluso las puestas en marcha también (Figura 11).

Id	Nombre Proyecto	Empresa Mandataria	Inversión Total MMUSD	Inversión Periodo	Región	Tipología	Estado S.	Construcción	Bilatorna_Cronograma	
1319	PROYECTO OLIVERO MELI ANEL EN NORTE	COMPAÑIA NACIONAL DEL COBRE DE CHILE	7.942	90	Chagres	Complejo minero subterráneo	Aprobado	01/03/2017	31/12/2025	El Proyecto se encuentra en Construcción hasta el año 2025, por el espacio hasta el Cierre de los trabajos de una explotación de 15 años.
13145	VII EL LAVALINALE CAVERN	COMPAÑIA NACIONAL DEL COBRE DE CHILE	80	11	Metropolitana	Tronque de relevos	Aprobado	01/09/2021	20/02/2028	El proyecto continúa en fase de Construcción.
14001	EL ESPINO	COPI	700	503	Copiapó	Desarrollo de Minas	Aprobado	01/09/2004	30/11/2025	El Proyecto se encuentra en Construcción operaciones para el año 2026.
14015	PROYECTO SANTO DOMINGO S.C.M.	MINERA SANTA DOMINGO S.C.M.	2.300	2.304	Atacama	Complejo minero de superficie	Aprobado	01/01/2007	30/06/2029	Según la actualización de datos, se espera que el proyecto se termine después del año 2028.
15046	MEJORAMIENTO DE LA GENERACION, TRANSPORTE Y DISTRIBUCION DE RECURSOS ANONIALES DE DIVISION EL TRONQUE	COMPAÑIA NACIONAL DEL COBRE DE CHILE	14	8	Chagres	Obras constructivas para la minería	Aprobado	03/04/2003	30/04/2025	El proyecto se encuentra terminado.
17060	MINISABERINERAZ DE MAYO DE CASO DE PLOMO PRODUCCION A RTM	COMPAÑIA MINERA SODIPAC	25	2	Copiapó	Obras de desarrollo de mina	Aprobado	05/09/2018	31/06/2028	El proyecto continúa en etapa de construcción en el año 2025, en línea con la programación de 2025.
17044	MINERA CENTINELA	MINERA CENTINELA	4.000	2.770	Antofagasta	Planta mineral de cobre subterráneo	Aprobado	01/09/2004	30/06/2027	El Proyecto se encuentra en fase de construcción, se prevé el inicio de operaciones en el año 2027, mantenimiento (o cronograma) de 15 años.
17074	PLANTA DE PRODUCCION DE GEOLÓGICOS 2016-2028	COMPAÑIA NACIONAL DEL COBRE DE CHILE	58	4	Chagres	Procesamiento Minero	Aprobado	01/09/2006	30/04/2028	El Proyecto se encuentra en fase de construcción, se prevé el inicio de operaciones en el año 2025.
18000	EXTENSION DE ANCHOS DE CARRILES DEL CUMES Y PLANTA DE	COMPAÑIA NACIONAL DEL COBRE DE CHILE	16	5	Vaporiales	Obras constructivas para la minería	Aprobado	01/11/2001	31/12/2028	El Proyecto se encuentra en ejecución LO para la minería.
18002	DISTRIBUCION CENTRALIZADA DE RECURSOS MINERALES PELIGROSOS EN MINERIA REGIONAL	MINERA SODIPAC LTDA.	7	2	Antofagasta	Obras constructivas para la minería	Aprobado	04/03/2018	31/12/2021	De acuerdo a los antecedentes de la SUE se prevé el inicio de construcción del sistema de distribución de la línea de construcción del sistema de operación por lo que la duración será de 15 años.
18017	PLANTA DE SALICILATO DE SODIO MORTE COQUELCO, E.M.V.A	AGUAS FERRONIC SPA	1.000	107	Antofagasta	Obras (plantas de tratamiento) (bioremediación)	Aprobado	10/05/2010	20/02/2028	El Proyecto se encuentra en construcción operaciones en el año 2025.
18048	CONTINUIDAD OPERACIONAL DIVISION SALVADOR	COMPAÑIA NACIONAL DEL COBRE DE CHILE	62	7	Atacama	Desarrollo de Minas	Aprobado	03/02/2000	10/03/2028	El Proyecto se encuentra en línea con la programación de 2025.
18049	OPTIMIZACION DEL FLUJO DE RECURSOS SUBSISTEMAS Y OBRAS ANONIAS	MINERA CENTINELA	506	106	Antofagasta	Tronque de relevos	Aprobado	03/09/2018	31/12/2021	El Proyecto se encuentra ejecutando en línea con la programación de 2025.
				26.224						

Figura 11

También somos bien rigurosos en seguir las bitácoras de los proyectos cada tres meses y las descripciones. Por lo tanto, este es un modelo vivo que cada tres meses se va actualizando y que nos permite entregar esta información oportunamente a estas 200 empresas que son socias de la corporación y también se lo entregamos a las instituciones públicas y privadas mencionadas al inicio (Figura 12).

Contribución	Construcción	Bilatorna_cronograma	Objetivo
01/03/2017	31/12/2025		El Proyecto se encuentra en Construcción, se prevé el inicio de las operaciones para el año 2026, según los antecedentes oficiales, según la programación de inversión del proyecto se termina después del año 2028.
01/09/2021	20/02/2028		El Proyecto continúa en fase de Construcción, se prevé el inicio de las operaciones en el año 2027, mantenimiento (o cronograma) de 15 años.
01/09/2004	30/11/2025		El Proyecto se encuentra en Construcción, se prevé el inicio de las operaciones para el año 2026, según los antecedentes oficiales, según la programación de inversión del proyecto se termina después del año 2028.
01/01/2007	30/06/2029		Según la actualización de datos, se espera que el proyecto se termine después del año 2028.
03/04/2003	30/04/2025		El proyecto se encuentra terminado.
05/09/2018	31/06/2028		El proyecto continúa en etapa de construcción, con finalización estimada para el año 2026, en línea con la programación de 2025.
01/09/2004	30/06/2027		El Proyecto se encuentra en fase de construcción, se prevé el inicio de operaciones en el año 2027, mantenimiento (o cronograma) de 15 años.
01/09/2006	30/04/2028		El Proyecto se encuentra en fase de construcción, se prevé el inicio de operaciones en el año 2025.
01/11/2001	31/12/2028		El Proyecto se encuentra en ejecución, se prevé el inicio de las operaciones para el año 2026, según los antecedentes oficiales, según la programación de inversión del proyecto se termina después del año 2028.
04/03/2018	31/12/2021		De acuerdo a los antecedentes de la SUE se prevé el inicio de construcción del sistema de distribución de la línea de construcción del sistema de operación por lo que la duración será de 15 años.
10/05/2010	20/02/2028		El Proyecto se encuentra en construcción, se prevé que la planta comience operaciones en el año 2026.
03/02/2000	10/03/2028		El Proyecto se encuentra en línea con la programación de 2025.
03/09/2018	31/12/2021		El Proyecto se encuentra ejecutando en construcción, con la fecha prevista de término estimado para el año 2021.

Figura 12

Vamos a revisar ahora el área de energía y aquí me voy a empezar a referir algunos temas que yo creo que pueden ser bien interesantes para ustedes también. Ya lo habíamos visto, del orden de 15.000 o 16.000 millones de dólares (Figura 13).

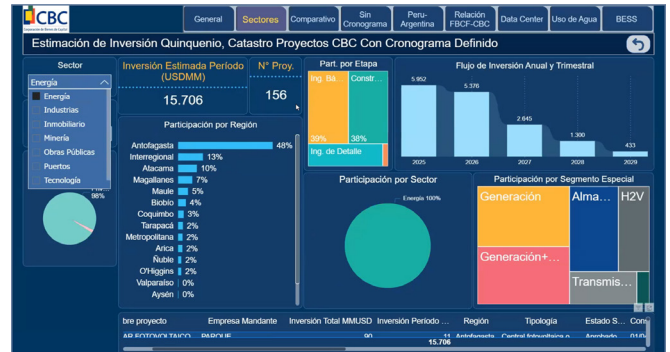


Figura 13

En primer lugar, alrededor de un cuarto de mostrado corresponde a proyectos de generación, que en casi su totalidad son generaciones ERNC; nosotros venimos con un proceso de recambio de nuestra matriz de energía eléctrica. En casi diez años ha habido un crecimiento a una velocidad muy importante y yo diría que es de las más importantes que han ocurrido en el mundo desde el punto de vista de transformación.

Nos falta ahora salirnos de la matriz eléctrica y avanzar hacia los procesos de gasto energético en total, todo el tema de transporte, electromovilidad o cómo ciertas industrias todavía se abastecen no necesariamente de energía eléctrica, sino que también de otras fuentes de gasto energético, particularmente térmico convencional.

Ahora, es importante indicar que la recuperación de la inversión en energía se ha dado fundamentalmente por este concepto que está aquí al lado, el almacenamiento, con tecnología BESS. Fijense que el 26% de estos 15.000 millones, o sea, más de 3.000 millones de dólares están considerados en proyectos que están única y exclusivamente destinados al tema de almacenamiento, donde una de las debilidades, sobre todo de la generación solar, tiene que ver con su capacidad de poder inyectar al sistema las 24 horas.

Felizmente, esto a nuestros asociados se lo pudimos anticipar hace un par de años atrás, cuando teníamos las carteras ya iniciales de proyectos BESS y particularmente cuando estaban en su ingeniería y definiendo cronogramas. Y yo diría que ahora, nosotros, con mucho orgullo, podemos decir que esa tendencia de lo que estamos viendo hoy día, fuimos capaces de anticiparla hace un par de años atrás.

Ahora, donde todavía estamos con debilidades es en el tema de transmisión.

Chile, para poder seguir creciendo en su configuración energética, en ERNC con mayor participación, tiene uno de sus cuellos de botella en la transmisión. Y aquí estamos un poquito atrasados y en riesgo, porque uno de los proyectos principales, que es el Kimal – Lo Aguirre, todavía está con un proceso de tramitación ambiental bastante complejo, pero, aun así, terminado este proyecto, se requieren más proyectos de transmisión para poder habilitar una capacidad muy alta que tenemos de generación y almacenamiento de energías renovables no convencionales.

Respecto a la cartera de proyectos de hidrógeno verde, en este catastro incluye el gasto de los proyectos que están particularmente en tramitación en el sistema de evaluación ambiental y no son más de tres proyectos.

La cartera de hidrógeno verde es una cartera bastante amplia, hay más de 74 proyectos catastrados, pero lo concreto, cuando uno mira esos proyectos, la probabilidad de que una cantidad importante de esos proyectos se ejecute en el quinquenio sigue siendo baja todavía y diría que va a depender fundamentalmente de los primeros proyectos que se logren ejecutar en los tiempos que se están indicando y, particularmente, si la industria logra resolver los principales problemas que tiene. La rapidez de desarrollo de esta industria tiene que ver básicamente con el precio de producción respecto al hidrógeno gris, que hoy día se transa a nivel mundial. Si no hay restricciones a eso, va a tener que seguir buscando cómo desarrollar productos a un menor precio, así como la solución de algunas complejidades técnicas que también están definidas para algunos de sus productos.

Por lo tanto, también hay temas de envergadura, que se tienen que resolver desde el punto de vista de la integración con otros sistemas, energéticos, portuarios, logísticos; por lo tanto, nosotros observamos que la cartera de proyectos de hidrógeno verde de este orden podría ser razonable para el quinquenio siguiente, mucho más que el actual, de acuerdo con la cartera (Figura 14).

Ahora, me voy a referir, para que no se nos pase el tiempo, a obras públicas, que creo que es muy importante, porque este sector tiene algunas particularidades. Estamos hablando de 328 proyectos, de los cuales el 40% está concentrado en

la región Metropolitana, pero el de obras públicas es un sector que se distribuye a nivel nacional, por lo tanto, es muy importante desde ese punto de vista, porque sustenta la inversión, sobre todo en las regiones más pequeñas, y constituye prácticamente toda la que se desarrolla en esos territorios (Figura 15).

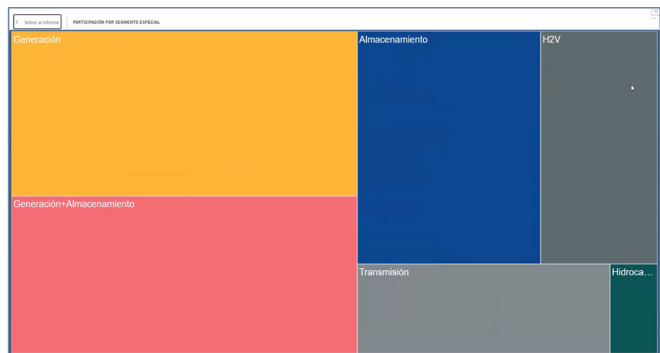


Figura 14

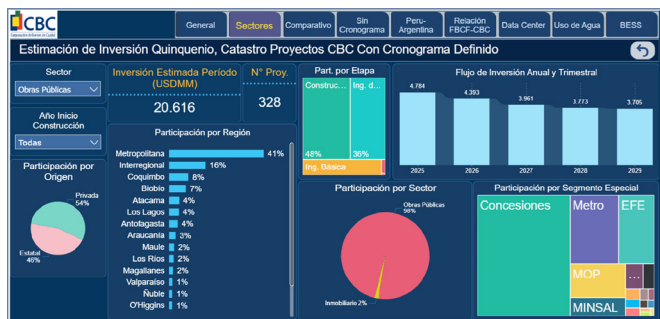


Figura 15

Ahora, yo diría que son muy relevantes dos elementos. El primero, que la mitad de lo que se debería hacer en los próximos cinco años corresponde a proyectos concesionados, es decir, con inversión privada en obras públicas. Son proyectos que tienen que ver con concesiones viales, de infraestructura hospitalaria, carcelaria, aeroportuaria.

Yo diría que lo relevante es la proporción. Hacia atrás hemos venido creciendo desde un 30% en concesiones, particularmente estoy hablando de este periodo de gobierno, hacia lo que va el cierre de este gobierno y el inicio del próximo, creciendo hacia un 50%. Eso es muy importante.

Ahora, el segundo punto distintivo, es la inversión que está haciendo Metro y EFE. Fijense que Metro es un inversor

estatal muy continuo y de los mayores a nivel de empresas individual en el país y eso ha sido transversal en todos los Gobiernos, Pero fíjense que EFE está con un nivel de inversión casi equivalente al de Metro.

Adicionalmente, yo diría que muy importante es lo que ha sido el Ministerio de Salud.

Este Ministerio ha venido invirtiendo mucho, y va a seguir invirtiendo mucho dinero en los próximos cinco años. Lo mismo se ve para el Ministerio de Vivienda y Urbanismo y otros, en todo lo que tiene que ver con obras sanitarias y los municipios (Figura 16).

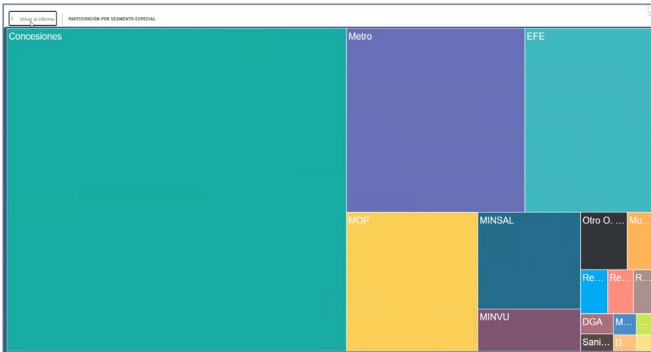


Figura 16

Obras Públicas debería estar gastando este año del orden de los 5.000 millones de dólares, y para los próximos años ya tiene comprometidos, a través de los cronogramas de sus proyectos, del orden de los 4.000 millones de dólares.

Por eso, cuando yo les decía al principio, el quinquenio está sustentado en sectores fuertes. Porque minería, cuando toma la decisión de inversión, es muy difícil que vuelva atrás, y pasa algo muy similar en el caso de obras públicas, y esto está justamente refrendado por este tipo de información que tenemos. Imagínense que para el año 2028 o 2029, son cerca de 4.000 millones de dólares. Por lo tanto, la probabilidad de que esto pudiese mantenerse a un súper buen nivel en los próximos años es bastante alta, porque es difícil que esos proyectos vayan a caer (Figura 17).

Voy a avanzar ahora hacia el tema inmobiliario, que yo diría que está básicamente en la región Metropolitana y es un sector que ha estado golpeado en los últimos años (Figura 18).

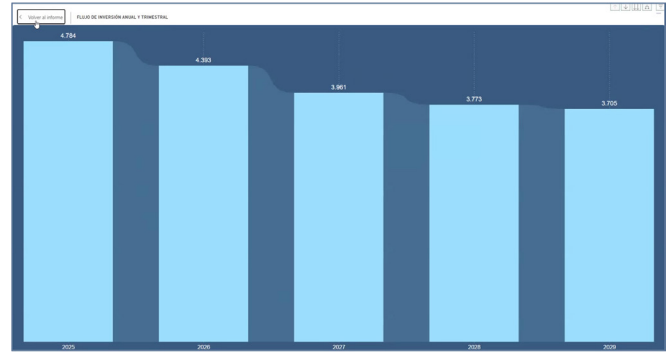


Figura 17

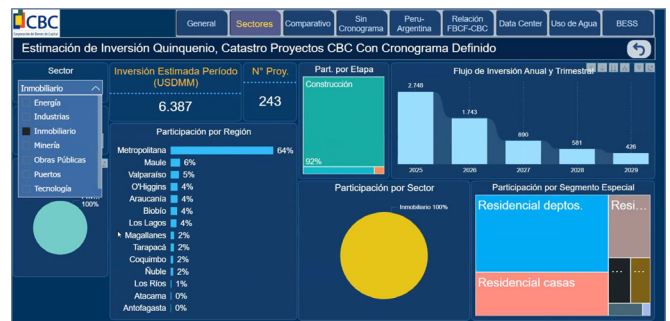


Figura 18

Particularmente ahora está teniendo algunos indicios de recuperación en las áreas residenciales en departamentos y casas, pero sobre todo en departamentos con subsidios que se implantaron en los últimos meses, y podría tener algún efecto importante en alguna recuperación parcial, no total, en este sector, fundamentalmente para el próximo año.

El sector inmobiliario, al igual que el sector industrial, se mueve de manera bastante elástica respecto a las expectativas político-económicas del ambiente local o nacional. Por lo tanto, diría que eso, junto a una reconfiguración que hubo del modelo después de la pandemia, lo ha tenido todavía con una capacidad bastante más baja. Algo también podría mejorar respecto a temas de infraestructura comercial y oficinas, algo que se está viendo en la zona oriente de Santiago.

Por lo tanto, yo diría que podría tener recuperación progresiva en la medida que esa percepción de mejoría en términos político-económicos del país pudiese ser tomada por un nuevo impulso para este sector y, particularmente, también si se mantiene el tema de los subsidios que se han visto en los últimos meses (Figura 19).

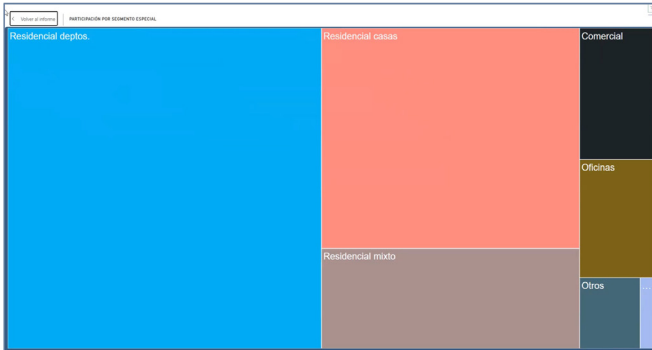


Figura 19

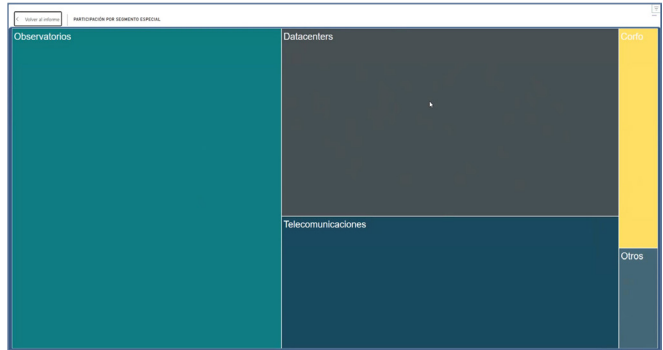


Figura 21

Lo mismo pasa con el sector de la industria, que es también bastante elástico. Diría que nosotros tenemos catastrados pocos proyectos grandes, del orden de los 2.300 y el más grande está vinculado a un proyecto de agua desalada en Atacama, un proyecto muy grande que influye mucho en la cifra, pero el resto está bastante limitado todavía.

Cuando hablamos de industrias estamos hablando de industria salmoneira, industria agroalimentaria, manufacturera, pero que está también con algún nivel de disminución de dinamismo respecto a lo que hemos tenido en la historia, pero esto es un tema que ya viene desde hace muchos años atrás (Figura 20).

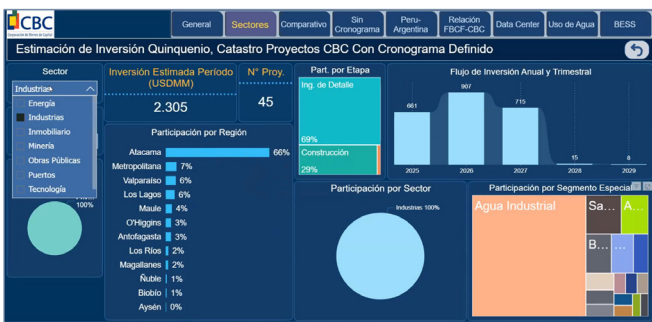


Figura 20

En tecnología, muy brevemente, está sustentado básicamente en los temas de observatorios astronómicos que todavía nos quedan, y me voy a referir particularmente después al tema de la data center. Diría que aquí hay un potencial muy alto y hay temas de ingeniería que resolver. Creo que en los data center, con el potencial que tenemos, hay que mirarlo con la ingeniería local (Figura 21).

Y me voy a referir a estos temas más puntuales, al de data center, desalación y almacenamiento, yo creo que ahí hay oportunidades grandes desde el punto de vista de cómo hacer una profundización en los temas de ingeniería (Figura 22).

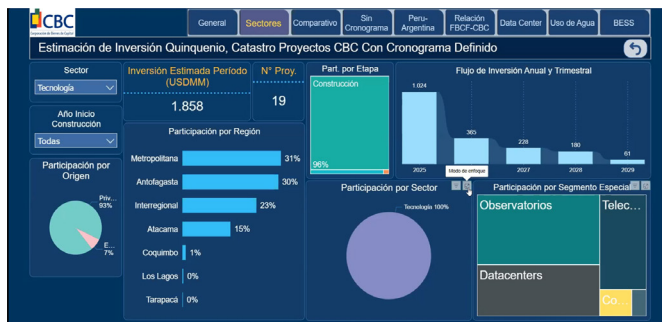


Figura 22

Por ejemplo, el tema de los data center. En data center, hay 37 proyectos en nuestro catastro que están sumando del orden de los 5.000 millones de dólares (Figura 23).

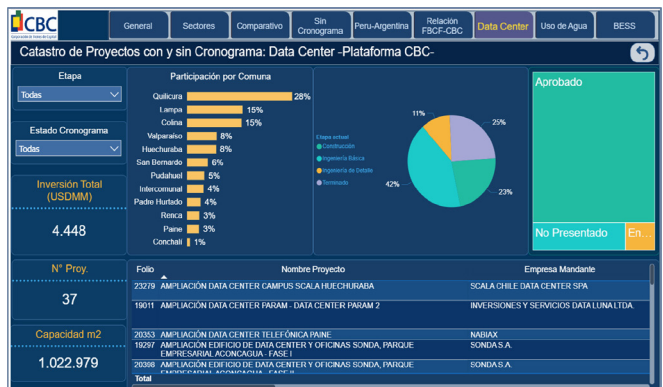


Figura 23

Nosotros tenemos catastrados 15 grandes que se han terminado en los últimos años (Figura 24).

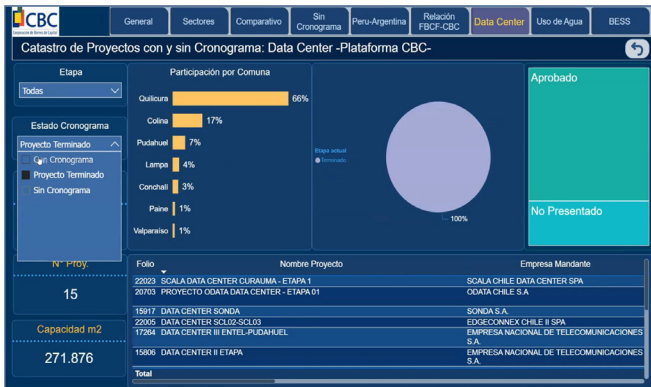


Figura 24

Por lo tanto, ya tenemos casi la mitad que está terminada y nos quedan alrededor de 17 que estarían por construirse (Figura 25).

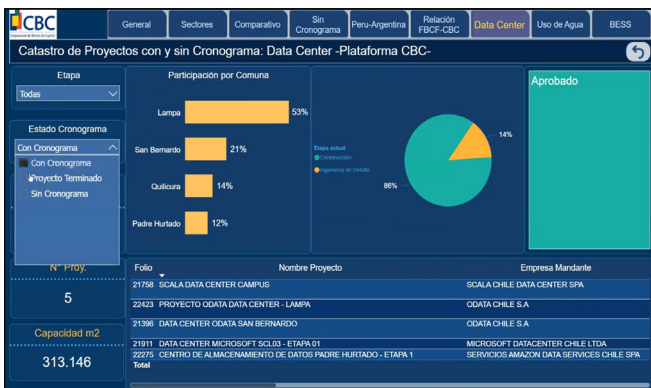


Figura 25

Por lo tanto, tenemos alrededor de 17 proyectos que están sin cronograma (Figura 26).

Hoy día, el potencial de construcción o de instalación de data center en Chile es bastante alto. Pero también hay que ir resolviendo el problema de lo que significa, primero, la concentración que se está dando en ciertas comunas, como Quilicura, Lampa, Colina, y los problemas ambientales que han comenzado a aparecer respecto al uso de agua y los procesos de enfriamiento de estos data center.

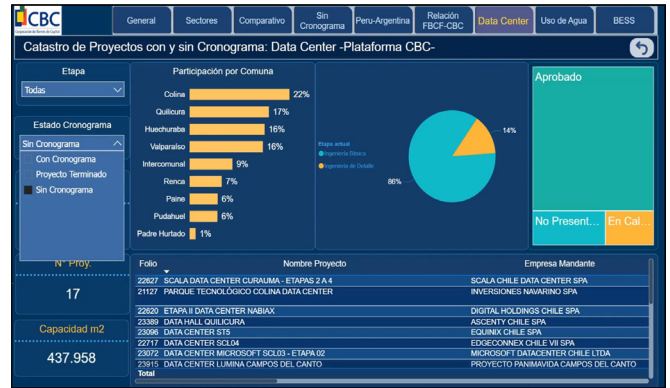


Figura 26

Yo creo que eso, de manera agregada, no necesariamente está bien resuelto. A lo mejor, puntualmente está bien resuelto, proyecto a proyecto, pero desde la lógica agregada yo creo que ahí tenemos un desafío para nuestras capacidades de ingeniería (Figura 27).

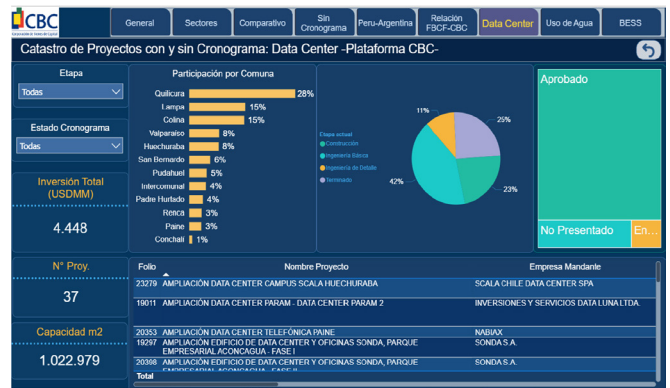


Figura 27

Algo parecido está pasando en la industria de proyectos de almacenamiento BESS. Fíjense que nosotros también tenemos catastrado un orden de 377 proyectos, de los cuales ya con cronograma tenemos 42. Por lo tanto, sin cronograma tenemos un potencial muy grande de proyectos en los cuales hay participación de sistemas BESS, que cuando uno los mira particularmente uno a uno, efectivamente no hay ningún problema, pero cuando uno empieza a mirar los niveles de concentración y los impactos que podría generar la operación simultánea de todo esto con el potencial que tenemos, creo que esos temas no necesariamente los hemos visto de manera tan explícita (Figura 28).

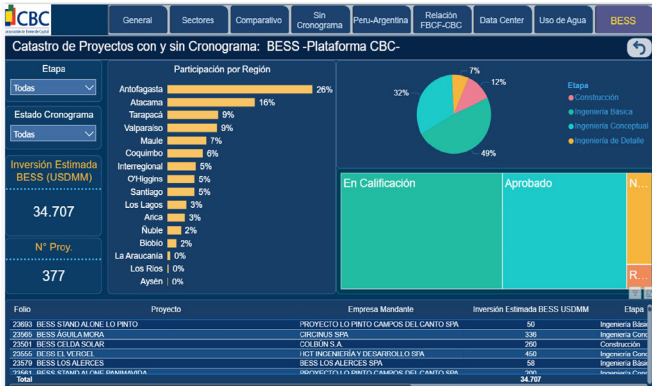


Figura 28

Y también me voy a referir brevemente para poder dar paso a las preguntas, a lo que está pasando con el tema del uso del agua.

En el uso del agua, tanto a nivel de desaladoras como de reutilización de agua y transporte de agua, fijense que nosotros tenemos un potencial muy alto de desalación de agua, con más de 4.000 kilómetros de costa, pero también de reúsos de agua en industrias como la minería particularmente y transporte de agua de un lugar a otro, que hay que mirarlo también de manera agregada.

Estas tres últimas tipologías de proyectos las estoy planteando desde la lógica del desafío de mirar su potencial, de ver la oportunidad de la instalación en ciertos territorios y cuáles son los desafíos que debemos resolver para que no se generen cuellos de botella, pero también desde el punto de vista de cuáles son las posibilidades que tenemos para ocupar estos sistemas de manera mucho más sinérgica con nuestro desarrollo futuro como país (Figura 29).



Figura 29

En el caso del tema del agua, hoy día, de los 51 proyectos hay 10 -que están en construcción, por lo tanto, tenemos un potencial muy alto con los que vienen (Figura 30).

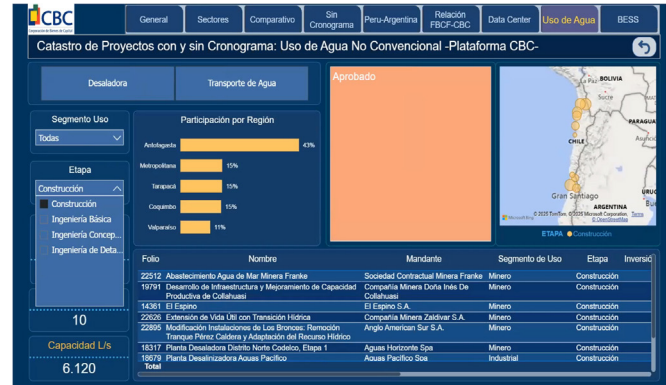


Figura 30

La mitad de los que restan corresponden a proyectos de hidrógeno verde y es probable que no necesariamente se vayan a dar todos esos proyectos dentro de este quinquenio. Pero uno podría ir viendo cómo estos proyectos podrían ir generando un modelo, que vaya anticipando lo que va a venir en el hidrógeno, pero con algunas utilidades mixtas. Yo creo que ahí hay un desafío (Figura 31).

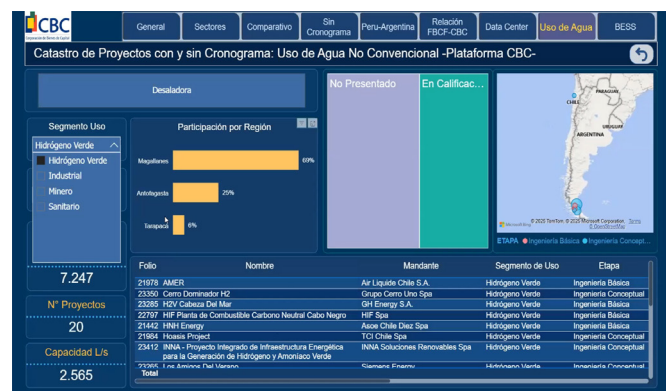


Figura 31

En todo lo que tiene que ver con el uso industrial del agua desalada, fundamentalmente, creo que tenemos un potencial alto.

Si nosotros combinamos el tema energía, resolviendo temas de transmisión, de desalación, más los temas de

almacenamiento, tenemos un potencial importante para hacer cosas distintas a las que hacemos hoy día y que nuestra matriz de proyectos de inversión no sea solamente minería, obras públicas, energía, sino que podamos a lo mejor ampliar.

Ahí hay un tema importante de mirar como país, que desde el punto de vista de la ingeniería se podría hacer un aporte importante (Figura 32).

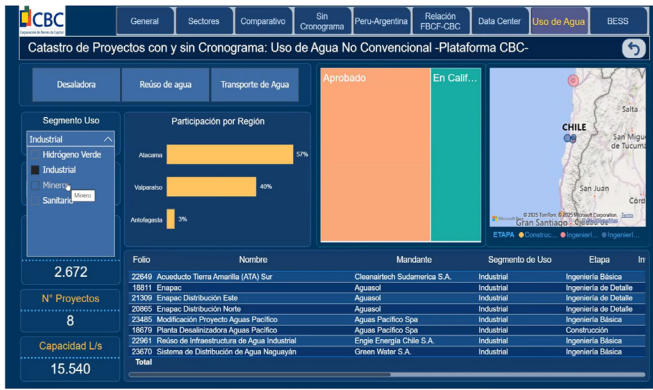


Figura 32

Y solamente para establecer los proyectos que están sin cronograma habíamos hablado de que teníamos 800 proyectos o casi 900 con cronograma.

Bueno, tenemos casi 1.400 sin cronograma. Son estos los que podrían eventualmente ser parte de los futuros proyectos. Y eso suma 240.000 millones de dólares.

Si tenemos con cronograma 74.000 millones, tenemos dos veces más en proyectos y tres veces más en dinero de proyectos que están sin cronograma y que podrían ingresar (Figura 33).

Si consideramos los que están en procesos de calificación de estos 1.300 proyectos, tenemos un 20% ya aprobados y un 37% en calificación, es decir, casi un 60% de la cartera. Con eso, tenemos un quinquenio más al menos, i.e., 960 proyectos y casi dos quinquenios en realidad, de los que están solamente aprobados o en calificaciones. Es decir, se trata de proyectos que están activos, aunque en fases iniciales y que pueden alimentar dos quinquenios más de inversiones. Entonces, ahí hay un desafío enorme.

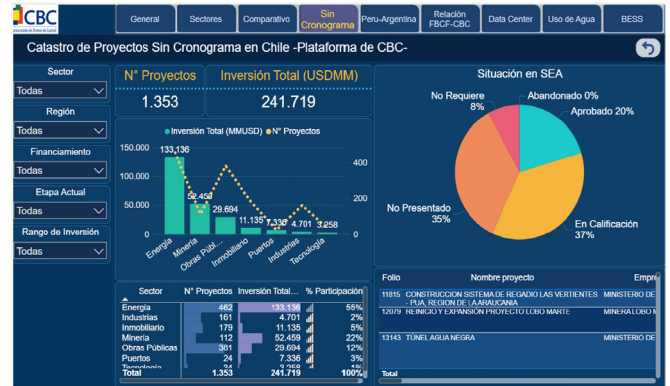


Figura 33

Y lo planteo primero porque la mitad de esos son proyectos de energía. Tenemos capacidad de potencial energético muy alto. Si esto lo combinamos con el tema del agua y desalación, si lo vamos combinando con el tema data center, probablemente, u otros usos industriales, uno podría decir que ahí tenemos una mirada país que podría aprovechar nuestros recursos y nuestras capacidades para hacer algo adicional, a lo bueno que hacemos hoy día con la minería particularmente como principal sector productivo (Figura 34).

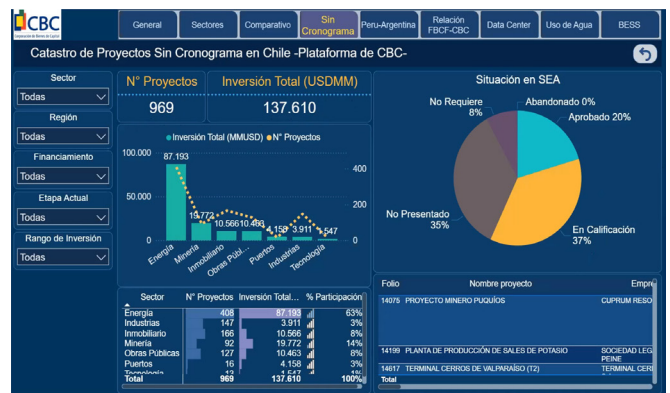


Figura 34

Voy a parar ahí, y quedo atento a las preguntas que surjan de esta presentación.

Muchas gracias por su atención.

Sra. Silvana Cominetti.

—Muchas gracias, Orlando.

En realidad, la cantidad de información es enorme y agradecemos muchísimo la presentación muy completa.

Y uno siente que, con toda esta información, la cantidad de análisis adicionales que se pueden hacer, sobre todo también desde la academia, podríamos abordar muchísimo ciertas áreas o análisis integrados.

A continuación, el Sr. Orlando Castillo responde preguntas y comentarios de los presentes.

Sr. Claudio Castro.

—Al inicio, cuando presentaste el gráfico de Stock quinquenal, ¿Cuáles son las unidades del gráfico?

Sr. Orlando Castillo.

—Eran millones de dólares, correcto. Por lo tanto, en el stock, cuando decía 74.118, eran 74 mil millones de dólares.

Sr. Diego Andrés Jofré Villablanca.

—¿Alguna posibilidad que nos pueda compartir el link del Power BI? Excelente trabajo y exposición.

Sr. Orlando Castillo.

—Hay una parte no completa, que no tengo yo, porque esta información nosotros se la entregamos a nuestras empresas socias que pagan una suscripción por esta entrega de información, pero hay una parte que sí nosotros la tenemos pública en nuestra página web.

Por lo tanto, yo diría que hay una buena parte de la información general que yo he presentado hoy día, que está en nuestra página web y que es de uso público, así que ahí pueden estar observando permanentemente la información.

Así que ahí pueden ir a www.cbc.cl y hay una pestañita que indica que pueden acceder a un Power BI que tenemos permanentemente.

Sr. Jorge Pedrals.

—Los datos que se muestran ¿tienen una comparación ex post, respecto de lo que realmente se construyó en cada periodo?

Sr. Orlando Castillo.

—Sí, cada cierto tiempo hacemos ese análisis, no lo tenemos en evaluación permanente, lo hemos hecho de manera ex post cada cierto tiempo. Y yo diría que anda bastante bien, las previsiones nuestras son bastante buenas. Yo diría que se mueven, así como banda de control entre el 85% y el 105-110%. Por lo tanto, tiene más o menos 15% de diferencia al final del quinquenio, lo que se hizo respecto a lo que nosotros habíamos ido indicando cuando uno lo mide la información al último trimestre de cada año.

Entonces, deberíamos medir a finales de 2025 cuánto habíamos proyectado al inicio o al fin del año pasado y los vamos sumando y da más o menos 15% de diferencia.

Y la diferencia yo diría que tiene que ver básicamente con proyectos que en algún rato se alargan un poco más. Por otro lado, casi nunca entran antes, pero básicamente con que se alargan más y otros que van subiendo montos en el proceso de construcción. Eso explica las diferencias.

De hecho, yo diría que para nosotros el principal indicador de calidad lo da el trabajo que hace el Banco Central con nuestros datos en sus informes de política monetaria. En este, como en las presentaciones como en el informe digital que ellos entregan, toda la información vinculada a proyectos de inversión es la que recogen de CBC.

Sr. Diego Andrés Jofré Villablanca.

—¿Me llama la atención la poca inversión que tenemos en la región de Valparaíso 0%? siendo que tenemos los proyectos como la futura mina Vizcachitas y Codelco Andina.

Sr. Orlando Castillo.

—Correcto, tal como lo mencioné, esta información saca la fotografía del estado en los proyectos al 30 de junio.

En el caso de Vizcachitas, es un proyecto grande, que incluso anunció miles de millones de dólares en términos de lo que podría ser su construcción, está en ingeniería en este rato y ni siquiera ha ingresado al sistema de valoración ambiental, por lo tanto, está sin cronograma.

Lo que suma a esta cuenta es solamente lo que podría estar gastando en ingeniería. Entonces, claro, si en algún momento, por ejemplo, ingresa al sistema de evaluación ambiental y define cronograma, se incluirá en las cifras de gasto quinquenal.

Sr. Felipe García.

—¿Modifica la inversión de Codelco el accidente de El Teniente?

Sobre el uso de agua recuperada, ¿existen desafíos normativos o hay certeza jurídica? ¿Qué hay sobre los negocios no regulados de las empresas sanitarias?

Sr. Orlando Castillo.

—Claro, tengo más competencia y más antecedentes en el primer punto que en el segundo.

La semana pasada tuvimos la entrega de un premio CBC a dos empresas socias que han tenido participación relevante en proyectos de inversión.

Voy a pasar el aviso, Echeverría Izquierdo con su participación en el Rajo Inca, en el overhall de toda la planta concentradora y también el complejo portuario de Mejillones con TGN, con terminales en el norte, también vinculado a Codelco con un terminal automatizado marítimo. Y estuvo en esa oportunidad Máximo Pacheco; él mencionó el impacto que había tenido en la continuidad operacional de El Teniente, se ha hablado por sobre 400 millones de dólares de impacto en términos de la continuidad operacional, atraso de producción de más de 40.000 toneladas de cobre fino. Pero dijo que lo habían recuperado de otras divisiones.

Y respecto al tema del agua, yo diría que tenemos una asociación, un convenio de colaboración con ACADES, que es la Asociación Chilena de Desalación y Reúso de Agua, y ellos están permanentemente trabajando el tema regulatorio, legal, y los hemos escuchado que es un tema todavía no totalmente resuelto, y que es parte de la discusión y donde ellos quieren hacer ciertas intervenciones.

Sr. Alejandro Steiner.

—Excelente presentación. Particularmente en los años anteriores, ¿cómo se compara esta inversión con el PIB del país?

Sr. Orlando Castillo.

—Cuando uno habla de inversión, nosotros no estamos hablando de la inversión total que ocurre en el país, que es alrededor de un 20-25% del PIB total, cuando uno habla de formación bruta y capital fijo. Pero lo que nosotros podemos observar acá (estoy compartiendo un gráfico que tiene que ver con nuestra información respecto a la formación bruta y capital fijo), nuestra información de proyectos de inversión es alrededor de un 25%, en promedio, diría que un 25% de la formación bruta y capital fijo, es decir, desde el indicador completo de inversión nacional (Figura 35).

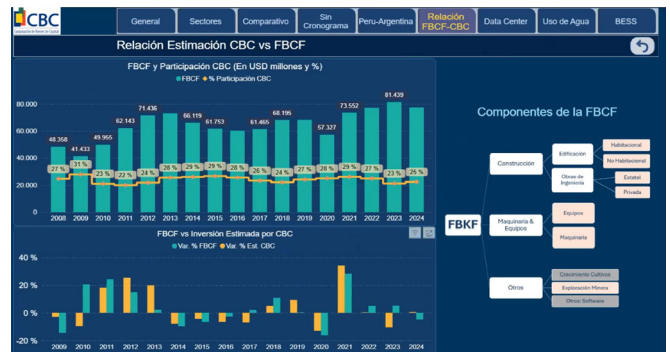


Figura 35

Sra. Gloria Hutt.

—En obras públicas existen aproximadamente 10.000 millones de dólares de proyectos adjudicados, no iniciados, desde 2020. ¿Cómo se verifica el impacto de esa demora que es creciente?

Algunos proyectos están alcanzando 8 a 10 años para comenzar obras, esa demora impide que la inversión se transforme en actividad económica.

La inversión de EFE es parte de un plan de inversión de 5.000 millones de dólares desde 2013, incluye alcanzar el equilibrio operacional aproximadamente en 2028, no es solo inversión de los dos últimos años.

Sr. Orlando Castillo.

—Sí, yo diría que particularmente el tema de obras públicas es cierto, al principio sobre todo de este gobierno, hubo algún retraso importante en la concreción de los proyectos que ya venían en cartera, particularmente del sistema concesionado, y yo diría que ya a mitad del gobierno se hizo un esfuerzo más grande que nosotros lo fuimos notando en el crecimiento de los procesos de adjudicación. Creo que el gran desafío que tiene cualquier gobierno, y particularmente el que viene, es justamente que estos procesos sean muy ágiles, porque obviamente corresponde a una infraestructura habilitante en la mayoría de los casos, y si eso se retrasa, obviamente el impacto que tiene en el desarrollo de proyectos vinculados es muy relevante.

Y en el caso de EFE, sí, yo diría que sí, es cierto, es un plan que es como metro, grande, y que nosotros observamos en los datos de gasto ya estimado que se ha dado en el último periodo, y se continúa hacia adelante. Hubo proyectos de

EFE que tuvieron mucho rato sin un avance sostenido y yo diría que hemos observado en los últimos años un avance sustantivo, en ese programa de inversión.

Sra. Silvana Comminetti.

—Bueno, queremos agradecer muchísimo la conferencia y de verdad es importante la cantidad de información de la que dispone la Corporación de Bienes de Capital.

Sr. Juan Carlos Barros.

—Muchas gracias, Silvana, por hacerte cargo de las preguntas y muchas gracias, Orlando, por la presentación. La verdad es que nos quedó una visión muy clara de lo que se espera para los próximos cinco años. Y aquí lo único que queda es tener optimismo en que las cifras se están recuperando.

Estamos viendo cifras de inversión que no veíamos hace muchos años. Y muchas felicitaciones por el trabajo que realiza la Corporación.

Sr. Orlando Castillo.

—Muchas gracias, Juan Carlos por la invitación.

Fin de la conferencia.

PLAN NACIONAL SUMO PRIMERO

Una de las iniciativas educacionales más significativas para el fortalecimiento de la enseñanza de la matemática en Chile

*Sra. Salomé Martínez,
directora del Laboratorio de Educación Matemática del Centro
de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile*

El 27 de noviembre de 2025, se realizó —vía zoom Reuna— la conferencia titulada “Plan Nacional SUMO Primero” a cargo de la Sra. Salomé Martínez Salazar, directora del Laboratorio de Educación Matemática del Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile.

Salomé Martínez Salazar es Ingeniera Civil Matemática de la Universidad de Chile, tiene un doctorado en la Universidad de Minnesota y postdoctorado en Georgia Tech. Es catedrática de la Universidad de Chile y académica del Departamento de Ingeniería Matemática, investigadora del Centro de Modelado Matemático y directora del Laboratorio de Educación de dicha unidad.

Lideró el proyecto “Suma y Sigue: Matemáticas en Línea”, premiado por UNESCO en 2017, y actualmente lidera el Plan Nacional Sumo Primero, que entrega textos escolares a más de 1.300.000 niños y niñas y apoya a docentes en su implementación.

Ha recibido diversas distinciones como: el Premio de Excelencia Científica para Investigadoras Jóvenes (2011), el ingreso a la Academia de Ciencias como miembro titular (2018), la distinción Amanda Labarca (2020), y el Premio a la Ingeniera por Acciones Distinguidas (2024) del Instituto de Ingenieros de Chile, siendo la primera mujer en recibir este reconocimiento.

Ha dedicado su carrera a promover la igualdad de género en ciencia e ingeniería. En 2012 integró la primera Comisión de Igualdad de Oportunidades de Género y participó en la creación del Programa de Equidad de Género en la Universidad de Chile, que hoy inspira el programa “Más Mujeres Científicas”.

Fue la primera directora de Diversidad y Género de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas impulsando iniciativas que promuevan mayor igualdad.

A continuación, su exposición.



Sra. Salomé Martínez S.

Sr. Juan Carlos Barros.

—Muy buenos días a todos y todas, quiero darles la más cordial bienvenida a nuestra conferencia del mes de noviembre, que va a tratar sobre la Iniciativa Nacional Sumo Primero.

El Instituto Ingeniero de Chile es una corporación sin fines de lucro que desde hace 136 años se ocupa de hacer aportes a la excelencia en la ingeniería, a su enseñanza y al desarrollo del país. En este contexto, periódicamente realizamos foros, seminarios o charlas que se ocupan de temas que, por su relevancia para el país, requieren ser expuestos ante la comunidad.

En esta oportunidad tenemos como invitada a Salomé Martínez, directora del Laboratorio de Educación Matemática del Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile, quien nos va a dar una conferencia sobre el Plan Nacional Sumo Primero.

Este plan es una de las iniciativas más significativas que se ha realizado en los últimos años para el fortalecimiento de la enseñanza de la matemática en Chile. Salomé nos va a comentar el avance que ha tenido y cuáles son los nuevos desafíos que tiene en este programa.

Esperamos, en esta conferencia, tener una discusión enriquecedora sobre el rol que juega la formación en matemáticas para niños y jóvenes de enseñanza básica y agradecemos la participación en esta conferencia de nuestra expositora.

Vamos a dividir nuestro tiempo en dos bloques, uno en el cual Salomé nos va a hacer una presentación y vamos a dejar al final un espacio para preguntas y comentarios de la audiencia.

Queremos finalmente dar nuestro agradecimiento a REUNA que hace posible este foro.

Salomé gracias por tu participación, tienes la palabra.

Sra. Salomé Martínez.

—Parto por agradecer la invitación a contarles sobre este Plan Nacional Sumo Primero. Como mencionó Juan Carlos, yo espero que conversemos de este plan que es

súper importante porque enfrenta uno de los desafíos grandes que tiene nuestro país, que es mejorar la calidad de la educación. Y también espero convencerlos de que este plan es un aporte que hace la ingeniería a las políticas públicas, en particular a las políticas educativas, y mostrarles los distintos aspectos que hay involucrados, tanto organizacionales, de despliegue territorial, de la estrategia que nosotros utilizamos, etcétera.

Hay un montón de aspectos que tienen que ver con la ingeniería y que hacen mucho sentido a que este programa se haga desde la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Y, por otro lado, también espero convencerlos de que el diseño y la educación también tienen algo de ingeniería, en que uno trata de enseñar algo y también tiene que resolver un problema de diseño, que también está a la base de lo que hacen los ingenieros.

Así, espero que disfruten esta presentación, que la preparé pensando en el público, y que podamos tener una buena discusión al final (Figura 1).

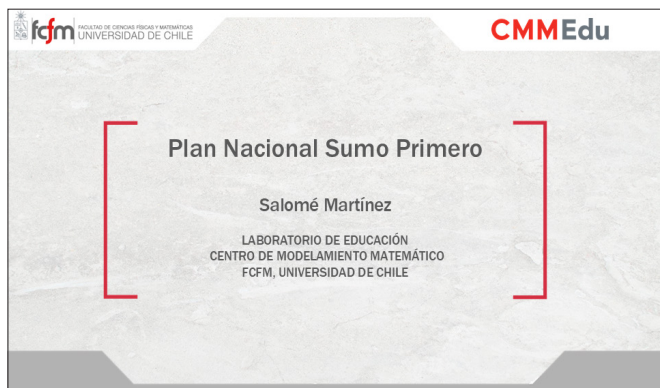


Figura 1

Bueno, lo primero que les quiero decir es por qué avanzar en matemáticas es urgente para Chile. Nosotros tenemos un problema que no ha podido ser resuelto, que es mejorar los aprendizajes y las capacidades que tienen los ciudadanos para enfrentar su vida futura.

A los jóvenes, la educación en Chile no los está preparando para los desafíos futuros, tanto para sus estudios como para desempeñarse en un trabajo. Les comparto esta cifra: en la PISA 2021, el 55,7% de los jóvenes no alcanza el nivel de competencias mínimas que son necesarias para participar

plenamente en la sociedad. Y si uno ve este gráfico, el azul tiene que ver con alcanzar las competencias mínimas y el rojo no, y nos damos cuenta cómo ha sido persistente este problema.

Ya en el año 2006 este porcentaje era 55,1, en 2009 51,0 y así en 2022 es 55,7. Entonces, este es un problema persistente. Chile no ha logrado mejorar. Chile es el país que tiene mejor desempeño en la prueba PISA de Latinoamérica. Sin embargo, el promedio de los países OCDE de los niños que no alcanzan este nivel mínimo es 31,0 y en nuestro país es 55,7 (Figura 2).

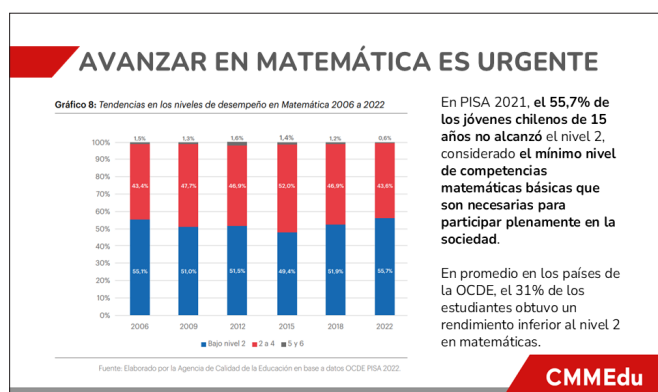


Figura 2

La matemática influye en la economía de un país y en las oportunidades de desarrollo. De hecho, hay un estudio de la OCDE que dice que: si todos los estudiantes alcanzan este nivel básico, el PIB real en Chile incrementaría un 7% para el 2030. Entonces esta inversión, para que los estudiantes tengan una mejor educación matemática, que les permita alcanzar ese nivel de competencias mínimas, tiene una influencia enorme en nuestra economía. Y se nos dice que hacer esto, generar esa mejora, es difícil. Requiere de inversiones sostenidas del Estado. Mejorar no es fácil en matemática. Se han hecho muchas inversiones, muchos currículos, se invierte en textos escolares, en capacitaciones docentes, ha habido un esfuerzo muy importante por mejorar la formación inicial y aun así la deficiencia y el desafío en matemática es persistente.

La educación matemática fortalece el pensamiento crítico, permite evaluar información en este momento que es importante para tomar decisiones informadas. Además, se sabe que las habilidades matemáticas tempranas son

el mejor predictor del rendimiento académico futuro. Las habilidades matemáticas tempranas predicen mejor el rendimiento académico futuro que las habilidades en lectura temprana.

Entonces la matemática es muy importante. Todo lo que se haga a nivel temprano para mejorar las competencias matemáticas de nuestra población es muy importante si queremos que Chile sea una sociedad que base su crecimiento en el conocimiento (Figura 3).

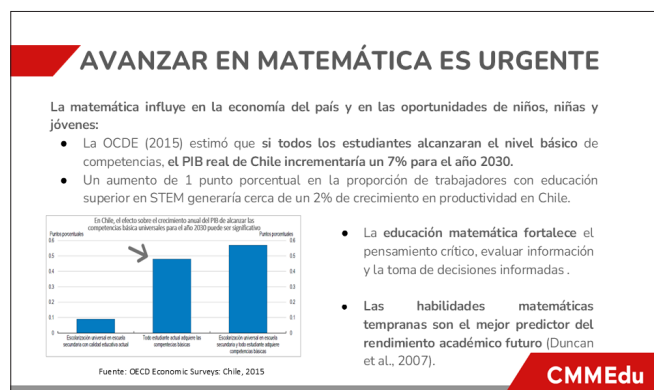


Figura 3

Les muestro esta imagen, uno a veces se olvida por qué uno aprende, y lo asumida que tenemos la matemática como personas. A veces uno piensa que le cuesta ver la matemática en la vida real, pero si uno mira esta imagen, que es una imagen del Sumo Primero, les pregunto yo ¿qué vemos en esta imagen? Yo creo que muchos de ustedes ven muchas multiplicaciones.

A muchos, desde chiquitos, nos han enseñado matemáticas, y hemos ido desarrollando una manera de ver el mundo que tiene que ver con la matemática. Y cuando vemos esto, 4x5, vemos las mantas con los cinco niños y no podemos evitar ver multiplicaciones.

Nuestros ojos de la matemática, que nos han moldeado desde que somos pequeños, nos obligan a ver esas multiplicaciones, no podemos mirar eso sin ver multiplicaciones. Eso nos muestra, de manera muy clara, cómo la matemática se imbuje en nuestra vida, y en la manera en que vemos el mundo. Y me parece que a uno le cuesta darse cuenta de lo mucho que vemos y usamos la matemática para interpretar.

O sea, como que no hay manera de no ver esos cuatro grupos de cinco, esos tres grupos de cuatro, no hay manera de no ver eso. Y eso hace la matemática que venimos aprendiendo desde niños (Figura 4).



Figura 4

Ahora, los números para mejorar son terribles. Uno dice, pero ¿cómo es posible que no se mejore? Ocurre que es un desafío muy, muy grande.

Hay alrededor de 38.000 profesores que enseñan matemática de primero a sexto básico. Son muchos profesores y hay alrededor de un millón trescientos mil niños que cursan de primero a sexto básico. La profesión docente probablemente es la profesión más numerosa, y junto con los profesionales de la salud son profesiones que hacen un país. Entonces, para poder generar cambios, tenemos que poder llegar a un número muy, muy grande de docentes. Así, no basta con formarlos bien desde el inicio, porque hay muchos que ya están haciendo clases. No basta con hacer capacitaciones que impacten a mil docentes, porque son 38.000. Esto es un problema mayor. Es un problema que requiere estrategias distintas (Figura 5).

¿Desde dónde me paro yo? ¿Dónde trabajo? ¿Quién soy yo? Yo trabajo en el CMM, en el Laboratorio de Educación del Centro de Modelamiento Matemático. Somos un equipo grande. Ahí está la foto de muchos de nosotros. Hay más todavía que colaboran con nosotros.

Somos un equipo multidisciplinar de más de 25 personas que es muy variopinto. Donde hay matemáticos, yo soy ingeniera y doctora en matemáticas. Y en este grupo hay ingenieros, hay docentes, hay científicos sociales,

hay diseñadores, programadores, todos trabajando para apoyar y aportar. Porque esto se hace para lograr es una tremenda meta, de que todos los niños, niñas y jóvenes tengan acceso a una educación matemática de calidad. Desde el año 2019 tenemos una cátedra UNESCO que se llama Formación de Docentes para Enseñar Matemática en el Siglo XXI (Figura 6).



Figura 5



Figura 6

Y nosotros somos parte del Centro de Modelamiento Matemático, que es uno de los centros de excelencia que tiene Chile. En mi centro se trabajan las matemáticas para que incidan en el desarrollo de Chile desde muchos ámbitos. Pueden ver el tema de salud digital, por ejemplo, que es un ámbito muy interesante.

Cómo el modelamiento matemático puede incidir en la salud, tanto en la gestión hospitalaria, como en la comprensión de las enfermedades, y en muchas otras cosas. Ahí ven otro tema: clima y biodiversidad. También tenemos el

tema de la infraestructura crítica para el país, y una de las áreas es la educación matemática (Figura 7).



Figura 7

Nosotros como grupo trabajamos en distintos ámbitos de la educación matemática. Hoy día voy a hablar del programa Sumo Primero, pero trabajamos desde larga data en la formación inicial docente, trabajamos en el desarrollo profesional docente y también tratamos de aportar recursos para la enseñanza en aula (Figura 8).



Figura 8

Nosotros nos especializamos en la construcción de modelos orientados a la innovación que integran a distintas unidades del Mineduc. Tenemos amplia colaboración con el Ministerio de Educación, sostenida a lo largo de más de 10 años. Tenemos redes de colaboración que integran al mundo académico, universidades, servicios locales de educación, municipios y escuelas.

Hemos podido construir modelos de implementación con foco territorial y alcance nacional y también plataformas digitales para el aprendizaje y la promoción de comunidades profesionales. Y nuestra *expertise* es en matemática (Figura 9).

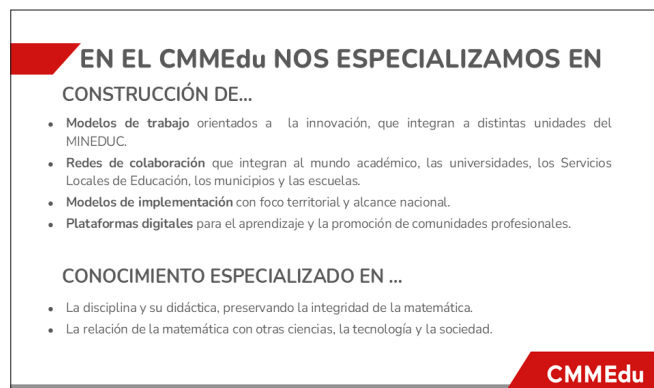


Figura 9

Nuestros principales proyectos de 2025, para darles una idea, los pueden encontrar si van a nuestra página web o si tipean los nombres, lo encuentran todo.

Tenemos Sumo Primero, por ejemplo, donde estamos trabajando con alrededor de 40 profesionales que participan de la elaboración de los desarrollos del programa y más de 75 profesionales en la implementación territorial. Somos un equipo grande.

MatCon, un programa que se llama Matemática Conectada, corresponde a recursos para enseñar matemática de séptimo a cuarto medio. Hay alrededor de 25 profesionales en su desarrollo y tenemos una plataforma, que es abierta, de recursos que ustedes pueden poner en matcon.uchile.cl y pueden entrar a la web que creo es matcon.cl.

RedFID, una red de formadores de profesores que apunta a potenciar las capacidades de quienes forman profesores. Estamos trabajando con formadores de 31 universidades, impactando más del 50% de la matrícula de pedagogía en educación básica y pedagogía en matemática.

Y nuestro programa de desarrollo profesional Suma y Sigue, que lleva más de 10 años. Estamos trabajando con seis servicios locales de educación y un departamento de

educación municipal; además de una implementación que se hace en modalidad e-learning para todos los docentes del país. Y llegamos a alrededor de 850 docentes por año.

Esta es nuestra *parrilla* de proyectos que se alimentan unos a otros. Y tienen todos que ver con el Ministerio de Educación y con las políticas públicas (Figura 10).

PRINCIPALES PROYECTOS 2025			
SUMO PRIMERO	MatCon	RedFID	SUMA Y SIGUE
+ de 40 profesionales involucrados en su desarrollo. + de 75 profesionales en la implementación territorial. 2700 docentes y los textos a 1.3 MM de estudiantes.	+ de 25 profesionales involucrados en su desarrollo. Plataforma disponible para todos los docentes del país.	72 formadores de 31 universidades son parte de la red, impactando a más de un 50% de la matrícula de carreras de PEB y Pedagogía en Matemáticas.	+30 profesionales involucrados en la implementación. Alianza con 6 Servicios Locales de Educación + 1 Departamento de Educación Municipal. + 850 docentes de todas las regiones (e-learning y b-learning).

Figura 10

Bueno, hoy día voy a hablar de Sumo Primero y les voy a contar un poquito cómo surge este proyecto y la importancia que tiene (Figura 11).



Figura 11

El Ministerio de Educación hace larga data, desde los años 90 y mucho antes también, entrega textos escolares. Los textos son una tremenda herramienta para potenciar el aprendizaje de la matemática. Es una de las políticas importantes y costosas que tiene el Ministerio de Educación.

Se entregan textos para todas las disciplinas, un texto por niño. Y esta política de textos escolares ha sido permanente, ha sido mejorada, se han incorporado procesos ampliados. En general, se llama a una licitación para que las editoriales presenten propuestas.

Y el año 2019 el Ministerio de Educación tomó otra decisión, que fue elaborar libros, adaptar una colección japonesa, que es la colección “Study with Your Friends Mathematics for Elementary School”, creada por el profesor Masami Isoda de la Universidad de Tsukuba, un profesor que tiene una amplia historia de colaboración con Chile. Y en ese momento el Ministerio de Educación tomó una decisión que fue muy importante, hacer una colección propia, que pueda ser mejorada, que sea un capital del ministerio para poder focalizar las políticas de mejoramiento en la educación matemática (Figura 12).

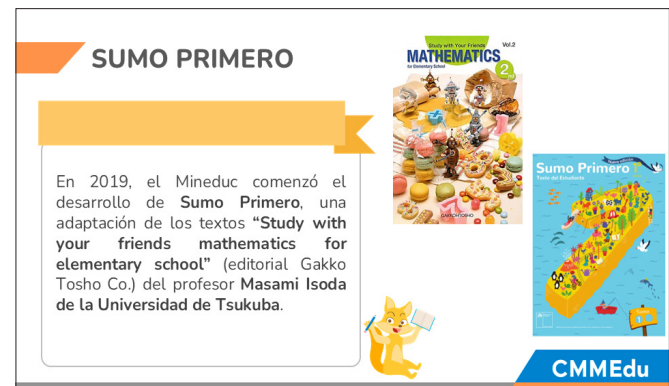


Figura 12

Ahí están los libros, esa es la colección Sumo Primero. Estos textos tienen una idea muy importante, que buscan formar estudiantes que aprendan por sí mismos y para sí mismos.

Esta idea de gente que aprende por sí misma y para sí misma es súper importante ahora, donde los ciudadanos van a tener que aprender toda su vida, en un ambiente donde la tecnología y donde todas las transformaciones que nos ha tocado vivir son tan rápidas.

Es imprescindible que podamos formar ciudadanos que puedan aprender por sí mismos. Entonces, esta idea de formar estudiantes desde su escolaridad que aprendan a aprender es muy importante y algo en lo que el país debería

estar ocupado, formando estudiantes que puedan aprender por sí mismos.

He estado en foros donde preguntan ¿cómo se deben formar estudiantes para el futuro? No sacamos nada con enseñar herramientas tecnológicas particulares, si en realidad, se necesita que la gente pueda volver a aprender una y otra vez (Figura 13).

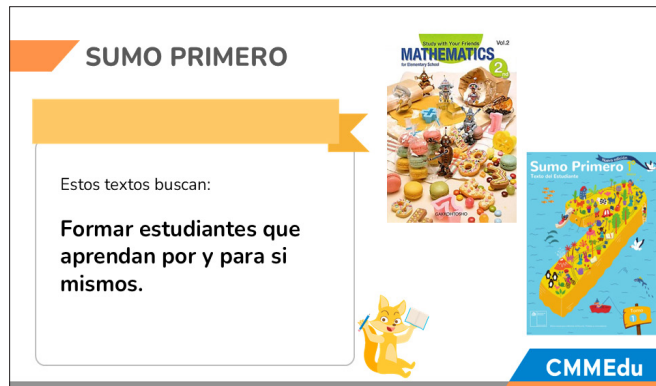


Figura 13

¿Cómo se logró esta colección? En 2019, como les decía, se adaptaron los textos para primero y segundo básico. Después de 2020, en plena pandemia, el ministerio nos contactó a nosotros y a la Universidad Católica de Valparaíso para que termináramos la adaptación de esta colección, porque se necesitaba invertir y distribuir muy buenos textos alineados al currículo en un momento de absoluta emergencia, que era la pandemia.

Esto ocurrió durante el Gobierno del presidente Piñera. En 2023, ya en el gobierno del presidente Boric, esta política continúa, lo que creo que es un ejemplo muy importante de que para que estas cosas mejoren y puedan transformarse en un capital país, las políticas deben tener continuidad. El Ministerio de Educación siguió con estos libros.

Como había muchas manos en la primera edición, había que revisar los libros, había que velar por su coherencia y adaptarlos a lo que se llamó la priorización curricular. Y en 2025, por razones que no voy a comentar ahora, se transforman en la única colección que se entrega a las escuelas que reciben subvención estatal (Figura 14).

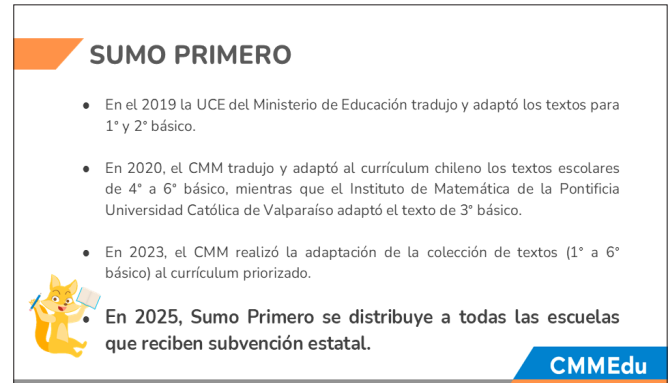


Figura 14

Los textos son importantes, ya los voy a convencer por eso (Figura 15).

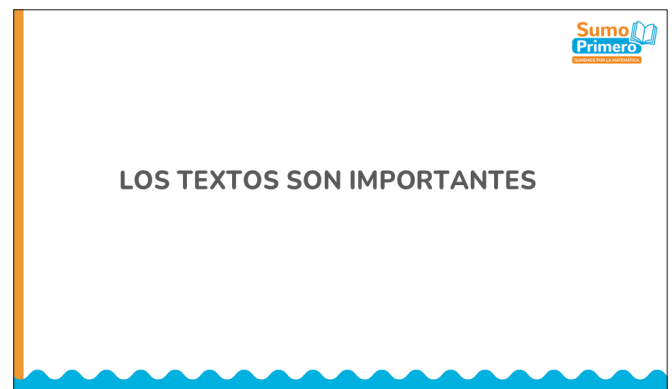


Figura 15

Aquí les voy a mostrar unos textos de los años 89, 90 por ahí, que plasmaban una idea de cómo se aprendía matemática. Entonces aquí hay una pregunta que dice ¿cuántas parejas de niños se van a formar cuando tengo 26 niños? Se hace un diagrama. Esta diagramita que muestra 13 y 13, y se dice formen el diagrama subconjunto de dos elementos cada uno, cuéntenos los subconjuntos y anota el resultado. 26 dividido por 2. Esto es un libro de tercero básico, cuando se introduce la división.

Se formaron 13 parejas. Esta división también podemos resolverla así. 26 dividido 2, dividimos las decenas por 2, dividimos las unidades por 2. Se nos muestra este procedimiento y se nos da una página para hacer los cálculos.

Y esto se parece mucho a cómo aprendimos nosotros a dividir, donde tal vez se mostraba un problema y se iba al procedimiento y lo practicábamos. Y tal vez no era tan claro el sentido de la división.

Entonces acá se puede ver que tuvimos un ejemplo donde igual se mostró un diagrama. A lo mejor a muchos de nosotros ni siquiera nos mostraron el diagrama. Se da un procedimiento y se dice que también lo podemos resolver de esta manera, que es un algoritmo, y luego práctica (Figura 16).

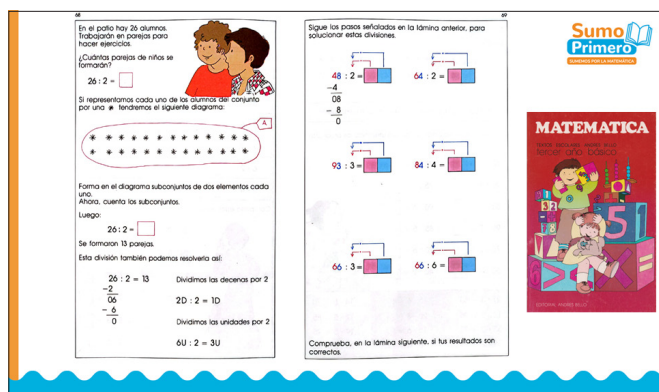


Figura 16

¿Cómo se ve ahora dividir? Entonces uno diría, mira, vamos a mostrar otra manera de enseñar lo mismo, la división también en tercer básico.

Entonces hay un problema que dice: hay 12 calugas que se quieren repartir entre cuatro niños, que es el problema del reparto. Entonces los niños cogen las calugas, hay uno que tiene 2, otro que tiene 5, y eso nos da para discutir qué significa el reparto. En realidad, queremos repartirlos de forma equitativa.

Entonces acá, está la situación donde los niños agarran la misma cantidad, cuatro cada uno, pero no alcanzan para todos. Es una situación de la vida real, una situación que le hace sentido a los estudiantes que desde chiquitos reparten dulces, y que entienden cómo se reparten, y que a veces alcanzan, o no alcanzan, y nos tiene que tocar a todos lo mismo, que tiene que ser equitativo. Esto es la base para empezar a pensar en la operación. Por el momento la división, cuando la vemos así, es una acción, no es una operación matemática.

Entonces se dice, el problema es, hay 12 calugas, se quiere repartir a cuatro niños, de forma que cada uno quede con la misma cantidad, ¿cuántas calugas puede repartir cada niño? Acá se espera que los niños piensen en cómo hacerlo, entonces se entiende eso, y uno quisiera que los niños anticipen ese resultado, de hecho, el zorrillo les dice, piensen un cálculo antes de hacer el reparto, no haciendo el reparto físico, sino que piensen qué tendrías que calcular para poder hacer esto (Figura 17).

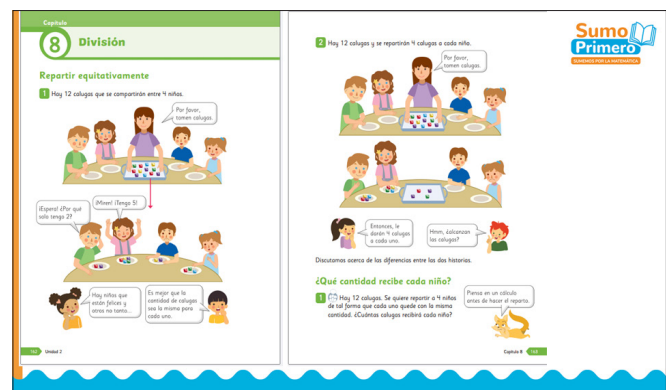


Figura 17

Bueno, acá en la otra página hay una acción, la acción de repartir, y se modela esto de repartir uno a uno, y entender el significado de la división, donde voy repartiendo uno a uno, hasta que no me quedan más calugas por repartir, y aparece esta frase, una frase numérica que va a modelar esta situación, esta acción que está ocurriendo. Si se reparten 12 calugas entre cuatro niños de manera equitativa, cada niño recibe tres calugas, yo hice el reparto, comprobé mi resultado, a lo mejor también pensé en una multiplicación, y acá está la cantidad total de calugas, la cantidad de niños, la cantidad que recibe, y se le da sentido a qué significa cada uno de esos números (Figura 18).

Hay otro ejemplo, reparte seis cubos de manera equitativa en tres cajas, ahora cambia la cantidad de cajas y la cantidad de cubos, inventa otro reparto, y ahí finalmente esos cálculos se llaman divisiones, y ¿qué es lo que permite hacer la división? (Figura 19).

Acá seguimos con esto, se hace en otras situaciones. Cortar cuerda, si uno piensa un poquito, uno puede entender que aquí se liga la multiplicación con la división. En este

recuadro tenemos ya divisiones, pero no hay algoritmo todavía (Figura 20).

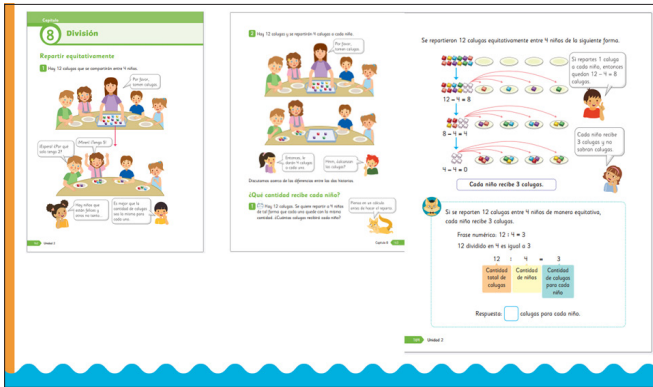


Figura 18

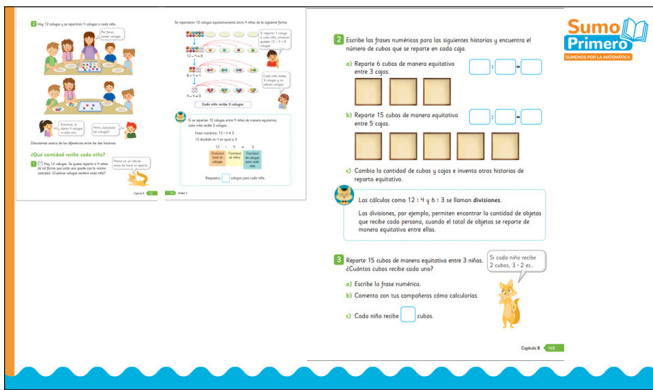


Figura 19

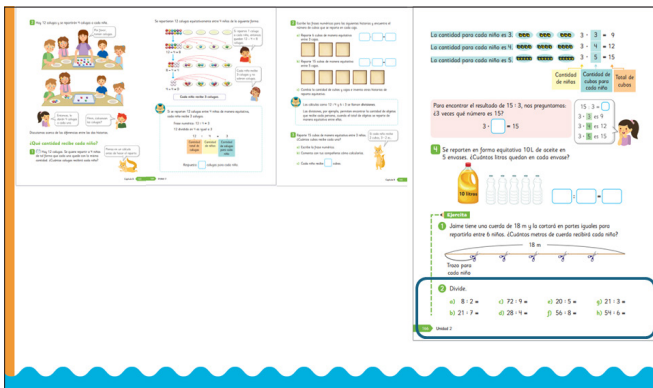


Figura 20

El Sumo Primero aborda los algoritmos. Es muy importante que aprendamos el algoritmo, de hecho, es muy importante entender el procedimiento para poder darle sentido, para poder calcular. Para poder entender la división tenemos que entender el procedimiento de la división. Pero, el algoritmo se aprende más tarde. La división necesita de alguna forma de calcular para poder entenderla, pero no necesita el algoritmo estándar.

Y como vemos es muy distinto como aprendimos la división, ¿no es cierto? Ahora, uno buscaría que los estudiantes la aprendieran, siendo ellos partícipes, entendiendo el significado de lo que es dividir, y al mismo tiempo construyendo los procedimientos para dividir.

Como yo les contaba, por supuesto que en Japón y en Chile los niños tienen que aprender el algoritmo, pero el algoritmo de la división no es la división (Figura 21).

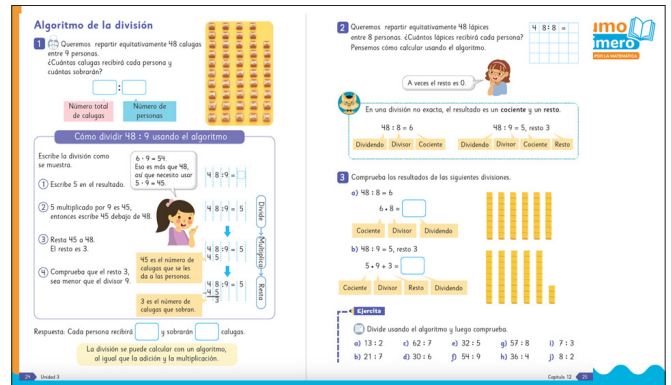


Figura 21

Entonces esta, oportunidad de cambiar la manera en que se enseña matemática con más sentido, más ligada con los estudiantes, motivando más y dando más oportunidades para que los estudiantes participen de la construcción de lo que están aprendiendo, que aprendan de manera significativa, entregar esta colección a nivel nacional es una gran oportunidad (Figura 22).

Cuando uno entrega un libro a un profesor, en general, cuando hay un editorial que hace los libros, le llega un libro por profe. Pero si el ministerio tiene una colección, en realidad lo que le está entregando a los profesores es la colección completa, porque la colección completa muestra una forma de aprender matemática (Figuras 23 y 24).

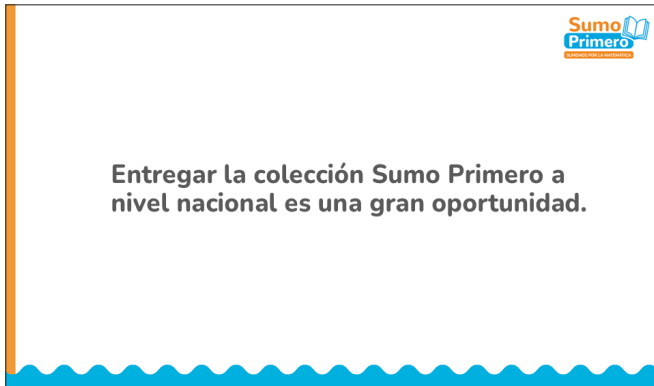


Figura 22



Figura 23



Figura 24

¿Qué se necesita para que los estudiantes aprendan por y para sí mismos? Para que logremos esto, que los niños vayan aprendiendo ellos en la escuela y no que el profesor les diga lo que tienen que hacer, que es una cosa distinta.

Primero, tienen que enfrentarse a situaciones que les permitan extender su conocimiento a partir de lo que ya han aprendido y en situaciones que ya conocen, como la situación de las calugas. Dudo que un niño sea la primera vez que se enfrente en tercero básico a repartir dulces. Es una situación común, donde él ya tiene un conocimiento de cómo se hace eso, de cómo se reparte.

Que sepan cómo se aprende. Esto es muy importante para que un estudiante pueda aprender por sí mismo, tiene que saber cómo se aprende, tiene que haber tenido muchas veces la experiencia de enfrentarse a construir conocimiento. Si yo a un niño le digo lo que tiene que hacer y de repente lo hago partícipe, va a ser difícil que pueda hacerlo, porque no está acostumbrado a aprender por sí mismo. Si queremos adultos que en el futuro aprendan por sí mismos, tenemos que haber formado estudiantes que puedan aprender por sí mismos. Aprender a aprender.

Se trata de generar estas experiencias de aprendizaje coherente donde las representaciones, lenguaje, situaciones sean familiares, de manera que puedan enfrentarse a lo que es nuevo. Si yo a una persona la enfrento a una situación donde todo es nuevo, donde la manera de escribir y donde el diagrama que estoy utilizando son nuevos, es muy difícil que pueda aprender, porque se está enfrentando muchas cosas nuevas al mismo tiempo. Para poder aprender hay que aprender de a poco. Hay muchas teorías del aprendizaje que hablan de que uno aprende lo que está al alcance de uno. Esto todos los adultos sabemos, uno no le puede pedir a alguien que haga algo para lo cual no está preparado.

Si yo uso un libro en primero y uso un libro distinto en segundo, si no es parecido al de primero, si no tiene la misma secuencia, siempre me voy a estar enfrentando muchas cosas nuevas que el profesor me va a tener que explicar. Y nosotros no queremos que sea el profesor el que explique, sino que el niño sea el que aprenda. Entonces, tiene que haber una consistencia muy grande para que los desafíos sean de a poco (Figura 25).

Entonces este es el capítulo de división. Aquí les estoy mostrando las páginas, ¿se acuerdan de la situación concreta, de que los niños puedan resolver las divisiones, con muchas maneras de entender? Aquí hay un problema en que le dicen al niño, inventa un problema que se resuelva por división, y después explícame la división en tus

propias palabras, qué situaciones tú quieres contemplar para dividir (Figura 26).

Que se necesita para formar niños que aprendan por y para si mismos

- Enfrentarse a situaciones que les permitan extender su conocimiento a partir de lo que ya han aprendido, en situaciones que ya conocen.
- Sepan como se aprende, que hayan tenido oportunidad de enfrentarse muchas veces al proceso de construir conocimiento.
- Generar experiencias de aprendizaje coherentes, donde las representaciones, lenguaje, situaciones sean familiares para los estudiantes, de manera que puedan enfrentarse a lo que es nuevo.
- Los docentes deben saber que saben y que está al alcance de los estudiantes.

CMMEdu

Figura 25

Este procedimiento, esta manera de aprender las operaciones, de dar el significado a las operaciones, de pasar de la acción con números que son cantidades, que no son números, a la operación con números, es algo que los estudiantes han vivido 4 o 5 veces cuando llegan a la división. Entonces, ellos lo han aprendido muchas veces igual. Cuando yo llego a la división entiendo cómo se aprende. Esta consistencia es muy importante (Figura 27).

Adiciones hasta 10

¿Cuántos hay en total?

El libro de la suma

Capítulo 4 Adición 1° básico

Figura 27

Capítulo 7 División 3° básico

El libro de la división

Figura 26

Acá vemos lo mismo, el área de rectángulos y cuadrados. Para poder aprender el área tengo que haber aprendido la multiplicación de esta forma; esto está en cuarto básico y me aseguro de que el estudiante está preparado porque ha visto esto antes (Figura 28).

Esto lo ven en tercero básico, pero si yo les muestro el capítulo de la suma, es muy parecido. Parte con la situación de juntar las pelotas en el canasto. Si yo pongo dos peces y tres peces en una pecera juntos ¿cuántos peces hay?Cuál es la frase numérica que se escribe para expresar esta suma. Esta acción de juntar, que no es sumar, es juntar, la voy a escribir de manera matemática con una suma.

Aquí hay un diagrama con los cubitos, es más abstracto que la situación concreta. Después sumo, y ya no hay una situación ahí, hay una operación. Después invento la historia para esos monitos, para 5 más 3 y después hago el libro de la suma. El niño en primero básico hizo esto, entonces esto se repite, como se imaginarán ustedes, se repite para la multiplicación en segundo, para la resta en primero.

PREPARACIÓN PARA APRENDER

Área de rectángulos y cuadrados

Sumo Primero 4° básico

Sumo Primero 3° básico

Figura 28

Miren acá, el área con figuras compuesta. Los niños tienen que aprender que, a veces para calcular el área, tengo que descomponer; lo veo en cuarto básico. También lo veo en quinto básico, para obtener el área del paralelogramo. Cuando el estudiante se enfrenta a encontrar el volumen, ya vio tareas parecidas que se relacionan con la descomposición. Ustedes ven en el diagrama del cuarto, del quinto, del sexto, los colores, la manera, la disposición, cómo se anota, todo es parecido. Entonces, no estoy variando todo al mismo tiempo, estoy variando algunas cosas. Por ejemplo, las actividades de cuarto y quinto básico son diferentes, pero tienen algo similar, que es la descomposición, que es el tipo de diagrama, que es el uso de la cuadrícula, que es la manera de aprender. Entonces se necesita esta gran consistencia para poder aprender matemáticas (Figura 29).

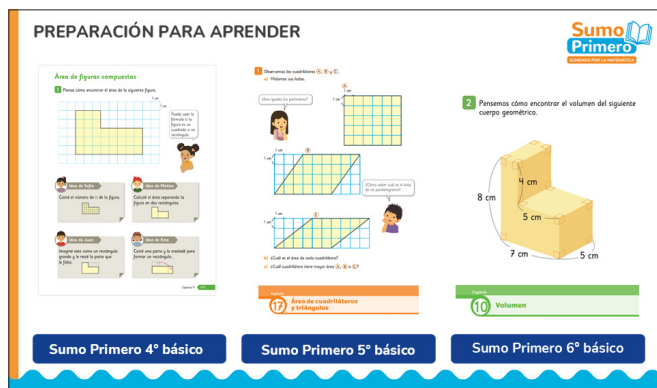


Figura 29

Pero, para aprovechar esta colección y potenciar el aprendizaje se requiere que los docentes comprendan la propuesta, entiendan esto que les estoy mostrando. Entiendan las conexiones entre los distintos contenidos y la secuencia de la tarea. Vieron ustedes cómo se aprendía con la división, yo aprendía con la acción, después se iba a proponer el problema, después a resolver con números y así, todas esas secuencias las tiene que entender un profesor, son cosas difíciles de entender. Esto me llevó tiempo entenderlo y no es fácil. Cuando un profesor recibe el libro, tiene que darle un sentido que es profundo y que en la base tiene una concepción de cómo se aprende (Figura 30).

Cuando nosotros supimos que esto se iba a entregar a todo Chile, le propusimos al ministerio hacer un programa para aprovechar esta tremenda oportunidad que tiene Chile, porque todos los estudiantes van a estar recibiendo esta

colección, así además revitalizamos las ganas de aprender matemáticas. Y propusimos hacer un programa que fortaleciera el uso efectivo de la colección mediante instancias de apoyo a los docentes, junto a la creación de un asistente en base a IA, que les voy a mostrar, y el fomento en liderazgos regionales. Manifestamos también que si los únicos que saben de esto somos nosotros y la Católica de Valparaíso, olvidense, esto no va a funcionar en Chile, se necesita mucha *expertise* distribuida (Figura 31).



Figura 30



Figura 31

Así, propusimos posicionarnos y hacer programas de apoyo y el asistente con IA (Figura 32).

El ministerio se entusiasmó, pero solo si llegábamos a todas las regiones. Les dijimos: vamos a llegar a todas las regiones, y ahora estamos llegando a 22 territorios distintos. Para eso hicimos alianza con 12 universidades, como la Universidad de Tarapacá, la Universidad de Atacama, la Universidad de Magallanes, la Universidad Austral y además con los

llamados Servicios Locales de Educación Pública, con el SLEP de Iquique, del Licancabur, de Puerto Cordillera, de Maule Costa, Punilla Cordillera y Valdivia (Figura 33).



Figura 32

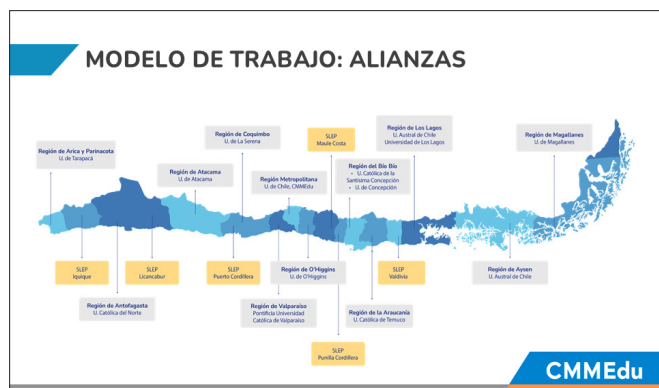


Figura 33

Lo primero que dijimos: vamos a hacer talleres que tienen que ser presenciales, porque debemos tener una experiencia muy activa de aprendizaje. Sabemos que ahora estamos online, pero no es lo mismo hacer una actividad online que presencial. Vamos a hacer talleres presenciales en estos 22 territorios, vamos a hacer cuatro talleres anuales, diferenciados. Esto, porque hay profesores que se especializan, que enseñan a los niños más chiquitos, profesores que enseñan a los niños más grandes, así que vamos a hacer talleres distintos, similares en esencia, pero distintos. Además, hicimos talleres para los jefes técnicos. Nunca se habían hecho talleres para el uso de textos escolares para ellos, bueno, tampoco para los docentes a esta escala. Que aprendan, que entiendan el libro, porque el jefe técnico cuando apoya al profesor, cuando supervisa al profesor,

cuando vaya a ver una clase, tiene que entender lo que está viendo. Además, hicimos webinars para padres y apoderados, porque los papás, si creen en el Sumo Primero, le van a decir a los niños, oye, tienes que llevar el texto, ¿qué han visto en tu clase? Así además van a entender el libro. Cuando apoyen a los niños en la casa, ojalá que los ayuden a pensar y no que les hagan las tareas, o que les digan, esto se hace así. Porque eso nos pasa como papás, de repente uno no sabe, y termina diciendo mejor hazlo como digo yo, que es más fácil. Además, hemos hecho jornadas para formadores de profesores, y muchos webinar para aprender a usar el chat (Figura 34).

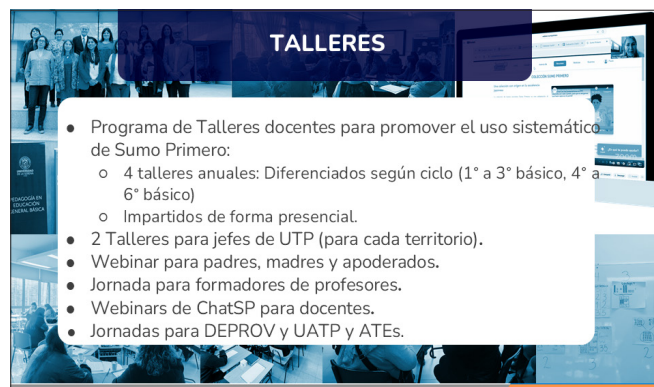


Figura 34

Generamos un comité académico, que fue muy interesante, porque nos ayudó a generar liderazgos distribuidos. Invitamos a personas de muchos lugares de Chile, a trabajar en conceptualizar y en desarrollar en conjunto los talleres del programa, y a pensar en el programa en conjunto. Aquí están Raimundo Olfos, Sandra Burgos, Soledad Estrella. Está María Isabel, que ella fue jefa de la UCE en el ministerio, y que está estaba colaborando con el programa. Muchas personas han trabajado con nosotros de manera muy extensa en el desarrollo del programa, ¿por qué? porque al desarrollar el programa, los talleres y al pensar y al estudiar los libros, vamos a aprender todos, y cuando alguien del norte necesite apoyo, va a existir ese conocimiento en todo Chile. Por supuesto que esto hay que multiplicarlo por 20, por 30, por 40, por 100, tiene que haber muchos más expertos si queremos que esto funcione, pero esto es un primer paso (Figura 35).

Ahí están los alineamientos, desarrollo la propuesta, y el apoyo, además, para impartir esos talleres (Figura 36).

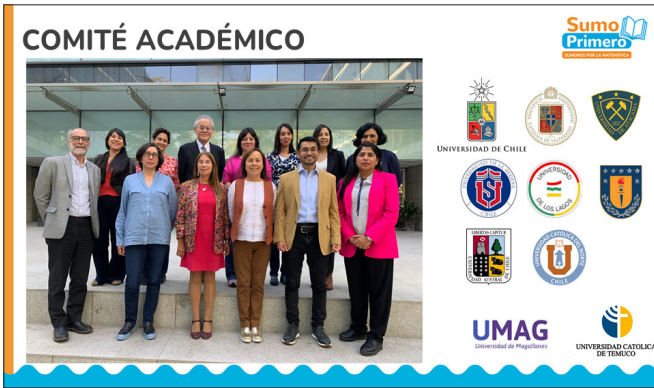


Figura 35

Aquí les voy a mostrar talleres. Por ejemplo, talleres en Atacama, talleres en Punilla Cordillera, en la ciudad de Coihueco, en la Universidad de Chile, en La Serena, en la Católica de Valparaíso (Figuras 38 a 43).

EL ROL DEL COMITÉ ACADÉMICO

- Constituir un grupo de estudio y trabajar colaborativamente para comprender la propuesta didáctica Sumo Primero.
- Definir los lineamientos de los talleres Sumo Primero.
- Desarrollar una propuesta de talleres Sumo Primero que considere los diversos contextos chilenos.
- Apoyar el trabajo de los facilitadores del Plan Nacional Sumo Primero y participar activamente en los talleres a realizarse en cada región.

Figura 36

Taller Docente I

- Universidad de Atacama
- 6 de junio
- Copiapó

Figura 38

Además, formamos alrededor de 40 facilitadores a nivel nacional, porque hay que impartir muchos talleres en todo Chile y en muchas regiones. En los SLEP, los servicios locales de educación, formamos profesores líderes, para que ellos sepan y sean los referentes y tengan el programa. Aquí está cómo se preparó la gestión del taller (Figura 37).

Taller Docente I

- SLEP Punilla Cordillera
- 9 de junio
- Coihueco

Figura 39



Figura 37

Taller Docente II

- Universidad de Chile
- 25 de julio
- Santiago

Figura 40



Figura 41



Figura 42



Figura 43

Hasta el momento, hemos hecho 223 eventos que participaron en abril, que fue cuando lanzamos el programa este año. Hemos capacitado a más de 2.700 docentes, que han participado en más de un taller. Y se entregó el libro a 1,3 millones de estudiantes (Figura 43).

Esto no se puede hacer sin un tremendo equipo. Aquí está el equipo de implementación, este equipo del CMM. De hecho, queremos hacer un grafo de cómo ha sido la organización para poder hacer todo el programa, ha sido un desafío enorme coordinarse con tanta gente (Figura 44).



Figura 44

Y ahora quiero volver al libro. Los profesores reciben una colección, como les decía y van a los talleres. Pero claro, los talleres nos quedan cortos, son cuatro talleres de dos horas y media; pero el profesor cuando prepara su clase tiene que hacerse muchas preguntas: ¿qué saben mis estudiantes?, ¿cómo lo aprendieron? Esto que voy a enseñar yo ahora, cuándo va a ser importante, ¿con qué recursos? Miren, los profesores tienen mucho trabajo, hay que facilitarles que ellos puedan entender el sentido de todo este recurso, y eso se logra de a poco. Supongamos que nos va bien y que los profesores van a estar diez años trabajando con los libros. Tienen que ir aprendiendo, pero se aprende de a poco, uno no aprende todo de una vez, entonces, ¿cómo les facilitamos que aprovechen la colección? (Figura 45).

Y para eso creamos el Chat SP, que es un asistente experto de los textos escolares Sumo Primero, que combina IA y el conocimiento didáctico especializado para ofrecer orientación a la planificación y gestión, secuencias de contenido y estrategias de enseñanza.

El desafío grande. Cuando se meten los libros en el Chat SP, si se mete todo, hay que considerar que los libros tienen muy poco texto. Entonces usamos las guías docentes, que son guías digitales, pero igual tienen poco texto. Hay

muchas relaciones del libro, como las que yo les mostré, que están ocultas, que solamente están en la *expertise* de quienes desarrollaron y de quienes hemos adaptado esto.



Figura 45

Todas esas conexiones hay que explicárselas al profesor, hay que hacerlas transparentes para él. Esto implica integrar un montón de conocimiento especializado. Por ejemplo, si le preguntas al Chat SP sobre los Sumo Primero, no va a saber porque no es experto en el tema. En ese caso, el Chat SP va a inventar algo. Para lograr esto, tuvimos que crear nuestras propias bases de conocimiento fundamentadas en nuestros libros. El chat GPT no es experto en este tema, así que tuvimos que desarrollar una herramienta propia bastante compleja (Figura 46).

CHATSP

Es un asistente experto en los textos escolares Sumo Primero, diseñado para apoyar a los docentes de 1° a 6° básico.

Combina IA y conocimiento didáctico especializado para ofrecer orientación en planificación, gestión de clases, secuencias de contenidos y estrategias de enseñanza coherentes con el modelo didáctico de Sumo Primero.

<https://www.sumoprimerocil/>

CMMEdu

Figura 46

Por ahora, tenemos estos botones, pero pronto vamos a agregar muchas más funciones. Estos botones están diseñados para guiar a los profesores, ayudándoles a identificar

las preguntas en las que el chat realmente puede dar respuestas útiles. Por ejemplo, un profesor podría preguntarse sobre los conocimientos previos necesarios para que sus alumnos aprendan un tema en particular, cómo se puede continuar con el estudio de un tema, o en qué capítulos se aborda. Por ejemplo, un profesor de quinto que está enseñando volumen podría preguntarse cuándo sus alumnos aprendieron áreas. El chat puede responderle indicándole que el área se introduce por primera vez en el libro tercero. Esto puede ser particularmente útil para los profesores que no están familiarizados con el currículo y pueden usar esta información para guiar su enseñanza. Además, el chat puede proporcionar sugerencias de gestión y otro material de apoyo para ayudar a los profesores a mejorar sus prácticas de enseñanza (Figura 47).



Figura 47

Por ejemplo, uno podría preguntar ¿cuáles son los conocimientos previos que necesitan mis estudiantes para abordar el capítulo 2 de primero básico? (Figura 48).



Figura 48

Y ahí le va a decir: “Mira, el capítulo 2 se trata de esto, te sugerimos que vayas al capítulo 1, que son los números hasta 10”. Para indicar dónde van a aprender esto, les damos los vínculos al texto y a la guía docente para que los profesores puedan ver y, posteriormente, mostrar (Figura 49).

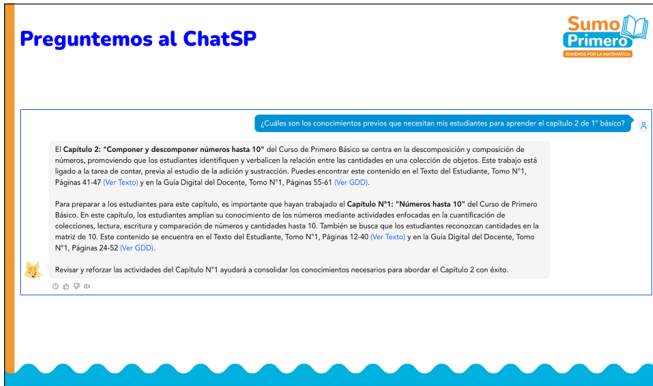


Figura 49

Entonces este sistema está construido sobre una base tecnológica que combina bases de datos de grafos, los knowledge graphs, y además procesamiento de lenguaje natural, para poder entender la intención de las preguntas.

Y aquí, hicimos la construcción de todo el grafo, con conexiones como “esto es antecesor de esto”, “esto está relacionado a nivel de capítulo”; y prontamente lo queremos hacer a nivel de temas, o sea un grafo súper complejo (Figura 50).

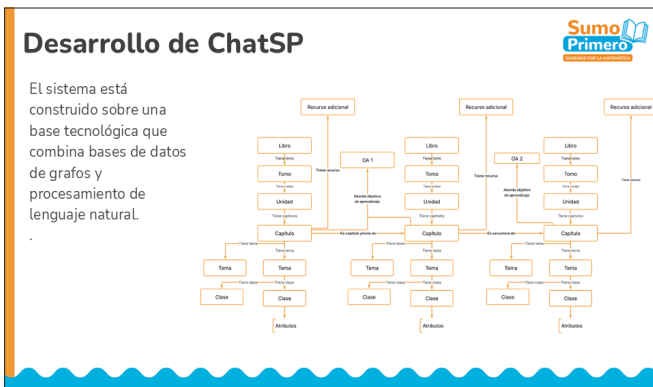


Figura 50

Para eso nosotros creamos estas bases, este grafo de conocimiento. Se trata de bases que vamos a seguir enriqueciendo para que este sistema no solamente pueda hacer estas preguntas un poquito relacionadas con búsqueda, sino que, además, se genere conocimiento, por ejemplo, para que los profesores entiendan una secuencia. Para eso tenemos que seguir trabajando con este chat que es muy especializado (Figura 51).

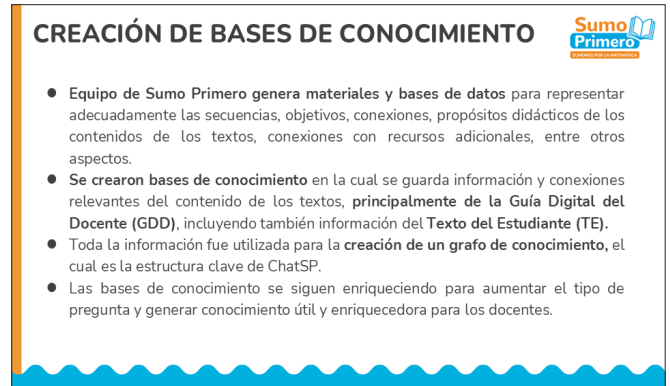


Figura 51

Estos son más o menos los grafos de conocimiento, y los muestro porque pueden parecer aterradoras, ya que muestran todas las relaciones que hay entre estos libros que son para enseñar matemática de primero (Figura 52).

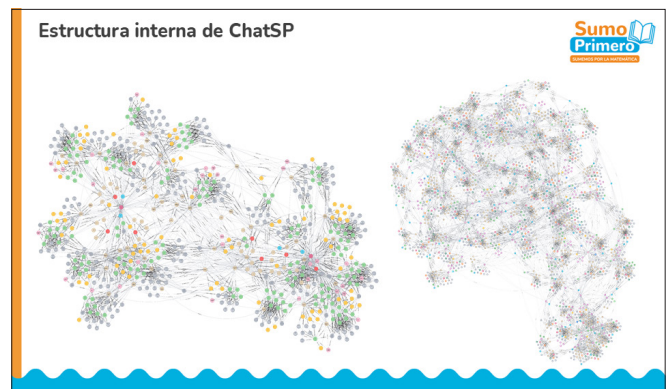


Figura 52

Aquí está el equipo que también quiero reconocer, el equipo que desarrolla el Chat SP. También quiero reconocer Sebastián que ha desarrollado mucho material que tiene que ver con la difusión. Aquí está el equipo de desarrolladores. La persona que conceptualizó el chat, que fue un trabajo muy grande, es especialista en IA, es Francisco Vázquez, que es un estudiante de doctorado, de nuestro doctorado en el DIM, Departamento de ingeniería matemática. Paula y Lorena, que son el equipo que está a cargo de este desarrollo, ellas son expertas en Sumo Primero; y están Cristian, Vicente y Diego, que son programadores y diseñadores (Figura 53).



Figura 53

Daniela Rojas, profesora y doctora en educación que trabaja aquí en el centro, lideró la coordinación general de este proyecto. Sofía, nuestra coordinadora de todos los proyectos, también jugó un papel crucial. Este proyecto, un verdadero buque, requirió coordinar a mucha gente y asegurar que muchas cosas sucedieran. No les puedo describir lo complicado que fue coordinar para los talleres, asegurar que el relator estuviera presente, organizar la ceremonia. Pasa de todo, pero aun así logramos todo lo que nos propusimos a principios de año. Ahora entramos al segundo año con mucho más conocimiento. El programa se extiende un año más, y esperamos que continúe. En marzo, planeamos conversar con las nuevas autoridades para asegurar la continuidad de este programa. Para mejorar la educación matemática, necesitamos invertir y comprometernos a largo plazo. La colección Sumo Primero debe seguir siendo un capital del Estado de Chile para potenciar la educación matemática (Figura 54).

Muchísimas gracias (Figura 55).



Figura 54



Figura 55

A continuación, la Sra. Martínez responde preguntas y comentarios de los asistentes.

Sr. Juan Carlos Barros.

—Muchas gracias, Salomé por tu presentación y felicitaciones por el gran trabajo que has realizado con tu equipo. Me gustaría saber si hay alguna pregunta de alguno de los asistentes, si alguien desea que le expliquen un poco más. Me gustaría a mí partir, como no veo que haya preguntas.

Un elemento clave que tú mencionaste, que esta fue una iniciativa que partió en el Gobierno de Sebastián Piñera y continuó en el Gobierno de Gabriel Boric y ustedes ya están en conversaciones para que esta sea una iniciativa que continúe en el próximo Gobierno. Creo que ahí hay un elemento clave que es precisamente lo que nosotros hemos visto en muchas comisiones de trabajo del Instituto, que hay iniciativas que parten en un Gobierno y no son políticas de Estado, sino que son políticas de Gobierno.

Ese es un elemento clave, pero me gustaría si tú puedes mencionar, ¿cuáles son los elementos clave que tú consideras que son los más relevantes?, porque en realidad estamos llenos de iniciativas y la verdad que no todas llegan a estos resultados como los que han tenido ustedes.

Sra. Salomé Martínez.

—Considero, Juan Carlos, que el aspecto fundamental, esencial, crucial, radica en que el ministerio, al tomar la decisión de implementar esta iniciativa, solicitó la participación de universidades, dado que contamos con una estructura permanente. Por lo tanto, creo que el respaldo de una universidad o un centro como el nuestro, que dispone de un financiamiento independiente del financiamiento de los proyectos, aunque sí, el que exista una continuidad en nuestra labor, fue determinante.

Esta situación nos permitió entablar un diálogo fundamentado y brindar al gobierno una explicación detallada sobre la continuidad de la iniciativa y su relevancia. Considero que esta tarea resulta sumamente compleja si no se cuenta con un socio como nosotros, dado que el Ministerio de Educación, por su tamaño, enfrenta dificultades para generar el conocimiento necesario para que esta iniciativa tenga un impacto significativo.

La elaboración de los libros 2020 se llevó a cabo bajo condiciones distintas, es decir, sin el nivel de conocimiento que poseemos actualmente.

La generación de conocimiento en los equipos requiere un tiempo considerable, y mi equipo y yo hemos podido preservar ese conocimiento, independientemente de nuestra participación directa, ya que lo consideramos un activo valioso. Los Sumo Primero se integraron a nuestro conocimiento, a nuestro propio capital como laboratorio.

En consecuencia, habíamos realizado una inversión significativa en este proyecto, lo que nos permitió abordar al nuevo gobierno con una perspectiva distinta, brindándole valor y permitiéndonos desarrollar nuevas aplicaciones para el conocimiento adquirido.

Una vez que se agota el financiamiento, estos proyectos a menudo cesan sus operaciones. Sin embargo, en el Centro de Modelamiento Matemático (CMM), hemos logrado crear

un capital propio y contamos con un equipo altamente capacitado capaz de abordar estos desafíos.

Considero que sería beneficioso para el ministerio contar con un financiamiento más estable, lo que nos permitiría contribuir significativamente al conocimiento necesario para el desarrollo y la implementación de políticas estatales. Los equipos técnicos, si bien a veces permanecen, con frecuencia experimentan cambios y, en general, son insuficientes para la implementación efectiva de políticas. El tamaño de nuestro equipo no es comparable al del ministerio. Para lograr este objetivo, dada la estructura del Estado chileno, es indispensable la colaboración con las universidades.

Por lo tanto, creo que este es un trabajo serio y propositivo. No soy una persona que espera que me busquen; la única vez que me contactaron fue para el proyecto Sumo Primero. Todos los demás proyectos han sido propuestos por mi equipo al ministerio. Las universidades también deben adoptar un enfoque propositivo y comprender que los desafíos de la política pública no siempre están relacionados con la investigación, sino con la resolución de problemas.

La misión de las universidades compite con la capacidad de abordar problemas en tiempos más acotados, que los que se necesitan para la investigación, y en condiciones que a menudo difieren de las ideales para generar nuevo conocimiento. Si bien algunos argumentan que la evaluación es fundamental, consideramos que la importancia de implementar el taller para el profesor supera la de la evaluación inmediata. Si bien la evaluación puede llevarse a cabo posteriormente, la resolución de un problema de política pública y la satisfacción de necesidades inmediatas son prioritarias sobre la publicación académica.

Esta perspectiva requiere una postura dentro de la universidad que va más allá de la mera generación de conocimiento, enfatizando la importancia de ambas dimensiones.

Sr. Juan Carlos Barros.

—Tengo otra inquietud relacionada con el siguiente aspecto: frecuentemente, los ingenieros somos objeto de críticas, ya que se nos acusa de involucrarnos en asuntos ajenos a nuestra competencia y de emitir opiniones sobre temas diversos. En

ocasiones, se nos cuestiona nuestra participación en discusiones sobre educación, argumentando que dicha responsabilidad recae en los docentes. En este sentido, me gustaría indagar sobre el proceso mediante el cual lograron establecer una relación efectiva con los profesores, considerando que estimo que una de las claves del éxito reside en dicha relación.

Sra. Salomé Martínez.

—El proceso de construir confianza entre los educadores años y la gente que trabaja en las universidades que son especialistas en educación matemática lleva muchos.

Para nosotros, el trabajo con ellos implica entender que tienen un conocimiento que, efectivamente, nosotros no tenemos. Para que eso pueda ocurrir, los equipos tienen que ser multidisciplinarios de verdad. Ahora, de alguna manera, para desplegar un proyecto así se necesita tener una visión también desde la ingeniería, se necesita tener una visión práctica. Creo que hemos sido muy abiertos en trabajar con gente distinta a nosotros. Por ejemplo, los talleres no son como yo lo hubiera hecho, por suerte, porque para eso hay gente más apropiada.

Sr. Juan Carlos Barros.

—La última pregunta que quisiera plantearle es la siguiente: considero sumamente notable el trabajo realizado por tu equipo, dado que durante años la atención se ha centrado en la educación universitaria y en los métodos de formación. Incluso en el Instituto, se han establecido numerosas comisiones de trabajo dedicadas a la formación de ingenieros. Sin embargo, ustedes comenzaron su labor no desde la educación media, sino directamente desde la educación básica, que es precisamente donde se requiere mayor esfuerzo. ¿Cómo percibe la posibilidad de no solo aplicar el programa Sumo Primero en el ámbito de las matemáticas, sino también extender esta iniciativa al ámbito de la biología, el lenguaje y otras disciplinas, considerando que es en estos campos donde se definen los resultados más significativos?

Sra. Salomé Martínez.

—Sí, efectivamente, por ejemplo, en lenguaje se hizo Leo Primero, que corresponde libros para cuatro cursos.

Pero eso no está en manos de una universidad, no hubo ninguna, este Gobierno llamó a las universidades para revisarlo, y no hubo ninguna universidad que quisiera o pudiera hacerlo. Sumo Primero, creo que fue fértil, porque estábamos nosotros, porque nosotros teníamos redes, porque a nosotros nos gusta trabajar con otra gente. Entonces, también se necesitan grupos que sean capaces de convocar, porque si uno quiere hacer las cosas a nivel nacional, tiene que convocar a mucha gente y que, además, tenga competencias, conocimientos. Si a mí me hubieran dicho algo de Sumo Primero en el año 2010, yo no podría haber hecho nada con el Sumo Primero. Entonces, me llegó en un momento en que nosotros teníamos un desarrollo tal, que pudimos hacernos cargo. Ya habíamos tenido la implementación territorial de nuestro programa Suma y Sigue, que es desarrollado por nosotros, para formación de profesores, y esa preparación permitió hacernos cargo.

Entonces, creo que se generan esas semillas para un trabajo a largo plazo. Obviamente que en otras disciplinas hay grupos que pueden aportar, y yo creo que sería muy bueno que el ministerio se asociara con grupos más permanentes, que pudieran gestionar y hacerse cargo de estos programas, y generar estos capitales que vamos construyendo para poder mejorar en el futuro. No veo otra manera de hacer las cosas.

Sr. Juan Carlos Barros.

—Te quiero hacer una petición, si tú puedes recopilar cuáles han sido los factores claves de éxito, porque esto que han hecho es notable y es algo que se puede replicar. Porque ustedes tuvieron una serie de aciertos, que son de la partida, esto de involucrar a los profesores, de ir a un sector, aunado con el trabajo colaborativo con universidades y no solamente dentro de un mismo grupo; y con la construcción de confianzas también.

Sra. Salomé Martínez.

—Creo que el involucramiento de universidades fue un acierto. Permitted la construcción de confianzas.

Nosotros en diciembre, el 20, tenemos una jornada de evaluación del programa. Donde vamos a ver los aciertos y los no tan aciertos, porque no hay muchas cosas que tengamos que hacer mejor el próximo año.

Vamos a hacer una jornada, y yo por supuesto te puedo invitar a participar, pero también les puedo contar cómo nos fue, y hacer un reporte. Porque vamos a hacer una jornada con los stakeholders, para poder evaluar el modelo de implementación y cómo hemos implementado. Porque nosotros nos damos cuenta de que los territorios tienen características muy diferentes. Hay territorios donde la manera de hacerlo tiene que ser distinta.

Nosotros nos hemos dado cuenta de que hay mejoras que se pueden hacer. El equipo de implementación tiene mucha experiencia. Además, el mismo equipo ha ido construyendo el modelo con Daniela, y eso es lo que queremos mostrar, y queremos proponer mejoras. Así, el próximo año, en que vamos a implementar de nuevo el programa, podemos partir con un modelo mejorado.

Ahí les podemos compartir las mejoras, y eso es una de las cosas que nos gustaría publicar. De hecho, justo hace un

par de días estábamos hablando y una investigadora nos decía que debemos hacer el grafo de relaciones necesario para implementar. Yo creo que eso es algo que tenemos que hacer, porque es muy importante ver la complejidad que se necesita, el tipo de perfiles que uno necesita, el tipo de preparación de las personas para poder implementar un programa como este.

Sr. Juan Carlos Barros.

—Bueno, un millón de gracias, Salomé. Muy interesante lo que están haciendo, y muchas felicitaciones a ti y a tu grupo.

Agradecemos la participación de todas las personas que asistieron a esta conferencia. Nos vemos luego. Muchas gracias.

Fin de la conferencia.



**ANALES
DEL INSTITUTO
DE INGENIEROS DE CHILE**

Vol. 138, N° 1 - ABRIL 2026

ISSN 0716-2340

“Uno de los pensamientos que más ha preocupado al Instituto de Ingenieros, desde su fundación, ha sido la creación de un organo que lo ponga en relación con la sociedad, a cuyos intereses trata de servir, i cada día que pasa nos hace ver más i más la necesidad que la corporación tiene de consignar en un periódico las ideas que surjan i que se elaboren en su seno, referentes a los multiplicados i variadísimos ramos de la ingeniería.

En esta virtud, no porque nuestro periódico sea especialmente el órgano del Instituto, dejará de serlo también del país en general, i léjos de esto, creemos obrar en consonancia con nuestro propósito, ofreciendo sus columnas a las personas ilustradas i de buena voluntad que nos honren con el precioso continjente de ideas útiles”.

(Anales del Instituto de Ingenieros. Tomo 1, Año 1, 1888).

Anales del Instituto de Ingenieros
Vol. 138, N° 1, abril de 2026
ISSN 0716-2340

Contenido

ANOMALÍAS DE RECARGA Y ALARMAS PARA LA DETECCIÓN DE AVERÍAS EN MÁQUINAS DE CARGA DE METRO DE SANTIAGO.

Nicolás Mendicoa Rosas

Pág. 1

LÍMITES DE VALIDEZ DEL ANÁLISIS SÍSMICO ESTÁTICO NO-LINEAL DE EDIFICIOS.

J. Campbell, P. Castillo, M. Durán, T. Guendelman

Pág. 13

OPTIMIZATION OF PARAMETERS IN CONSTITUTIVE MODELS FOR CONSOLIDATED UNDRAINED TRIAXIAL COMPRESSION TESTS USING GENETIC ALGORITHMS.

A. Gavidia, C. Morales y G. Corral

Pág. 29

THREE-DIMENSIONAL INVERSION OF ACTIVE SEISMIC GEOPHYSICAL TESTS BASED ON SURFACE WAVES.

R. Vega, E. Sáez, J.C. Tiznado y F. López-Caballero

Pág. 34

Editora

Ximena Vargas Mesa, Instituto de Ingenieros de Chile

Comité Editorial

Daniela Pollak A., Sociedad Chilena de Geotecnia (SOCHIGE)

Marcela Munizaga M., profesora titular de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile

Mario Lafontaine, presidente de la Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ACHISINA)

Los Anales del Instituto estarán dedicados a la presentación de trabajos técnicos en el área de la Ingeniería y ramas afines, para lo cual acepta colaboraciones tanto del país como del extranjero.

Se publicarán aquellos artículos que, a juicio del Comité Editorial, contribuyan al desarrollo o difusión del conocimiento, de técnicas y métodos o de aplicaciones de importancia en la Ingeniería. Artículos de índole expositiva que unifiquen resultados dispersos o que den una visión integrada de un problema o de una puesta al día de una técnica o área, serán bienvenidos. Del mismo modo, ensayos sobre temas de interés para la profesión como perspectivas educacionales, históricas o similares.

ANOMALÍAS DE RECARGA Y ALARMAS PARA LA DETECCIÓN DE AVERÍAS EN MÁQUINAS DE CARGA DE METRO DE SANTIAGO

Nicolás Mendicoa Rosas ¹

RESUMEN

Este trabajo analiza las máquinas de autoservicio de las líneas 3 y 6 del Metro de Santiago mediante Análisis Exploratorio de Datos (EDA) y algoritmos de detección de anomalías. El EDA identificó una correlación mensual entre reclamos y averías significativamente mayor en la Línea 3 (0,89) que en la Línea 6 (0,41), destacando las fallas de efectivo por su alta concentración y correlación con reclamos y las de pantalla por su mayor impacto en las recargas.

Se implementaron algoritmos para identificar cambios en los flujos de recarga y alarmas técnicas, cuyos outputs permitieron entrenar un modelo Random Forest para predecir tasas de avería. Este modelo superó en precisión a los métodos base. La solución final se integró en un dashboard de monitoreo para optimizar el mantenimiento y la toma de decisiones, proponiendo mejoras futuras en la temporalidad de variables móviles en anomalías y la segmentación por método de pago.

Palabras Clave: Mantenimiento predictivo, Detección de anomalías, Máquinas de autoservicio, Continuidad operacional

ABSTRACT

This study analyzes the self-service ticket machines on Metro de Santiago's lines 3 and 6 using Exploratory Data Analysis (EDA) and anomaly detection algorithms. The EDA identified a significantly higher monthly correlation between complaints and failures on Line 3 (0.89) compared to Line 6 (0.41); specifically, cash-related failures showed the highest concentration and correlation with complaints, while screen-related issues had the greatest impact on recharges.

Algorithms were implemented to identify shifts in recharge flows and technical alarms, providing outputs used to train a Random Forest model for predicting failure rates. This model outperformed the proposed baseline methods. The final solution was integrated into a monitoring dashboard to optimize maintenance and decision-making. Future improvements are suggested regarding the temporality of rolling variables in anomalies and segmentation by payment method.

Keywords: Predictive maintenance, Anomaly detection, Self-service machines, Operational continuity

¹ Ingeniero civil matemático y computacional. Pontificia Universidad Católica de Chile. nmendicoa@alumni.uc.cl

I METRO Y SUS MÁQUINAS DE CARGA

I.1 La Empresa

Metro es una empresa de transporte estatal encargada de proveer servicios de transporte en trenes subterráneos en la capital chilena, y es la compañía de transporte público más grande de la región metropolitana. Transporta alrededor de 2.3 millones de personas en un día laboral cualquiera, realizando sobre el 60% de los viajes de transporte público de la capital. La misión principal de la empresa es: “*Acercar a las personas a vivir una mejor ciudad*”, por lo que asume un rol más allá del transporte, entregando servicios y promoviendo cultura en sus estaciones y los barrios que circundan a estas.

I.2 Máquinas de Carga

Las máquinas de carga autoservicio de las líneas 3 y 6 (L3 y L6 respectivamente, de ahora en adelante) de Metro, como bien dice su nombre, tienen por finalidad brindar al usuario la capacidad de cargar su tarjeta BIP! sin necesidad de un operador humano. Las máquinas de carga sufren averías frecuentemente, y gran parte de los reclamos de los usuarios están asociados a estas. De hecho, 1 en 3 reclamos fueron asociados a máquinas de carga el 2023, y en lo que va del 2024 el número es similar, con un 29% del total de reclamos.

Las máquinas de carga son complejas y pueden tener muchos tipos distintos de averías, causadas por factores como la alta frecuencia de recargas, el mal uso de usuarios y el mantenimiento inadecuado de parte de funcionarios, como la remoción o incorporación incorrecta de las piezas que componen la máquina (el módulo de billetes mal puesto posterior a una recaudación de billetes o una mantención, por ejemplo). Se realizan mantenimientos preventivos a las máquinas, pero debido a su cantidad en la Red, y la distribución de estas, que abarca toda la ciudad, es costoso y poco viable realizarlo de manera frecuente en cada máquina. Surge la necesidad de reducir y prevenir averías de todo tipo para mejorar la experiencia del usuario y proveer un mejor servicio, asegurando que las personas puedan cargar sus tarjetas y llegar a sus destinos en un tiempo razonable. Para abordar estos problemas, en este trabajo se emplean metodologías descriptivas y predictivas, con algoritmos ideados a partir de los datos disponibles.

El aspecto descriptivo busca realizar hipótesis a partir del comportamiento de los usuarios en relación con las máquinas, hacer clasificación por grupos de máquinas en base a aspectos relacionados a sus averías, reflexionar sobre las estrategias de mantenimiento y recaudación

actual y entregar hallazgos tanto al equipo de mantenimiento y gerencias sobre nuevas direcciones en el proceso operativo.

El aspecto predictivo se enfoca en desarrollar modelos que anticipen posibles fallos y determinar las máquinas con mayor necesidad de mantenimiento preventivo o focalizado, minimizando costos e interrupciones en el servicio. Los modelos predictivos implementados están basados en datos históricos y metodologías estadísticas y de *Machine Learning*, permitiendo identificar patrones que podrían indicar riesgo de avería de manera productiva y con explicabilidad de estos factores.

II METODOLOGIA

II.1 Infraestructura de datos

La infraestructura de datos en Metro de Santiago está implementada en AWS, apoyándose en servicios como *S3* y *Glue* para el almacenamiento y *extract, transform and load* (ETL) de los datos de forma productiva, mediante *Event Schedulers* y *Step Functions* que aseguran que las tablas se actualicen de manera automática todos los días. Los datos provienen de distintas fuentes y proveedores que trabajan con la empresa, y se almacenan en un Data Lake central, sobre el cual se realizan los análisis y algoritmos. Durante el tiempo trabajado, se desarrolló un diccionario centralizado *Many-to-One* de las distintas fuentes de datos de estaciones, con objetivo de unificar y estandarizar las tablas asociadas a un código único por estación y así facilitar el manejo y cruce de las tablas asociadas. Las tablas utilizadas durante el trabajo de título fueron principalmente asociadas a estaciones: afluencia de personas y reclamos; y las máquinas de carga: información desagregada de recargas, averías, órdenes de mantenimiento, recaudaciones, y alarmas. La mayoría de la información asociada a máquinas viene directamente generada por estas en *logs*, que se limpian para posteriores análisis. Lo mismo sucede con la afluencia, que viene directo de los *logs* de torniquetes. Por otro lado, los reclamos vienen directamente de la página web de Metro.

II.2 EDA

Se realizó un análisis exploratorio de averías y reclamos asociados a máquinas de carga, además de los algoritmos desarrollados. Hay una serie de hipótesis planteadas en este análisis:

- ¿Cuál ha sido la evolución de las tasas de averías desde el año pasado?

- ¿Hay correlación entre las averías y reclamos asociados a máquinas?
- ¿Hay tipos de averías que impacten más en reclamos?
- ¿Hay alguna manera de cuantificar el impacto de una avería en las recargas?
- ¿Pueden las alarmas ser un buen indicio para averías?
- ¿Cuáles son las alarmas que más predicen averías?
- ¿Es la estrategia de mantenimiento actual la mejor?

Para ello, se trabajó con datos históricos de reclamos, averías, órdenes de mantenimiento, alarmas y recargas desde enero 2023 hasta marzo 2024. Se planteó estudiar correlaciones entre las variables, además de cuantificar el volumen de averías por tipo.

II.3 Análisis Recaudaciones y Averías de efectivo

Se buscó confirmar o negar la siguiente hipótesis: recaudaciones (ya sea frecuencia u operadores) tienen un efecto en las averías. Para ello, se estudió la frecuencia de averías y recaudaciones por línea, la diferencia en tiempo de estas variables y los montos acumulados por las máquinas al momento de recaudar.

II.4 Modelo Predictivo Tasa de Avería

II.4.1 Estrategia de mantenimiento

El mantenimiento de las máquinas es esencial para su correcto funcionamiento. Para ello, se dispone de personal encargado de revisarlas semanalmente. La estrategia se divide en tres tipos de mantenimiento:

- Preventivo: revisiones planificadas para reducir la probabilidad de falla en los equipos.
- Correctivo: detección de averías por parte de personal o de usuarios. Un técnico va al sitio y repara la máquina rápidamente para que siga con su correcto funcionamiento. Una máquina puede estar averiada por días antes de ser identificada y revisada.
- Focalizado: en base a un modelo predictivo, se caracterizan las máquinas con mayor probabilidad de avería para la próxima semana.

Se destinan parte de los recursos (HH) en estos tres tipos de mantenimiento. Cabe destacar que no hay suficiente personal para realizar mantenimiento sobre cada máquina cada semana, por lo que se debe comprometer y revisar un subconjunto de máquinas cada vez. De ahí radica la importancia del modelo predictivo implementado en el mantenimiento focalizado: aquellas predichas como más propensas a averiarse la próxima semana.

II.4.2 El modelo predictivo

El modelo es un *Random Forest* (Breiman, 2001) implementado en *PySpark*, que toma como entrada información histórica de cada máquina, como sus recargas, alarmas levantadas y averías por tipo. Durante el trabajo de título se buscó mejorar el modelo, incorporando variables asociadas al tipo de máquina y a los algoritmos de detección de anomalías de recargas y alarmas.

Además de integrar estas nuevas variables al modelo, se hizo una selección de características relevantes mediante la eliminación recursiva de características con validación cruzada (RFECV, por sus siglas en inglés) (Pedregosa et al., 2011), con el objetivo de eliminar ruido de variables poco relevantes. La selección final de características se detalla en la sección de resultados.

Como métricas, se observó la raíz del error cuadrático medio (RMSE) de las tasas y el ordenamiento de las máquinas según las tasas, además de la exactitud y precisión del modelo en escoger las 20 máquinas con mayor tasa de avería durante la próxima semana (RMSEord@20, A@20, P@20 respectivamente), las cuales serán revisadas mediante mantenimiento focalizado. Se comparó estas métricas con métodos de media móvil de averías las últimas 2 semanas y un mes, respectivamente. Se incluyó también el modelo *Random Forest* (RF) base, sin información de anomalías de alarmas y recargas. Los modelos RF serán referidos como: “**Baseline**”: sin variables de anomalías, “**Predicción + Anom.**”: con variables originales además de variables asociadas a anomalías y “**Feature Selection**”: con variables elegidas por RFECV. Se entrenan con datos desde 2023-01-01 hasta 2024-02-22, usando optimización de hiperparámetros *GridSearch* y evaluados desde 2024-02-23 hasta 2024-06-16.

II.5 Algoritmo: Anomalías de Recargas

Una de las grandes complejidades de las máquinas de carga es identificar cuándo están averiadas o no están disponibles para las recargas de los usuarios. La identificación de las averías es totalmente manual por parte de los operadores, cuando van a revisarlas presencialmente. Debido a que se tiene información de las recargas de cada máquina disponible en línea, se observó la oportunidad de mejorar el proceso de identificación de sucesos anómalos en las recargas de las máquinas directamente a través de los *logs*.

En base a esto, se ideó un algoritmo cuyo objetivo es identificar momentos en que las máquinas tienen menos recargas de lo habitual, definido como una **anomalía de recarga**. Dentro de la misma estación, las recargas de cada máquina son distintas. Se toma como supuesto que

las recargas de las máquinas son localmente estables, es decir, que la distribución de recargas horarias de la máquina m el día t es el mismo que la distribución promedio de recargas horarias de la máquina m de las últimas 2 semanas (entre el día $t-15$ y el día $t-1$). El algoritmo se ejecuta sobre días hábiles, ya que la distribución de recargas de fin de semana es distinta a la de un día laboral.

El algoritmo es el siguiente:

Algoritmo 1: Anomalías de Recarga

Input: Datos de recarga por máquina m y tiempo t .

Output: Z-score de anomalías $Z_{t,m}$.

Agrupar recargas en ventanas temporales t de 15 minutos

foreach máquina m **do**

 Calcular media móvil ($\mu_{t,m}$) y desviación estándar móvil ($\sigma_{t,m}$) de 2 semanas sobre días hábiles

 Obtener la cantidad total de recargas diarias

$\#R_{t,m}$

 Calcular el Z-score de la ventana actual:

$$Z_{t,m} = \frac{\mu_{t,m} - \#R_{t,m}}{\sigma_{t,m}}$$

end

Sobre el algoritmo, se realiza el siguiente post-procesamiento:

1. En paralelo, se calcula el Z-score de **afluencia** de pasajeros por estación siguiendo la metodología de ventanas temporales de 15 min, para aislar el efecto de cierre de estación.
2. Se asigna un nivel de anomalía $L \in \{0, 1, 2, 3\}$ según la magnitud del Z-score obtenido.
3. Se descartan las anomalías de recarga que coincidan con anomalías de afluencia en la misma ventana temporal.
4. Se agrupan anomalías de recarga cercanas cuya separación temporal sea menor a 1 hora. Estas agrupaciones se definen como **camadas de anomalías**.

II.6 Algoritmo: Segmentación de Alarmas

Algoritmo desarrollado para segmentar alarmas según averías, con objetivo de mandar avisos al equipo de mantención. Mediante este algoritmo se identificó que la distribución de anomalías por tipo de máquina es considerablemente distinta. El algoritmo simplificado es el siguiente:

- Sobre un subconjunto de alarmas, se busca encontrar los pares máquina/alarma cuya distribución es segmentable en las dos clases: **[avería hoy, no avería hoy]**.
- Definiendo umbrales con algoritmo de *Kneedle*

(Satopaa, Albrecht, Irwin, & Raghavan, 2011) se observa la cantidad de alarmas en un día de cada máquina y se define un umbral que busca el *tradeoff* entre falsos positivos (máquina sin avería catalogada como averiada) y falsos negativos (máquina averiada catalogada como sin avería)

- Los umbrales serán una medida para enviar alertas cuando una máquina esté por sobre el umbral definido para esa alarma.

II.7 Algoritmo: Anomalías de Alarmas

Similar a las recargas, es de relevancia identificar alarmas de cierta máquina sobre lo habitual. Para ello, se idearon dos algoritmos de detección de anomalías. El primero, relacionado a alarmas independientes, observa 1 a la vez y determina si esta es anómala respecto al histórico. El segundo, relacionado a alarmas múltiples, observa todas las agrupaciones de alarmas por máquina y determina si el conjunto de es anómalo, asignando un puntaje o *anomaly score*, luego incorporado como variable del nuevo modelo predictivo.

II.7.1 Alarmas independientes

Mediante un algoritmo similar al de anomalías de recargas, se calcula el nivel de anomalía de cada tupla: (máquina, día, alarma). A diferencia de las anomalías de recarga, ahora se quiere identificar momentos en que las alarmas de las máquinas están por sobre de lo habitual. Se desarrollaron 4 métodos para identificar anomalías de alarmas, y se clasifica una tupla como una anomalía de alarma si se cumplen alguna de las siguientes condiciones:

1. Z-Score:

$$\frac{\#\text{alarmas}_{amt} - \mu_{amt}}{\sigma_{amt}} \geq \text{umbral}$$
2. Paramétrico:

$$\#\text{alarmas}_{amt} - (\mu_{amt} + k \cdot \sigma_{amt}) \geq 0$$
3. Cuantil 95:

$$\frac{\#\text{alarmas}_{amt} - Q_{95,amt}}{\sigma_{amt}} \geq \text{umbral}$$
4. IQR:

$$\#\text{alarmas}_{amt} \geq Q_{75,amt} + k \cdot \text{IQR}_{amt}$$

Donde los parámetros móviles (calculados a 1 mes) se definen como:

- a : alarma, m : máquina, t : intervalo de tiempo
- μ_{amt}, σ_{amt} : Media y desviación estándar móvil.
- $Q_{x,amt}$: Cuantil móvil X
- $\text{IQR}_{amt} = Q_{75,amt} - Q_{25,amt}$: Rango intercuartílico móvil.

Posteriormente se realizó un EDA comparando la sensibilidad de cada metodología y características de cada máquina.

II.7.2 Alarmas múltiples: Isolation Forest

Se entrenó un algoritmo *Isolation Forest* (Liu et al., 2008) sobre una tabla:

$$X_{m,t} = [m, t, A_1, A_2, \dots, A_{79}]$$

Donde m corresponde a la máquina, t a la fecha, A_i a la frecuencia de la alarma i -ésima.

Se decidió trabajar con *Isolation Forest* debido a su rapidez de cómputo, su naturaleza no supervisada y su eficacia en datos de alta dimensión. Se tienen 79 alarmas distintas sobre cada máquina, por lo que algoritmos como SVM o DBSCAN sufren la maldición de la dimensionalidad y son ineficientes en espacios de dimensión alta, como lo es el espacio de alarmas en \mathbb{R}^{79} . Al tratarse de un problema no supervisado, se usó como métrica para generar el corte el índice de Calinski-Harabasz (Pedregosa et al., 2011), definido como la razón entre la dispersión *inter-cluster* e *intra-cluster*. Debido a que es un problema de detección de anomalías, solo hay dos clases, la función a maximizar es:

$$CH = \frac{\sum_{i=1}^2 n_i |\mathbf{c}_i - \mathbf{c}|^2}{\sum_{i=1}^2 \sum_{x \in C_i} |x - \mathbf{c}_i|^2 / (N - 2)}$$

Donde N es el número de observaciones, \mathbf{c}_i es el centroide del *cluster* i , \mathbf{c} es el centroide total y n_i es la cantidad de observaciones pertenecientes al *cluster* i .

II.8 Visualización de resultados

Para visualizar averías, reclamos y resultados de los algoritmos implementados, se desarrolló un *Dashboard* en *R* con *Shiny*. Este fue diseñado con objetivo de brindar una herramienta de visualización del estado de la Red en cuanto a indicadores relacionados con las máquinas, reemplazando el reporte semanal que se enviaba al equipo de mantenimiento, detallando las predicciones de máquinas con averías del modelo.

De esta forma, el equipo es capaz de visualizar secciones críticas en cualquier momento del día. A continuación, se presenta la estructura de la herramienta, con el objetivo de cada vista:

- **Landing:** Descripción de variables, vistas y uso
- **Resumen Global:** Indicadores y KPIs a nivel Red: visualizar si han bajado, subido las averías y reclamos respecto a meses anteriores. Indicadores por estaciones: dónde se han concentrado las averías y reclamos cada mes.
- **Resumen por estación:** Estaciones críticas de la Red en la temporalidad escogida. Permite identificar en qué sectores se debe invertir más recursos para mejorar el servicio.
- **Histórico por estación:** Compara variables asociadas a máquinas por estación, permitiendo

identificar tendencias y relaciones.

- **Detalle Diario Máquinas:** Visualización del algoritmo de anomalías de recargas. Permite identificar comportamientos extraños en máquinas específicas de la Red, lo que podría dar indicios de averías.
- **Modelo Predictivo:** Predicción de las tasas de avería por cada máquina, ordenadas por gravedad, permitiendo identificar las que requieren mantenimiento focalizado. Además, contiene variables de monitoreo del rendimiento modelo productivo, para ajustarlo en caso de ser necesario a futuro.

II.9 Diagramas de flujo

La infraestructura de la empresa está construida sobre AWS, y se usaron varios de sus servicios en la generación y transformación de datos. El flujo de datos se productivizó a través de *Glue*, gatillados por *Event-Schedulers* y un *Step-Function* global que unifica los scripts. Se categorizan las tablas generadas según la *Medallion Architecture* propuesta por *Databricks* (2020):

- **Bronze:** datos crudos provenientes de la web y logs de máquinas: reclamos, averías y recargas. En este nivel, cada observación corresponde a un evento:
 - un reclamo: motivo, fecha referencia, fecha respuesta, texto, id de usuario
 - una avería: descripción, hora inicio, hora término, id de máquina
 - una recarga: monto, saldo, hora recargada, máquina, id de tarjeta
- **Silver:** datos agrupados por fecha, horario, estación o máquina, procesados y limpios para análisis:
 - Tablas intermedias, agrupadas por día u hora
 - Entrada de algoritmos de anomalías de recargas y alarmas
- **Gold:** hallazgos empresariales de valor:
 - Salida del modelo predictivo
 - Salida de los algoritmos de anomalías de recargas y alarmas
 - Tablas usadas en vistas del Dashboard

Se buscó generar un flujo de datos que permita aprovechar esta estructura y tener como resultados tablas relevantes a nivel operacional, teniendo en cuenta la eficiencia necesaria para ser visualizada en un *Dashboard empresarial*.

III RESULTADOS

III.1 EDA

Uno de los detalles más interesantes encontrados durante el EDA es la correlación entre los reclamos asociados a máquinas de carga y averías. Sorprendentemente, la correlación mensual entre estas variables es muy distinta por línea: Línea 3 alcanza un 0.89, mientras que Línea 6 solo un 0.41.

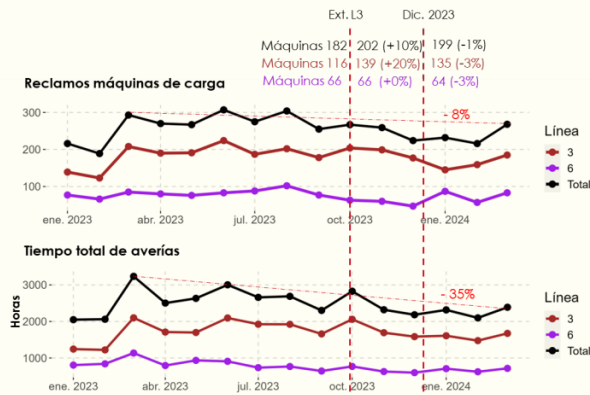


Figura III.1 : Reclamos y averías mensuales

No todas las averías son iguales, y estas impactan en distinta medida a los usuarios y las recargas que se realizan. Para el posterior análisis, se categorizaron averías en 4 tipos: efectivo, Transbank, pantalla y otro. Se analizó la correlación entre la cantidad de reclamos diarios con los 4 tipos distintos de averías, presentado en la Tabla III.1, además de la composición del tipo de avería por línea en la Tabla III.2.

Gran cantidad de los reclamos están asociados a efectivo: Máquina retiene billete, Máquina no da vuelto, Máquina no carga monto (Figura III.2):

Tabla III.1 : Corr. tipo avería y reclamos

Tipo de Avería	L3	L6
Efectivo	0.87	0.43
Pantalla	0.36	~0
Transbank	0.55	0.32
Otro	0.45	0.36

Tabla III.2 : Tipo de avería por línea

Tipo de Avería	L3	L6
Efectivo	83.1%	73.1%
Pantalla	4.6%	8.7%
Transbank	1.1%	0.6%
Otro	11.2%	17.6%

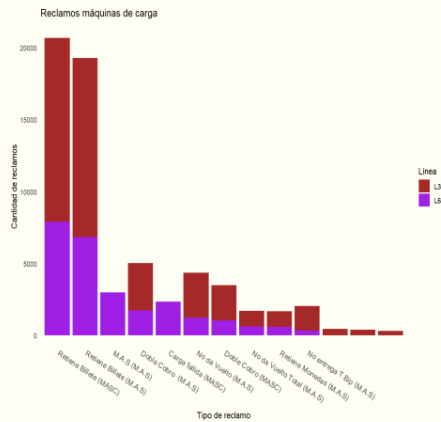


Figura III.2 : Reclamos Máquinas de Carga - L3, L6

Existe una alta correlación entre los reclamos de L3 y las averías de máquinas que son relacionadas con el manejo de efectivo de las máquinas. Para L6 las averías de efectivo son las que más se correlacionan con reclamos, pero tiene una menor correlación que L3. Dado esto, se decidió estudiar la correlación de **averías de efectivo** con alarmas de máquinas (Tabla III.3):

Tabla III.3 : Correlación entre cantidad de alarmas y averías de efectivo

Descripción alarma	Correlación
No permite pago efectivo	0.39
Apertura puerta no permitida	0.23
Timeout de comunicaciones	0.18
Error en el módulo de billetes	0.41
Depósito de devolución de billetes error	0.45
Hopper 1 lleno	0.23
Depósito de devolución de billetes lleno	0.09

Mediante el algoritmo de anomalías de recargas, se estudió el impacto de las averías en las recargas de las máquinas por línea. El impacto se mide como la diferencia entre las recargas esperadas y las recargas reales durante la avería:

$$\sum_{t=1}^N \mathbb{E}(R_t) - R_t$$

Donde

R_t : recargas en el intervalo $[t, t + 15)$ min

- $4N$ = duración de la avería en horas.

Para las averías de alto impacto, se utilizaron averías con anomalías de recarga de nivel 3, es decir, con una disminución grande respecto a las recargas esperadas. De la misma forma, se definió las averías de bajo

impacto, se utilizaron las averías con anomalías de recarga de nivel 1 o 0 (sin anomalía). Las figuras III.3 y III.4 tienen averías de alto y bajo impacto por mes, respectivamente, mientras que la figura III.5 muestra el impacto en recargas por cada anomalía de recarga no asociada a una avería. La figura III.6 muestra el impacto por tipo de avería.

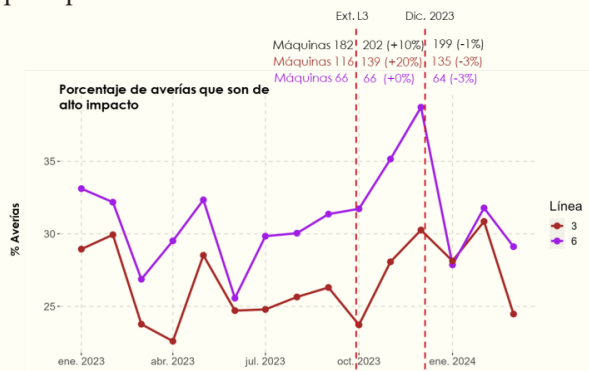


Figura III.3 : Averías de alto impacto por línea

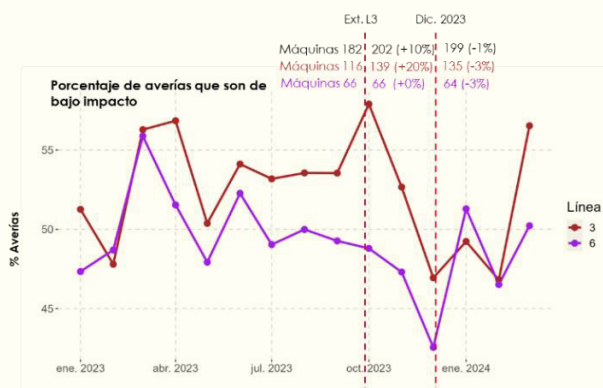


Figura III.4 : Averías de bajo impacto por línea

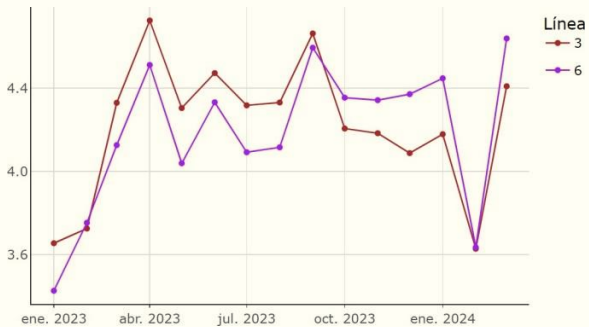


Figura III.5 : Impacto de anomalías de recarga sin averías

Porcentaje de averías según impacto y tipo de avería

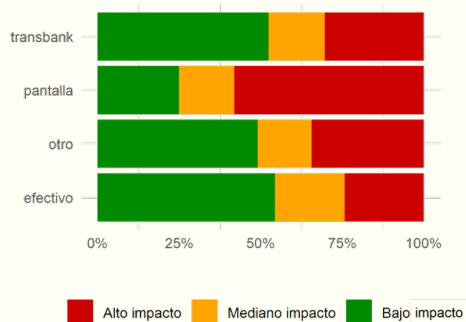


Figura III.6 : Averías según impacto y tipo

III.2 Análisis recaudaciones y averías de efectivo

Se presenta en la tabla III.4 un resumen de indicadores asociados a recaudaciones, agrupados por línea. La figura III.7 presenta además el tiempo promedio entre recaudaciones por tipo de máquina MAS y MASC. Por otro lado, la figura III.8 compara el promedio entre los días entre averías y el promedio entre los días entre recaudaciones para cada máquina. Se muestra además la envoltura convexa por línea para observar la diferencia en la distribución.

Tabla III.4 : Indicadores de recaudaciones y averías por línea

Línea	Días entre recaud.	Días entre averías	Monto recaudado	Averías / recaud.
L3	2.1	6.5	1.17 MM	30%
L6	3.8	8.1	2.15 MM	45%

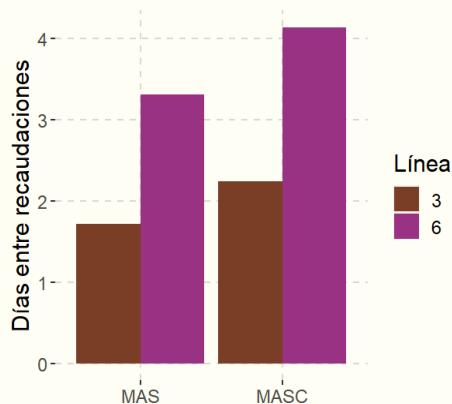


Figura III.7 : Días entre recaudaciones por tipo de máquina y línea

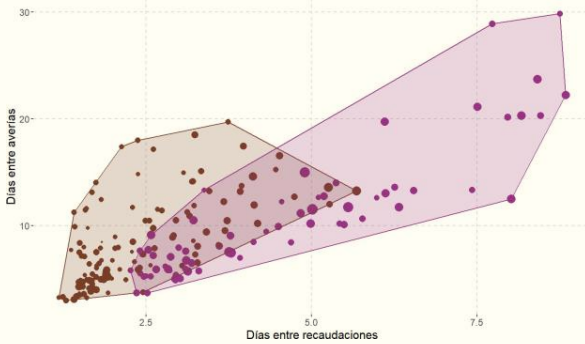


Figura III.8 : Días entre recaudaciones y averías, agrupado por máquina

III.3 Algoritmo Anomalías de Recarga

En la figura III.9 se observa una camada de anomalías de recarga, señalada en el rectángulo azul. La línea negra representa las recargas cada 15 minutos de la máquina, mientras la nube gris representa el promedio móvil \pm una desviación estándar calculada mediante el algoritmo.

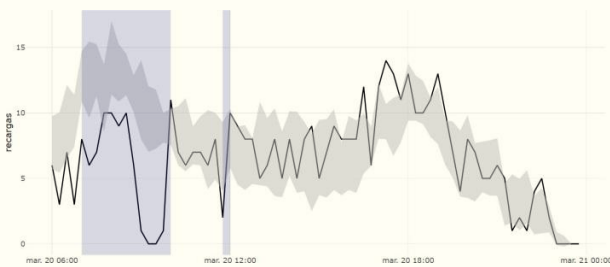


Figura III.9 : Ejemplo del Algoritmo Anomalías de Recarga

III.4 Mejoras al modelo predictivo de averías

Se incorporaron variables de anomalías al modelo predictivo *Random Forest*. La selección final de características mediante RFECV se describen a continuación:

- Recargas los últimos 3/7/14 días
- Averías los últimos 3/7/14 días
- Alarmas efectivo los últimos 3/7 días
- *Anomaly score* de *Isolation Forest*
- Monto normal - monto real dada anomalía de recarga
- Componentes PCA anomalías de alarmas, método 1, 2 y 4

En las figuras III.10 y III.11 se observa el RMSE del orden y la exactitud de las top 20 máquinas con tasas más altas. “Media móvil 2 semanas” y “Mes Móvil” corresponden a métodos *naïve* para identificar averías, “**Baseline**” corresponde al modelo *baseline* sin datos de anomalías, “**Feature Selection**” corresponde al modelo final. El modelo final logra disminuir la cantidad de características que usa el modelo desde 62 hasta 39 (-

37%), pero manteniendo la calidad de la predicción.

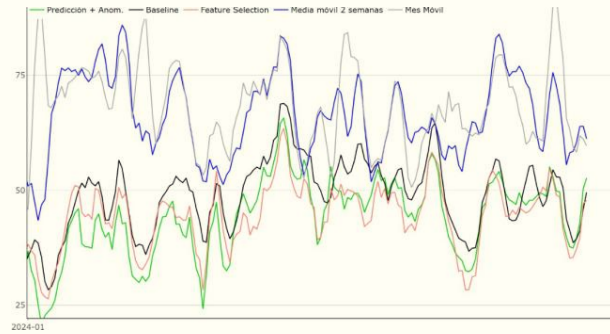


Figura III.10: RMSE Top 20 por modelo



Figura III.11: Accuracy Top 20 (A@20) mensual por modelo

III.5 Algoritmo: Anomalías de Alarmas

Se agrupó la cantidad anomalías de alarma por máquina para los 4 métodos diseñados, obteniéndose la figura III.12. Se aprecian 4 divisiones, por lo que se definió los grupos MCH1-4 para ser estudiados. La composición por tipo de máquina (MAS, MASC) de estos grupos se presenta en la figura III.13.

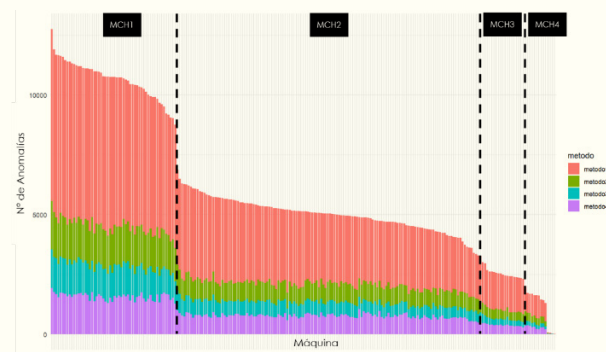


Figura III.12 : Cantidad de anomalías de alarmas por máquina

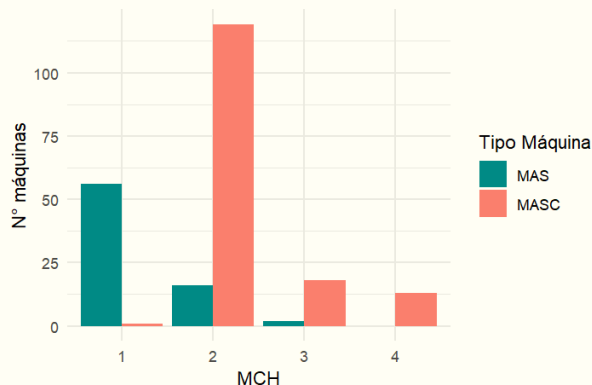


Figura III.13 : Composición de grupos MCH por tipo de máquina

Similarmente, se estudió la cantidad de anomalías de alarmas segmentadas por alarma, para los 4 métodos diseñados (figura III.14). Se aprecian 4 divisiones principales, por lo que se definió los grupos A1-4. Dados los grupos de máquinas definidos, se estudió la distribución de alarmas por grupo, cuyo resultado se puede observar en la figura III.15.

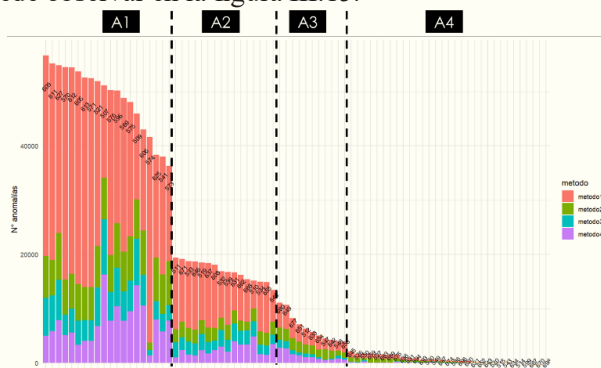


Figura III.14 : Anomalías de alarma agrupadas por alarma

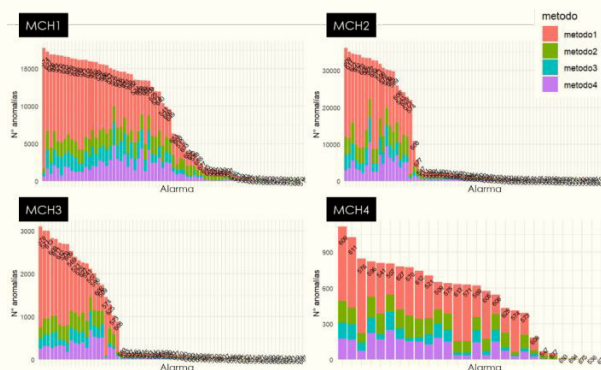


Figura III.15 : Distribución de anomalías de alarma por grupo de máquinas

III.6 Dashboard

Se presentan algunas de las vistas implementadas para el *Dashboard*, con fin de ayudar en el monitoreo y toma de decisiones asociadas a máquinas de carga.

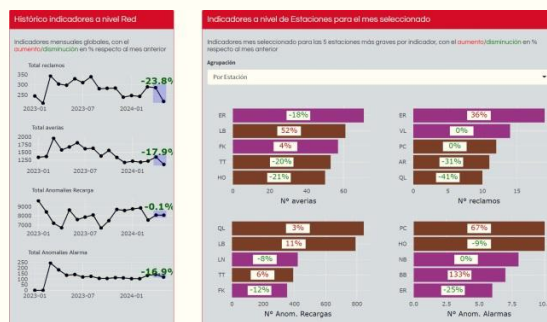


Figura III.16 : Dashboard: Vista general



Figura III.17: Dashboard: Monitoreo métricas modelo predictivo

IV DISCUSION

IV.1 EDA

Lo primero a notar es la diferencia significativa entre líneas en la correlación de averías y reclamos de la figura III.1. Hay una clara causalidad: a mayor tasa de avería y máquinas en mal estado, usuarios se ven más propensos a reclamar.

Pero no todas las averías son iguales, y un análisis de reclamos de la figura III.2 señala que gran parte de estos están asociados a máquinas afectando directamente a los usuarios y su dinero. Por ejemplo, una retención de billete o un atasco de tarjeta en la máquina incita a un usuario a reclamar, ya que le afecta directamente la pérdida de dinero, mientras que una avería de pantalla simplemente implica que no se puede usar la máquina y se debe usar otra en la misma estación. En el peor caso, el usuario deberá hacer más fila, lo cual no necesariamente implica un reclamo.

La alta correlación de averías de efectivo y reclamos de la Tabla III.1 refuerza esta intuición, pero no explica la

gran diferencia entre correlación de L3 y L6. De la tabla III.2 se extrae también que el porcentaje de las averías de efectivo es el mayor, independiente de la línea. Esto deja en claro que la mayor complejidad en la manipulación y reparación de las máquinas de carga radica en componentes físicos, como el módulo de billetes y el Hopper de monedas.

Surge la siguiente pregunta: ¿será que las averías de línea 6 se demoran más en ser identificadas y reparadas, y por eso la correlación es menor?

Con objetivo de potenciar este análisis, se utilizó el algoritmo de detección de anomalías de recarga implementado, y se observó el impacto de averías en las recargas, medidas como la diferencia entre las recargas esperadas y las recargas reales durante la duración de la avería. Se observa de la figura III.3 que el impacto de averías de L6 es consistentemente mayor, indicando que la diferencia en averías puede estar asociada a la estrategia de mantención de cada línea. Es relevante también el aumento de averías de alto impacto entre la extensión de L3 (finales de septiembre 2023) y diciembre 2023, donde se observa un aumento lineal independiente de la línea, notando que en L6 no hubo integración de nuevas máquinas durante el período. De la figura III.5 se puede observar algo similar, donde las anomalías de recarga de L6 aumentaron su impacto desde aproximadamente octubre 2023, lo cual indica posibles averías no detectadas en la línea. Ahora viendo la figura III.6, se pudo observar que averías de pantalla son las con mayor impacto en recargas, lo que sigue la intuición, pues una avería de efectivo significa que todavía se pueden realizar recargas con tarjeta, y una avería de tarjeta implica que todavía se puede cargar con efectivo. Una avería de pantalla implica que no se puede visualizar la transacción y el equipo es inutilizable hasta ser reparado.

IV.2 Recaudaciones

Una hipótesis planteada para la diferencia en averías recae en la estrategia de recaudación de las máquinas. Con cada recaudación, existe la posibilidad de avería, debido a la re-moción e incorporación de piezas delicadas de la máquina. De la figura III.7 y tabla III.4, se determina que la frecuencia de recaudaciones de L3 es el doble que la de L6, y en promedio el monto acumulado por recaudación de L6 es el doble que en L3. Es decir, en L3 existen máquinas que se recaudan a la mitad de capacidad, realizando el doble de recaudaciones de las necesarias y aumentando la probabilidad de avería con cada una de ellas. Lo anterior implicaría que la estrategia o planificación de recaudaciones no está estandarizada en la Red.

La Figura III.6 potencia esta hipótesis, donde se observan muchas máquinas de L3 concentradas en el sector de recaudaciones y averías frecuentes. De estas

máquinas, muchas tienen un monto recaudado promedio bajo, lo que indica que no se llenan al momento de ser recaudadas. Se puede observar una relación lineal entre las dos variables, donde las máquinas que se recaudan de manera menos frecuente presentan menos averías. Esto último es notorio, ya que L6 tiene una relación lineal más pronunciada, a pesar de tener una proporción mayor de averías sobre recaudaciones.

IV.3 Modelo Predictivo

Se puede apreciar de la figura III.10 y III.11 que el modelo final es consistentemente mejor que los modelos *naïve* y casi siempre mejor que el *baseline*, donde este último en ocasiones es peor que los *naïve*. El puntaje de anomalía del *Isolation Forest* resultó ser de las variables más importantes, junto con estadísticos sobre las anomalías de alarmas univariable. Comparando el modelo de anomalías totales y de *Feature Selection*, se ve que se logra mantener la capacidad predictiva, a pesar de tener una fracción de las características del original. Reducir la complejidad de un modelo es esencial para aumentar la robustez de este y disminuir la influencia de ruido contenido en variables poco explicativas. La incorporación de anomalías y alarmas supuso una mejora en el modelo predictivo de averías, además de que estas variables nuevas hayan sido determinadas como relevantes por el *Feature Selection*, implica que los algoritmos de anomalías de recargas y alarmas son buen indicio de comportamientos extraños en las máquinas, asociados a averías aún no detectadas por el personal.

IV.4 Anomalías de alarmas

El algoritmo pudo caracterizar tanto máquinas y alarmas según la cantidad de anomalías en sus grupos. A partir del grupo MCH por tipo (figura III.13), se logró identificar las máquinas más anómalas (MCH1), compuesta casi exclusivamente de máquinas MAS (56 MAS y 1 MASC). Mediante un análisis segmentando por tipo MCH, de la figura III.14 se llegó a la conclusión de que las máquinas de tipo MAS presentan anomalías distribuidas en muchas más alarmas, mientras que las anomalías en las máquinas tipo MASC se distribuyen en algunas pocas. Sigue la intuición, pues las MAS operan con monedas y vuelto, y además dispensan tarjetas. Lo anterior refuerza la idea de que máquinas MASC y MAS se comportan muy distinto, y estas últimas son mucho más complejas en cuanto a su mantenimiento y posibles averías.

V CONCLUSIONES

Se logró analizar datos históricos relacionados con máquinas de cargas, identificando correlaciones relevantes en reclamos y averías. Se encontró una diferencia significativa en la relación de estas variables en L3 y L6 del Metro de Santiago, con un posterior análisis específico respecto a la relación con distintos tipos de averías, donde se observó que el volumen de reclamos es en su mayoría relacionado a averías de efectivo. Además, se analizó el efecto de alarmas en las averías, lo que motivó la implementación de un algoritmo de anomalías de alarmas. Para explicar las diferencias observadas por línea, se propuso hipótesis como la diferencia en el impacto de averías y la diferencia en estrategias de recaudación, donde se observó diferencias significativas en la frecuencia y monto acumulado por recaudación, lo que sugiere que la planificación de recaudaciones difiere por línea. Lamentablemente, al momento de escribir este trabajo no hay manera de validar o rechazar estas hipótesis, debido a que no se pudo recopilar la información necesaria para ello ni aplicar un cambio en la estrategia de recaudación. Aun así, estas explicaciones quedan como intuición para la empresa a futuro, con el fin de estandarizar sus procesos y entregar un mejor servicio. La implementación de los algoritmos de anomalías de recargas y alarmas aprovechan información generada por la misma máquina para identificar cambios en las recargas y alarmas. Si bien no todo cambio brusco está ligado a una avería necesariamente, los activos cumplen con eficacia su función y puede dar valor a la hora de tomar decisiones respecto al monitoreo de las máquinas. El algoritmo de anomalías de recarga permitió también caracterizar las averías según su impacto en las recargas, en donde se encontró que averías asociadas a pantalla eran las que más disminuían recargas, lo que coincide con la intuición. Por otro lado, el algoritmo de anomalías de alarmas logró validar el comportamiento de distintas máquinas y alarmas, caracterizándolas por grupos respectivos. Las mejoras implementadas al modelo predictivo son relevantes, al haber sido integradas con datos de dos algoritmos de anomalías, mejorando las métricas de desempeño contra métodos base. Además, se logró reducir a la mitad la cantidad de variables del modelo mediante un proceso algorítmico, manteniendo las mismas métricas de desempeño, reduciendo la complejidad y quitando posibles efectos de ruido de variables, así potenciando las decisiones tomadas en las variables más relevantes. Al tener un modelo *Random Forest* con cierto grado de explicabilidad, se logró tener un mejor entendimiento del problema. Se logró dar con una solución factible *data-driven*, incorporada en un *Dashboard* de monitoreo, que

contiene información de todos los activos implementados, junto con las predicciones de las máquinas de carga para ayudar en la toma de decisiones. Como trabajo futuro, existen posibles mejoras al algoritmo de anomalías de recargas. Una de ellas es aumentar la temporalidad de las variables móviles y así mejorar la robustez del modelo. Por otro lado, separar anomalías según el método de recarga (efectivo y Transbank) podría dar más énfasis en anomalías asociadas a problemas en partes específicas de la máquina. Se tomó como supuesto que la distribución de recargas horarias por máquina es constante a través de los días laborales de la semana, cuando puede ser que la distribución de cada día de la semana sea distinta. Posibles mejoras al modelo predictivo son usar un modelo basado en *Deep Learning* e incorporar nuevas variables relevantes.

VI AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi profesor guía, Alejandro Cataldo, por su orientación y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

Extiendo mi gratitud a Metro de Santiago, por brindarme la oportunidad de realizar mi práctica profesional y trabajo de título en la institución. Agradezco especialmente al equipo de Ciencia de Datos por su apoyo técnico y colaboración en la comprensión de los procesos operativos, así como por las facultades otorgadas para la publicación de los análisis y resultados presentados en este trabajo.

REFERENCIAS

- [LIU08] Liu, F. T., Ting, K. M., & Zhou, Z.-H. (2008). Isolation Forest. 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining. <https://doi.org/10.1109/icdm.2008.17>
- [SAI08] Saitta, S., Raphael, B., & Smith, I. F. C. (2008). A comprehensive validity index for clustering. *Intelligent Data Analysis*, 12(6), 529–548. <https://doi.org/10.3233/ida-2008-12602>
- [BRE01] Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- [PED11] Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Coumrapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., &

Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825-2830.

[MEDnd] What is a medallion architecture?.
Databricks. (n.d.).
<https://www.databricks.com/glossary/medallion-architecture>

[SAT11] Satopaa, V., Albrecht, J., Irwin, D., & Raghavan, B. (2011). Finding a "Kneedle" in a haystack: Detecting knee points in system behavior. In *2011 31st International Conference on Distributed Computing Systems Workshops* (pp. 166-171). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICDCSW.2011.20>

LÍMITES DE VALIDEZ DEL ANÁLISIS SÍSMICO ESTÁTICO NO-LINEAL DE EDIFICIOS

J. Campbell¹, P. Castillo², M. Durán³, T. Guendelman⁴

RESUMEN

En este trabajo se busca validar la Curva de Capacidad no-lineal de la estructura, empleando el procedimiento estático incremental conocido como “pushover”, el cual ha evolucionado desde la aplicación de un patrón único de cargas estáticas laterales, al “pushover” multimodal, que origina resultados cada vez más cercanos a los que proporcionaría uno de tipo dinámico no-lineal tiempo-historia.

Un análisis dinámico riguroso requiere el empleo de varios registros de terremotos; iteraciones para compatibilizar los datos de entrada y de salida de una estructura en proceso de diseño; los cambios permanentes del proyecto arquitectónico y su implicancia directa en los criterios de diseño sismo-resistentes.

Con el objetivo de calificar la calidad de los resultados que derivan del empleo de diversos procedimientos descritos en la literatura técnica sobre el tema, se aplican demandas sísmicas reales y espectros de diseño normativos a una serie de edificios típicos de la práctica nacional, de diversas rigideces, cuyos modos de vibración participan en la respuesta de la estructura. Las conclusiones que se obtienen validan el empleo razonable de los procedimientos estáticos no-lineales o, por el contrario, derivan el análisis sísmico a procedimientos tiempo-historia no-lineales.

Palabras-Clave: análisis pushover, análisis modal, análisis no-lineal, análisis tiempo-historia.

ABSTRACT

This work seeks to validate the nonlinear capacity curve of the structure, using the incremental static procedure known as pushover, which has evolved from the application of a unique pattern of lateral loads, to the multimodal pushover, which originates results increasingly closer to those provided by a nonlinear time-history dynamic type.

A rigorous dynamic analysis requires the use of several earthquake records; iterations to match the input and output data of a structure in the process of design; the permanent changes of the architectural project and its direct implication in the seismic resistant design criteria.

In order to qualify the quality of the results derived from the use of various procedures described in the technical literature on the subject, real seismic demands and normative design spectra are applied to a series of typical buildings of the national practice, of various rigidities, whose modes of vibration participate in the response of the structure. The conclusions obtained validate a reasonable use of nonlinear static procedures or, on the contrary, derive the seismic analysis to nonlinear time-history procedures.

Keywords: pushover analysis, modal analysis, nonlinear analysis, time-history analysis.

¹ Ingeniero Civil, Dr.-Ing., Depto. de Ing. en OO.CC.-U. de La Serena, jcampbel@userena.cl

² Ingeniero Civil, Mg., Depto. de Ing. en OO.CC.-U. de La Serena, pcastillo@userena.cl

³ Ingeniero Civil, Dr.-Ing., mduran@userena.cl

⁴ Ingeniero Civil, MSc., Doctor h.c., IEC Ingeniería S.A., tguendelman@iec.cl

1. INTRODUCCIÓN

La filosofía de diseño sísmico vigente en el mundo desde los años '70, prioriza brindar protección a la vida de las personas. La Norma Chilena de Diseño Sísmico de Edificios [Ref.1] acoge esta filosofía y la expresa en sus principios e hipótesis básicos, estableciendo que, para movimientos sísmicos de intensidad moderada, las estructuras resistan sin daños; que, durante sismos de mediana intensidad, los daños se limiten a elementos no estructurales; y que, durante sismos de intensidad excepcionalmente severa, que originen daños, se evite el colapso.

La tendencia actual amplía esta filosofía incorporando aspectos de importancia económica, tales como la continuidad de operación de las instalaciones, la protección de los elementos no estructurales y de sus contenidos, según el uso e importancia de cada estructura. Esta nueva filosofía denominada “Diseño por Desempeño (Performance Based Design)”, aparece formalmente expuesta en 1995 en el documento VISION 2000 [Ref.2].

Debido a la acción de sismos reales, severos, una estructura diseñada elásticamente para un sismo reducido, puede desempeñarse de manera no lineal, mediante la generación de mecanismos disipativos, generalmente transformados en rótulas plásticas equivalentes, capaces de disipar energía y transferir esfuerzos a elementos con menor compromiso relativo a sus capacidades nominales.

Es de aceptación internacional medir la “Capacidad” o “Resistencia” de la estructura a través del diagrama que relaciona el esfuerzo de corte basal “V” con el desplazamiento de su nivel superior “ Δ ”, mediante un análisis de tipo pseudo-estático (NSP – Nonlinear Static Procedure) conocido como “Pushover” [Ref. 3], consistente en la aplicación de una ley estática de fuerzas sobre la estructura, por lo general similar a las de su modo fundamental de vibración, que se incrementa monótonicamente para generar sucesivas rótulas plásticas. Sin embargo, no hay garantías de que este patrón monomodal de fuerzas sea capaz de reproducir efectos de modos superiores de vibración, lo que ha llevado al desarrollo de diversos procedimientos multimodales, de diversos autores. En este trabajo se emplea el Procedimiento Demanda-Capacidad Multimodal Modificado [Ref. 4 y 5] con el que se realiza el análisis comparativo entre los análisis monomodal y multimodal, utilizando modelos estructurales representativos del denominado “edificio chileno”.

2. MODELOS DE ANÁLISIS

2.1 Modelos “edificio chileno”

No obstante que el desarrollo que sigue tiene validez más general, el énfasis de este estudio se centra en lo que se ha denominado el “edificio chileno”, caracterizado por su esqueleto resistente de muros de rigidez, vigas y dinteles de unión y exigencias normativas que, principalmente, establecen un corte basal mínimo y control de los desplazamientos de entrepiso, tanto entre centros de gravedad como en los bordes de las plantas de piso involucradas.

El “edificio chileno”, en general, muestra bastante regularidad en términos de un número de indicadores que se encuentran descritos en el Perfil Bio-Sísmico [Ref. 6]. De los 21 indicadores contenidos en la versión 3.0, la más reciente, se han considerados los que se estima más relevantes para los efectos de este estudio, que son:

- H_0/T (m/s): altura total del edificio, medida para los pisos por encima del nivel del subterráneo, dividida por el período de vibración traslacional dominante.
Rango normal: 32-64. Valores aceptables fuera de rango: 16-32 y 64-120.
- $1000 \delta/H_0$: desplazamiento del techo del edificio resultante del análisis, dividido por la altura total del edificio, medida por encima del nivel del suelo.
Rango normal: $\leq 2,0 \%$.
- $1000 \delta_{\text{centro de gravedad}}/h$: desplazamiento entrepiso medido en el centro de gravedad como resultado del análisis normativo; h es la altura del piso.
Rango normal: $\leq 2,0 \%$.
- dens-Axial (Densidad de Muros para Control de Compresión): área de la sección de los elementos resistentes, en cualquier piso, como porcentaje del área acumulada de losas por encima del piso correspondiente.
Rango normal: $\geq 0,1 \%$.
- dens-Corte (Densidad de Muros para Control de Corte): área de la sección transversal de los elementos resistentes, en cualquier piso, como porcentaje del área de la losa correspondiente al piso.
Rango normal: $\geq 2,0 \%$.

Utilizando estos indicadores, se calibraron tres modelos de pórticos resistentes paralelos (Fig. 1 y

Fig. 2) que forman parte de la estructura resistente de un edificio de 30 pisos con cinco subterráneos. Las alturas de entrepiso son constantes, de 2,50 m. Se tomaron en cuenta dos consideraciones de análisis: empotramiento en el cielo de los subterráneos y empotramiento en el sello de las

fundaciones, debido a que ello obedece a procedimientos frecuentemente encontrados en la práctica profesional.

M1 Empotrado Cielo Subterráneo	M2 Empotrado Cielo Subterráneo	M3 Empotrado Cielo Subterráneo
M1 Empotrado Sello Fundación	M2 Empotrado Sello Fundación	M3 Empotrado Sello Fundación
muros de 4 m; vigas de 6m	muros exteriores de 4 m, muro interior de 2 m; dinteles de 2 m	muros de 4 m; dinteles de 1 m
* Bielas indeformables axialmente (diafragmas rígidos). ** Muro perimetral de e = 13 [cm]; L = 22 [m]		

Fig. 1 – Elevación de los modelos de análisis.

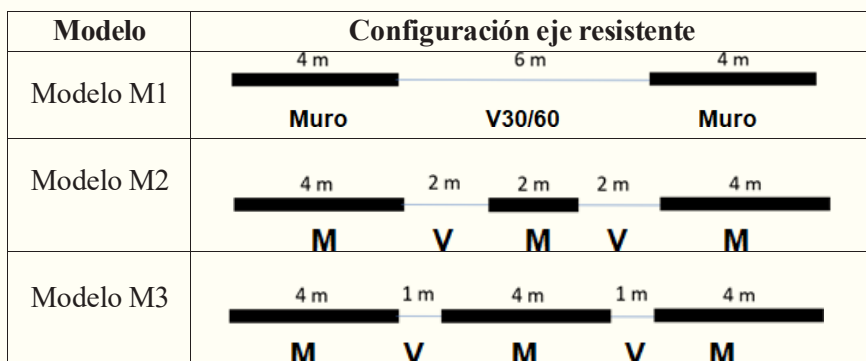


Fig. 2 – Corte transversal a nivel de piso.

El edificio tiene una planta de 18x22 m² y se supone un peso unitario de 1 tf/m². En los subterráneos, el peso sube a 2.000 tf. La dirección de análisis es la más larga y está constituida por tres pórticos resistentes paralelos y dos muros perimetrales de 22 m de longitud, en los cinco subterráneos. Para los efectos del análisis, se incorpora, en cada pórtico, la fracción correspondiente de los dos muros perimetrales.

Los espesores de muro considerados son de 40 cm en los primeros diez pisos; 35 cm en los siguientes diez y 30 en los diez pisos superiores. El espesor de los dos muros de subterráneo es de 20 cm (los cuales, prorrateados en los tres ejes da un valor de 13 cm de espesor).

Los resultados del análisis modal para los tres modelos, en sus versiones sin y con subterráneos, se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 – Parámetros vibratorios de los modelos.

Modelo	Modo	Nivel basal en cielo Subterráneos		Nivel basal en sello fundación	
		Periodo [s]	Masa Equiv. [%]	Periodo [s]	Masa Equiv. [%]
M1	1	3,223	68,231	3,457	40,495
	2	0,828	14,368	0,884	9,666
	3	0,363	5,756	0,393	5,980
	4	0,202	3,394	0,228	9,529
	5	0,130	2,089	0,162	17,224
	6	0,091	1,407	0,124	6,875
Suma			95%		90%
M2	1	1,936	68,112	2,249	41,117
	2	0,509	16,958	0,549	12,789
	3	0,241	4,869	0,264	7,902
	4	0,151	2,756	0,175	14,225
	5	0,104	1,724	0,135	11,819
	6	0,077	1,209	0,102	3,036
Suma			96%		91%
M3	1	1,630	64,971	1,997	40,611
	2	0,366	20,124	0,414	16,064
	3	0,167	5,646	0,193	13,388
	4	0,105	2,717	0,134	15,522
	5	0,075	1,597	0,101	4,985
	6	0,057	1,089	0,075	1,518
Suma			96%		92%

La síntesis de resultados, según el Perfil Bío-Sísmico, para los modelos indicados, se resume como se indica en la Tabla 2.

El parámetro H_0/T se relaciona con la flexibilidad del edificio y en estos seis casos se observan los resultados mostrados en la Fig. 3.

Tabla 2 – Indicadores del Perfil Bío-Sísmico seleccionados.

Modelo	H_0/T [m/s]	$1000 \square/H_0$ [‰]	$1000 \delta_{cg}/h$ [‰]	dens-Axial [%]	dens-Corte [%]
M1	23,97	1,295	1,97	Sobre 0,1	Leve <2,0
M2	39,32	0,641	0,94	Sobre 0,1	Sobre 2,0
M3	47,21	0,415	0,62	Sobre 0,1	Sobre 2,0
M1 - S	22,26	0,563	1,00	Sobre 0,1	Leve <2,0
M2 - S	34,04	0,453	0,76	Sobre 0,1	Sobre 2,0
M3 - S	39,13	0,396	0,66	Sobre 0,1	Sobre 2,0

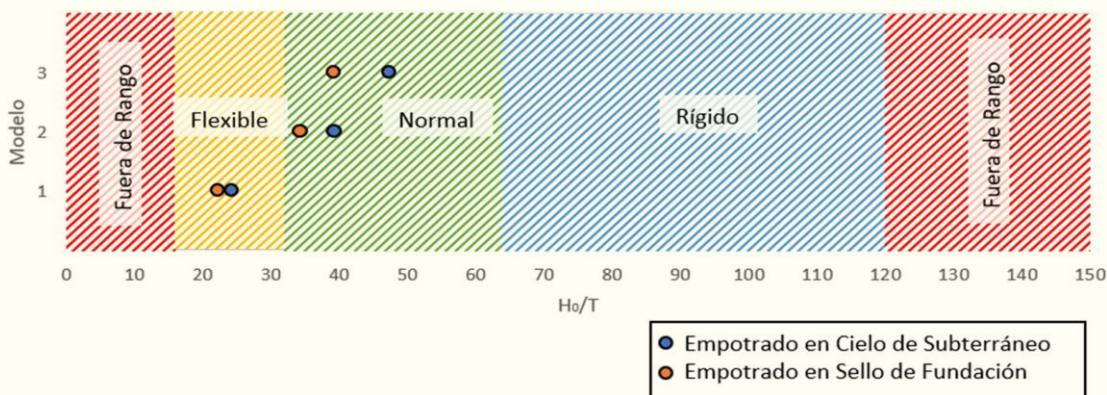


Fig. 3 – Flexibilidad de los modelos.

2.2 Modelos complementarios

En forma complementaria se incluye un caso denominado M4, correspondiente a un pórtico con columnas de 90/90 y vigas de 30/100. Las distancias entre los ejes de las columnas son iguales a 5 metros, la altura entrepiso es igual a 2,5 metros y las masas por nivel son las mismas que las de los modelos M1, M2 y M3.

El modelo M4 es referencial y en este solo se estudiaron los parámetros vibratorios con el objetivo de observar el comportamiento de un edificio con predominio de las deformaciones de corte. Específicamente, se buscó comprobar la hipótesis de que un edificio de corte puro concentra gran parte su masa en el modo fundamental. Los resultados de este análisis se muestran en la Tabla 3.

Al obtener un modelo en el que el modo fundamental tiene una masa equivalente mayor al 70% se haría innecesario realizar un análisis multimodal. Por lo tanto, para este modelo no se calcularon las armaduras de corte ni flexión.

Otro modelo adicional corresponde a una variante de M2-S, en la que se ignoran las masas de los 5 subterráneos, modalidad de análisis bastante frecuente en la práctica. No se exhiben los valores de los parámetros vibratorios debido a que son casi idénticos a los del análisis con estas masas, y solo cambian los porcentajes de masa equivalente, pues se refieren a la masa activa, que corresponde a la de la superestructura, únicamente.

Tabla 3 – Parámetros vibratorios modelo M4.

Modelo	Modo	Nivel basal en cielo Subterráneos	
		Periodo [s]	Masa Equiv. [%]
M4	1	2,933	71,786
	2	0,847	16,612
	3	0,435	4,049
	4	0,297	2,010
	5	0,222	1,192
	6	0,175	0,824
Suma			96%

Adicionalmente, se probó un modelo M2 teniendo en cuenta una capacidad de corte en los muros reducida (sin considerar el aporte de la armadura de corte). Este modelo resultó en una falla muy prematura (a baja carga y desplazamiento), del tipo “falla frágil” entre los niveles 15 y 16 del modelo.

Al respecto, el control de la falla por corte no es para determinar la Curva de Capacidad, sino para evitar que esta sea la falla que provoque el comportamiento frágil.

3. PROCEDIMIENTO “PUSHOVER” MULTIMODAL

3.1 Capacidades de los elementos resistentes

El análisis estático no-lineal (“pushover”) se realiza en un eje resistente, para los modelos M1, M2 y M3, en cada una de las dos hipótesis de participación de los subterráneos, lo que constituye un conjunto de seis modelos de análisis. El procedimiento empleado se nutre de los datos geométricos y mecánicos de los seis modelos descritos y de las capacidades resistentes de sus elementos que, para efectos de flexión, lo definen sus momentos plásticos M_y (Tabla 4) y para las capacidades de corte V_n (Tabla 5).

3.2 Descripción del procedimiento “pushover” multimodal

Como ya se ha indicado, el método que aquí se utiliza es el mismo que aquel detallado en [Ref. 4 y 5]. Debido a esto, a continuación, se muestra una breve descripción de los pasos que el método establece.

En particular, se destaca que el método considera la acción de varios modos de vibrar (tantos como se desee) y que la no-linealidad se tiene en cuenta considerando comportamiento elástico-plástico ideal concentrado en los extremos de los elementos estructurales (tanto para momento flector como para esfuerzo cortante). Habiéndose definido la estructura (geometría, materialidades y elementos), sus masas por nivel, las capacidades de los elementos y el espectro del sismo que se desea considerar, el procedimiento se desarrolla con la siguiente secuencia:

- 1.- Se determinan los periodos propios y formas de vibrar de la estructura (los que se desee considerar en el análisis).
- 2.- Con los periodos propios se determinan las pseudo-aceleraciones asociadas del espectro del sismo considerado.
- 3.- Se definen los vectores de cargas modales como: $\underline{R}_i = a_i \cdot S_{ai} \cdot \underline{M} \cdot \phi_i$

Tabla 4 – Capacidades de flexión.

	Espesor [cm]	Pisos	A_s min [cm²]	M_y [tf·m]
Muros de 4 m	30	26-30	35,0	700
	30	21-25	60,0	1.000
	35	16-20	100,0	1.600
	35	11-15	134,0	2.100
	40	6-10	132,0	2.100
	40	1-5	225,0	3.200
Muros de 2 m	30	26-30	15,0	120
	30	21-25	15,0	120
	35	16-20	20,0	170
	35	11-15	40,0	280
	40	6-10	50,0	350
	40	1-5	60,0	440
Vigas	30/60	1-30	20,4	40

Tabla 5 – Capacidades de corte.

	Espesor [cm]	A_{sv} min [cm²/m]	V_c [tf]	V_s [tf]	V_n [tf]
Muros de 4 m	30	7,9	72,0	106,2	178
	35	8,8	83,9	117,6	201
	40	10,5	95,9	141,1	237
Muros de 2m	30	7,9	36,0	53,1	89
	35	8,8	42,0	58,8	100
	40	10,5	48,0	70,6	118
Vigas	30/60 L = 1m	23,7	12,6	55,7	49
	30/60 L = 2m	23,7	12,6	55,7	49
	30/60 L = 6m	15,7	12,6	36,9	49

Donde:

\underline{R}_i : Vector de cargas asociada al modo "i"

a_i : Factor de participación modal del modo "i"

S_{ai} : Aceleración espectral asociada al modo "i"

\underline{M} : Matriz de masas concentradas de la estructura

ϕ_i : Forma de vibrar del modo "i"

4.- La estructura es cargada individualmente para cada modo con el vector indicado anteriormente. De este análisis resultan esfuerzos en cada elemento, un corte basal y un desplazamiento del nudo elegido para cada modo.

5.- Se combinan (mediante SRSS) los esfuerzos de cada elemento y se realiza la comparación de estos esfuerzos con los momentos plásticos asociados de modo de determinar cuál es el elemento crítico (el de mayor razón de agotamiento), luego de lo cual las cargas son redefinidas de manera tal de producir el agotamiento total de ese extremo del elemento (rótula). Adicionalmente, se compara el esfuerzo de corte de cada elemento con el corte máximo admisible para ese elemento. Cuando este alcanza el corte máximo, el elemento se rotula en ambos extremos y para cargas adicionales se comportará como una biela. De esta forma se obtiene un factor de carga que en definitiva es el que agota el elemento crítico.

6.- Se calculan los esfuerzos combinados de todos los elementos para este factor de carga, además del corte basal y del desplazamiento del nudo elegido (también combinados).

7.- Luego de esto se redefine la matriz de rigidez de la estructura.

8.- Se repite el proceso desde el paso 4, con la nueva matriz de rigidez y considerando cada elemento con una capacidad (de flexión y corte) disminuidas debido a las cargas aplicadas en la iteración previa.

9.- Cuando la estructura se encuentra degradada de forma tal que no admite más cargas o cuando se ha alcanzado un desplazamiento mayor al que se defina como máximo, el procedimiento se detiene.

Luego de esto, se grafica la Curva de Capacidad (Desplazamiento de techo versus Corte basal) de la estructura asociada al espectro considerado.

El procedimiento descrito ha sido implementado en un programa Fortran.

3.3. Demandas sísmicas

Para este trabajo, las demandas sísmicas corresponden a los espectros elásticos provenientes de la normativa nacional, específicamente, de la norma sísmica NCh433 [Ref. 1] y del Manual de Carreteras [Ref. 7], ambos en sus versiones vigentes a esta fecha. Estas dos fuentes se utilizan en la combinación de dos zonas sísmicas (2 y 3 para ambas referencias) y dos tipos de suelo (II y III para el Manual de Carreteras y B y C para la NCh433), como se indica en la Fig. 4.

4. RESULTADOS DE LOS PROCESOS ESTÁTICOS NO-LINEALES

En las tablas Tablas 6 a 11 se presentan los valores más relevantes de las curvas de capacidad obtenidas para cada uno de los modelos analizados (M1, M2, M3, M1-S, M2-S y M3-S) considerando los espectros indicados (4 variantes del Manual de Carreteras y 4 variantes de NCh433) y teniendo en cuenta los casos con 1, 3 y 5 modos de vibración.

En las tablas indicadas " Δ_0 " y " Q_0 " son el desplazamiento en el techo y la fuerza de corte basal en el instante de la primera rótula, " K_i " es la rigidez del primer segmento de la Curva de Capacidad y " Δ_i " y " Q_i " son el desplazamiento en el techo y la fuerza de corte basal en la última iteración.

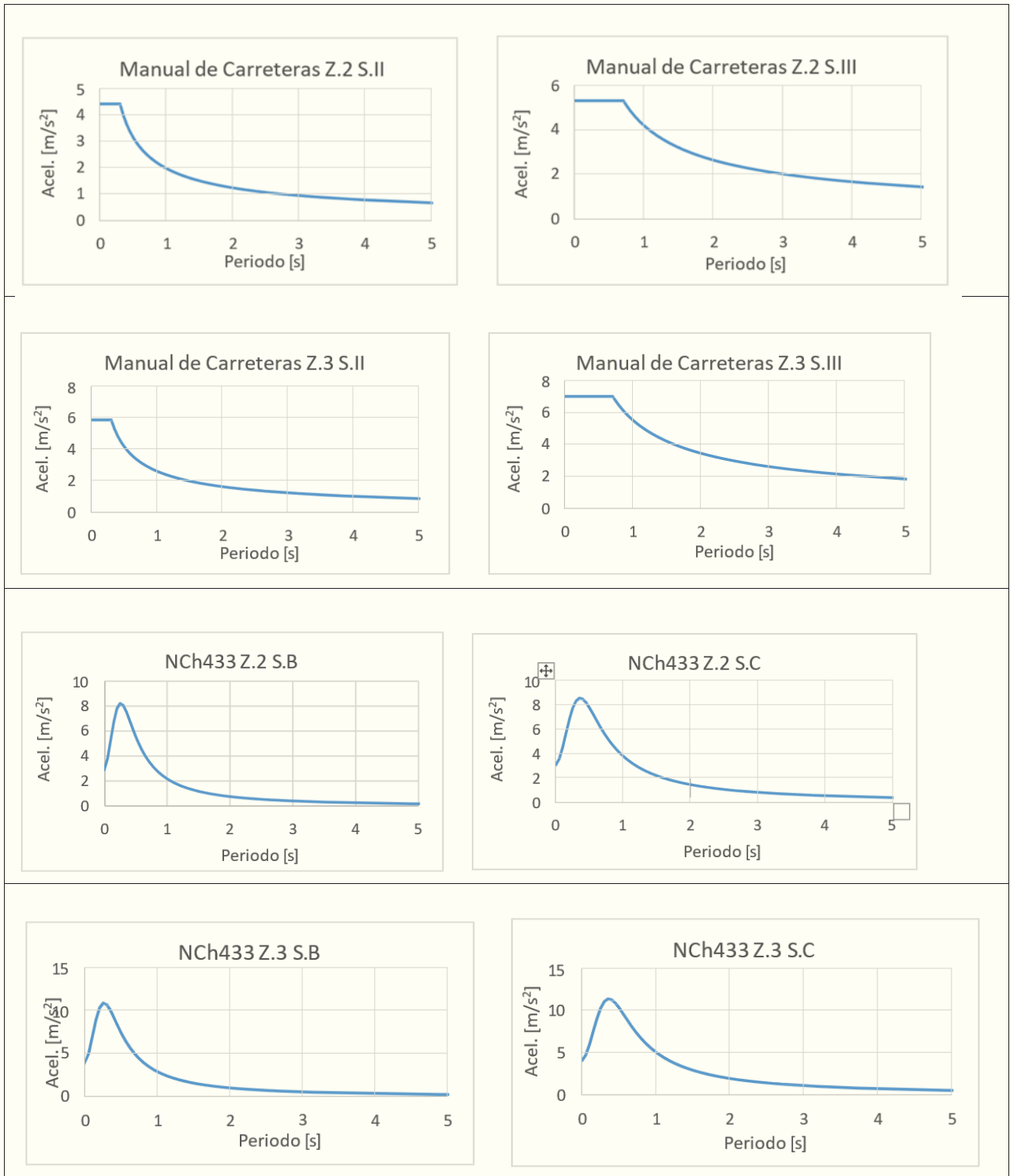


Fig. 4– Espectros elásticos empleados en el análisis.

Tabla 6 – Valores relevantes obtenidos para M1.

Espectro	N° modos	Δ_0 (m)	Q_0 (tf)	K_i (tf/m)	Δ_r (m)	Q_r (tf)
---	1	0,122	89,0	728,9	0,640	183,4
MC Z2 SII	3	0,122	105,0	860,5	0,649	213,7
MC Z2 SII	5	0,122	107,9	884,2	0,648	219,3
MC Z2 SIII	3	0,122	102,2	835,6	0,649	207,7
MC Z2 SIII	5	0,122	103,2	843,5	0,649	209,6
MC Z3 SII	3	0,122	105,0	860,6	0,649	213,7
MC Z3 SII	5	0,122	107,9	884,3	0,648	219,3
MC Z3 SIII	3	0,122	102,2	835,5	0,649	207,7
MC Z3 SIII	5	0,122	103,2	843,5	0,649	209,6
NCh Z2 SB	3	0,107	186,9	1.747,6	0,409	298,1
NCh Z2 SB	5	0,107	203,8	1.910,1	0,406	323,9
NCh Z2 SC	3	0,120	162,8	1.357,6	0,581	289,7
NCh Z2 SC	5	0,120	167,8	1.399,8	0,580	298,2
NCh Z3 SB	3	0,107	186,8	1.746,2	0,409	298,1
NCh Z3 SB	5	0,107	203,8	1.908,6	0,407	323,9
NCh Z3 SC	3	0,120	162,8	1.357,6	0,581	289,7
NCh Z3 SC	5	0,120	167,8	1.399,8	0,580	298,2

Tabla 7 – Valores relevantes obtenidos para M2.

Espectro	N° modos	Δ_0 (m)	Q_0 (tf)	K_i (tf/m)	Δ_r (m)	Q_r (tf)
---	1	0,084	163,3	1.942,5	0,557	326,8
MC Z2 SII	3	0,079	182,7	2.311,6	0,543	365,5
MC Z2 SII	5	0,079	184,2	2.333,1	0,544	368,2
MC Z2 SIII	3	0,081	175,5	2.169,8	0,550	351,0
MC Z2 SIII	5	0,081	176,0	2.177,2	0,550	352,1
MC Z3 SII	3	0,079	182,7	2.311,6	0,543	365,4
MC Z3 SII	5	0,079	184,2	2.333,0	0,544	368,2
MC Z3 SIII	3	0,081	175,5	2.169,8	0,550	351,0
MC Z3 SIII	5	0,081	176,0	2.177,3	0,550	352,1
NCh Z2 SB	3	0,056	217,0	3.874,1	0,484	479,6
NCh Z2 SB	5	0,056	220,2	3.930,8	0,446	473,3
NCh Z2 SC	3	0,066	202,4	3.086,7	0,497	428,8
NCh Z2 SC	5	0,066	203,4	3.102,0	0,497	430,5
NCh Z3 SB	3	0,056	217,0	3.873,6	0,484	479,6
NCh Z3 SB	5	0,056	220,1	3.930,3	0,446	473,3
NCh Z3 SC	3	0,066	202,4	3.086,7	0,497	428,8
NCh Z3 SC	5	0,066	203,4	3.102,0	0,497	430,5

Tabla 8 – Valores relevantes obtenidos para M3.

Espectro	Nº modos	Δ_0 (m)	Q_0 (tf)	K_i (tf/m)	Δ_r (m)	Q_r (tf)
---	1	0,087	221,5	2.532,9	0,539	451,4
MC Z2 SII	3	0,072	241,3	3.374,2	0,506	541,1
MC Z2 SII	5	0,072	242,8	3.394,8	0,508	543,5
MC Z2 SIII	3	0,080	232,4	2.896,3	0,531	494,5
MC Z2 SIII	5	0,080	233,0	2.904,0	0,532	495,5
MC Z3 SII	3	0,072	241,3	3.374,1	0,506	541,1
MC Z3 SII	5	0,072	242,8	3.394,7	0,508	543,4
MC Z3 SIII	3	0,080	232,3	2.896,1	0,531	494,5
MC Z3 SIII	5	0,080	233,0	2.903,9	0,532	495,5
NCh Z2 SB	3	0,043	255,5	5.958,8	0,247	632,3
NCh Z2 SB	5	0,043	256,7	5.986,6	0,246	633,1
NCh Z2 SC	3	0,059	246,7	4.165,4	0,454	602,1
NCh Z2 SC	5	0,059	247,2	4.174,3	0,455	602,9
NCh Z3 SB	3	0,043	255,5	5.956,8	0,247	632,3
NCh Z3 SB	5	0,043	256,7	5.984,6	0,247	633,1
NCh Z3 SC	3	0,059	246,7	4.165,8	0,454	602,1
NCh Z3 SC	5	0,059	247,2	4.174,6	0,455	602,9

Tabla 9 – Valores relevantes obtenidos para M1-S.

Espectro	Nº modos	Δ_0 (m)	Q_0 (tf)	K_i (tf/m)	Δ_r (m)	Q_r (tf)
---	1	0,138	88,0	637,5	0,548	140,5
MC Z2 SII	3	0,134	113,0	843,0	0,546	179,9
MC Z2 SII	5	0,133	238,2	1.784,9	0,543	378,8
MC Z2 SIII	3	0,135	106,3	788,5	0,546	168,8
MC Z2 SIII	5	0,135	160,6	1.192,5	0,545	254,8
MC Z3 SII	3	0,134	113,0	843,1	0,546	179,9
MC Z3 SII	5	0,133	238,2	1.785,1	0,543	378,8
MC Z3 SIII	3	0,135	106,3	788,5	0,546	168,8
MC Z3 SIII	5	0,135	160,6	1.192,6	0,545	254,8
NCh Z2 SB	3	0,093	212,1	2.281,3	0,420	366,9
NCh Z2 SB	5	0,090	589,3	6.583,7	0,333	959,8
NCh Z2 SC	3	0,106	173,0	1.626,5	0,541	301,4
NCh Z2 SC	5	0,105	336,3	3.196,7	0,535	584,9
NCh Z3 SB	3	0,093	212,1	2.282,8	0,419	366,9
NCh Z3 SB	5	0,089	589,5	6.588,4	0,333	959,9
NCh Z3 SC	3	0,106	173,0	1.626,3	0,541	301,4
NCh Z3 SC	5	0,105	336,2	3.196,2	0,535	584,8

Tabla 10 – Valores relevantes obtenidos para M2-S.

Espectro	Nº modos	Δ_0 (m)	Q_0 (tf)	K_i (tf/m)	Δ_f (m)	Q_f (tf)
---	1	0,113	166,4	1.472,5	0,404	281,0
MC Z2 SII	3	0,104	225,4	2.166,0	0,283	347,5
MC Z2 SII	5	0,103	341,0	3.319,7	0,277	523,4
MC Z2 SIII	3	0,107	199,9	1.873,6	0,296	312,5
MC Z2 SIII	5	0,106	250,5	2.357,7	0,295	391,3
MC Z3 SII	3	0,104	225,4	2.166,0	0,283	347,5
MC Z3 SII	5	0,103	341,0	3.319,3	0,277	523,4
MC Z3 SIII	3	0,107	199,9	1.873,7	0,296	312,5
MC Z3 SIII	5	0,106	250,5	2.358,1	0,295	391,4
NCh Z2 SB	3	0,062	308,1	5.005,8	0,160	501,5
NCh Z2 SB	5	0,061	502,6	8.288,0	0,337	889,7
NCh Z2 SC	3	0,076	261,4	3.445,9	0,246	449,6
NCh Z2 SC	5	0,075	346,1	4.585,2	0,226	578,6
NCh Z3 SB	3	0,062	308,1	5.006,5	0,160	501,5
NCh Z3 SB	5	0,061	502,6	8.289,3	0,337	889,8
NCh Z3 SC	3	0,076	261,4	3.445,4	0,246	449,6
NCh Z3 SC	5	0,075	346,1	4.584,4	0,226	578,5

Tabla 11 – Valores relevantes obtenidos para M3-S.

Espectro	Nº modos	Δ_0 (m)	Q_0 (tf)	K_i (tf/m)	Δ_f (m)	Q_f (tf)
---	1	0,125	227,8	1.817,5	0,285	347,2
MC Z2 SII	3	0,100	343,1	3.441,8	0,217	532,4
MC Z2 SII	5	0,098	419,8	4.284,5	0,218	655,8
MC Z2 SIII	3	0,112	290,5	2.599,3	0,248	446,1
MC Z2 SIII	5	0,111	330,1	2.977,5	0,248	508,6
MC Z3 SII	3	0,100	343,1	3.441,8	0,217	532,4
MC Z3 SII	5	0,098	419,7	4.284,5	0,218	655,7
MC Z3 SIII	3	0,112	290,5	2.599,5	0,248	446,2
MC Z3 SIII	5	0,111	330,1	2.977,8	0,248	508,6
NCh Z2 SB	3	0,047	394,5	8.396,0	0,149	795,8
NCh Z2 SB	5	0,046	464,4	9.999,4	0,157	939,8
NCh Z2 SC	3	0,067	340,9	5.084,3	0,145	590,1
NCh Z2 SC	5	0,067	378,1	5.667,1	0,145	652,3
NCh Z3 SB	3	0,047	394,5	8.395,7	0,149	795,8
NCh Z3 SB	5	0,046	464,4	9.998,8	0,157	939,7
NCh Z3 SC	3	0,067	340,9	5.084,9	0,145	590,1
NCh Z3 SC	5	0,067	378,1	5.667,6	0,145	652,3

A continuación, se muestran las Curvas de Capacidad para las diferentes variantes de número de modos

considerados y espectros aplicados al modelo M2 (Fig. 5).

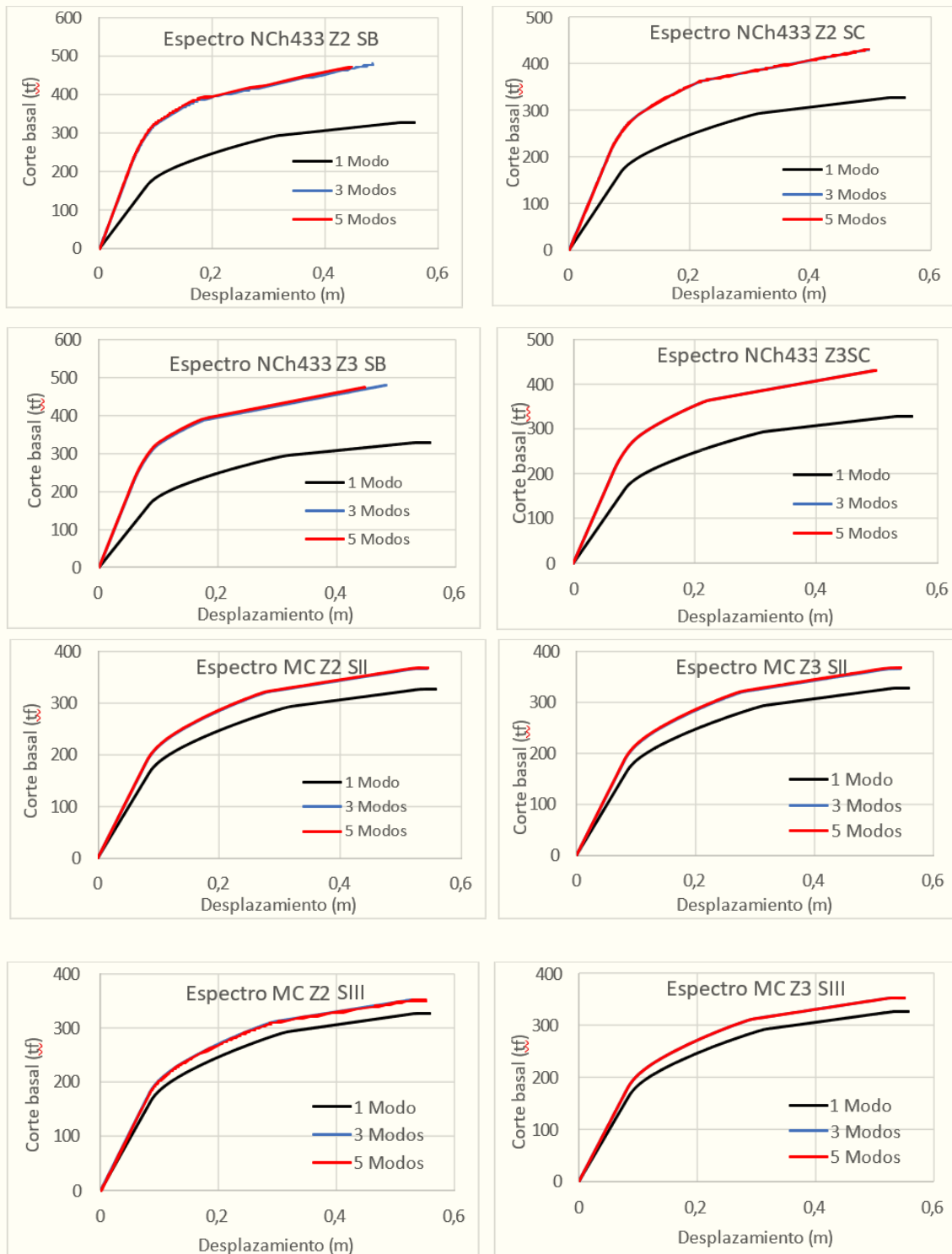


Fig. 5 – Curvas de Capacidad Modelo M2.

Finalmente, en las figuras (Fig. 6 y Fig. 7) se presentan las Curvas de Capacidad obtenidas para el

modelo M2 ordenadas según el número de modos y para los distintos espectros considerados.

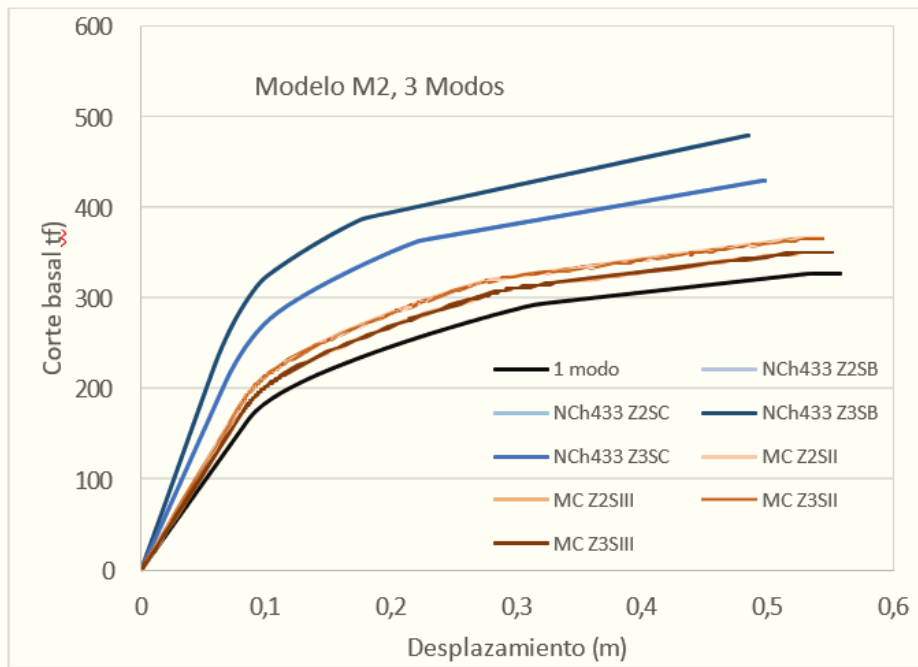


Fig. 6 – Comparación Curvas de Capacidad Modelo M2 con 3 modos

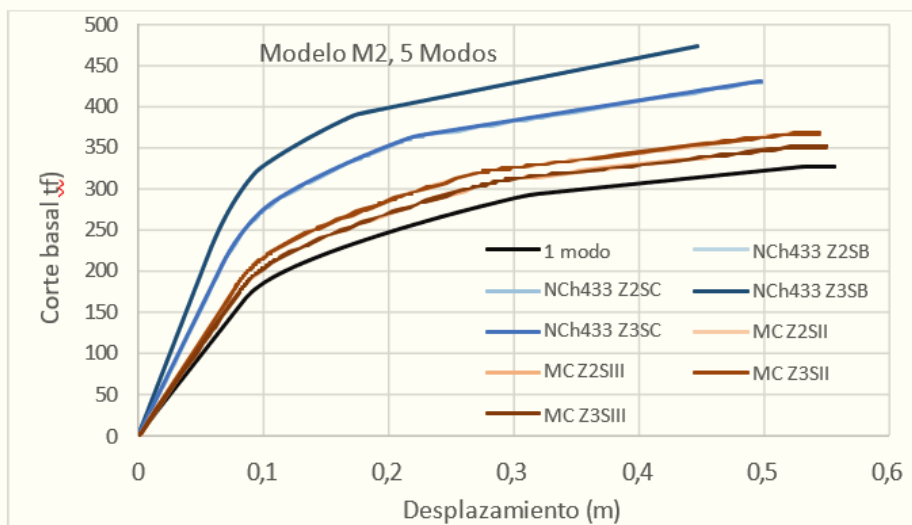


Fig. 7 – Comparación Curvas de Capacidad Modelo M2 con 5 modos.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En general, en las figuras anteriores se aprecia una diferencia importante en la respuesta de las estructuras, especialmente en términos de fuerza de corte, la cual tiende a ser mayor en los casos multimodales (3 y 5 modos) con respecto al análisis monomodal. Este aumento de las fuerzas de corte es particularmente notorio en los casos de respuesta considerando los espectros de NCh433. En términos de desplazamientos no se aprecian diferencias importantes.

Por otra parte, se observa que las curvas multimodales obtenidas (3 y 5 modos) prácticamente se confunden, por lo que podría establecerse que con la participación de algunos modos (mínimo 3 en estos casos) la respuesta se torna aproximadamente estable en comparación a 1 o 2 modos.

De la revisión de las Fig. 6 y 7 se aprecia que varias curvas se encuentran superpuestas. Las curvas que se superponen son aquellas asociadas a los espectros con un mismo tipo de suelo y diferente zona sísmica. Esta situación es lógica, debido a que los espectros de ambas fuentes (NCh433 y Manual de Carreteras) dependen de la magnitud de la aceleración máxima efectiva del suelo de igual manera (el tipo de suelo es el factor que le da la forma al espectro), por lo que las relaciones de proporción entre las ordenadas espectrales de los diferentes modos, para un mismo tipo de suelo, son las mismas.

6. CONCLUSIONES

En primer lugar, se debe recalcar que los resultados indicados se refieren a modelos de edificios típicamente chilenos, los cuales tienen características de regularidad y rigidez que son propias de la forma en que se modela y diseña en nuestro país. Debido a esto, se debe tener cuidado en considerar estos resultados como representativos de modelos estructurales de otros países, con rangos de rigidez y criterios de estructuración y regularidad diferentes.

Como se ha señalado, las curvas de capacidad precedentes muestran una discrepancia importante en la magnitud de las ordenadas y poca variación en las abscisas. Para entender estos resultados hay que pensar que las fuerzas del modo fundamental de vibración no explican adecuadamente la contribución de los modos superiores en la respuesta de la estructura.

Los resultados del “pushover” monomodal se suelen extender para incluir el efecto de los modos

superiores, dividiendo el corte basal por la fracción entre su masa equivalente y la masa total del edificio. Los desplazamientos también se rectifican, pero en este caso, la contribución del modo fundamental es muy predominante. Con estas rectificaciones las curvas mono y multimodal se aproximan bastante, lo que podría llevar a pensar que, en el caso de los modelos de este trabajo, representativos del edificio chileno, sea suficiente hacer un análisis monomodal.

Por otro lado, para los mecanismos de plastificación no basta con esta corrección, debido a que los efectos de los modos superiores podrían alterar significativamente la ubicación y secuencia de rótulas plásticas, especialmente en los pisos superiores del edificio.

Se concluye por lo tanto que, incluso en modelos del edificio chileno, con masas equivalentes por sobre el 60%, deba emplearse el procedimiento multimodal.

Finalmente, se recalca que este tipo de procedimientos “pushover” no reemplazan a aquellos más sofisticados como tiempo-historia no-lineales, sino que aplican como complemento a éstos en términos, por ejemplo, de servir como un análisis preliminar, de comparación o de verificación posterior.

Como perspectiva de trabajo futuro, se pretende estandarizar la solución para casos regulares a través de una comparación entre análisis estático no-lineal versus tiempo-historia, considerando comportamiento geométrico y mecánico no-lineal de los materiales, usando softwares comerciales sofisticados (por ejemplo, SAP, ANSYS, Ruaumoko, etc.). Adicionalmente, y en esta misma línea, se tratará de formular un proyecto que establezca tipos de irregularidades geométricas y mecánicas, en forma de “pushover” mono y multimodal en estructuras tridimensionales y su comparación con análisis tiempo-historia.

Otra línea de trabajo, en la cual ya se está avanzando, es desarrollar análisis IDA (“Incremental Dynamic Analysis”) con estas mismas estructuras, con el objeto de verificar la validez de las curvas de capacidad obtenidas.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el valioso aporte de los ingenieros Julio Galindo Carazas, Hernán Santos Guzmán y Juan Latorre Paiva (de IEC Ingeniería S.A.), por su apoyo en la definición de los modelos de análisis, y Miguel Colque González (del Departamento de Ingeniería en Obras Civiles de la Universidad de La Serena), por su apoyo en el

análisis de los modelos estudiados.

Referencias

- [1] Instituto Nacional de Normalización, “Diseño Sísmico de Edificios”, Norma NCh433.Of96, 1996.
 - [2] Structural Engineers Association of California, “Performance Based Seismic Engineering of Buildings - VISION2000”, 1995.
 - [3] A.K. Chopra and Goel, K.R., “Evaluation of NSP to Estimate Seismic Deformation: SDF System”. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Volume 126 N°4, April 2000.
 - [4] J. Campbell, M. Durán, T. Guendelman, “Procedimiento Demanda-Capacidad Multimodal“, IX Congreso de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Concepción, Chile, Noviembre 2005.
 - [5] J. Campbell, M. Durán, T. Guendelman, S. Páez, “Procedimiento Demanda-Capacidad Multimodal Modificado”, XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Santiago, Chile, Mayo 2008.
 - [6] T. Guendelman, F. Medina, M. Guendelman, L. Figueroa, “Perfil Bío-Sísmico de Edificios 3.0”, *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*, Vol. 129, N°3, diciembre de 2017, contenida en la *Revista Chilena de Ingeniería* ISSN 0370 – 4009 - N°482, - Diciembre 2017.
 - [7] Ministerio de Obras Públicas, “Manual de Carreteras, Volumen 3. Instrucciones y criterios de diseño”. Dirección de Vialidad, Edición 2018.
-

OPTIMIZATION OF PARAMETERS IN CONSTITUTIVE MODELS FOR CONSOLIDATED UNDRAINED TRIAXIAL COMPRESSION TESTS USING GENETIC ALGORITHMS

A. Gavidia¹, C. Morales² y G. Corral³

RESUMEN

La pérdida de resistencia del suelo en condiciones no drenadas es una de las principales causas de falla en proyectos de ingeniería geotécnica. El modelo constitutivo más utilizado a nivel mundial es el modelo lineal elástico perfectamente plástico de Mohr-Coulomb, el cual no logra representar adecuadamente el comportamiento no drenado, lo que conlleva a diseños poco conservadores o configuraciones de parámetros no recomendadas para simular la pérdida de resistencia. Para abordar este problema, se utiliza la metodología de actualización de parámetros propuesta por Corral (2013), basada en algoritmos genéticos. Se comparan tres modelos constitutivos: Mohr-Coulomb, Hardening Soil small-strain stiffness y NorSand, disponibles en el software comercial PLAXIS. La metodología para la optimización de parámetros utiliza ensayos de compresión triaxial no drenados y considera los errores de medición máximos admisibles según ASTM D4767. Se demuestra la ventaja de esta metodología sobre el ajuste de parámetros tradicional. Además, se comparan los diferentes modelos constitutivos y se evidencia la superioridad de los modelos avanzados sobre el modelo lineal elástico perfectamente plástico, logrando mejoras que van del 50 % al 98 % en algunos ensayos triaxiales no drenados. Se observa cómo, mediante modelos avanzados y esta metodología, es posible representar la trayectoria de esfuerzos y simular la pérdida de resistencia que puede causar fallas frágiles en proyectos geotécnicos.

Palabras claves: Ensayos triaxiales no drenados, optimización de parámetros, algoritmos genéticos

ABSTRACT

The loss of soil strength in undrained behavior is one of the main causes of failure in geotechnical engineering projects. The most widely used constitutive model worldwide is the linear-elastic-perfectly plastic Mohr-Coulomb model, which is unable to adequately represent undrained behavior, leading to non-conservative designs or parameter configurations not recommended for simulating strength loss. To address this problem, the parameter updating methodology proposed by Corral (2013), based on the genetic algorithm, is used. Three constitutive models are compared: Mohr-Coulomb, Hardening Soil small-strain stiffness, and NorSand, available in the commercial software PLAXIS. The methodology for parameter optimization using undrained triaxial compression tests and considering the maximum allowable measurement errors according to ASTM D4767. The advantage of this methodology over traditional parameter adjustment is demonstrated. Additionally, the different constitutive models are compared, and the superiority of advanced models over the linear-elastic-perfectly plastic model is evidenced, achieving improvements ranging from 50 % to 98 % in some undrained triaxial tests. It is observed how, through advanced models and this methodology, it is possible to represent the stress path and simulate the strength loss that can cause brittle failures in geotechnical projects.

Keywords: Undrained triaxial tests, Parameter optimization, Genetic algorithm

¹ SRK Consulting SpA, agavidia@srk.cl

² SRK Consulting SpA, camorales@srk.cl

³ Inteligencia Geotécnica SpA, gcorral@inteligenciageotecnica.com

1. INTRODUCTION

In geotechnical engineering, limit equilibrium models are commonly used for physical stability analysis of slopes. Nevertheless, this method cannot provide any information about the deformations. The finite element and finite difference methods allow solving this great limitation. However, the implementation of these analysis methods entails other challenges, mainly related to the selection and calibration of constitutive models to represent the behavior of geomaterials.

The most widely used constitutive model in the world is the linear-elastic-perfectly plastic Mohr-Coulomb (MC) model. However, this model has significant restrictions for simulating undrained soil behavior, since it does not adequately reproduce the stress path, maintaining the mean effective stress constant during the evolution of behavior [1][2]. On the other hand, advanced constitutive models like MIT-E3 [3] can accurately capture undrained soil behavior. However, this model is not available in commercial applications like PLAXIS, one of the widely used finite element programs for deformation analysis. Reproducing this behavior in numerical models is essential for developing reliable analysis; for this reason, more advanced alternatives such as Hardening Soil small-strain stiffness (HSs) and NorSand (NS) exist, which can better capture the undrained stress path and the strength loss of soft soils, a critical phenomenon in geotechnical engineering project failures.

The calibration of parameters in constitutive models is crucial to achieve an adequate representation in a geotechnical project. However, the absence of sufficient geotechnical tests in projects or the experience of the person in charge of the analysis can hinder the routine use of these models, increasing the risk of significant errors when the inherent limitations of each model are unknown. Various studies have proposed the use of inverse analysis at the element scale to adjust parameters, obtaining favorable results through genetic algorithms [4][5].

This article applies the parameter optimization methodology by Corral (2013) [6], which aims to calibrate the soil response in undrained triaxial

compression tests (TxCU) exhibiting strength loss behavior. The allowable errors according to ASTM D4767 [7], which establishes an accuracy of 1% of the axial load at failure, and pressure control within 2 kPa for effective consolidation pressures less than 200 kPa and within 1 % for effective consolidation pressures greater than 200 kPa.

2. PARAMETER UPDATING METHODOLOGY

The parameter updating methodology consists of a series of iterative steps, represented in Figure 1. The process begins with obtaining laboratory measurements (m), from which the parameters of the selected constitutive model are adjusted to obtain initial predictions (p).

With the initial predictions and the measurements, two key parameters proposed by Corral (2013) [6] are calculated: the Structured Square Residual (SSR) and the Structured Global Variance (SGV). Then the Sensitivity Analysis is performed to identify the parameters of the constitutive model to be updated, followed by the Inverse Analysis to obtain the update parameters of the constitutive model, thus allowing for more accurate numerical model predictions.

In summary, this methodology integrates TxCU test results with finite element models for parameter adjustment and adequate representation of soil behavior. The integration is achieved through the combination of sensitivity analysis and inverse analysis, thus favoring the improvement of numerical predictions and model adjustment. To ensure a satisfactory response at the element level, the recommendations of Tasso et al. (2024) [8] are followed, where should be compared: (i) the stress path in terms of deviatoric stress ($q = \sigma'_1 - \sigma'_3$) and mean effective stress ($p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$), (ii) the relationship between deviatoric stress and axial strain, and (iii) the evolution of the excess pore pressure respect to axial strain.

The application of this methodology requires the estimation of the covariance matrix and the error structure, as defined in Corral (2013) [6]. Considering that the estimation of both variables involves the calculation of variance, based on the ASTM D4767 [7], for this article a general standard deviation of 1% is established for all recommended variables [8], including deviatoric stress, mean effective stress, and excess pore pressure.

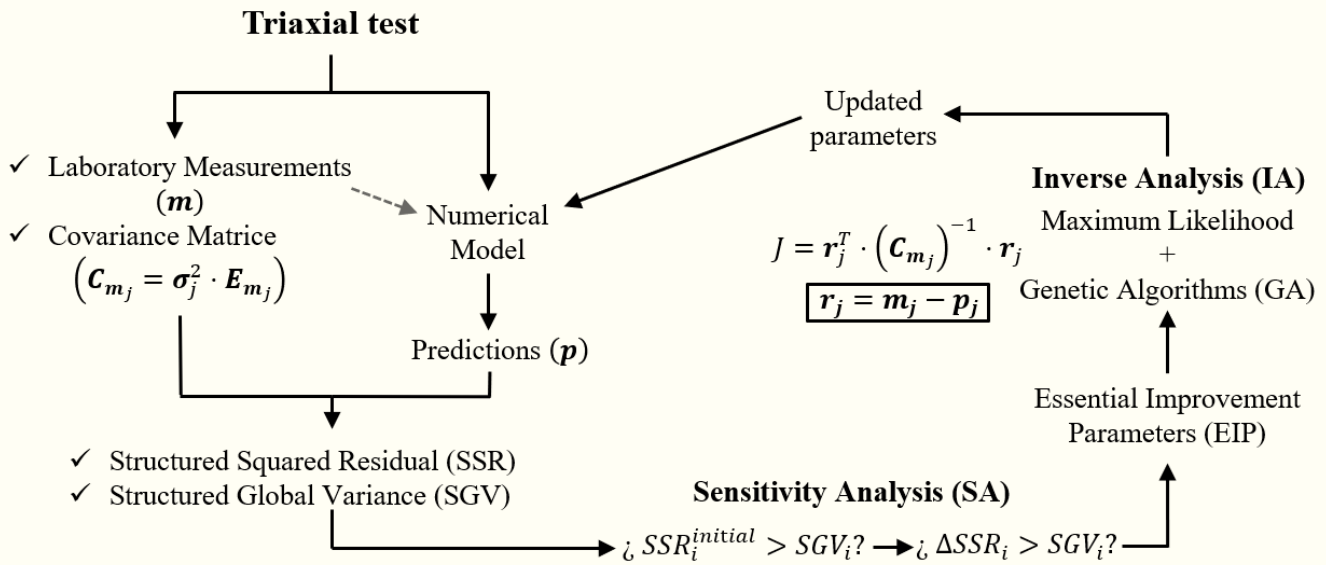


Figure 1. Simplified procedure for parameter updating

As an error structure, the maximum likelihood approach is used (J), detailed in Eq.1, which is defined through covariance matrices (C_{m_j}) and residual vectors (r_j), the residual vector being the difference between the measurement (m) and the prediction (p).

$$J = \sum_j^t \left[r_j^T \cdot (C_{m_j})^{-1} \cdot r_j \right] \quad \text{Eq.1}$$

The main advantage of using Eq.1 lies in the possibility of combining different types of measurements with various units, allowing this methodology to be applied to both drained and undrained triaxial tests, enabling the joint adjustment of volumetric deformations and other variables involved with pressure. Finally, this methodology, through a genetic algorithm, to minimize Eq.1 by varying the parameters identified as critical in the sensitivity analysis. Subsequently, to quantify the improvement obtained after the inverse analysis, the incremental improvement ratio is used in relation to the initial value of J described in Eq..

$$\text{Improvement} = \frac{J_{Optimized}^{Average} - J_{Initial}^{Average}}{J_{Initial}^{Average}} \quad \text{Eq.2}$$

3. CASE STUDY

This study employs twelve tests of a low plasticity sandy silt gold tailing characterized by Reid (2023) [9]. This

program includes a set of triaxial compression tests, with isotropic and anisotropic consolidation stages, different mean effective stress conditions; in addition, drained and undrained shearing. The specimens tested were performed by Air Dried (AD) and Moist Tamped (MT).

For the implementation of the methodology, three constitutive models are used: MC, as it is the most widely used constitutive model in the industry, and the constitutive models HSs and NS, which allow for a more accurate representation of the non-linear behavior of soils and are used in flow liquefaction analysis [10].

The data used includes between 600 and 1,200 measurement points per triaxial test, considering three fundamental variables: deviatoric stress, mean effective stress, and excess pore pressure [8]. From these data, the average error is obtained using Eq.1. Figure 2 shows the error associated with the initial parameter adjustment ($J_{Initial}^{Average}$), where adjustments are made through traditional methods, for example, from theoretical adjustments recommended for each constitutive model. Likewise, the error after applying the methodology ($J_{Optimized}^{Average}$) is also observed, showing a significant improvement. When quantifying the improvement with Eq. an 84% error reduction is observed in the NS model, 68% in the HSs model, and 22% in the MC model, as a general average of all triaxial tests.

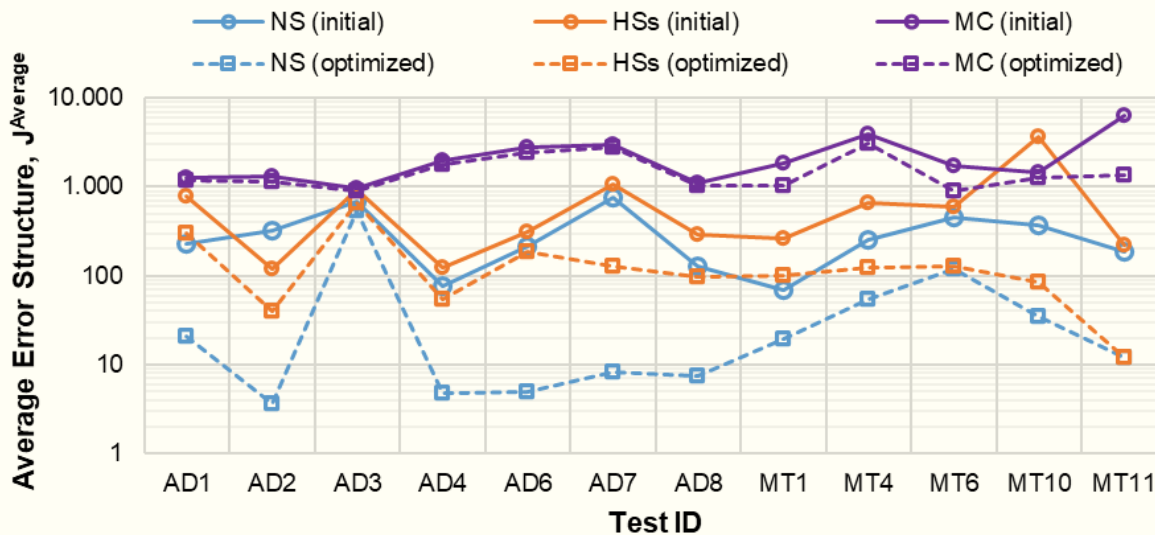


Figure 2. Error structure for initial adjustment and final adjustment after parameter optimization

4. CONCLUSIONS

In the application of the methodology, a consistent improvement in the adjustment of undrained triaxial test results is observed. The NS constitutive model demonstrates better performance in comparison between the evaluated constitutive models, while the HSs model also shows a notable ability to reproduce undrained triaxial tests. In contrast, the MC model does not achieve satisfactory adjustment, as it does not adequately represent the stress path and maintains an almost constant effective mean pressure until reaching the critical state line. This limitation forces the representation of strength loss to depend mainly on the dilatancy parameter.

Although the methodology facilitates the parameter calibration process in different constitutive models, the breadth of the search ranges used in the genetic algorithm makes it difficult to identify the best possible adjustment. Additionally, unusual or unrealistic parameter values are often used to optimize the adjustment, especially in the case of the MC model, where average friction angle values of 15° and dilatancy angles of -3.8° are obtained to represent strength loss behavior, highlighting the inherent limitations of this model in representing stress paths.

The validation of the methodology should be extended to a single set of triaxial tests and optimized using

specimens with identical initial conditions. In this study, twelve independent tests are optimized, with each specimen having different initial conditions.

REFERENCES

- [1] Corral Jofré, G. A. Re-analysis of deep excavation collapse using a generalized effective stress soil model. Thesis (Civ. E.) – Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering; 2010.
- [2] Bentley. PLAXIS Material Models Manual 2D; 2024.
- [3] Whittle, A. J., & Kavvas, M. J. Formulation of MIT-E3 constitutive model for overconsolidated clays. *Journal of Geotechnical Engineering*; 1994. 120(1). p. 173–198.
- [4] Rokouzzaman, Md., & Sakai, T. Calibration of the parameters for a hardening-softening constitutive model using genetic algorithms. *Computers and Geotechnics*. 2010. 37(4), p. 573–579.
- [5] Samarajiva, P., Macari, E. J., & Wathugala, W. Genetic Algorithms for the Calibration of Constitutive Models for Soils. *International Journal of Geomechanics*. 2005. 5(3), p. 206–217.
- [6] Corral Jofré, G. A. Methodology for updating numerical predictions of excavation performance. Thesis (Sc. D. in Geotechnical Engineering) –

Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering; 2013.

- [7] American Society for Testing and Materials. ASTM D4767-11: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils; 2020.
- [8] Tasso, N., Rivarola, F. L., De Santiago, O., Rivas, N., & Sottile, M. Calibrating constitutive models for flow liquefaction: a word of caution. In International Symposium of Tailing Deposits. Hotel Sheraton Soberano, Chihuahua, Mexico; 2024.
- [9] Reid, D. Slope stress prediction benchmarking exercise: Triaxial calibration data; 2023.
- [10] Sottile, M. A comparison of advanced constitutive models to evaluate flow liquefaction of upstream raised tailings dams. Proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE), La Serena, Chile; 2024.
-

THREE-DIMENSIONAL INVERSION OF ACTIVE SEISMIC GEOPHYSICAL TESTS BASED ON SURFACE WAVES

R. Vega¹, E. Sáez¹, J.C. Tiznado¹ y F. López-Caballero²

RESUMEN

La caracterización precisa de la velocidad de ondas de corte superficiales (V_s) es crucial para los estudios de amplificación sísmica de sitio. Los métodos tradicionales de ondas superficiales se basan en modelos estratificados unidimensionales (1D) ajustados a curvas de dispersión empíricas, los cuales pueden ser inapropiados en sitios altamente heterogéneos. Este estudio evalúa un esquema de inversión de onda completa (FWI) utilizando modelación de un ensayo de fuente activa por el método de elementos espectrales (SEM). Se comparan dos modelos: un perfil estratificado derivado de inversión MASW-1D y un modelo heterogéneo, a partir de exploración MASW-2D, que incorpora variabilidad lateral en los 50 m superiores. Las simulaciones realizadas con SEM3D muestran que ambos modelos reproducen los tiempos de llegada. Sin embargo, el modelo basado en MASW-2D captura de mejor manera las amplitudes de las formas de onda y las fases secundarias, lo que pone de manifiesto la importancia de considerar la heterogeneidad lateral en estos análisis. A futuro, para cuantificar la heterogeneidad del modelo y mejorar su confiabilidad, se recomienda utilizar un enfoque basado en datos, que incorpore bases de datos sintéticas y redes neuronales.

Palabras claves: Ondas superficiales, MASW, SEM3D, velocidad de onda de corte, redes neuronales

ABSTRACT

Accurate characterization of near-surface shear-wave velocity (V_s) is critical for seismic site response analyses. Conventional surface-wave methods rely on 1D layered models fitted to empirical dispersion curves, which may be inadequate in heterogeneous conditions. This study evaluates a full-wave inversion (FWI) approach using spectral element (SEM) modeling of an active-source test. Two models are compared: a layered profile derived from MASW-1D inversion and a heterogeneous model from MASW-2D exploration incorporating lateral variability within the upper 50 m. Simulations performed with SEM3D show both models reproduce arrival times. However, the MASW-2D model better captures waveform amplitudes and secondary phases, which highlights the importance of lateral heterogeneity. A data-driven framework using synthetic databases and neural networks is recommended in future analyses to quantify heterogeneity and improve model reliability.

Keywords: Surface waves, MASW, SEM3D, shear-wave velocity, neural networks

¹ Pontificia Universidad Católica de Chile

² Université Paris-Saclay / CentraleSupélec

1. INTRODUCTION

Traditional seismic site classification techniques have historically relied on invasive testing methods that produce penetration indicators of the studied site and often require extensive fieldwork. In recent years, there has been increasing interest in geophysical techniques that avoid soil disturbance and offer more efficient site characterization alternatives [1], in addition to characterizing materials in a range of elastic strains, much closer to the range of deformations expected in an earthquake. Among these, surface wave-based methods have gained widespread use, as they enable the estimation of shear wave velocity (V_s) profiles taking advantage of the dispersive natures of surface waves [2].

One of the most widely used surface wave methods is the Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), which involves deploying a linear array of geophones and generating controlled impacts to record the induced surface wave propagation [3]. This technique enables the construction of one-dimensional (1D) V_s profiles by analyzing the dispersion of Rayleigh and/or Love waves. However, the assumption of lateral homogeneity in MASW-1D can be overly simplistic, particularly in stratified or heterogeneous geological sites where lateral variations significantly affect seismic response.

To address this, the MASW-2D method was developed [4]. It enhances lateral resolution by applying the common midpoint (CMP) concept and cross-correlation techniques to generate dispersion curves from multiple source-receiver pairs along the array [5,6]. These curves are then inverted to produce 2D shear wave velocity models that potentially capture subsurface heterogeneity better. Nevertheless, MASW-2D surveys require a significantly higher number of impacts and processing effort, which can be limiting in field applications. Furthermore, the constructed 2D section is basically an overlay of 1D profiles and not really a resolution of the heterogeneous nature of the site.

In this context, numerical modeling offers a powerful tool to simulate wave propagation under different subsurface conditions and evaluate the implications of using simplified or incomplete models. The Spectral Element Method (SEM) [7], implemented in SEM3D

[8], allows for high-fidelity simulations of seismic wavefields in complex media.

This study proposes an alternative approach based on the development of a database of controlled-perturbed subsurface models derived from a baseline MASW-1D layered structure. By simulating seismic wave propagation for each perturbed model and quantifying the mismatch against recordings, a machine learning model is trained to learn the relationship between local perturbations in shear wave velocity and their impact on surface waves propagation. The trained model is then used to modify the initial MASW-1D velocity structure in a data-driven manner, through regression, with the aim of improving the agreement between synthetic and observations. This approach is evaluated against a fully heterogeneous SEM3D model constructed from MASW-2D field data, to assess whether a statistically enhanced MASW-1D model can provide a comparable or improved representation of site response.

2. METODHOLOGY

This study was conducted at the Cendyr site in La Serena, northern Chile, as part of the FONDEF project ID22I10032. Surface wave data were acquired along six seismic lines using linear arrays of 24 geophones (4.5 Hz), with spacings of 2, 4, and 5 meters (Figure 1). A 100-kg drop mass was used as the active source, released from a height of 2 meters at varying distances along each array. The Vertical component was recorded, including an accelerometer mounted on the drop mass to monitor the mass drop to estimate the equivalent force applied to the surface.

Three methods were applied to characterize the subsurface shear wave velocity (V_s): MASW, MASW-2D, and HVSr. MASW and HVSr data were processed using Geopsy [9], and MASW2D dispersion curves were obtained from recordings using SeisImager [10]. The 1D and 2D V_s profiles derived from these methods were used as input for numerical modeling.

To simulate seismic wave propagation, a layered model based on the MASW-1D results was implemented in SEM3D. A database of controlled-perturbed models was then generated by introducing local variations in V_s within cubic regions of the domain. Each perturbed model was simulated using SEM3D, and synthetic waveforms were compared to the real field data to compute a misfit.

This database was used to train a machine learning regression model that learns the relationship between local V_s perturbations and their effect on ground motion. The trained model was then applied to modify the initial MASW-1D model, producing a data-driven version of the velocity structure. This new model was also simulated in SEM3D and compared to a reference simulation based on the full MASW-2D field data, allowing for evaluation of the proposed method.

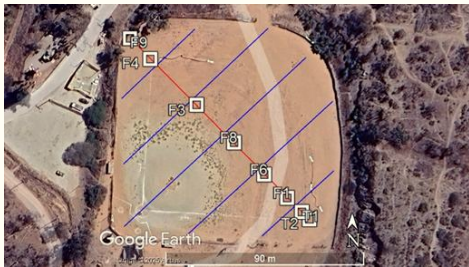


Fig. 1. Study area Cendyr

3. RESULTS

Figure 2 presents a vertical cross-section at $X = 0$ m for the two SEM3D input models. The left panel corresponds to the layered model derived from MASW-1D, while the right panel displays the model constructed from MASW-2D tests. The MASW-1D model assumes lateral homogeneity, resulting in horizontal velocity layers, whereas the MASW-2D model captures significant lateral variations in shear wave velocity (V_s) upper 50 m. These differences are expected to influence the propagation of surface seismic waves in subsequent SEM3D simulations.

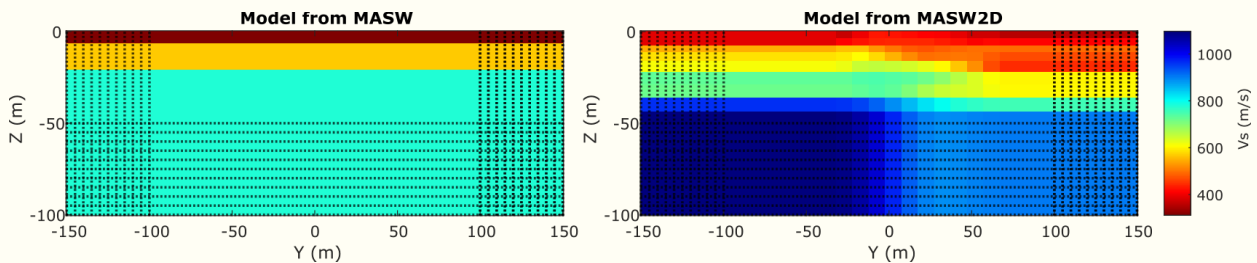


Figure 2. Vertical cross-section at $X = 0$ m showing the shear wave velocity (V_s) distribution used in SEM3D simulations. **Left:** Layered model derived from MASW-1D, assuming horizontal stratigraphy and lateral homogeneity. **Right:** Heterogeneous model constructed from MASW-2D, incorporating lateral variations in V_s observed in the field. The dotted lines at the model boundaries represent the Perfectly Matched Layer (PML).

To evaluate the performance of the two input models, synthetic seismograms generated with the two SEM models were compared against recordings. Figure 3

illustrates representative traces of the vertical component at station G1 located 8 m from the drop mass.

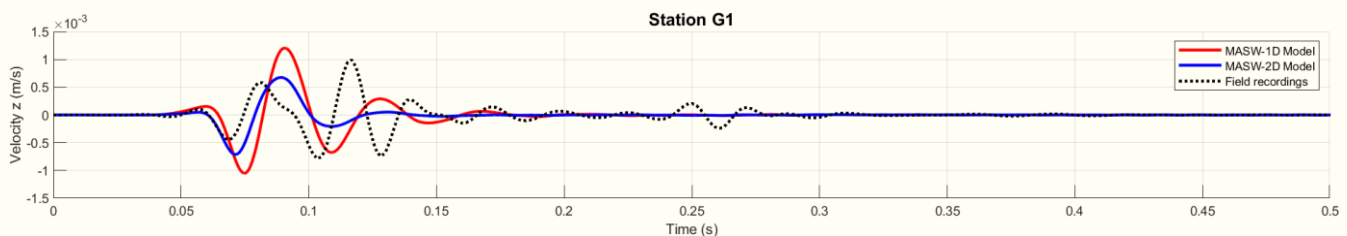


Figure 3. Comparison of observed (dashed black) and synthetic vertical-component seismograms at station G1. Red trace: SEM3D simulation with MASW-1D model. Blue trace: SEM3D simulation with MASW-2D model.

Both models reproduce the time of the first arrival, but their amplitudes and waveform shapes differ from the field data. The MASW-1D model overestimates the peak amplitude of the main pulse and yields a simpler waveform, consistent with its lateral homogeneity assumption. In contrast, the MASW-2D model provides a closer match to both the amplitude and the complexity of secondary wavelets between ~ 0.10 – 0.25 s, better reflecting the coda observed in the recordings. This indicates that near-surface lateral Vs variations are required to explain the measurements at this site. Remaining mismatches around the 0.12–0.15 s packet suggest additional refinements may be needed in the shallow Vs structure and/or in the source–time function and damping parameters used in the simulations.

4. CONCLUSIONS

This study compared SEM3D simulations based on two input models: a layered MASW-1D profile and a heterogeneous MASW-2D model. While both models reproduce the timing of the first arrivals, the MASW-2D model provides a closer match to waveform amplitudes and secondary phases, underscoring the role of lateral Vs variations in near-surface response. However, a systematic quantification of error is still required to objectively evaluate model performance across all sensors. Future work will therefore focus on computing misfit metrics and applying neural networks trained on perturbed Vs models, with the aim of refining MASW-based structures and further reducing discrepancies between observed and simulated waveforms.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by FONDEF project ID22I10032. The authors gratefully acknowledge this funding, which made field experiments and simulations possible.

6. REFERENCES

- [1] Rana S, Mishra VN, Rai PK. Applications of Geophysics in Structural and Geotechnical Engineering. *Best Practices in Geotechnical and Pavement Engineering*; 2024. p. 323–334.
- [2] Humire Guarachi FA. Aplicación de métodos geofísicos basados en ondas superficiales para la caracterización sísmica de suelos: Aplicación a la microzonificación sísmica del norte y poniente de Santiago. Tesis de doctorado, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago; 2013.
- [3] Park CB, Miller RD, Xia J. Multichannel analysis of surface waves (MASW). *Geophysics* 1999; 64(3): 800–808.
- [4] Park CB, Miller RD, Xia J, Ivanov J. Multichannel analysis of surface waves (MASW)—Active and passive methods. *The Leading Edge* 2007; 26(1): 60–64.
- [5] Hayashi K, Suzuki H. CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface wave data. *Exploration Geophysics* 2004; 35: 7–13.
- [6] Askari R, Ferguson RJ, Isaac JH, Hejazi SH. Estimation of S-wave static corrections using CMP cross-correlation of surface waves. *Journal of Applied Geophysics* 2015; 121: 42–53.
- [7] Komatitsch D., Tromp J. (1999). The spectral element method: An efficient tool to simulate the seismic response of 2D and 3D geological structures. *Geophysical Journal International*, 139, 806–822.
- [8] CEA, CentraleSupélec, IPGP, CNRS (2017). *SEM3D Ver 2017.04. Registered at French Agency for Protection of Programs (Dépôt APP). France IDDN.FR.001.400009.000. S.P.2018.000.31235.*
- [9] Wathelet M., Chatelain J.L., Cornou C., Giulio G.D., Guillier B., Ohrnberger M., Savvaidis A., Bard P.Y. (2020). Geopsy: A user-friendly open-source tool set for ambient vibration processing. *Seismological Research Letters*, 91(3), 1878–1889.
- [10] Geometrics Inc. (2017). *SeisImager/2DTM Manual, Version 4.0*. Geometrics Inc., San Jose, California, USA.

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Empresas Socias

ANGLO AMERICAN CHILE LTDA.

ANTOFAGASTA MINERALS S.A.

ASOCIACIÓN DE CANALISTAS SOCIEDAD DEL CANAL DE MAIPO

BESALCO S.A.

CÍA. DE PETRÓLEOS DE CHILE COPEC S.A.

CyD INGENIERÍA LTDA.

EMPRESA CONSTRUCTORA BELFI S.A.

EMPRESA CONSTRUCTORA GUZMÁN Y LARRAÍN SpA

EMPRESA CONSTRUCTORA PRECON S.A.

EMPRESA NACIONAL DE TELECOMUNICACIONES S.A.

EMPRESAS CMPC S.A.

ENAEX S.A.

INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN SIGDO KOPPERS S.A.

SOCIEDAD QUÍMICA Y MINERA DE CHILE S.A.

EMPRESAS DE INGENIERÍA COLABORADORAS

ACTIC CONSULTORES LTDA.

ARCADIS CHILE S.A.

IEC INGENIERÍA S.A.

JRI INGENIERÍA S.A.

LEN Y ASOCIADOS INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

SYNEX CONSULTORES LTDA.



Nuestros canales digitales:

Sitio web: www.iing.cl

Linkedin: <https://www.linkedin.com/company/64274333/admin/>

E-mail: iing@iing.cl · secretaria@institutodeingenierosdechile.cl

Nuestros teléfonos:

(+56) 22696 8647 · (+56) 93736 0656