

Revista Chilena de

# INGENIERIA

ISSN 0370 - 4009 - N° 495 - Abril 2022



# Anales del Instituto de Ingenieros

Vol. 134, N° 1 - ISSN 0716 - 2340

# INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Fundado en 1888

Miembro de la Unión Panamericana de Asociaciones de Ingenieros (UPADI)

Miembro de la American Society of Civil Engineers (ASCE)

## JUNTA EJECUTIVA

### *Presidenta*

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

### *Primer Vicepresidente*

Ricardo Nicolau del Roure G.

### *Segundo Vicepresidente*

Cristian Hermansen Rebolledo

### *Tesorero*

Jorge Pedrals Guerrero

### *Protesorera*

Marcela Munizaga Muñoz

### *Secretario*

Germán Millán Valdés

### *Prosecretaria*

Ximena Vargas Mesa

## DIRECTORIO 2022

Elías Arze Cyr

Dante Bacigalupo Marió

Marcial Baeza Setz

Fernando Bravo Fuenzalida

Juan E. Castro Cannobbio

Alex Chechilnitzky Zwicky

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Alejandra Decinti Weiss

Álvaro Fischer Abeliuk

Roberto Fuenzalida González

Rodrigo Gómez Álvarez

Mauro Grossi Pasche

Cristian Hermansen Rebolledo

Carlos Mercado Herreros

Viviana Meruane Naranjo

Germán Millán Valdés

Marcela Munizaga Muñoz

Juan Music Tomicic

Ricardo Nanjarí Román

Ricardo Nicolau del Roure G.

José Orlandini Robert

Jorge Pedrals Guerrero

Luis Pinilla Bañados

Daniela Pollak Aguiló

Miguel Ropert Dokmanovic

Alejandro Steiner Tichauer

Luis Valenzuela Palomo

Ximena Vargas Mesa

René Vásquez Canales

Scarlett Vásquez Paulus

### *Secretario General*

Carlos Gauthier Thomas

## SOCIEDADES ACADÉMICAS MIEMBROS DEL INSTITUTO

ASOCIACIÓN CHILENA  
DE SISMOLOGÍA E INGENIERÍA  
ANTISÍSMICA, **ACHISINA**.

Presidente: Jorge Carvallo W.

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

Presidente: Alexander Chechilnitzky Z.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA  
HIDRÁULICA, **SOCHID**.

Presidenta: Scarlett Vásquez P.

SOCIEDAD CHILENA  
DE GEOTECNIA, **SOCHIGE**.

Presidente: Roberto Gesche S.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA  
DE TRANSPORTE, **SOCHITRAN**.

Presidenta: Marisol Castro A.

**PMI SANTIAGO CHILE CHAPTER**.

Presidente: Alfonso Barraza San M.

SOCIEDAD CHILENA DE EDUCACIÓN  
EN INGENIERÍA, **SOCHEDI**.

Presidente: Raúl Benavente G.

## COMISIONES DEL INSTITUTO

**APRENDIZAJES EN INGENIERÍA,  
MODALIDAD VIRTUAL**.

Presidenta: Silvana Cominetti C.

**INGENIEROS EN LA HISTORIA PRESENTE**.

Presidente: Ricardo Nanjarí R.

**LA MUJER EN EL ESTUDIO Y EJERCICIO  
DE LA INGENIERÍA**.

Presidenta: Viviana Meruane N.

**CALIDAD DE LA INGENIERÍA  
EN PROYECTOS DE INVERSIÓN**.

Presidente: Ricardo Nicolau del Roure G.

**EL HIDRÓGENO VERDE Y LAS ENERGÍAS  
RENOVABLES**.

Presidente: Cristian Hermansen R.

**EL ESTADO, SU EFICIENCIA, SU ROL  
Y LOS DESAFÍOS FUTUROS**.

Presidente: Jorge Pedrals G.

**LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO**.

Presidente: Luis Nario M.

## CONSEJO CONSULTIVO

Raquel Alfaro Fernandois

Elías Arze Cyr

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Bruno Behn Theune

Sergio Bitar Chacra

Mateo Budinich Diez

Juan Enrique Castro Cannobbio

Jorge Cauas Lama

Joaquín Cordua Sommer

Alex Chechilnitzky Zwicky

Álvaro Fischer Abeliuk

Roberto Fuenzalida González

Alejandro Gómez Arenal

Tomás Guendelman Bedrack

Diego Hernández Cabrera

Jaime Illanes Piedrabuena

Agustín León Tapia

Nicolás Majluf Sapag

Jorge Mardones Acevedo

Carlos Mercado Herreros

Germán Millán Pérez

Guillermo Noguera Larraín

Luis Pinilla Bañados

Rodolfo Saragoni Huerta

Mauricio Sarrazin Arellano

Raúl Uribe Sawada

Luis Valenzuela Palomo

Solano Vega Vischi

Hans Weber Münnich

Andrés Weintraub Pohorille

Jorge Yutronic Fernández



# Lleva a tu empresa por un camino diferente



Wholesale & Investment Banking de Bci te acompaña en la transformación de tu empresa, para que se convierta en un negocio cada vez más **sostenible**.

Conoce más en [bci.cl/empresas/asg](http://bci.cl/empresas/asg)

**Acción  
diferente**

Infórmese sobre la garantía estatal de sus depósitos en su banco o en [www.cmfchile.cl](http://www.cmfchile.cl)



Wholesale & Investment Banking



Estimados Señores/as:

Informamos a usted, que nuestra página web [www.iing.cl](http://www.iing.cl) se encuentra en construcción.

Por tal razón, rogamos dirigir sus requerimientos de información de documentos, publicaciones, actividades e invitaciones, como también, las solicitudes de ingreso de socios a la Secretaría del Instituto.

También puede acceder al enlace de LinkedIn:

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

Teléfonos (+56) 22696 8647 y (+56) 93736 0656

E-mail: [iing@iing.cl](mailto:iing@iing.cl) - [institutodeingenieros@gmail.com](mailto:institutodeingenieros@gmail.com)

Esperando su comprensión, le saluda atte.

Carlos Gauthier T.

Secretario General Instituto de Ingenieros de Chile



## Nuestra portada

Infraestructura hacia el año 2030. Es muy importante pensar cuál es la estrategia de desarrollo que un país como el nuestro debe diseñar para poder avanzar sustantivamente en la generación del crecimiento, de capacidades productivas, de productos y distribución adecuada de estos, hacia todos los habitantes del país.

Créditos fotográficos: Robert Stokoe en Pexels.; ThisIsEngineering en Pexels; rawpixel.com formulario PxHere; American Public Power Association en Unsplash; Rabih Shasha en Unsplash.

## REVISTA CHILENA DE INGENIERÍA N° 495, abril de 2022

Dirección: San Martín N° 352, Santiago  
Teléfonos: 22696 8647 - 22698 4028 - 22672 6997  
www.iing.cl • e-mail: iing@iing.cl

### DIRECTOR

Raúl Uribe S.

### CONSEJO EDITORIAL

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

### REPRESENTANTE LEGAL

Silvana Cominetti Cotti-Cometti  
Dirección: San Martín N° 352, Santiago

### SECRETARIO GENERAL

Carlos Gauthier T.

### SECRETARÍA

Patricia Núñez G.

### DIAGRAMACIÓN

versión productora gráfica SpA

## EDITORIAL

Pág. 2

## LA CIENCIA DETRÁS DE LA CARBONO-NEUTRALIDAD

Pág. 3

Conferencia de la Sra. Maisa Rojas,  
Directora del Centro de Ciencia del Clima  
y la Resiliencia (CR)2.

## APRENDIENDO CAMBIO CLIMÁTICO DESDE LA PANDEMIA

Conferencia de la Sra. Laura Gallardo,  
Investigadora del Centro de Ciencia  
del Clima y la Resiliencia (CR)2.

## DESAFÍOS POR ABORDAR EN INFRAESTRUCTURA HACIA EL AÑO 2030

Pág. 24

Conferencia del Sr. Carlos Cruz L.,  
Director Ejecutivo del CPI.

## FORO: LA MINERÍA FRENTE AL PROCESO CONSTITUCIONAL, SUS APORTES Y DESAFÍOS

Pág. 44

Expositores, señores:

- Sr. Elías Arze C., Consejero Nacional del Colegio de Ingenieros de Chile A.G.
- Sr. Jorge Pedrals G., Presidente de la Comisión de Política Minera del Instituto de Ingenieros de Minas de Chile.
- Gustavo Lagos, Profesor del Departamento Ingeniería en Minas de la P. Universidad Católica de Chile.
- Willy Kracht, Director del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile.
- Sergio Bitar, Ex Ministro de Minería.

## ENTREVISTA

### A INGENIEROS DESTACADOS

Pág. 66

– Sr. Álvaro Fischer Abeliuk  
– Sr. Rodolfo Saragoni Huerta  
Comisión de Ingenieros en la Historia Presente  
Presidente: Ricardo Nanjarí R.

El 30 de junio de 2021 se desarrollaron las conferencias de Maisa Rojas, Directora del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Doctora en Física Atmosférica por la Universidad de Oxford y Laura Gallardo, investigadora de la misma institución, Doctora en Meteorología Química por la Universidad de Estocolmo. La señora Maisa dictó la conferencia “La ciencia detrás de la Carbono-Neutralidad” y la señora Gallardo, la conferencia “Aprendiendo Cambio Climático desde la Pandemia”.

Maisa Rojas detalló las acciones que está implementando Chile para lograr la carbono neutralidad. En la Conferencia de las Partes número 21 en París, 2015, se firmó el “Acuerdo de París”, en el que uno de sus objetivos es limitar el aumento de temperatura por debajo de 2 grados. Posteriormente, se constató que hay muy poca evidencia científica del significado de limitar el calentamiento a 1,5 grados, por lo que se solicitó al Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) escribir un Informe, conocido como “Informe de 1,5 grados”, que incluye elementos para el desarrollo sostenible y esfuerzos por erradicar la pobreza, e ir más allá del cambio climático, lo que queda inserto en la agenda 2030 como Objetivos de Desarrollo Sostenible. Concluye Maisa Rojas, destacando la importancia de evaluar otras áreas relacionadas, que podrían conducir a que Chile se convierta en una sociedad carbono-neutral en los próximos 30 años.

Laura Gallardo, por su parte, complementó la presentación de Maisa Rojas, enfocándose en cosas que nos pasan y que respiramos. Detalló algunos elementos de aprendizajes que nos deja la pandemia. Se ubica en el Antropoceno, época marcada por el impacto humano sobre el sistema climático y sobre el planeta en su totalidad y en ese contexto se pregunta: ¿hasta qué punto uno puede aprender de una catástrofe? Explica como las cuarentenas sostenidas y la fuerte reducción del desplazamiento de vehículos de combustión, han reducido de manera importante la emisión de contaminantes y de material particulado. Enfatiza que hay procesos que no son lineales y que se traducen normalmente en un sistema complejo como el sistema climático. Por ejemplo, la mitigación climática debe ser sostenida y acelerada y en el corto plazo puede haber una pequeña ayuda de forzantes climáticos de vida corta (como el ozono y las partículas), con la ventaja de que, además, nos pueden ayudar a cuidar la calidad del aire. A la larga, el dióxido de carbono es muy importante por su relación con la temperatura y porque vive mucho tiempo en la atmósfera. Concluye su presentación invitando a la sociedad a promover medidas sostenibles desde un punto de vista económico, ambiental, social y técnico.

El martes 30 de noviembre de 2021, Carlos Cruz Lorenzen, Director Ejecutivo del Consejo de Políticas de Infraestructura (CPI) dictó la conferencia denominada “Desafíos por Abordar en Infraestructura hacia el Año 2030”. La primera constatación que considera el conferencista, consistió en señalar que es muy importante pensar respecto de la estrategia de desarrollo que un país como el nuestro debe diseñar para poder avanzar, sustantivamente, en la generación de crecimiento, de capacidades productivas, de productos y distribución adecuada de ellos a todos los habitantes del país.

Chile tiene algunos compromisos que son relevantes, como firmante del acuerdo de París. Por lo tanto, está muy comprometido a bajar en forma significativa las emisiones contaminantes, en un contexto mundial en el cual Chile representa solo 0,2% de las emisiones totales, pero que, a la vez, está dentro de los 18 países más afectados. Hoy no es posible desarrollar proyectos sin contemplar los efectos ambientales desde su concepción. Tienen que ser inclusivos y asegurar que los beneficios de su impacto lleguen a todos.

Como suscriptor del objetivo sustentable de las Naciones Unidas, el país se comprometió con 17 metas de aquí al año 2030, de las cuales el 70% tienen vínculo con la infraestructura y, por lo tanto, las políticas que se puedan diseñar en esta área, son muy relevantes para alcanzar objetivos sustentables. El rol que le cabe a la infraestructura y los desafíos que debieran enfrentarse, consisten en: superar brechas, generar actividad y crear oportunidades. El señor Cruz desarrolla un detallado análisis de las acciones específicas requeridas.

El 14 de diciembre se realizó el Foro: “La Minería frente al Progreso Constitucional, sus Aportes y Desafíos”, evento organizado conjuntamente por el Instituto de Ingenieros de Chile, el Colegio de Ingenieros de Chile A.G. y el Instituto de Ingenieros de Minas de Chile. Contó con la participación de don Elías Arze, como Consejero Nacional del Colegio de Ingenieros, don Jorge Pedrals, como Presidente de la Comisión de Política Minera del Instituto de Ingenieros de Minas, y con los panelistas Sres. Gustavo Lagos, Willy Kracht y Sergio Bitar. La importancia y el volumen de información contenidos en este evento, hacen difícil sintetizar su contenido, por lo que invitamos a su lectura en esta edición de la Revista, que contiene el texto completo del foro.

Finalmente, en esta edición, se incluyen sendas entrevistas a los destacados ingenieros señores Álvaro Fischer y Rodolfo Saragoni.

## “LA CIENCIA DETRÁS DE LA CARBONO-NEUTRALIDAD”

Conferencia Sra. Maisa Rojas, Directora del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, (CR)2.

## “APRENDIENDO CAMBIO CLIMÁTICO DESDE LA PANDEMIA”

Conferencia Sra. Laura Gallardo, Investigadora del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, (CR)2.



Sra. Maisa Rojas.



Sra. Laura Gallardo.

El día miércoles 30 de junio de 2021 a las 12:00 horas, vía Zoom, ante una gran concurrencia de personalidades del ámbito académico, público y privado se realizaron las conferencias de la Sra. Maisa Rojas, con el tema “La Ciencia detrás de la Carbono-Neutralidad”, y de la Sra. Laura Gallardo, quien expuso el tema: “Aprendiendo Cambio Climático desde la Pandemia”.

Maisa Rojas es Licenciada en Ciencias con mención en Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile, Doctorada en Física Atmosférica en la Universidad de Oxford y posee un Postdoctorado en la Universidad de Columbia, Estados Unidos. Directora del Centro del Clima y la Resiliencia (CR)2. Climatóloga y académica del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Fue coordinadora del Comité Científico para la COP25 del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación; integrante del Consejo Asesor Presidencial de la COP25 y participante de la delegación chilena de la COP26. Además, coordinó el Comité Científico Asesor de Cambio Climático y es autora líder del Quinto Informe de Evaluación (AR5) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). También participó como autora coordinadora del Informe del IPCC (AR6).

Laura Gallardo es Bachiller en Ciencias con mención en Física de la FCFM de la Universidad de Chile. Tiene un Magister y Doctorado en Meteorología Química en la Universidad de Estocolmo, Suecia. Académica del Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Investigadora del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. Trabajó como asesora experta en la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), conduciendo los primeros estudios de modelación a escala regional con énfasis en la dispersión azufre oxidado desde fundiciones de cobre. Luego se desempeñó como investigadora asociada del Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile.

## El Presidente, Sr. Ricardo Nicolau del Roure.

—Buenas tardes, muchas gracias por asistir a esta charla mensual del Instituto de Ingenieros de Chile. Hoy tenemos un tema muy interesante para tratar y que está muy de actualidad. Los temas de cambio climático están en todos los noticiarios muy frecuentemente y no siempre entendemos claramente de qué se trata ni qué cosa involucra, por lo tanto, hoy tenemos dos conferencistas sobre el cambio climático, a cargo de dos profesoras de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile.

Primero está la doctora Maisa Rojas, Directora del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)<sup>2</sup>, es climatóloga y académica del Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, estudió Física en la Universidad de Chile y luego hizo un doctorado en Física Atmosférica en la Universidad de Oxford. Es autora principal, coordinadora del próximo Informe: “Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC)”, y es coordinadora del Comité Científico Asesor de Cambio Climático, que creó el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación para la organización de la COP 25. Ella dictará la charla que se titula: “La Ciencia detrás de la Carbono-Neutralidad”.

Y también tenemos como charlista a la profesora y doctora Laura Gallardo, académica del Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias, Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, Investigadora del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)<sup>2</sup>. Obtuvo un doctorado en meteorología química en la Universidad de Estocolmo en el año 1996; cuando regresó a Chile en 1997 trabajó como Asesora Experta en la Comisión Nacional de Medioambiente entre los años 1997 y 2001, conduciendo los primeros estudios de modelación a escala regional con énfasis en la dispersión de óxido de azufre desde fundiciones de cobre; luego se desempeñó como Investigadora Asociada del Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile. Sus principales líneas de investigación son: modelación atmosférica y asimilación de datos, calidad del aire de las ciudades y forzantes climáticos de vida corta; en la Universidad de Chile imparte cursos sobre química atmosférica, modelación del cambio global, modelación inversa en ciencias atmosféricas y su conferencia se titula: “Aprendiendo Cambio Climático desde la Pandemia”.

## Sra. Maisa Rojas.

—Muchísimas gracias, por la presentación y por la invitación. Hablaré de la ciencia detrás del carbono-neutralidad, pero también me voy a referir un poco a las acciones más bien de gobernanza que está implementando Chile, para lograr la carbono neutralidad (Figura 1).



Figura 1

Para comenzar tenemos que poner el contexto, porque estamos hablando de carbono-neutralidad y me refiero aquí al año 2015, cuando como parte de la Convención sobre Marco de Cambio Climático de las Naciones Unidas, ocurre la Conferencia de las Partes número 21 en París, donde se logra firmar el famoso Acuerdo de París (Figura 2). El artículo 2 del Acuerdo de París menciona que el objetivo es mantener el aumento de temperatura muy por debajo de 2 grados y hacer los esfuerzos para limitarlo a 1,5 grados. Así es que, dentro del texto del Acuerdo de París aparece un límite en temperatura, es un resultado histórico y demuestra una intención política mundial para cambiar a un mundo bajo en emisiones.

Y lo que ocurre después del Acuerdo de París en el 2015, es que hay muy poca evidencia científica de qué significaba un mundo en el cual lográbamos limitar el calentamiento a 1,5 grados, así es que lo que hace la convención es pedirle al Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), que también es una organización de Naciones Unidas, pero independiente, escribir un Informe y éste es el muy famoso y muy influyente Informe de 1,5 grados, así es como se le conoce, pero aquí incluyo el título completo por lo siguiente. Porque dice que este es un Informe especial sobre calentamiento de 1,5 grados, pero en un contexto de amenaza de cambio climático, pero también de desarrollo sostenible y de nuestros esfuerzos por erradicar la pobreza.



Es decir, se le pide al IPCC no hablar solamente de cambio climático, sino que entrar en contexto con todos esos objetivos que nos hemos puesto como como sociedad y que están encapsulados en la agenda 2030 como Objetivos de Desarrollo Sostenible (Figura 3).



Figura 2

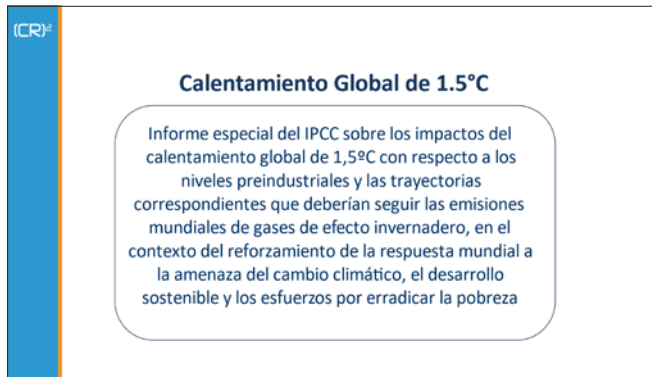


Figura 3

Y aquí están en tres muy breves frases las mayores conclusiones del Informe, **medio grado cuenta, cada año importa y cada decisión cuenta**, ¿Qué significa esto? El Informe hace una comparación entre lo que es un mundo que se calienta a 2 grados versus a un grado y medio, y el resultado es que hay una diferencia importante que, al lograr limitar el calentamiento a 1,5 grados versus 2 grados, nos vamos a ahorrar una cantidad muy importante de impactos, y esto es muy relevante, porque en el fondo lo está diciendo es que vale la pena hacer ese esfuerzo (Figura 4).

Después, el Informe se refiere a evaluar la factibilidad; dice que geofísicamente todavía es factible limitar el calentamiento a un grado y medio, pero para esto cada año

importa, es decir que el Informe deja muy claro que hay una urgencia para actuar y también a cómo lo podemos lograr. Bueno, esto lo vamos a lograr con una cantidad importante y diversa de medidas, esto no lo van a poder hacer los Estados solos, sino que va a tener que involucrar al sector privado, a la academia, a las ciudades, a las regiones, etcétera, así que esos son los tres grandes mensajes de este informe que se ha publicado a fines del 2018.

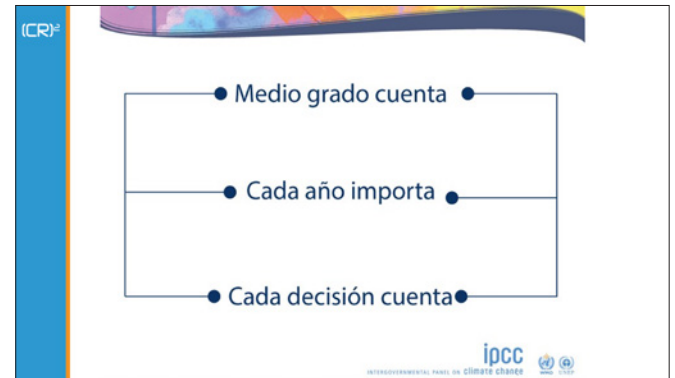


Figura 4

Un poco más sobre el Informe. Lo primero que hace es ver dónde estamos y lo que ustedes ven es una serie de tiempo de temperatura que empieza el año 1860 (Figura 5), se ve claramente que las temperaturas han aumentado de tal manera que desde el período preindustrial el calentamiento ha sido aproximadamente de 1 grado, estamos en el calentamiento de 1 grado. Y si hacemos una extrapolación simple vamos a llegar a 1,5 en algún momento entre los años 2030 y 2050, así es que vamos a estar probablemente todos vivos todavía cuando el mundo tenga un grado y medio más de calentamiento.

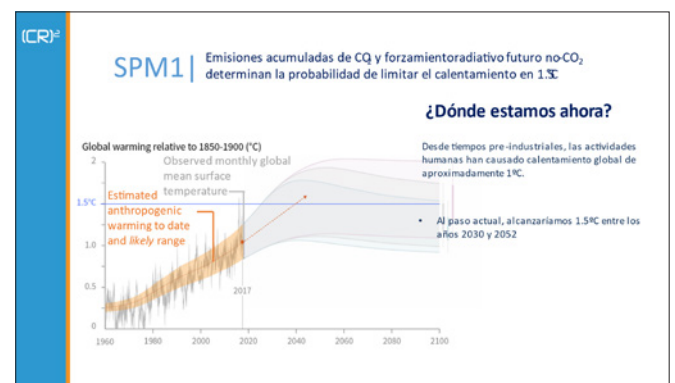


Figura 5

Con respecto a cuáles son los impactos diferenciales y los potenciales riesgos asociados a estos distintos niveles de calentamiento, el Informe aborda varios de esos y recuerden que aquí lo importante es que queremos también lograr los otros objetivos de desarrollo sostenible. Entonces, si limitamos el calentamiento a 1,5 vamos a tener menos personas que vivan en clima extremo, con calor extremo, precipitaciones extremas, nos ahorramos 10 cm de aumento nivel del mar, que tiene una importancia muy relevante, sobre todo para las personas que viven en las costas o en pequeñas islas; se cuantifican 10 millones de personas menos expuestas a los riesgos de vivir con niveles más altos de los océanos.

También menores impactos en biodiversidad de especies, menores impactos en reducción de seguridad alimentaria, menor población expuesta a escasez de agua en aproximadamente un 50%, también menos riesgo en la pesca, en la vida de los que dependen de ello y varios cientos de millones de personas menos expuestas y susceptibles a la pobreza, así que, en resumen, fíjense que siempre dice “menor”, ya estamos en riesgo de todo esto con estos impactos de calentamiento de 1,5 grados (Figuras 6 a 9).

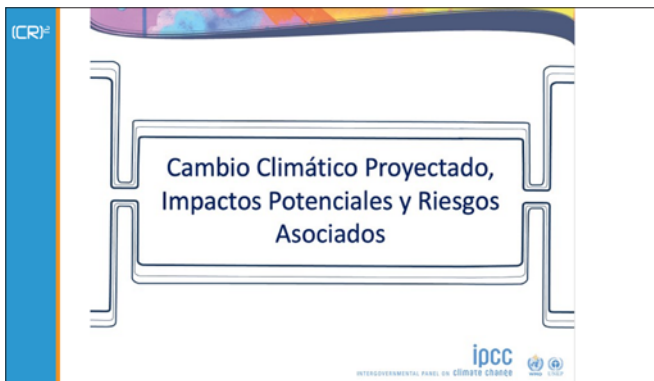


Figura 6

Lo que dice el Informe después es explicar de cómo lo logramos, y creo que en esto la ingeniería en particular tienen un rol muy importante que jugar y para eso entonces quiero explicar con estas láminas que las hizo un colega que fue el autor principal del capítulo sobre emisiones; el Informe trata de explicar de una manera simple la relación entre las emisiones, las concentraciones y finalmente la temperatura.

Recordemos que el Acuerdo París está escrito con su objetivo en términos de temperatura; eso lo tenemos que



Figura 7



Figura 8



Figura 9

relacionar ahora con la actividad humana. Entonces, la actividad humana es la quema de combustibles fósiles y de esa manera inyectamos carbono a la atmósfera. Imaginémos que desde el comienzo de la Revolución Industrial está ocurriendo de una manera lineal años tras años, esto se traduce en concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Y aquí, yo estoy haciendo una trampa porque yo les pongo



Figura 10

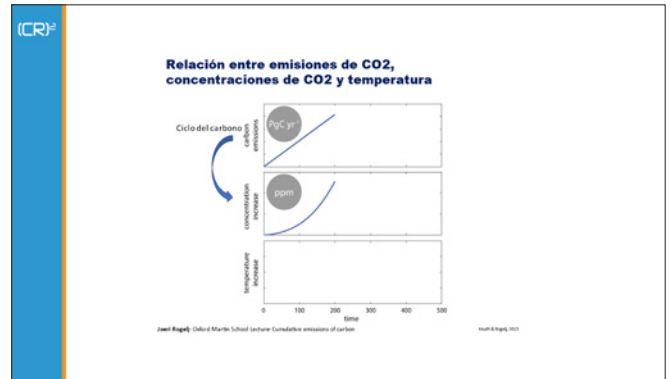


Figura 13

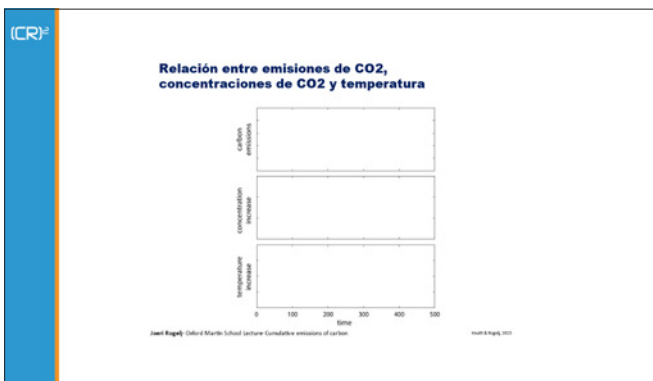


Figura 11

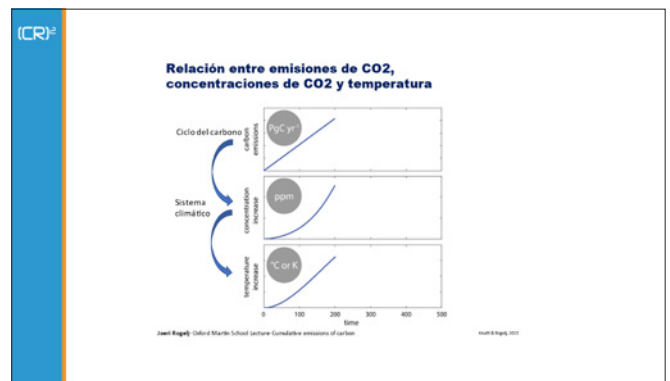


Figura 14

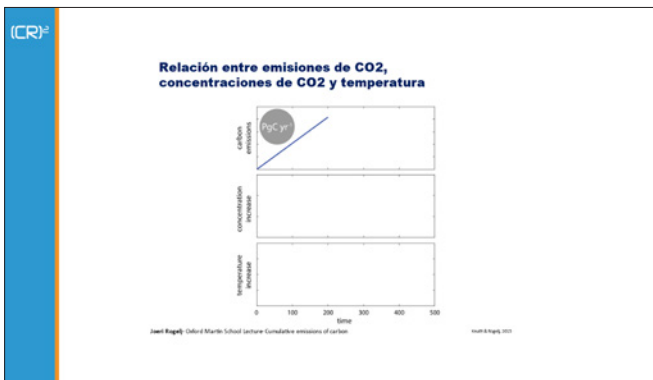


Figura 12

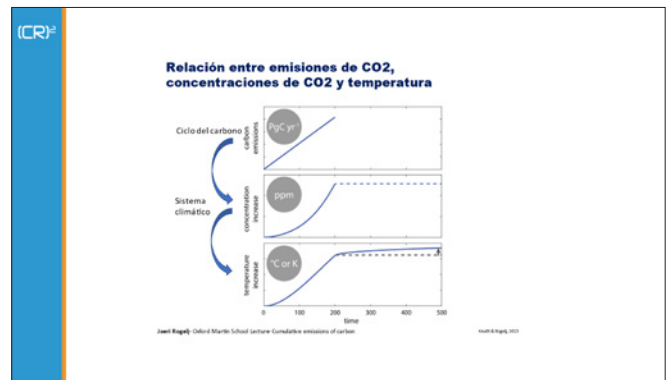


Figura 15

simplemente una flecha, pero acá hay una cantidad muy importante de conocimiento físico, químico y biológico del ciclo del carbono, y otra vez, después de la cantidad muy grande de interacciones entre los componentes del sistema climático, se traduce en un aumento de temperatura. Así que en estas dos flechitas yo estoy escondiendo todo el conocimiento de muchas disciplinas relacionadas

con las Ciencias de la Tierra por varias décadas y siglos de conocimiento (Figuras 10 a 15).

Si imaginamos que de la noche a la mañana dejamos de emitir, esto lamentablemente no se traduciría en que las concentraciones vuelven a ser las mismas, es solo que las concentraciones se van a mantener constantes por un buen

tiempo y tampoco se traduce en que las temperaturas van a volver a ser las temperaturas preindustriales, sino que las temperaturas incluso van a aumentar un poco.

Y esto tiene que ver justamente con el ciclo carbono, que yo ilustro en mis clases con esta figura (Figura 16), y es que tenemos distintos reservorios; será como un reservorio de carbono y este reservorio o la altura del agua en esta tina va a depender de cuánta agua entra y cuánta agua sale. Entonces lo que nosotros hemos estado haciendo los últimos doscientos años es que nuestras actividades humanas están inyectando “agua”, carbono al reservorio de la atmósfera.

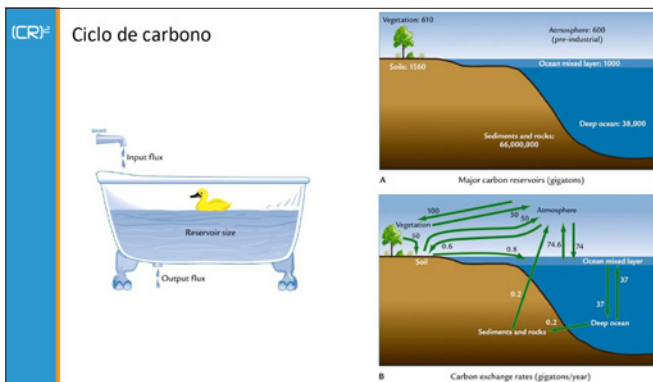


Figura 16

Aquí están los distintos reservorios y ahí en el mundo natural una cantidad importante de flujos, de cambios, de interacciones de flujos de un reservorio a otro de manera natural.

Entonces, de esta manera tenemos que las actividades humanas, principalmente quema de carbón, metano, petróleo, diésel, combustibles fósiles, se traducen en emisiones; estas a través del ciclo del carbono se traducen en concentraciones en la atmósfera y después a través de física que lo podemos traducir en forzamiento radiativo y el forzamiento radiativo realmente lo que hace es que cambia la temperatura (Figura 17).

Una de las preguntas científicas de las más antiguas y que lamentablemente todavía está relativamente abierta y de las más fundamentales y que es el Santo Grial de la ciencia climática, es cómo responde el sistema climático a un forzamiento radiativo, que le vamos a llamar a este Delta F, y cuál es el Delta T, el cambio de temperatura,

y esta es la pregunta fundamental, a esto lo llamamos la sensibilidad climática, que es una constante. Y la verdad de las cosas es que los primeros cálculos fueron hechos en el siglo XIX y la conclusión era que la sensibilidad climática debe ser algo así como 3 grados más menos un grado y la verdad de las cosas es que después de más de casi ya 150 años, la respuesta sigue siendo más o menos la misma; está asociada a una importante cantidad de incertidumbres, pero lo importante es que es positivo, o sea si nosotros tenemos un forzamiento radiativo la temperatura va a aumentar, eso es lo que sabemos (Figura 18).

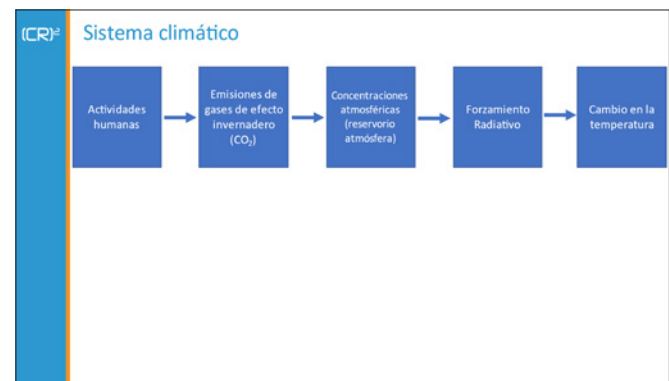


Figura 17

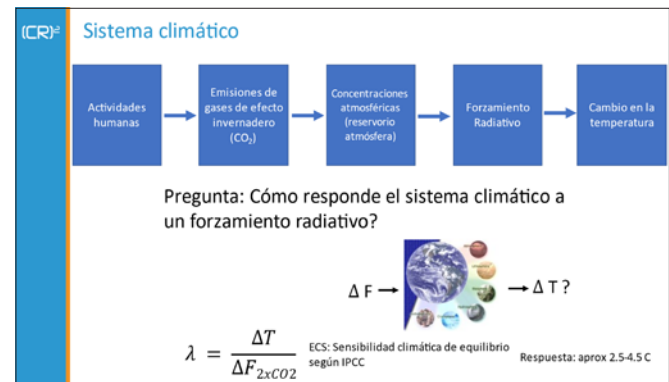


Figura 18

Hace aproximadamente diez años hubo un cambio bien importante en nuestro entendimiento de ciclo carbono y es una manera, en el fondo, de salirse de esta tremenda incertidumbre que había asociada a este parámetro de la sensibilidad climática, y lo explicaré ahora.

Volvamos a nuestras figuras estilizadas de emisiones, pero ahora fijémonos no en las emisiones año a año, sino

que, en las emisiones acumuladas bajo la curva, todo ese triangulito (Figura 19), entonces, si emitiéramos toda esta cantidad, eso llegaría a una cantidad de concentraciones que después con el pasar de los años, empezarían lentamente a bajar y a un aumento de temperatura dado. Ahora, si nosotros emitiéramos esta cantidad, la amarilla más la naranja, obviamente tendríamos concentraciones

más altas y temperaturas más altas y así sucesivamente (Figuras 20 a 23).

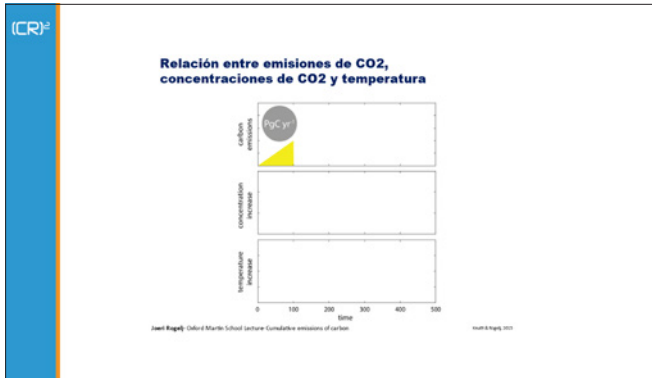


Figura 19

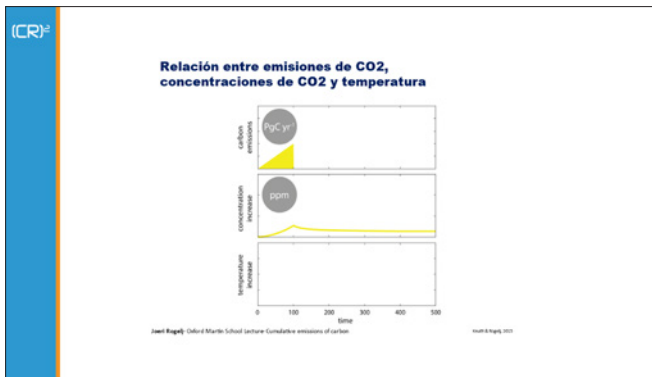


Figura 20

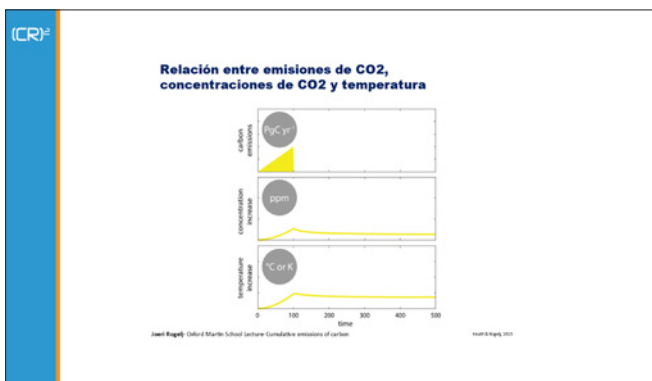


Figura 21

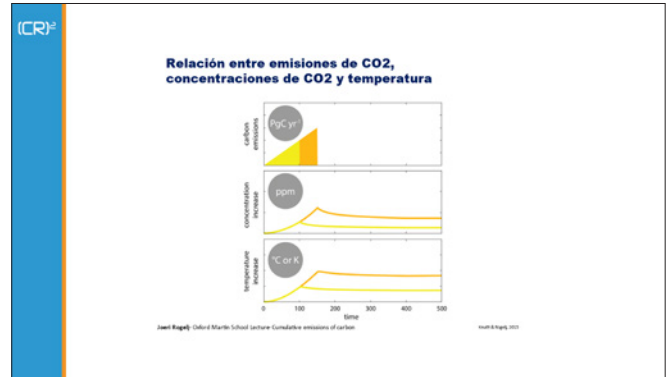


Figura 22

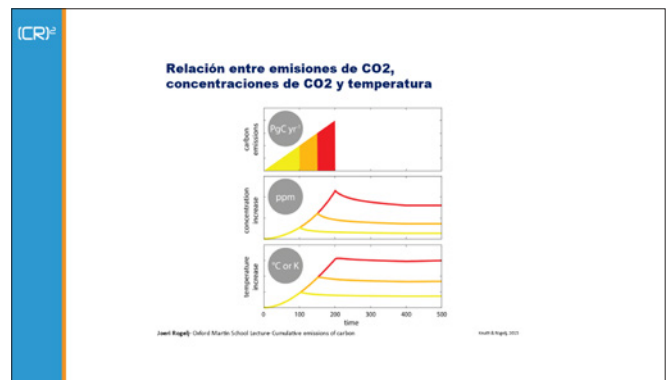


Figura 23

Ahora, fíjense de lo que se dieron cuenta hace poco menos de 10 años atrás y es que existe una relación cuasi lineal entre las emisiones acumuladas y el aumento de temperatura, y ello está asociado a la sensibilidad climática, pero esta respuesta trasciende a las emisiones acumuladas, y esto es muy importante, porque ahora tengo esta relación cuasi lineal y recordemos que nosotros tenemos un objetivo en temperatura, bueno, 2 grados ahora está asociado a un concepto que le llamamos el presupuesto de carbono para una cantidad finita de CO<sub>2</sub> (Figuras 24 y 25).

Corolario de esto entonces es que si yo estoy interesada en 1,5; tengo otro, por supuesto carbón que va a ser menor, pero si tengo 3 grados también tengo un presupuesto carbono que va a ser simplemente mayor, corolario es que sea cual sea el límite de temperatura que nosotros como sociedad, como países dentro de las Naciones

Unidas nos propongamos, porque podríamos decidir: “bueno 3 grados está bien, podemos vivir con 3 grados”, igual significa que hay una cantidad finita de carbono que podemos seguir inyectando a la atmósfera y por lo tanto llegar a emisiones cero, tiene que ocurrir sí o sí, sea cual sea el límite de temperatura que nosotros nos impongamos (Figura 26). Y es muy importante, porque antes de esto

se pensaba que lo que había que hacer era disminuir las emisiones, pero ahora entendemos que hay que llegar a emisiones cero, así que es un cambio de paradigma bien importante.

El Informe del IPCC, éste del 1,5 se publicó a finales del año 2018 y a comienzos del año 2019, Chile adopta el compromiso de ser carbono neutral para el año 2050. La pregunta entonces es cómo hacerlo y me voy a dedicar el resto de mi presentación a ver qué es lo que estamos pensando en el caso de Chile.

Tenemos las emisiones actuales que tienen un valor y tenemos ahora este punto final (Figura 27), que es el 2050 y yo siendo física diría: bueno, está es la manera más fácil de hacerlo, verdad, una línea recta para abajo, pero claramente esa no es la manera factible de alcanzar la meta (Figura 28).

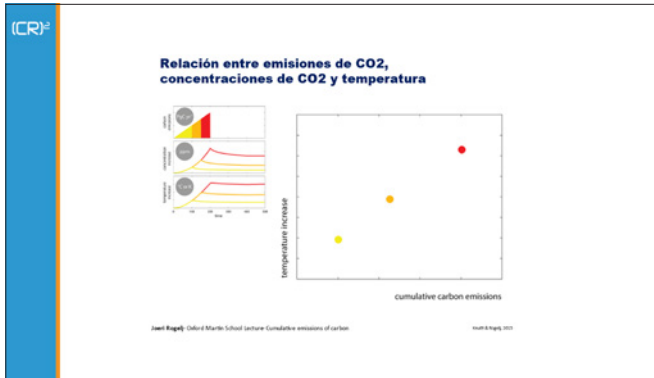


Figura 24

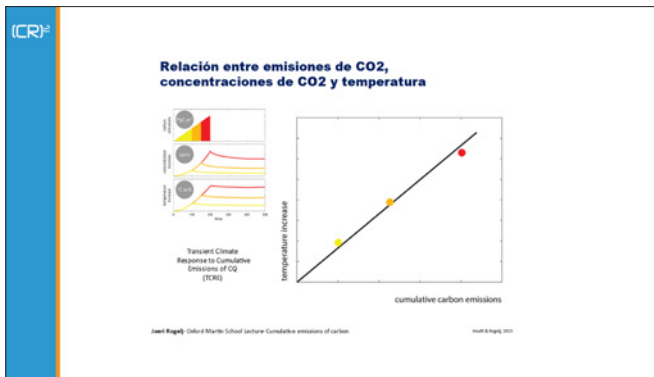


Figura 25

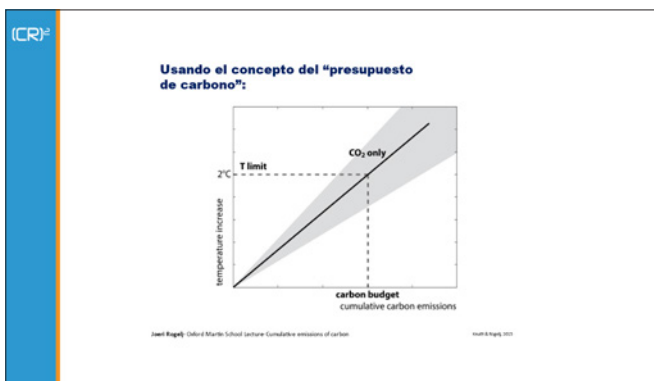


Figura 26

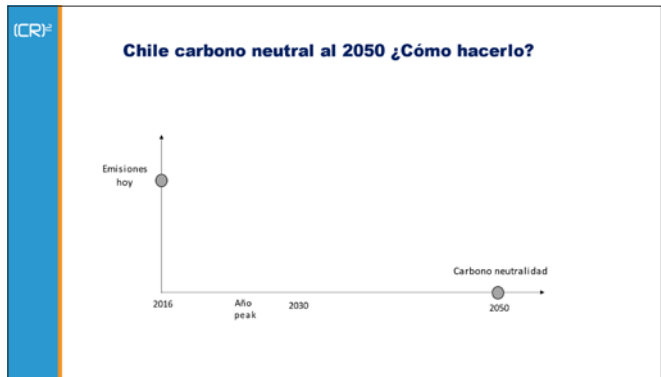


Figura 27

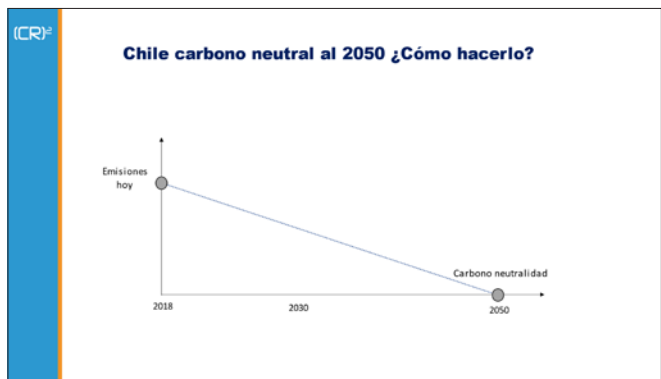


Figura 28

Pero, en esa línea recta aparece un área bajo la curva, y eso es lo que sería el presupuesto de Chile (Figura 29), esa es la cantidad de CO<sub>2</sub> que Chile como país puede emitir en los próximos 30 años.

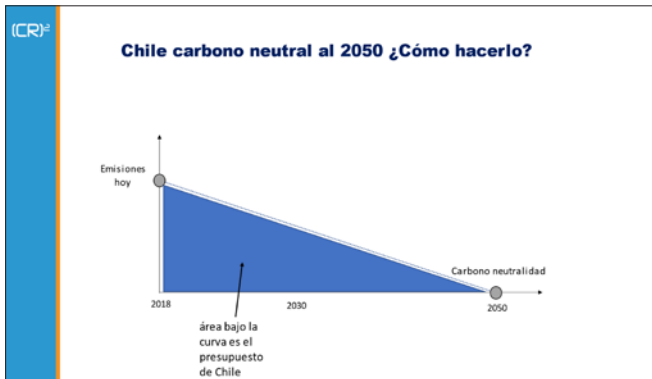


Figura 29

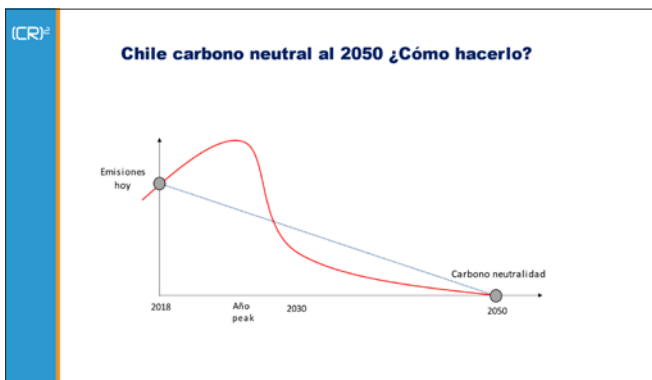


Figura 30

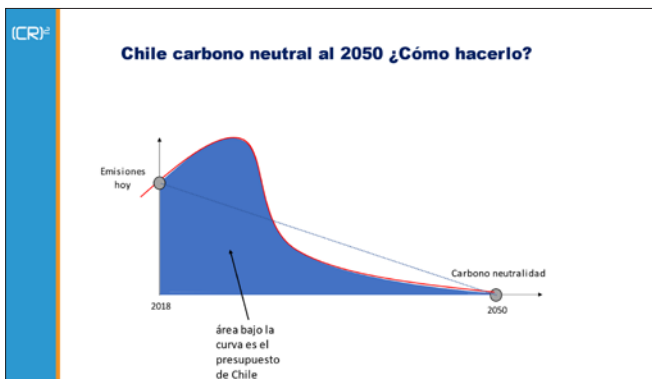


Figura 31

Probablemente, una curva más parecida a ésta (Figura 30), es más factible en que todavía en un par de años sigan aumentando nuestras emisiones, en que tendremos un año “Peak”. Pero acuérdense que lo que se tiene que mantener es el área bajo la curva y por lo tanto si nos gastamos más de ese presupuesto hoy en día, vamos a tener que bajar más rápidamente después. Esa es la consecuencia clara de tener que mantener un área constante bajo la curva (Figura 31).

El Informe de 1,5 grados dice que, más o menos al año 2030 las emisiones deberían haberse reducido en un 45% con respecto al año 2010, es decir, nuestras emisiones que tenemos actualmente 2020-2021, en 9 años tenemos que reducirlas prácticamente a la mitad (Figura 32).

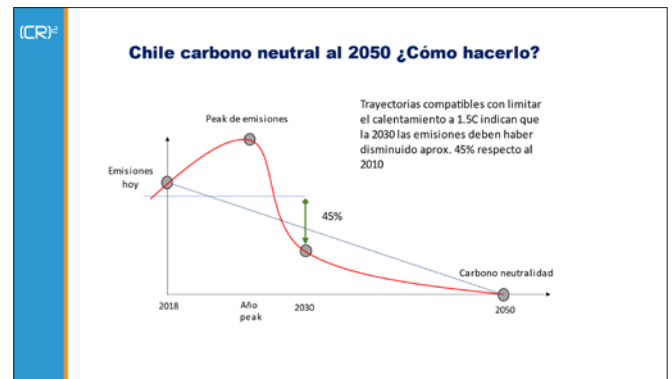


Figura 32

Esta es la es la figura oficial del Informe, ustedes aquí ven que hay una cantidad muy importante de simulaciones distintas porque hay distintas maneras de hacerlo (Figura 33), pero lo importante es que ustedes ven que está el cero, este es el presupuesto global en este caso, la carbono neutralidad ocurre y pasamos por el cero y esto ocurre, aquí dice año 2050, tenemos metas intermedias, y tenemos un año “peak”.

Otra manera de ver esto del presupuesto, más gráficamente, es pensar como en una torta (Figura 34). El presupuesto total es una torta, de la cual una cantidad muy importante ya nos la hemos comido, porque esto es el acumulado desde el año 1800 más o menos, y esto es lo que al año 2018 quedaba de presupuesto.

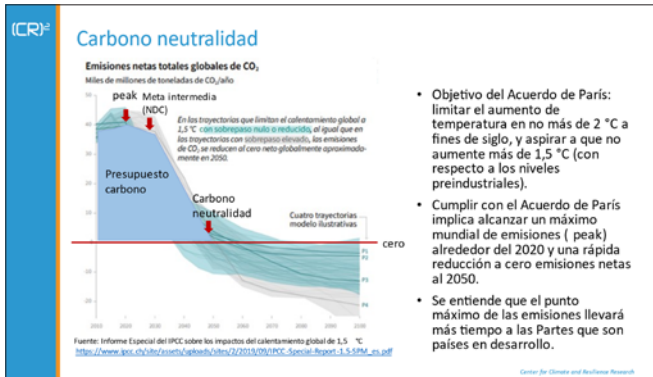


Figura 33

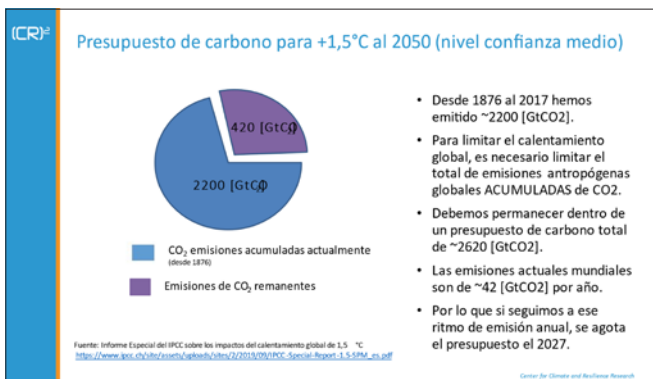


Figura 34

Éste es el balance de las emisiones de gases de efecto invernadero de nuestro inventario, en una serie de tiempo, del año 1990 al año 2018 (Figura 35), separado, esto se hace según guías del IPCC. También, energía es el sector más importante después de la industria; tenemos también agricultura, los bosques, los residuos, pero la parte más importante está asociado al sector energía y los valores negativos, ustedes ven acá que tenemos valores negativos porque aquí está el cero, es porque nuestros bosques en muchos parques nacionales están creciendo y están sacando el carbono en el proceso de fotosíntesis desde la atmósfera.

Cuando Chile asume el compromiso de la carbono- neutralidad, ése no fue un compromiso vacío, en el sentido de que no sabíamos en ese momento cómo hacerlo, sino que a partir de entonces se han evaluado una cantidad importante de medidas. Imaginemos que Chile no tiene compromiso de carbono-neutralidad y entonces estas son nuestras emisiones, las históricas y nuestras emisiones no están proyectadas a seguir creciendo si no tuviésemos compromiso de carbono neutralidad, pero en este documento

en que se llama a las contribuciones nacionalmente determinadas (Figura 36), que fue publicado el año pasado, se identifican como 30 medidas y ustedes ven que hay algunas que son bien importantes. Probablemente de algunas ya han escuchado hablar, hay una apuesta importante de hidrógeno verde, electromovilidad, edificación sostenible, retiro de centrales a carbón y eficiencia energética, todas áreas del sector energía, todas áreas donde ingenieros e ingenieras de Chile van a tener que ayudar a implementarlas.

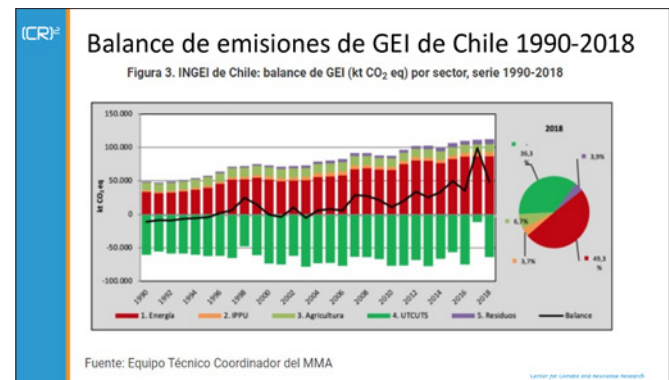


Figura 35

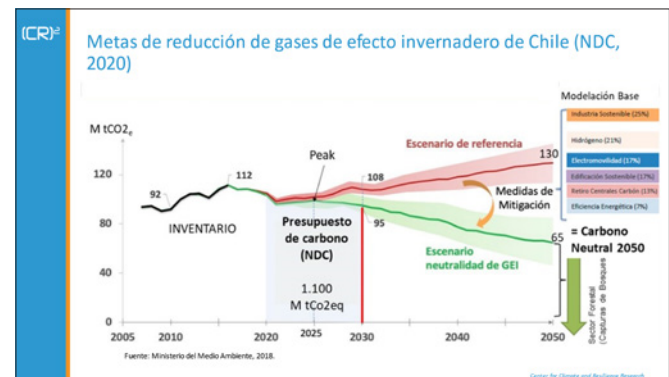


Figura 36

Comento brevemente que en el año 2019 me tocó coordinar Comité Científico para la COP25, liderado por Rodrigo Palma, que presidía la Mesa de Energía y Mitigación, y se escribió este documento en el cual se explican estas medidas de cómo hacerlo y se hizo toda esa evaluación (Figura 37).

Las cosas que tenemos identificadas son las medidas, pero una parte bien importante para que estás medidas realmente se puedan implementar es contar con un proyecto de Ley marco, y fíjense que el artículo 1 que define el



objeto de la Ley dice que, el objeto es transitar hacia un desarrollo bajo en emisiones de gases de efecto invernadero y resiliente al clima, ese es el objetivo principal de la Ley (Figura 38).

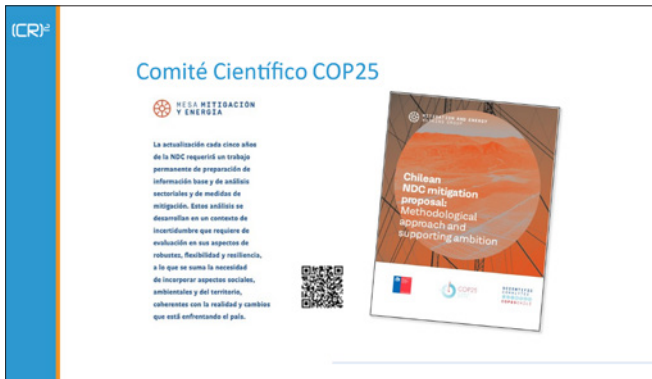


Figura 37

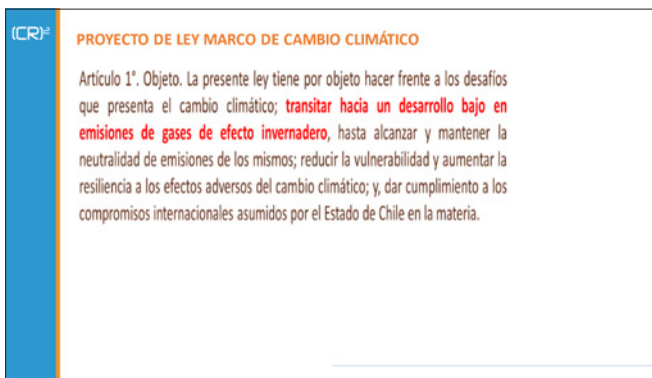


Figura 38

Los otros dos instrumentos fundamentales y que están descritos también en la Ley y que ya mencioné, la NBC, que es la contribución nacionalmente determinada; es uno de los instrumentos obligatorios que los países tienen que elaborar dentro del marco del acuerdo de París, y también la estrategia climática de largo plazo, que es otro instrumento dentro del Acuerdo de París. La NDC define el qué, de nuestro compromiso y la estrategia climática de largo plazo define el cómo. Esta estrategia está en pleno desarrollo, de hecho, actualmente está en consulta pública y la idea es que se finalice y sea aprobada por el Consejo de Ministros para la Sustentabilidad en septiembre, para que la Ministra pueda ir a las COP26, a entregar su estrategia climática de largo plazo (Figura 39).

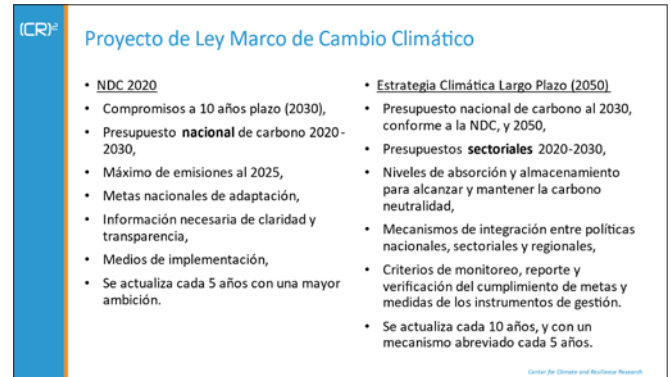


Figura 39

Para finalizar, y esto también es del Informe del IPCC de 1,5 grado, quisiera resumir el tema de la factibilidad y aquí es importante darse cuenta de que existen varias áreas en lo que uno tiene que evaluar (Figura 40); aquí está la factibilidad geofísica, ambiental, tecnológica, también factibilidad económica. Fíjense que incluso en el caso de Chile, también tenemos estudios de factibilidad económica y también tenemos factibilidad institucional, en el sentido de que, en el caso de Chile, se está discutiendo una ley que va a dejar entonces la redundancia por ley, estos compromisos y todo el engranaje para que Chile se convierta en una sociedad carbono neutral en los próximos 30 años.



Figura 40

Pero lo que sigue siendo una incógnita, y es algo que no se nos debe olvidar, es la factibilidad sociocultural, ¿estamos dispuestos los chilenos y chilenas de asumir estos cambios? porque está claro que estos son cambios que no tienen precedentes en la historia de la Humanidad por su profundidad, porque abarcan todas las áreas y por

lo rápido que se deben implementar. Y con este mensaje de transformación terminó mi presentación (Figura 41).

Muchas gracias.

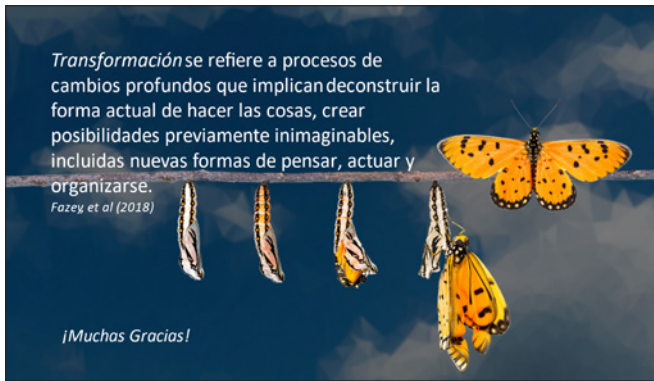


Figura 41

### Sra. Laura Gallardo:

—Gracias Maisa. Por mi parte, quiero llevarlos a una discusión complementaria a la presentación de Maisa y que tiene que ver con algunas cosas que nos pasan y que respiramos, y les voy a contar un poco respecto de algunos aprendizajes que nos ha permitido esta pandemia; a pesar de todo, siempre se puede aprender de las catástrofes (Figura 1).

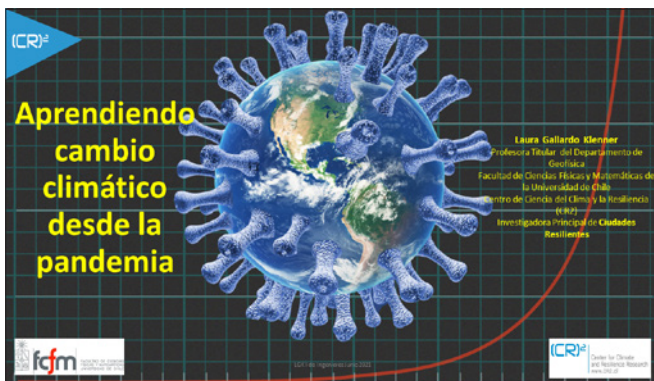


Figura 1

Para contextualizar yo partiría por un *cartoon* (Figura 2), un dibujo divertido en que alguien decía: bueno aquí

vienen todas estas crisis que tenemos encima, tenemos la crisis del Covid, los problemas económicos asociados a la pérdida de empleos y a la crisis económica que ello involucra y tenemos el cambio climático que también está presente, no que se nos viene, ya está, ya llegó una parte de esta ola verde, hasta donde estamos.

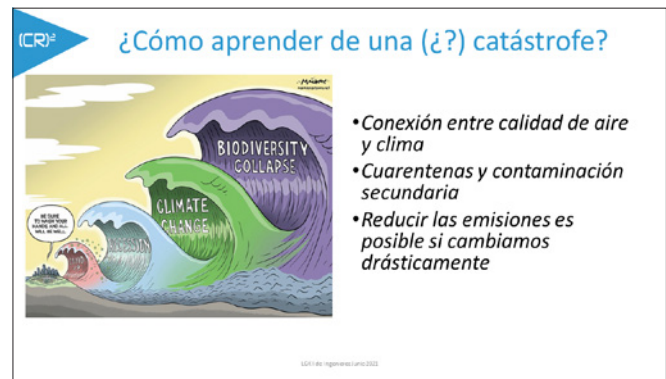


Figura 2

Pero también tenemos otras crisis planetarias como la pérdida y el colapso de muchos aspectos que tienen que ver con la biodiversidad. Ahora, si bien para el cambio climático cada vez nos queda menos tiempo, todavía tenemos la posibilidad de actuar, de tal manera que podamos evitar lo peor en muchos ámbitos de la pérdida de la Biodiversidad. Ya hemos perdido especies, no sólo que se pierdan ositos polares y que nos dé pena, sino que hay insectos y mucha flora y fauna que ya desapareció del planeta y con ello muchas de las funciones ecosistémicas que ellas cumplían; por lo tanto, hay mucho más riesgo asociado y estamos en un momento, en un tiempo de crisis.

En otras charlas hablo del Antropoceno, de esta época marcada por el impacto humano sobre el sistema climático o sobre el planeta en su totalidad y en ese contexto quiero preguntarme ¿hasta qué punto uno puede aprender de una catástrofe? Como les dije antes, efectivamente es el caso y lo que les quiero mostrar en particular es la conexión que existe entre calidad de aire y clima, qué aprendimos a través de las cuarentenas y por qué esto que planteaba Maisa que, por una parte, es geofísicamente factible, si queremos. Pero también va a haber condiciones políticas, porque hay avances en la buena dirección, también hay señales a veces de retroceso y tenemos que ser capaces de implementar estos cambios, que no sólo se refieren a los elementos de carbono, sino que se refiere también



se nota en términos de las emisiones, particularmente cuando usamos combustibles fósiles, ya sea a través de automóviles particulares, que lamentablemente en el caso de Santiago que estoy mostrando es poco más de un 50% de la población que hoy día se mueven automóviles y no en buses o micros como ocurría cuando algunas pocas décadas atrás cuando yo era estudiante. Y eso estuvo asociado a bajas de dióxido de nitrógeno que es muy característico de las fuentes móviles, pero también de algunas otras cosas como material particulado completamente respirable, este que puede llegar hasta los alvéolos o el monóxido carbono, otro producto de la combustión, incompleta o compuestos orgánicos volátiles que vamos a ver, son compuestos emitidos por esto, todas estas cosas un poquito fragantes, son en general asociados a compuestos orgánicos y volátiles, y por eso también somos capaces de percibirlos.

Ésta es una estimación del cambio (Figura 5), las emisiones durante ese período, esas primeras semanas en el caso de Santiago, que estimó Mauricio Osses y su equipo en la Universidad Técnica Federico Santa María. Estas eran como las condiciones normales a las 7, a las 12, a las 7 de la tarde. En el caso de Santiago, se ven marcadamente al principio, no sé si ustedes se acuerdan, pero en el caso de Santiago las primeras medidas de contingencia fueron hacer una restricción de movilidad muy fuerte hacia la zona de digamos abc1 de Santiago, en que uno tiene en condiciones relativamente normales, tiene un montón de actividad, por transporte en automóvil, el resto la ciudad también lo tiene, pero es muy marcado en este caso, en la hora punta de la mañana en que hay más movilidad en ese caso desde la zona oriente hacia la zona centro.

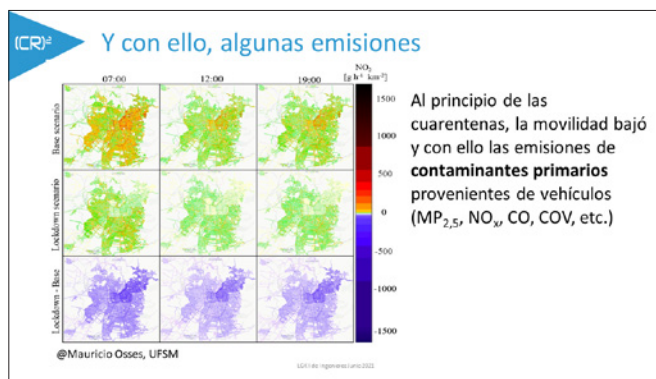


Figura 5

Pero también ocurre desde las zonas periféricas de Santiago hacia distintas zonas tanto centrales como del sector oriente, eso disminuye a mediodía y en la tarde vuelve a aumentar, pero de una manera algo más difusa, porque no todo el mundo se devuelve del trabajo a la misma hora. Durante las dos primeras semanas, en que hubo un cierre como de 10 días, uno ve una disminución ostensible. En cuanto a los colores, mientras más rojo más emisiones, mientras menos colores emisiones más bajas y uno efectivamente ve que hay zonas de la ciudad, incluyendo Santiago, en que disminuye sustantivamente sus emisiones en las horas punta mañana, punta tarde y la hora de mediodía.

Poder hacer este tipo de estimaciones y tan rápido, significa que hay mucha ingeniería detrás para tener estos datos de cambio en movilidad, cantidad de automóviles, etc. y, por cierto, la ciencia y la tecnología para saber calcular emisiones que son muchas.

Yo puse que los primarios aumentaron y ¿a qué me refiero con contaminantes primarios?, me refiero a aquellos contaminantes que son emitidos tal cual, directamente a la atmósfera.

El resto de lo que les quiero contar tiene que ver con contaminantes que se forman en la atmósfera, es decir, no son emitidos por ninguna cosa, no hay que ir a poner ningún tapón a ninguna parte, se forman en la atmósfera y a esa los vamos a llamar contaminantes secundarios.

Para verificar un poco esto de los cambios observados vía satelital sobre Santiago, me aprovecho de una imagen que produjo un estudiante (Figura 6), que está por titularse de ingeniero mecánico también de la Chile, que se llama Santiago Parraguez, y que muestra aquí el cambio cada 15 días en el caso de Santiago. Está el año 2019 y el año 2020, y está de nuevo la diferencia, pero ahora estimado de una manera completamente distinta, a través de información satelital de alta resolución, con alta resolución estamos hablando de algo así como unos 5 por 7 km aproximadamente, y aquí en cada la quincena correspondiente del 2019 y el 2020, vemos los cambios. Y cuando no vemos nada es porque está nublado, ya en la segunda parte de mayo, en que hay mucha nubosidad, se impide en la percepción remota del NO<sub>2</sub> en estos casos.

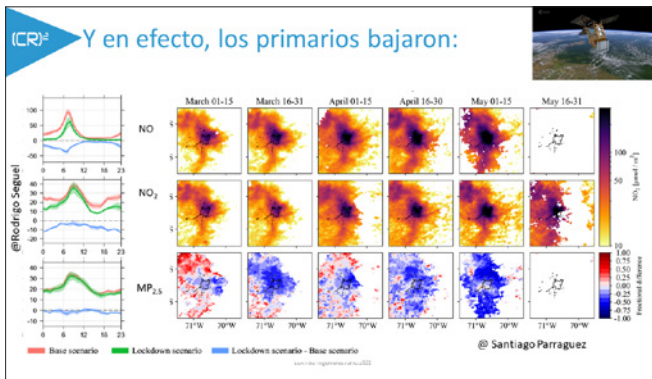


Figura 6

Y ustedes me dirán si bajó o no bajó, es una escala logarítmica que hace difícil ver las cosas, pero efectivamente, si uno ve el cambio que estamos mostrando, que es el cambio porcentual o la diferencia de fraccional, uno ve que en general, se observan más azules y esos azules son bajas, incluso bajas totales, digamos hasta el 100%, con un poco de ruido, porque efectivamente esta información satelital tampoco es extremadamente precisa, nunca es exacta, tiene ruido y por ello hay que tratar con cuidado los datos satelitales, pero en general uno ve sustantivamente una baja, particularmente en estas semanas en que se implementa esta restricción. Y uno lo ve, además, con una suerte de caracterización de disminución más acentuada, si ustedes quieren, hacia la zona noreste de la ciudad. También hay otra baja sustantiva y tiene que ver con el Primero de Mayo, hay por ahí también otros procesos que ayudaron a eso, pero en particular durante este período en que estábamos viendo antes, coinciden, y lo que estimó Mauricio Osses con lo que se ve a partir de las imágenes satelitales. Efectivamente uno ve una disminución en dióxido de nitrógeno.

Y hay otra fuente de información que la provee un químico ambiental que es Rodrigo Seguel, otro de nuestros colegas y que muestra monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno y material particulado medido en estaciones, esencialmente en la estación Parque O'Higgins de la red de monitoreo de Santiago; en la línea roja muestra la condición prepandemia, la condición en verde se muestra la pandemia y la diferencia en azul, y aquí el monóxido de nitrógeno también está asociado a los automóviles y, efectivamente, hay una hora punta mañana muy marcada, y esa hora punta mañana disminuyó en el centro de Santiago.

El dióxido de nitrógeno es en parte emitido, pero en parte responde a la formación de otra cosa que es ozono, que voy a tocar en la próxima lámina, y efectivamente, hay, uno ve una baja, pero no tanta baja como el caso de monóxido de carbono, eso nos sugiere que hay una variación provocada por otra cosa y esa otra cosa vamos a ver qué es, esencialmente son procesos fotoquímicos en la atmósfera.

En el material particulado, en el caso de Santiago Centro, se ve una disminución, pero una disminución pequeña y lo que les voy a contar es que, esa disminución pequeña, se ve porque parte del material particulado es efectivamente emitido directamente, pero hay otra parte del material particulado que se forma en la atmósfera; y esa parte que se forma en la atmósfera, en el caso de la zona oriente, por ejemplo, llega a ser en estas condiciones de fines del verano, del orden de un 50%. Es decir, con baja de emisiones directas podríamos bajar como la mitad, pero hay otra mitad que no respondía tan directamente a ese cambio de emisiones, sino que seguía formándose, porque esencialmente aumentó el ozono. Pero en términos de las emisiones, de las estimaciones, de las fuentes móviles, de los satélites, uno empieza a ver un cuadro consistente, en donde esta marca reducida o esta señal de reducción de emisiones primarias, particularmente son asociadas al sector transporte.

Vamos a la parte químicamente más complicada de todo esto y es el ozono, que es otro contaminante, pero también un gas de efecto invernadero y el tercer gas de efecto invernadero más importante, después del dióxido de carbono, el que habló Maisa Rojas, y después del metano que también lo tocó parcialmente, el ozono es el tercer gran gas de efecto invernadero y es un gas cuya presencia cerca de la parte baja de la atmósfera, ha venido subiendo desde el siglo XIX y, por lo tanto, aporta como gas de efecto invernadero. Ahora, el ozono es uno de estos contaminantes secundarios y como tal no obedece, no responde de manera lineal a los óxidos de nitrógeno y a los compuestos orgánicos volátiles.

Acá les muestro la mitad del cuento (Figura 7), que tiene que ver con su dependencia del óxido de nitrógeno que están puestos aquí. Uno tiene cuánto se produce por día de ozono en una cierta atmósfera y acá está la cantidad de óxido de nitrógeno presente; si hay relativamente poco óxido de nitrógeno presente en general, uno destruye ozono, en cambio sobre una cierta cantidad uno empieza

a producir ozono y esa producción, como vemos, depende no linealmente de la cantidad de óxido de nitrógeno; al principio, en la medida que van aumentando los óxidos de nitrógeno, va aumentando también, casi linealmente, la formación de ozono, pero cuando empieza a haber demasiados óxidos de nitrógeno, esa formación se vuelve menos eficiente porque parte del ozono se empieza a gastar tratando de oxidar óxido de nitrógeno, y eso determina que esto empieza a saturar y se invierte esa relación.

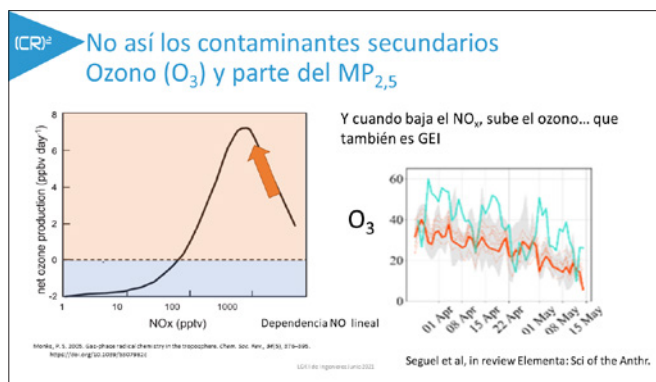


Figura 7

¿Qué pasó durante la pandemia en Santiago, en Bogotá, en Sao Paulo, en París? En todas estas ciudades en general disminuyó la cantidad de óxido de nitrógeno presente y esa disminución se traduce, por lo tanto, en un aumento, porque nos devolvemos, nos vamos hacia la izquierda en el eje de las “X” y en el eje de las “Y”, nos vamos hacia arriba, el ozono aumenta.

Cuando uno ve las observaciones in situ de nuevo, el Parque O’Higgins en la zona central, está la condición normal, en el color como café o rojizo, hay una variabilidad diaria y una variabilidad semanal y hay una variabilidad con la estación del año, a medida que esto se vuelve más frío. Estos son procesos fotoquímicos, así que mientras está más frío y por lo tanto también hay menos radiación, normalmente uno empieza a tener menos ozono, el máximo de ozono normalmente es veraniego, así que uno ve esta variabilidad estacional inter diaria, intra diaria, durante la época normal y vemos que es un promedio de 5 años, desde el 2019 hasta el 2015. Además, durante el año de la pandemia, lo que uno ve es que el ozono efectivamente aumentó así que, efectivamente, cuando la gente dice nada

más que “contaminación”; “contaminación”, nada más no es muy específico, porque por un lado bajó el material particulado, aquel primario, el secundario sube un poco y el ozono también subió y el aumento de ozono y el aumento de material particulado secundario efectivamente están ligados.

Bueno, aquí también vemos esta variación estacional, y estas variaciones diarias, interdiarias, etcétera. Entonces lo que nosotros quisimos hacer fue tratar de explicarlo, ya teníamos una buena sospecha de que esto fuese así, pero queríamos separar también hasta qué punto esto dependía de la meteorología, porque quizás está más nublado, quizá está más soleado, quizás, qué pasó. Y entonces, lo que usamos ahí son estas técnicas más o menos avanzadas, después les puedo contar, para separar el efecto la meteorología y el efecto de los precursores del ozono, de estas cosas que llevan a la formación de ozono, y efectivamente hubo un efecto de las bajas de óxido de nitrógeno, eso lo pudimos verificar.

Ahora, las fuentes móviles que estábamos viendo son esencialmente porque hay uso de combustible fósil, eso ocurre también a escala global y esta es una estimación que se hizo de cuánto habían bajado por la baja, sobre todo en el caso de fuente móviles a escala global, el dióxido de carbono de esta traza, de la que estaba hablando Maisa Rojas.

Efectivamente en abril, sobre todo en el hemisferio norte, pero también hubo alguna medida en el hemisferio sur, se vio una gran baja; así en ese mes, y llegó a ser más o menos un 7% de las emisiones globales de dióxido de carbono del año 2020, pero después rápidamente empezaron, igual que con la movilidad, a aumentar en Santiago y en otras ciudades; bueno en el mundo también y el general ya hacia fines del 2020, ya estábamos en casi en una condición normal, incluso con un peligro de aumento respecto de años previos; la mayor disminución se debió efectivamente al sector transporte a escala global (Figura 8).

¿Y eso qué significa? Cuando se traduce a un forzamiento radiactivo, tal como decía Maisa Rojas, y por lo tanto también un forzamiento o un cambio en las temperaturas, en este caso las temperaturas superficiales. Ésta es una estimación que hizo uno de nuestros colegas del IPCC con muchos otros más (Figura 9).

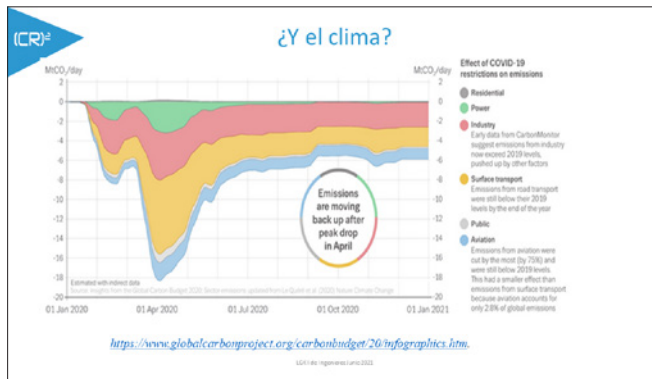


Figura 8

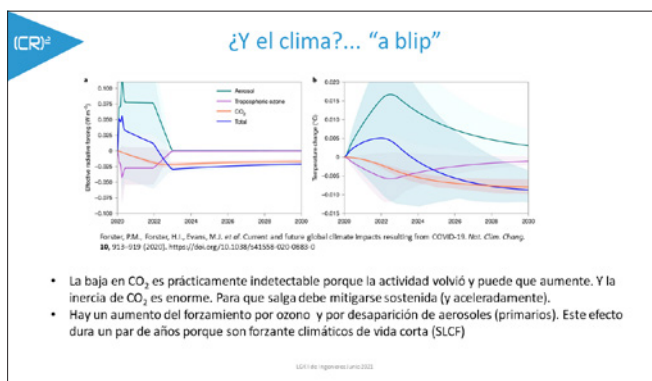


Figura 9

Digamos que en una prestigiosa universidad hicieron una estimación, no sólo de dióxido de carbono, sino que, de ozono, de esta traza que yo les decía que es contaminante, pero, además, es un gas de efecto invernadero y también de aerosoles o material particulado, que también tiene un forzamiento radiactivo. Y lo que calcularon para este periodo del 2020, particularmente llevado adelante por esta disminución en abril, uno ve en algunas zonas urbanas, en general un cambio en ese forzamiento y tiene un efecto de positivo, pero son efectos pequeños, más que discutir los efectos particulares lo que quiero decirles es que son números sumamente pequeños. El dióxido de carbono son valores chiquititos que también se traducen en temperaturas aún más chiquititas, estamos hablando de un par de décimas o centésimas de grado, que probablemente con un termómetro cualquiera ustedes no podrían ni siquiera medir. Pero en lo que sí les quiero llamar la atención, siguen términos de las cantidades de forzamiento y sus correspondientes cambios de temperatura, quizás vimos un

efecto de temperatura porque dejamos de ver esta pantalla de aerosoles, bajó eso y por lo tanto llegó más radiación, las temperaturas aumentaron, también se ve un efecto está asociado una baja de dióxido de carbono, pero qué es muy lento y muy pequeño y que la verdad ni siquiera es distinguible de la señal de ruido y que la razón ruido-señal fue muy pequeña y no alcanzamos a ver lo que pasa con el dióxido de carbono y un poquitito de ozono que, en general, tuvo un aumento y por lo tanto, un aumento forzamiento, de ahí de calentamiento.

Así que la baja de dióxido de carbono es esencialmente indetectable porque ya la actividad volvió y probablemente en algunos casos puede que aumente, por otra parte este efecto de larga duración que tiene el dióxido de carbono, porque vive mucho tiempo en la atmósfera, es un efecto de inercia muy grande y entonces lo que uno pueda aprender de ahí, que para disminuir el dióxido de carbono no basta con medias cortas, tienen que ser medidas estructurales, sostenidas y francamente aceleradas, y desde el punto de vista del ozono y por desaparición de aerosoles primarios, hay un incremento de temperaturas y de forzamiento relativamente pequeño, pero que se extiende durante mucho tiempo, también en el caso del dióxido de carbono, pero muy chiquitito, en este otro se va a notar un poquito un par de años, pero también es un forzamiento relativamente pequeño. Así que en general si uno quiere cambiar la manera que estamos afectando el clima, necesitamos tomar medidas estructurales, sostenidas y muy rápido.

Para resumir un poco lo que he querido contarles, al principio les decía que efectivamente hemos alterado el funcionamiento del planeta azul donde requerimos vivir, porque aquí vivimos y esto me gustó ilustrarlo con esta caricatura (Figura 10), en que van a estas personas a entrevistar a unos animales como en la zona de Wuhán. Aquí en la zona como relativamente tropical de Asia y estos personajes les empiezan a contestar que en realidad ellos no han cortado los árboles, no han puesto barreras a los ríos, no han cambiado el clima, no han hecho tráfico de animales silvestres, no han destruido la biodiversidad ni mucho menos, y entonces aprovechan de hacer su protesta y efectivamente quiénes somos responsables de todos estos cambios que estamos viviendo, no sólo de cambio climático sino que de una miríada de cambios que hacen poner en cuestión nuestra manera de vida, somos nosotros.



Figura 10

Por otra parte espero haberles ilustrado que de alguna manera, la contaminación atmosférica y el cambio climático son caras de una misma moneda, porque finalmente obedecen mayormente al uso de combustibles fósiles y en general, al uso que hacemos de la energía y que hay procesos que no son lineales y que se traducen normalmente en un sistema complejo como el sistema climático, en respuestas que pueden ser inesperadas como esto de que uno baja ciertos contaminantes y aumentan otros; uno esperaría que bajaran todos pero no, hay procesos no lineales que llevan al aumento del ozono y material particulado secundario. Por ejemplo, esto que ya decía de que la mitigación climática debe ser sostenida y acelerada y que en el corto plazo puede haber una pequeña ayuda de estos forzantes climáticos de vida corta como el ozono y las partículas, con la ventaja de que, además, nos pueden ayudar en enfrentar la calidad del aire. Pero a la larga, el dióxido de carbono es el importante por esta relación que tiene con la temperatura que les ilustraba la Profesora Rojas. De todas maneras y porque vive mucho tiempo en la atmósfera. Por lo tanto, tenemos que empezar a hacer algo ya, para que a futuro no sigamos teniendo aún más problemas de los que ya tenemos y ya hay que tomar esas medidas que sirven ahora pero también después, es decir, tienen que ser medidas sostenibles desde un punto de vista económico, ambiental, social y también ingenierilmente, si ustedes quieren, adecuadas.

Muchas gracias.

*Al término de la Conferencia, la Sra. Maisa Rojas y la Sra. Laura Gallardo respondieron consultas y comentarios de los asistentes. A continuación, reproducimos lo más relevante de estas intervenciones.*



### Sr. Ricardo Nicolau del Roure.

*—Muchas gracias profesoras Maisa Rojas y Laura Gallardo, muy interesante las ponencias que ustedes nos han explicado hoy, y me quedo con algunas cosas que me llamaron la atención, esto de que 1,5 grado importa es algo que no lo había escuchado y entendí el porqué, y cómo se logra mantener estos límites, ahí está el quid del asunto, también esto de la cantidad finita de CO<sub>2</sub> que podemos inyectar y que de alguna manera ha sido medida, y cómo hacer que Chile sea un país carbono neutral. Yo creo que se han tomado medidas importantes, pero el qué y el cómo, cómo lo hacemos como sociedad, me parece que ahí la factibilidad sociocultural atenta fuertemente como ustedes señalaron y no solo en Chile sino en el mundo entero. Y luego Laura nos explicó cómo hemos aprendido sobre la calidad del aire y estos fenómenos no lineales de los contaminantes en el aire con la pandemia, o sea, una catástrofe que nos permitió conocer algunos fenómenos y aprender de ellos. Y finalmente, esta moneda que tiene dos caras; la contaminación y el cambio climático son dos caras de la misma moneda que hoy quedó muy bien reflejado.*

### Sr. Raúl Demangel.

*—¿Qué otra medida adicional a los bosques existe, dado a que países desérticos tendrían más dificultades para el control del CO<sub>2</sub>?*

### Sra. Laura Gallardo.

*—Efectivamente el crecimiento de bosques sirve, pero tiene sus bemoles también y uno de ellos es que, en un país como*



Chile, aún en estas zonas que usualmente habían sido tan lluviosas y con hermosos bosques milenarios, primero no nos quedan muchos de esos bosques y segundo la disponibilidad de agua ha disminuido, y eso también le pone un límite, porque los bosques para crecer efectivamente necesitan carbono, pero también necesitan nutrientes y necesitan agua. Así es que no hay balas de plata en esto, aquí hay que conciliar y conjugar muchos tipos de medidas; la verdad es que estamos lejos, no hay una fuente de energía alternativa y lamentablemente porque es difícil y en algunos sentidos puede ser caro, pero es más caro no hacerlo, hay que cambiar las estructuras. En el caso de los desiertos un buen uso que se le puede dar a los desiertos como ha ocurrido y está ocurriendo en Chile, es el uso del desierto Atacama con la mayor radiación solar del mundo, en eso sí somos campeones, no dependemos de los resultados de otros partidos, ahí somos campeones porque tenemos el máximo, tenemos estas plantas solares que pueden llegar a producir energía en cantidad suficiente y buena, pero que tampoco son suficientes, también tenemos que tener estos sistemas de respaldo y alternativas, y no existe la bala de plata, tenemos que ocupar mucha inteligencia, mucha creatividad, mucha energía, mucha sociología también para poder hacer estas cosas, y mucha política, pero buena política.

### **Sr. Jorge Pedrals.**

*—¿Cuáles son los principales detractores de las teorías de calentamiento global por efecto exclusivo del hombre?*

### **Sra. Maisa Rojas.**

—A lo largo de los años se ha manifestado un movimiento de detractores, le llamamos negacionistas del cambio climático que sostienen, primero, que no existe, que no es causado por el ser humano, y otras versiones hablan de que existe, es causado por el ser humano, pero tenemos otras prioridades y otro más reciente, que tampoco aportan a la acción, son los que sostienen que ya no hay nada que hacer. Yo diría que, de los primeros, de los que dicen que no existe, esos ya no se manifiestan porque la evidencia simplemente de que el cambio ha existido es abrumador, no hay dónde esconderlo.

Ahora la pregunta es, bueno, estamos de acuerdo de que hay un cambio que hemos observado. La pregunta es si es

acción humana y ahí a eso le llamamos atribución, tiene varias metodologías de cómo hacemos esos estudios y la atribución también está clarísima.

Yo no lo mencioné específicamente, pero en el Informe 1,5, cuando decía que la actividad humana ha producido el calentamiento de un grado, o sea, todo el calentamiento se lo podemos atribuir a la actividad humana; no hubiese ocurrido sin la quema de combustibles fósiles y sin el cambio de uso de suelo como la deforestación que hemos llevado a cabo los últimos 150 años. Así es que ésa también es una pregunta que está cerrada científicamente, sin embargo existen detractores, con estos nuevos bemoles, de que bueno, está aquí, pero tenemos otras prioridades, y por eso yo hice hincapié en ese Informe de 1,5, porque no habla solamente de cómo enfrentamos el cambio climático y porque uno podría decir bueno, quizás a ti te importa mucho el cambio climático, pero a mí me importa mucho más solucionar el problema de la desigualdad, de la pobreza, no sé, tenemos muchas prioridades como sociedad. Pero, lo que muestra el informe es que si planificamos bien cómo se toman las decisiones, hay decisiones que se pueden tomar en la cual hay sinergia entre todos los objetivos, uno lo podría ser muy mal efectivamente y decidir por ejemplo, vamos a convertir los combustibles fósiles con combustible sintético a base de alimentación, y eso significa que todos los campos que hoy día nos producen comida para alimentarnos lo vamos a hacer para producir combustibles sintéticos, y esa sería una manera de solucionar el problema, pero evidentemente tendría impactos negativos en la seguridad alimentaria, pero lo interesante es que existen maneras bien planificadas, bien pensadas en que podemos hacer compatibles todos los objetivos de desarrollo sostenible.

Esa sería la respuesta, los argumentos geológicos están incluidos, los geólogos, yo soy paleo climatóloga de hecho, es un gran aprendizaje entender el clima en el pasado geológico, porque justamente la conclusión, es que no podemos explicar lo que estamos observando hoy, simplemente con esta forzante geológica antigua.

### **Sr. Jeremy Barbay.**

*—¿Es necesario y existen políticas para mejorar la eficiencia energética, por ejemplo, aislación térmica en las residencias de Chile de manera de reducir el consumo de energía?*

### **Sra. Maisa Rojas.**

—Es muy importante. Cuando uno mira la batería de opciones que existen y de hecho en el documento de la NDC, de la contribución nacionalmente determinada de Chile, yo les mencioné que tiene 30 medidas y la eficiencia energética a través del aislamiento térmico es una de ellas.

¿Cuál es la importancia de ellas? Es que produce una reducción en la necesidad de energía y por lo tanto si esa energía la producimos con combustibles fósiles, reduce las emisiones, pero también tiene impactos positivos económicos y en el caso del sur de Chile también los tiene porque a la aislación, si uno le suma el cambio de los calefactores, también reduce la contaminación intradomiciliaria y la contaminación en ciudades en el sur de Chile. Así es que ahí tenemos medidas que tienen triple impacto cambio climático, contaminación, seguridad energética, salud y pobreza energética, y también en el empleo porque ese tipo de trabajos son realizados por PYMES en general.

### **Sra. Laura Gallardo.**

—Podría acotar que, si bien hay mucha ingeniería que hacer en eso, también hay de nuevo mucha sociología y el punto es el siguiente. No es un problema solo de ponerle revestimientos o de cambiar la manera en que construimos, también hay que cambiar culturalmente. El cambio a la leña, por ejemplo, no es llegar y hacerlo, no son solo medidas de ingeniería, sino que tienen que ser medidas de ingeniería que se conversan con las personas, en que se llega a esos cambios por consenso. Y quizás alguno de estos intentos, que ha habido desde la perspectiva de la calidad del aire, por ejemplo, del sur de Chile, fueron muy exitosos en el caso de Temuco. Cuando se han tratado de extrapolar a otra zona, a veces se encuentran con que uno trata de hacerlo a punta de políticas de precios, entonces, ahora hay energía eléctrica, pero la gente no la toma porque a veces falla y cuando falla la energía eléctrica en Coyhaique no es chiste, uno quizás no ama- nece al otro día o amanece un poco tieso, entonces, hay que volver a mirar los problemas de una manera un poco distinta, no hay que mirarlos desde una pura perspectiva, normalmente hay que mirarlo desde muchas, porque son mucho más complejos que los problemas que estábamos acostumbrados a resolver.

### **Sr. Jeremy Barbay.**

—*¿La humanidad puede llegar a la emisión de carbono nula, sin una reducción masiva de la población humana y de su consumo energético individual promedio?*

### **Sra. Maisa Rojas.**

—Sí, es evidente de que si la población humana sigue y sigue aumentando va a ser cada vez más difícil repartirnos los recursos que tiene este planeta, pero antes de eso está la distribución del uso de los recursos entre los distintos humanos que es bien distinta. Hay un ejemplo que lo dio el ex Presidente Lagos hace muchos años atrás, pero creo que lo explica muy bien, en que comparaba dos ciudades con un índice desarrollo humano muy parecido y aquí no me acuerdo muy bien cuáles eran las ciudades de Estados Unidos, creo que era como Atlanta o Filadelfia en Estados Unidos y Barcelona, dos ciudades en que hay una buena calidad de vida y en ambas ciudades el promedio de las emisiones asociado en la ciudad de Estados Unidos era 3-5 veces mayor que la de Barcelona, simplemente por una manera muy distinta que tiene la ciudad de funcionar. Así que cuando hablamos del uso de recursos muy diversos no estamos pensando en que todos vayamos a ser pobres, sino simplemente en que hay maneras de construir ciudades que permiten gastar menos energía y aquí Laura, creo que puede complementar mucho el tema de las ciudades, porque ahí hay un espacio gigantesco de avance.

### **Sra. Laura Gallardo.**

—En las ciudades, hay mucho por avanzar, hoy por hoy las ciudades son responsables de aproximadamente un 68% de las emisiones globales de dióxido carbono, sea directa o indirectamente y esa proporción se espera que siga aumentando en la medida que la población crece y que es cada vez más urbana. Por lo tanto, lo que hagamos y dejemos de hacer en las ciudades va a ser fundamental y ciertamente ciudades segregadas, gigantescas, donde uno tiene que desplazarse por decenas de kilómetros para llegar a trabajar, eso no es sostenible, entonces es muy importante ponerle ojo a cómo convivimos nosotros en general y cómo convivimos dentro de las propias ciudades. Y hay maneras, desde qué tipo de vegetación usar, qué consumo de agua tener, cómo movilizarse, cómo desplazarse. Viendo datos

de Santiago, una de las cosas más impactantes quizás, es el nivel de movilidad que tienen los niños y niñas cuando van al colegio, es impresionante la cantidad de kilómetros que recorren día a día y eso no debe ser. Y eso a qué responde, a que mucha gente transporta un niño de un lado a otro para llevarlo a lo que supuestamente es un mejor colegio, pero por qué no tenemos mejores colegios, por qué no tenemos mejores barrios, por qué no tenemos mejores servicios; ¿qué hace que alguien se tenga que venir en auto desde Bajos de Mena hasta las Condes para trabajar? Entonces tenemos que pensar mejor nuestras ciudades, y eso significa pensar las grandes ciudades, pero también en el caso de Chile, pensar muy bien nuestras ciudades intermedias que son las que están creciendo más rápidamente, y dónde tenemos “más fácil”, relativamente, hacer intervenciones de diseño, de pensamiento urbano que nos lleven a ciudades más equitativas y también más sustentables, así de simple.

### **Sra. Maisa Rojas.**

—Había una pregunta sobre ¿cuál es la sensibilidad empresarial en estos temas de cambio climático? Obviamente yo no puedo dar una respuesta a eso porque no soy empresaria, pero yo diría que en general en el caso de Chile, dado que somos tan ricos en energías renovables

no convencionales y de que éstas han tenido un auge y una expansión bien importante los últimos años, llegar al carbono neutralidad se ve más bien como una oportunidad, una oportunidad para el desarrollo, para nuevos empleos, etcétera. Entonces, de alguna manera en este momento algo que parecía un castigo antiguamente, que no teníamos combustibles fósiles, no teníamos carbón, no tenemos petróleo, etcétera, en este momento es una bendición en realidad. Mucho más difícil para un país que por ejemplo tenga combustible fósil, que tenga petróleo, decidir dejar ese petróleo y empezar su desarrollo por otros lados, en ese caso y en el caso de Chile, además, y esto es bastante general también, como el 80% de nuestras emisiones vienen del sector energía, entonces si solucionamos cómo generamos energía con energía renovable y electrificación de transporte, tenemos resuelto el 80% de los problemas, eso es también es importante entender, que efectivamente esa factibilidad tecnológica existe porque el sector más importante es energía, y eso es a nivel global y a nivel del caso de Chile también.

### **Sr. Ricardo Nicolau del Roure.**

—*Qué esperanzador, que así sea, muchas gracias.*

**Fin de la Conferencia.**

# “DESAFÍOS POR ABORDAR EN INFRAESTRUCTURA HACIA EL AÑO 2030”

*Conferencia Sr. Carlos Cruz Lorenzen, Director Ejecutivo,  
Consejo de Políticas de Infraestructura, CPI.*



*Sr. Carlos Cruz Lorenzen.*

*El día martes 30 de noviembre de 2021 vía Zoom, ante una gran concurrencia de personalidades del ámbito público y privado se realizó la conferencia del Sr. Carlos Cruz Lorenzen, Director Ejecutivo del Consejo de Políticas de Infraestructura, CPI, quien expuso el tema: “Desafíos por Abordar en Infraestructura hacia el Año 2030”.*

*Carlos Cruz es Ingeniero Comercial de la Universidad de Chile y Maestría en Negocios en el IESA, Venezuela. Fue Coordinador General de Concesiones entre los años 1995 y 2000.*

*Ha sido Ministro de Obras Públicas, Transportes y Telecomunicaciones de Chile entre los años 2000 y 2002.*

*Actualmente, Director Ejecutivo del Consejo de Políticas de Infraestructura (CPI).*

## El Presidente, Sr. Ricardo Nicolau del Roure.

—Sean muy bienvenidos a nuestra conferencia del Instituto de Ingenieros de Chile de este mes, que versará sobre los desafíos que enfrenta la infraestructura pública del país hacia el año 2030.

Hoy tenemos a Carlos Cruz Lorenzen, Ingeniero Comercial de la Universidad de Chile, que tiene una maestría en negocios en la IESA de Venezuela. Fue el Coordinador General de Concesiones entre los años 1995 y 2000, cuando las concesiones de infraestructura pública tomaron fuerza en Chile y provocaron un impacto notable. Entre 2000 y 2002 fue Ministro de Obras Públicas y Telecomunicaciones y actualmente es Director Ejecutivo del Consejo de Políticas Infraestructura (CPI).

## El Ingeniero Sr. Carlos Cruz.

—Gracias por la presentación.

La definición más relevante respecto a la infraestructura está asociada al desarrollo económico de los países; hay quienes dicen que la infraestructura debe dar soporte a una estrategia de desarrollo y otros argumentan que la infraestructura es el motor que dinamiza una estrategia de desarrollo.

Voy a compartir con ustedes una presentación, para ir dejando establecidos algunos puntos que, a mi juicio, son claves en esta conversación y sobre los cuales –luego– podemos ir ahondando a medida que sea de interés, pero me interesa destacar la infraestructura como una condición esencial en esta discusión con respecto al desarrollo (Figura 1).



Figura 1

Creo que el gran problema de Chile es que no tiene una estrategia de desarrollo explícita y concordada, y eso ha quedado muy de manifiesto en las discusiones de las recientes campañas presidenciales, donde, por una parte, se sostiene que hay que cambiar el modelo de desarrollo y nadie sabe bien qué modelo de desarrollo es el que hay que cambiar. Y, por otro lado, sostienen que hay que seguir más o menos igual. Esta perspectiva es bastante complicada, puesto que nuestra estrategia de desarrollo ha tendido a declinar en el tiempo, y ha hecho más difícil que los beneficios de la actividad económica lleguen a todos los que tienen que llegar.

Por tanto, creo que es muy importante pensar cuál es la estrategia de desarrollo que un país como el nuestro debe diseñar para poder avanzar sustantivamente en la generación de crecimiento, de capacidades productivas, de productos y distribución adecuada de estos, hacia todos los habitantes del país (Figura 2).



Figura 2

Sin embargo, Chile tiene algunos compromisos que son relevantes. Somos firmantes del Acuerdo de París; por lo tanto, estamos muy comprometidos a bajar en forma significativa las emisiones contaminantes, en un contexto mundial en el cual Chile representa solo 0,2% de las emisiones mundiales, pero a la vez está dentro de los 18 países más afectados (Figura 3).

Entonces, ¿cuál es el sentido de este esfuerzo por bajar las emisiones? Esencialmente, debemos generar un espacio en la conversación mundial sobre la necesidad de que los países que más contaminan –China, India, Estados Unidos, Rusia– tengan una actitud mucho más proactiva y comprometida con la rebaja de las emisiones, de tal


manera de disminuir los impactos que tienen en un país como Chile.

Desafíos desde la infraestructura al 2030

**1. Compromisos del País**

b. Somos firmantes del acuerdo París: bajar en forma muy significativa las emisiones

- 0,2% de las emisiones mundiales
- entre los 18 países más afectados)



CPI CONSEJO POLÍTICAS DE INFRAESTRUCTURA

www.infraestructurapublica.cl

Figura 3

Si no somos consistentes con esta declaración, tendremos poco espacio en el mundo para poder levantar nuestro punto de vista. Y en este sentido, creo que es muy importante que mantengamos una política estricta de reducción de emisiones y podamos avanzar en la dirección que, de alguna manera, se ha ido diseñando en el último tiempo.

Simultáneamente, somos suscriptores del objetivo sustentable de las Naciones Unidas (Figura 4), que nos compromete con 17 metas de aquí al año 2030. De estos 17 objetivos, 70% de tienen vínculo con la infraestructura y, por lo tanto, las políticas que podamos diseñar en infraestructura son muy relevantes para alcanzar estos objetivos sustentables. Nosotros los hemos sintetizado en cinco.

Desafíos desde la infraestructura al 2030

**1. Compromisos del País**

c. Somos suscriptores de los Objetivos Sustentables de Naciones Unidas

- Minimizar la pobreza
- Aumentar el crecimiento
- Sustentabilidad ambiental
- Inclusión
- Transparencia y gobernanza



CPI CONSEJO POLÍTICAS DE INFRAESTRUCTURA

www.infraestructurapublica.cl

Figura 4

El impacto de la infraestructura debiera minimizar la pobreza; es cierto que en Chile ya no se habla de pobreza, hay cierto pudor respecto de la pobreza en Chile y se habla de sectores medios. Sin embargo, cuando se recorre, se ven las condiciones y diferencias que existen entre una localidad y otra. Las comunas de Santiago y algunas ciudades mayores del país todavía cuentan con bolsones de pobreza muy relevantes y la infraestructura debe que tener una orientación definitiva en disminuir los niveles de pobreza en Chile.

Ser capaz de aumentar el crecimiento. No cabe duda de que los países se desarrollan en tanto son capaces de incrementar su producto, por lo tanto, la infraestructura podría tener un rol muy importante en asegurar la sustentabilidad ambiental. De esto en el mundo ya no hay dudas y en Chile, menos.

Hoy no es posible desarrollar proyectos sin contemplar los efectos ambientales desde su concepción; tienen que ser inclusivos y asegurar que los beneficios de su impacto lleguen a todos. Deben asegurar transparencia y gobernanza. No es posible pensar en proyectos que no den a la comunidad seguridad y confianza. Para esto se deben aumentar significativamente los niveles de transparencia y asegurar una gobernanza de los proyectos, especialmente, cuando tienen impactos en un largo plazo.

En este contexto, es bueno mirar a Chile como un país que está expuesto a grandes cambios (Figura 5). Estamos enfrentando una crisis ambiental profunda que se aprecia en dos grandes aspectos: uno es la crisis hídrica y la otra tiene que ver con el comportamiento marítimo. Aunque voy a centrarme, principalmente, en la crisis hídrica, porque su impacto ha sido muy relevante.

Desafíos desde la infraestructura al 2030

**2. Somos un país expuesto a grandes cambios**

a. Estamos enfrentados a una crisis Hídrica de Magnitudes

- Aumento de la pluviometría en el norte: impacto en ciudades
- Reducción de las lluvias en el centro
- Aumento del consumo por razones productivas



CPI CONSEJO POLÍTICAS DE INFRAESTRUCTURA

www.infraestructurapublica.cl

Figura 5

Cuando se examina la pluviometría en el norte y su impacto en las ciudades, se hace evidente la necesidad de tomar medidas de protección de ciudades y hay una gran concentración de recursos que se debe destinar a este propósito.

La disminución de la pluviometría ha afectado a la zona centro, centro-norte y centro-sur con impactos muy significativos. Parte de la discusión hoy es sobre si ciudades grandes como Santiago o el Gran Valparaíso van a tener suficiente agua para sus habitantes en los próximos años. Y sería un éxito poder dar seguridad hídrica hasta mediados del próximo año.

Hasta hace poco tiempo, esto era bastante impensable. Pero la seguridad hídrica tiene que estar garantizada, por lo tanto, es fundamental tomar las medidas que pueda asegurar agua a estas ciudades.

Pero también, el impacto del aumento del consumo por razones productivas ha sido muy significativo. Me decía un empresario del sector hídrico que, con alarma, veía que en este momento en que estamos atravesando por un problema muy grave de carencia de recursos hídricos, se plantan paltas en la zona de María Pinto en forma creciente, sin contemplar las dificultades que existen para abastecer debidamente esos desarrollos agrícolas, asegurando el consumo de las comunidades aledañas. Por lo tanto, tenemos un problema importante de cambio en la pluviometría; también tenemos problemas de gestión en nuestro recurso hídrico que es necesario tener presente.

Estamos en medio de un cambio tecnológico sin precedentes. Somos parte de un proceso que es muy importante en las distintas disciplinas que contemplan la vida nacional y el efecto que esto tiene sobre la infraestructura es muy relevante.

Ayer un medio escrito del país informaba del impacto que puede tener el transporte de carga si se realiza a través de hidrógeno eléctrico con batería de litio, o hidrógeno como sustento. Creo que esa discusión es tremendamente relevante, desde el punto de vista de lo que pueden ser las distintas alternativas para ir abordando los desafíos logísticos. Por lo tanto, creo que es muy importante vernos como parte de un proceso de cambio tecnológico que va a representar cambios relevantes y también oportunidades muy importantes para el desarrollo del país (Figura 6).

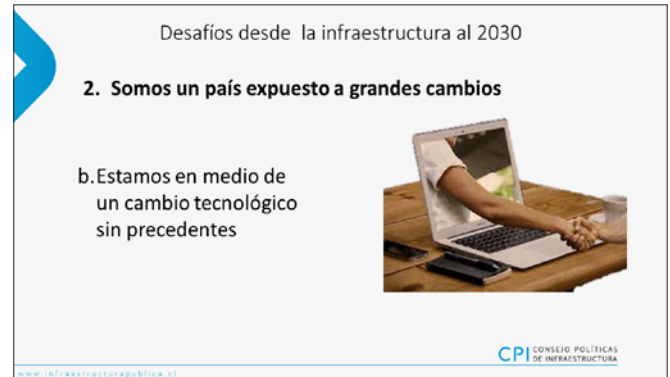


Figura 6

Las formas de vida están cambiando (Figura 7), las demandas de educación son cada vez mayores y estamos inmersos en un proceso de urbanización también cada vez más importante. Probablemente, Chile sea uno de los países con mayores niveles de urbanización en la región y muy cerca de los niveles de los principales países del mundo, lo cual –de nuevo– tiene grandes efectos positivos y también costos muy relevantes, lo que se debe tener en cuenta.

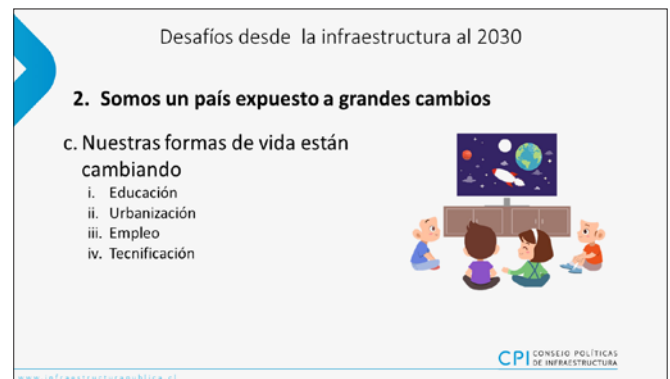


Figura 7

Respecto del empleo, se están viviendo cambios significativos. Ya no va ser tan fácil sustituir los desplazamientos que se produzcan como consecuencia del desarrollo tecnológico. ¿Qué pasará con los puestos de trabajo que se eliminen por los avances tecnológicos importantes?, es una pregunta necesaria y que estará presente en las distintas estrategias que podamos plantearnos a futuro en el marco de la tecnificación.

Me parece que tendrá una influencia significativa en nuestra forma de vida.

Estamos en una creciente demanda de participación. Sin ir más lejos, la crisis social que se develó en octubre del 2019 es relevante y se manifestó de forma tal que removió las estructuras de la sociedad chilena, particularmente, en las formas como se venían haciendo las cosas. Pensamos que eso va a estar presente y se va a explicitar permanentemente en los procesos de desarrollo que queramos enfrentar en el futuro (Figura 8).

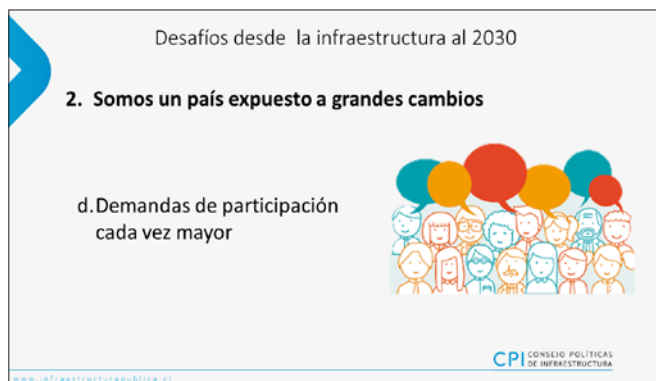


Figura 8

El aumento de la población por crecimiento vegetativo; es escaso, limitado, pero con una fuerte inmigración. Al país le ha ido bien y resulta atractivo para poblaciones de otras naciones cercanas, que ven en Chile una posibilidad para desarrollarse y esto va a significar una presión migratoria sobre nuestras fronteras. Esto puede ser visto como una amenaza o como una oportunidad. Países como Australia convirtieron a la migración en una herramienta económica relevante durante muchos años y lograron aumentar su población en forma muy significativa, tanto así que desde 1950 hasta ahora, Australia –que tenía la misma población de Chile en esa década– hoy nos supera en cerca de siete millones de habitantes. Por lo tanto, es un ejemplo de cómo la migración puede ser considerada un factor relevante desde el punto de vista de los esfuerzos de crecimiento y desarrollo, pero es un elemento que debemos tener presente frente a las dinámicas que el mundo nos ofrece (Figura 9).

En Chile estamos enfrentando un cambio político relevante, en donde se está discutiendo una nueva Constitución,

junto a un cambio de Gobierno y un Parlamento recién renovado. Todo esto representa situaciones que son distintas de las que hemos estado acostumbrados y, por lo tanto, es importante mirar a Chile en la perspectiva de este proceso de cambio multisistémico que está teniendo lugar y que creo que representa para muchos amenazas de distintas naturalezas, pero también creo que es muy importante considerarlo con una tremenda oportunidad para dar un salto hacia adelante y poder proyectarnos a un desarrollo mucho más atractivo, inclusivo y que contemple a toda la sociedad, desde el punto de vista de los beneficios que este proceso debiera representar (Figura 10).



Figura 9

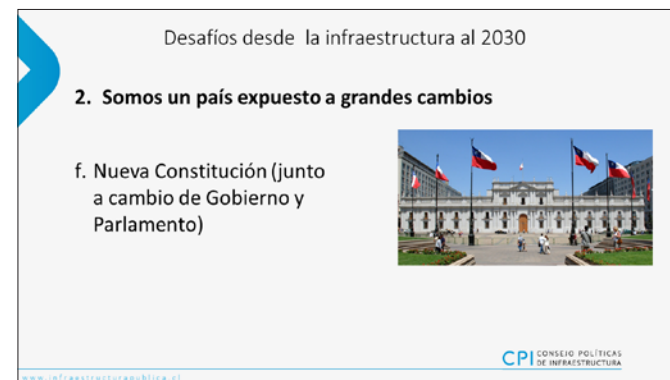


Figura 10

En ese contexto, ¿cuál es el rol que le cabe a la infraestructura y cuáles son los desafíos que la infraestructura debiera intentar enfrentar como soporte a este proceso que está sucediendo? Estos son cambios que están teniendo lugar y que se ven como el factor principal dentro del contexto en el cual Chile está inserto (Figura 11).



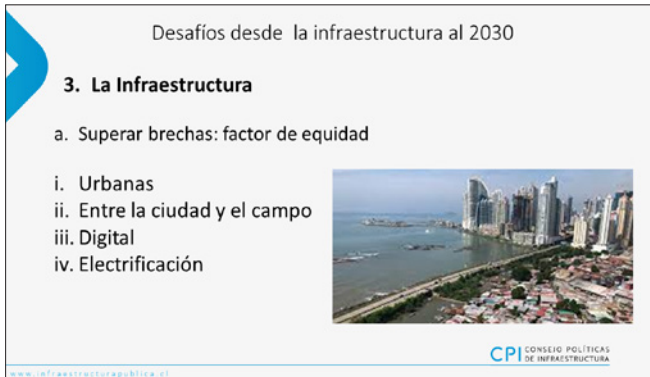


Figura 11

En primer lugar, la infraestructura supera brechas y en eso hay que ser muy claro, el desarrollo que ha tenido Chile es muy desigual, hay sectores que se han desarrollado de forma progresiva, hay otros sectores que han ido quedando atrás y la mirada de la infraestructura debe ser: de qué manera estamos en condiciones de que aquellos que no se han visto favorecidos por el proceso de desarrollo puedan alcanzar ciertos niveles de acceso a bienes públicos que la infraestructura ofrece, para poder situarse en mejores condiciones. Esto es evidente en las ciudades, y aclaro que en las ciudades hay diferencias que son muy marcadas y que son muy odiosas.

En los campos chilenos todavía hay bolsones de pobreza muy significativos, los cuales podrían minimizarse en la medida en que existan políticas de infraestructura que permitan ir produciendo este acercamiento al resto de la sociedad y a los bienes públicos que esas comunidades requieren para un mejor vivir.

Está también la brecha digital que, si no tomamos precauciones desde ya, puede ser un factor adicional de diferencias; hoy estamos en condiciones de abordarla, pero son necesarias políticas y acciones decididas. Lo mismo pasa con la electrificación, es cierto que Chile es un país de un gran nivel de electrificación, pero debemos hacer un esfuerzo porque ese proceso de electrificación creciente llegue a todos los lugares, de tal manera de poder contribuir por esa vía, no solo la mejor calidad de vida, sino también a niveles menores de contaminación, debido a las formas de energía a que se recurre cuando no se tiene acceso a un buen sistema de electrificación. Por lo tanto, el rol de la infraestructura como una base para ir superando brechas y generar mayor equidad parece fundamental.

Un segundo rol que cumple la infraestructura y que genera actividad, son las inversiones en infraestructura que –pongo entre comillas– “mueve a las industrias” (Figura 12). Es un factor que genera demanda y con ello muchos sectores productivos se activan, lo que genera empleo y estos a su vez también generan demandas. Por lo tanto, constituye un elemento que pone a la sociedad y al país en movimiento en función de las actividades que se puedan realizar. Por lo tanto, creemos que hay que hacer un esfuerzo por mirar la infraestructura no solo como factor de superación de brechas, sino también como un factor de generación de actividad, lo cual es muy importante para ver lo que podemos enfrentar en este contexto de cambios a los que estamos expuestos como consecuencia de esta situación crítica que vive la sociedad chilena.



Figura 12

Pero también la infraestructura es creadora de oportunidades y, probablemente, acá viene la gran interrogante: ¿La infraestructura permite el despliegue de potencialidades? Por ejemplo, llegar con caminos a zonas hoy todavía aisladas implica no solo incorporar a esas comunidades, sino también darles condiciones básicas para que puedan llevar adelante sus actividades productivas y vincularse a los mercados internos y externos a partir de sus propias especialidades. La infraestructura podría desplegar estas potencialidades que, de otra forma, serían difíciles de materializar y concretar. También, mejorar la ocupación del territorio, y que en la medida en que vamos extendiendo nuestras redes, el territorio nacional –que no es muy grande, pero que está ocupado medianamente– podría aumentar la oferta de aquella geografía que representa una oferta para el desarrollo de actividades económicas y sociales.

En consecuencia, por ejemplo, la infraestructura puede facilitar el acceso a zonas de particular belleza paisajística, lo que puede significar un tremendo despliegue de oferta turística y ser un factor relevante de dinamismo económico; en definitiva, aprovechar los beneficios que tiene nuestro territorio.

Entonces, puestas las bases para un crecimiento mayor, más equitativo y sustentable, la infraestructura cumple una función esencial desde el punto de vista de las potencialidades que, como país, tenemos para mirar el futuro (Figura 13).



Figura 13

¿Cuáles son los desafíos que tiene la infraestructura?

En primer lugar, quisiera decir que consideramos que la infraestructura es uno de los cuatro pilares principales del desarrollo de los países. Uno de ellos es el nuestro equilibrio macroeconómico, un contexto económico que facilite las condiciones de planeación desde el sector privado; esto es un factor positivo desde el punto de vista de la mirada de futuro. El segundo pilar y en el que hemos sido también bastante eficientes es crear estabilidad institucional que dé confianza a quienes generan capacidad productiva, invirtiendo, desarrollando actividades, pero también a la comunidad que se pone a disposición de las instituciones. En el tercer factor, en el que tenemos todavía una brecha importante, es el desarrollo del conocimiento.

Los países que adquieren ciertos niveles de desarrollo invierten en conocimiento en forma muy significativa, no solo en educación, sino en conocimiento en general, y en esto tenemos una brecha que salvar. La infraestructura, por último, es un cuarto pilar para el desarrollo, como

base para poder aprovechar la geografía desde el punto de vista del desarrollo.

En este sentido, los países que hemos mirado como referentes para evaluar cuáles son los esfuerzos que debemos hacer, para llegar a un cierto nivel de desarrollo, nos señalan que aquí estamos todavía muy rezagados en los montos de inversión respecto de nuestro producto interno bruto.

Hoy se “gasta” (y lo pongo entre comillas porque desde el punto de vista de administración del presupuesto público lo es, pero desde el punto de vista de lo que es la materialidad, ese gasto es inversión), 2,4% del PIB –tanto directamente del gasto público como por medio del sistema de concesiones en infraestructura pública– y se invierte desde el ámbito privado cerca de un 2% del PIB –sanitarias, empresas de telecomunicaciones y eléctricas–, con lo que en total llegamos a, más o menos, un 2,4% del PIB en inversión en infraestructura.

Pero, países que tienen un estado de desarrollo como el nuestro requieren invertir por lo menos del orden de 6% del PIB por 10 años. Esto significa invertir cerca de 1,6% más, aproximadamente 6.000 millones de dólares adicionales que debiéramos invertir año a año para llegar a los niveles de desarrollo que aspiramos. Por lo tanto, tenemos un desafío importante desde el punto de vista de la canalización de recursos para lograr a los niveles de inversión que el país requiere para avanzar en nuestro desarrollo (Figura 14).

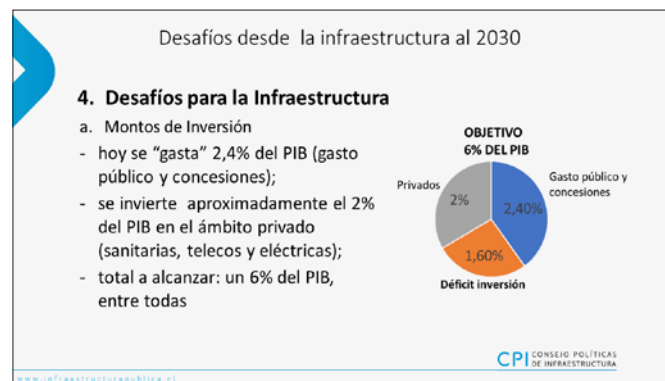


Figura 14

Un segundo gran desafío es que, asumiendo que tenemos una confusión respecto de nuestro modelo de desarrollo, no plenamente identificado, es necesario proponernos

identificar los factores relevantes que requiere nuestro desarrollo; hacer un trabajo de prospección y planificación a nivel supra ministerial, de tal manera de generar desde el Estado una visión compartida, políticamente validada, que nos permita proyectar a Chile en el mediano y largo plazo.

En el pasado, en Chile tuvimos el Ministerio de Planificación, que hoy es el Ministerio de Desarrollo. Este último está concentrado esencialmente en entidades que se enfocan en los sectores rezagados de la sociedad, más que en pensar en el desarrollo futuro del país y es necesario recuperar la capacidad de mirar nuestro país en el largo plazo y de generar las condiciones para que las instituciones del Estado puedan realizar labores coordinadas que permitan integrar los distintos esfuerzos.

Un ejemplo concreto lo dan dos proyectos de iniciativa privada que se encuentran en el Ministerio de Obras Públicas (MOP) para concesionar ferrocarriles entre Santiago y Valparaíso, que intervienen un espacio de la geografía administrado por la Empresa Ferrocarriles del Estado (EFE); a su vez, esta Empresa tiene un proyecto muy atractivo del tren de Santiago a Melipilla y su extensión a San Antonio, que compite con uno de los proyectos presentado en el MOP. La conversación entre las distintas agencias –Ministerio de Transporte, MOP y EFE– aparentemente no ha ocurrido, puesto que estos proyectos concesionables están pendientes de resolución.

Hay algo que no funciona debidamente en la forma en que nuestras instituciones interactúan para tomar decisiones relacionadas con el desarrollo de los modos de transporte en Chile (y que es extensivo a otras disciplinas) que requiere de una mirada más integrada para coordinar debidamente sus funciones y el uso de sus recursos para alcanzar propósitos compartidos. Para esto se debe contar con una entidad supraministerial que planifique y que prospecte el desarrollo del país, como lo hacen Australia a través de Infrastructure Australia y Nueva Zelanda, con Infrastructure New Zealand. Se trata de dos experiencias institucionales que deberíamos mirar. No inventar nada, solo mirar en países con desarrollo mayor que el nuestro, para no demorarnos en procesos decisionales que implican un cierto grado de integración interinstitucional (Figura 15).

¿En cuál de esas áreas creemos que es importante focalizar hoy el esfuerzo en un horizonte a 10 años? Luego del estallido social, no se puede plantear que existe una primera prioridad; pero lo que no es posible es seguir manteniendo

los niveles de inequidad existentes en nuestra sociedad y principales ciudades. Se debe hacer un esfuerzo consciente y radical para generar infraestructura habilitante, recuperar terrenos degradados por la falta de infraestructura e ir resolviendo los problemas de habitabilidad para 600.000 familias que no cuentan con viviendas. Esto nos parece una condición *sine qua non* para asegurar nuestro desarrollo futuro y dar a las ciudades su potencialidad productiva.



Figura 15

Por alguna razón se dice que no hay espacio más productivo que las ciudades, lo que requiere de inversión para facilitar la habitabilidad de las ciudades en las que estamos actualmente insertos.

Esto debe ir acompañado de conectividad física para los distintos sectores de las ciudades; pensamos que el énfasis principal debe estar en la infraestructura para el transporte público, ya que la forma mediante la cual nuestras ciudades pueden desarrollarse, es con buen sistema de transporte público. En Chile este es razonablemente bueno en relación con Latinoamérica, pero respecto de las principales capitales del mundo estamos bastante rezagados. En consecuencia, sería bueno empezar a ponernos al día. La única forma de disminuir el uso del transporte privado es ofreciendo alternativas de mejor calidad y de mayor eficiencia, acompañado de un buen sistema de conectividad digital, ya que ha quedado demostrado que muchas actividades se pueden hacer sin necesariamente desplazarse, para lo que se requiere que esa conectividad digital llegue a todos (Figura 16).

Un segundo sector que es relevante abordar de aquí a 10 años es el hídrico, donde el impacto del cambio climático en Chile tiene su principal manifestación. Va más allá de

hablar de sequía; si hay un cambio estructural en nuestra disponibilidad de recursos hídricos, tenemos que ser capaces de resolver las carencias que todavía sectores importantes de la sociedad tienen de acceso a agua potable. No es presentable que un país que se proyecte a largo plazo como país desarrollado siga abasteciendo a una parte de sus habitantes por medio de camiones aljibe; eso claramente no es sustentable. Tenemos que mejorar la gestión de los escasos recursos hídricos de los que disponemos, y eso pasa por ver la forma de incrementarlos, cuenca a cuenca.



Figura 16

Se han hecho trabajos y sugerencias muy importantes desde la Fundación Chile, la Mesa del Agua, el Ministerio de Obras Públicas, quienes han tomado esto como una tarea principal; hay que actuar en función de los requerimientos que tienen las distintas cuencas para cumplir con el propósito mínimo de asegurar el consumo humano, y ver las disponibilidades de esa cuenca para el desarrollo productivo –para la sustentabilidad alimentaria del país, pero también para desplegar potencialidades agroindustriales– pues creemos importante pensar en formas de aumento de la oferta hídrica, particularmente de zonas más críticas.

Para esto no hay mucho que inventar, en estas circunstancias la desalación adquiere un rol muy relevante y no basta con que el sector privado ofrezca soluciones; el Estado debe asumir un papel relevante orientado a los sectores más atomizados de la producción agrícola –para el consumo interno y el sector exportador de mayor potencial–, por lo tanto, hay que tener una discusión de política pública para ver cómo es posible avanzar en el diseño una política de Estado que abastezca la oferta de agua por la desalación o los mecanismos de cuenca (Figura 17).



Figura 17

La tercera área es la logística.

Entre mediados de los noventa y 2010, Chile dio un paso muy grande en su desarrollo logístico, con grandes proyectos de infraestructura que permitieron mejorar sustantivamente nuestra capacidad logística, tanto a nivel vial como a nivel aeroportuario y portuario. Nos pusimos a un nivel expectante desde el punto de vista de lo que era nuestra condición logística y eso se vio reflejado en una serie de índices que mejoraron la posición de Chile a nivel mundial.

Esto no es teoría, no son simples declaraciones de competencia a nivel mundial. Nuestra potencialidad productiva se desplegó como consecuencia de una mejora sustantiva en nuestras condiciones logísticas, sin embargo, hemos retrocedido y perdido el paso, hemos bajado en el ranking a nivel mundial. Tanto es así que hoy en Chile los costos de la logística –y lo dicen las autoridades de transporte– representan aproximadamente el 18% de los costos de transporte de los productos importados y exportados, mientras que en los países de la OCDE estos representan un 9%.

Tenemos un margen grande para avanzar en disminución de nuestros costos por la vía de mejorar nuestras condiciones logísticas y para eso tenemos que recuperar el terreno perdido en vialidad. Actualmente se están haciendo reposiciones de vías concesionadas en forma muy significativa y, de hecho, el Ministerio de Obras Públicas ha llamado a licitación a una cantidad importante de nuevos proyectos de reposición, lo que ojalá puedan materializarse a la brevedad.

Tenemos un rezago importante en ferrocarriles. Es cierto que se están haciendo esfuerzos significativos en el ferrocarril de pasajeros, pero quisiéramos un esfuerzo mucho mayor en el despliegue de los ferrocarriles de carga, de tal manera de complementar la red vial con el desarrollo de este último, fundamentalmente, por la característica de mucha de nuestras cargas tienen una condición de “ferrocarrilables”.

Estamos relativamente bien plantados y tenemos que seguir insistiendo en nuestra capacidad de dotarnos de infraestructura aeroportuaria para tener conectividad significativa con el resto del mundo. Contamos con puertos de alto nivel de eficiencia, pero tenemos cuellos de botella en el acceso, se necesita ir viendo formas de resolver la integración de la ciudad con el puerto, avanzar en la integración modal de ferrocarriles y carreteras en nuestros puertos, con una política de borde costero de características distintas a las de hoy.

Es necesario delinear una política de uso del borde costero en la que quien recibe concesiones para el desarrollo de un puerto, también debe tener obligaciones de prestación de servicio de ese puerto. Eso ahora no existe, por lo tanto, hay que reflexionar sobre la manera en que vamos a desplegar nuestras condiciones como país en el comercio mundial, desde el punto de vista de las oportunidades que nuestra larga costa nos ofrece y que son escasas. Por lo tanto, tenemos que hacer inversiones importantes para dotarnos de capacidad portuaria y esto no puede quedar simplemente resuelto según las condiciones de mercado, tiene que haber políticas que ordenen de alguna manera el uso del borde costero y es en lo que queremos insistir desde ahora a los próximos años (Figura 18).

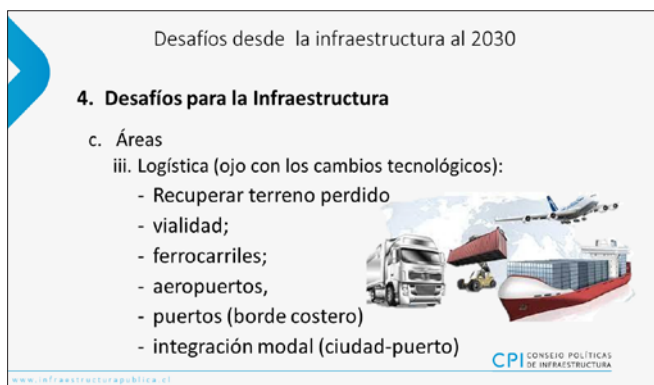


Figura 18

En el área de la electrificación, los esfuerzos hechos para descarbonizar han sido muy importantes. Sin embargo, vemos un problema. Da la impresión de que pese al crecimiento de la oferta de energías renovables no convencionales –en las cuales creo que se ha sido tremendamente exitoso como país– y en el incipiente desarrollo del hidrógeno verde, todavía no logramos que oferta y demanda conversen debidamente.

Tenemos un problema de transmisión que puede ser muy grave si es que no logramos resolverlo a la brevedad. Si dejamos que las condiciones como están hoy se desplieguen en la forma que lo han hecho, probablemente vamos a tener crisis desde el punto de vista del abastecimiento eléctrico en las zonas de mayor consumo, y eso es preocupante. Por lo tanto, todos debemos hacer un esfuerzo muy importante en mejorar nuestras condiciones de transmisión y para eso el rol del Estado es insustituible. Es imposible pensar que un privado vaya a conseguir las servidumbres, los permisos ambientales, el reconocimiento de la comunidad, etcétera, si no está de la mano del Estado para llevar adelante las grandes líneas de transmisión que el país requiere para el acceso de las fuentes de generación de energía hacia los centros de consumo.

En consecuencia, acá tenemos nuevamente el gran desafío de trabajar en conjunto entre el sector privado y el sector público, para desplegar libremente esas potencialidades (Figura 19).



Figura 19

En conectividad digital se están haciendo también esfuerzos muy importantes desde el punto de vista del despliegue de las nuevas tecnologías. Chile ya tiene una cantidad

importante de fibra óptica instalada que conecta o que va a conectar desde Arica hasta Tierra del Fuego, y que está en proceso de construcción.

Hemos avanzado mucho en el 5G. Podemos plantearnos el desafío de un 100% de cobertura en internet fijo, sin embargo, tenemos problemas de infraestructura para poder desplegarlo plenamente; necesitamos tener capacidad de transmisión, lo que implica antenas y sabemos lo difícil que es instalar las antenas si no hay un trabajo mancomunado, de nuevo, entre el sector público y el sector privado para poder identificar, instalar y operar las fuentes de transmisión que el despliegue del 5G requiere.

Estas no son situaciones que el mercado va a resolver por sí mismas; se requiere una política pública, un acoplamiento del sector público, de la comunidad y de las empresas privadas para llevarla a cabo. En consecuencia, creemos que acá hay un gran desafío si es que queremos avanzar en nuestra idea de que es posible llegar con una cobertura 100% internet a los hogares y centros de utilización (Figura 20).

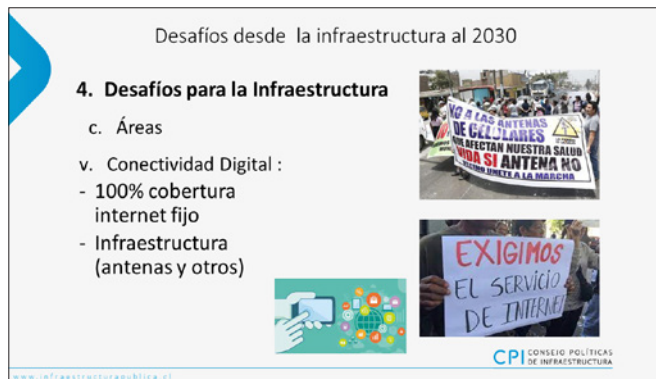


Figura 20

Todo esto tiene que estar en un contexto de sustentabilidad y con respeto al medio ambiente. Somos muy críticos respecto de cómo en Chile las empresas han ido vinculándose a este desafío y creemos que los avances de la Comisión Nacional Financiera –de comenzar progresivamente a imponer las normas 5G para el financiamiento de proyectos– es un requisito fundamental. Debemos avanzar más rápido en eso y Chile debe ser líder en este tipo de iniciativas, de tal manera de dar seguridades al mundo, pero también hacia adentro, a las empresas que están asumiendo responsablemente el compromiso con el medio ambiente y

con la sustentabilidad de la gobernanza de los proyectos en los que están a cargo. Vemos que eso es un requisito fundamental, desde el punto de vista de la relación entre políticas públicas de infraestructura con la forma por medio de la cual el sector privado se compromete con ellos.

Las políticas tienen que ser inclusivas, no es posible que la gente quede fuera de los beneficios de las políticas. Siempre se dice que en infraestructura hay sectores ganadores y sectores perdedores, no es posible seguir pensando que en Chile habrá zonas de sacrificio como las que hemos identificado en el último tiempo, y eso debe necesariamente quedar reflejado en las formas en que se toman las decisiones de inversión.

Pensamos que se debe modificar dramáticamente el sistema de evaluación social de proyectos; no es que estemos en contra del Sistema de Evaluación de Proyectos, sino que pensamos que hay que adecuarlo a las nuevas exigencias que el país tiene, de manera que la selectividad de proyectos –necesaria para asegurar una buena asignación de los recursos públicos– debe contemplar elementos adicionales a los contemplados actualmente, de manera que los recursos públicos destinados al desarrollo de proyectos de infraestructura se adecúen a las nuevas condiciones que tiene el país.

También debe asegurarse gobernanza. Lo que se escucha que ha pasado en distintas circunstancias respecto de grandes proyectos de infraestructura, es la falta de vinculación con las comunidades que se han visto interferidas por los proyectos. Debe haber un vínculo con la gestión; tiene que haber una adecuada participación. Las comunidades tienen que ser parte de los beneficios que esas grandes obras de infraestructura representan, tiene que haber una voluntad y cooperación entre ejecutores de los proyectos con las comunidades donde estos proyectos se insertan. Debe haber concordancia con las políticas públicas y las miradas a largo plazo que el Estado puede sustentar, para poder ir materializando las inversiones que el país requiere (Figura 21).

¿Y cuáles son las formas de financiamiento? Porque al final la pregunta es cómo financiamos todos estos grandes desafíos. El gasto público difícilmente podrá ampliar los recursos destinados a obras de infraestructura de estas características, es difícil que el presupuesto ministerial cambie la cantidad de recursos destinados a proyectos de carácter social.



Figura 21

Ojalá pudiéramos tener un presupuesto tendencial que se mantenga en el tiempo en torno al 2,2% o 2,3% del PIB, y por esa vía tener una base de sustentación que nos permita mirar el desarrollo del país a partir de ese esfuerzo.

Sin embargo, creemos que las empresas del Estado tienen margen para desarrollar su actividad, prueba de ello es lo que está haciendo EFE y lo que está haciendo Metro; lo mismo podría suceder con las empresas portuarias.

El Sistema de Concesiones –que ha sido tan criticado– tiene un rol muy importante que cumplir, con lo cual probablemente va a tener que adecuarse a las demandas ciudadanas actuales y, en consecuencia, probablemente los proyectos van a tener grados de exigencias mayores desde el punto de vista de la identificación y diseño de la construcción, y posterior operación y mantención. Pero sin lugar a duda es un área que tiene un potencial enorme.

Actualmente, el Ministerio de Obras Públicas ha declarado que para este año habrá batido récord en licitaciones de proyectos concesionables. Más de 5.500 millones de dólares se licitarán al cabo de este año, lo cual significa un aumento muy significativo de proyectos a materializar, y esperamos que esos proyectos puedan irse adecuando a las nuevas exigencias lo más rápido posible y poder constituir un soporte para el proceso de desarrollo que nos interesa sustentar.

Hay que hacer cambios; sobre todo si las tasas de retorno van a ser más apretadas de lo que se esperaba, también hay que considerar el aumento de los costos del financiamiento; por lo tanto, es posible que los contratos que antes eran a 25 años tendrán que extenderse, deberán darse las

condiciones para que esos contratos pueden rentabilizarse adecuadamente en el tiempo. Pero tiene que haber una relación mucho más integrada entre quienes promueven los proyectos por parte del Gobierno y el Estado, con quienes los ejecutan en el sector privado. Esa condición es fundamental para generar las relaciones institucionales de confianza para proyectar esta industria en el tiempo.

En el caso de Emporchi pasan cosas similares. Hemos tenido rezago en algunos proyectos importantes. Recién se han presentado ofertas para la extensión temporal del puerto de Valparaíso. Nos parece que acá tenemos un problema de cómo enfocar la política pública en nuestro desarrollo portuario y eso también debiera ser materia de una discusión, a efectos de poder contar con la infraestructura necesaria para mejorar nuestra competitividad a nivel de los mercados mundiales y estar en condiciones de enfrentar los desafíos que esto representa.

Y la Ley de Financiamiento Urbano Compartido (FUC), promulgada a principios de los 2000, es una ley totalmente subutilizada que debiera modificarse sustancialmente, para potenciar la posibilidad de que los privados participen en proyectos de interés en el desarrollo de nuestra infraestructura urbana. Pensamos que hay un campo enorme, pero se debe trabajar en la modificación de ese cuerpo legal para adecuarlo a las nuevas condiciones y hacerse viable para canalizar recursos privados al desarrollo de la infraestructura urbana de interés.

El sector privado tiene grandes desafíos en telecomunicaciones para desplegar plenamente el 5G. Se calcula que se requiere de grandes inversiones del orden de 20.000 millones de dólares por parte de privados en los próximos diez años. Esto debiera apoyarse en un sistema de cooperación con el sector público en que haya subsidios asociados, de tal manera de asegurar la llegada de internet a todas incluidas las zonas más abandonadas, y con una inversión fiscal de 6.000 millones de dólares más.

En el caso de la energía –ya lo dijimos– un gran esfuerzo en la transmisión debe seguir desplegándose en la búsqueda de energías alternativas; hay un campo grande de inversión que deberá desarrollarse en la medida que existan las condiciones que permitan ir resolviendo los problemas que actualmente existen, y avanzar lo más rápido posible en el proceso de descarbonización y en cumplir los compromisos ambientales que el país tiene.

En la parte sanitaria está la estimación de que, para resolver los problemas de abastecimiento de agua y seguridad hídrica, disminuir las pérdidas, mejorar las condiciones de potabilidad (en general son muy buenas), se debe hacer una inversión del orden de 10.000 millones dólares. Por lo tanto, también estamos en una en una situación de complejidad, sin embargo, da la impresión de que es posible desplegar esas inversiones para lograr los resultados a los cuales aspiramos (Figura 22).



Figura 22

Es necesario prospectar nuevas formas de financiamiento. En otros países de la región y en otras partes del mundo se está pensando en cosas nuevas para incorporar al desarrollo de la infraestructura. En el caso de Perú, se están sustituyendo impuestos por inversión en infraestructura, una alternativa que acá no se ha pensado y probablemente sea desechada, pero creo que habría que mirarla con interés, puesto que es una forma en la cual probablemente ciertas actividades podrían potenciarse, por la vía de sustituir el pago de impuestos por desarrollo de infraestructura que sea compatible, no solo con el desarrollo de esa actividad, sino también por el desarrollo de su entorno.

En Reino Unido se está proyectando la incorporación del sector privado como oferente de disponibilidades en distintos ámbitos de la infraestructura. Por ejemplo, en el caso de los hospitales, en vez de facilitar una infraestructura hospitalaria, el sector privado se compromete en facilitar un cierto número de camas, o un cierto número salas de operación, o un cierto número de salas de recuperación. Por tanto, cambiar la lógica de proveer infraestructura. Entregar disponibilidad de servicios, puede ser un elemento interesante de tener en cuenta para desarrollar

potencialidades de incorporación del sector privado a la dotación de los servicios. Esto es parte de las cosas que es necesario tener presente.

La Ley de Aportes No Reembolsables en Chile es sin duda interesante, pero hay que mirarla de manera de que efectivamente pueda tener impacto en el desarrollo de las ciudades en forma integrada y no aparecer como transferencia de recursos, no siempre como parte de un plan.

Los distintos mecanismos de securitización de ingresos –que podrían utilizarse en sectores que ya cuentan con reconocimiento de que para acceder a su servicio hay un pago de tarifa– perfectamente podrían ser parte de un desarrollo conceptual que permita generar instrumentos financieros para incorporar privados al desarrollo de ciertas actividades específicas. Por ejemplo, en ferrocarriles, donde es posible pensar en el desarrollo modo ferroviario a través de un tema de inversión privada, asegurado a través de mecanismos de securitización (Figura 23).



Figura 23

Esto es lo que quería compartir con ustedes hoy, como una primera aproximación, para invitarlos a una conversación y a intercambiar puntos de vista e ir enriqueciendo criterios de reflexión que hay detrás de cada una de estas alternativas.

Muchas gracias.

*Al término de su Conferencia, el Sr. Carlos Cruz respondió consultas y comentarios de los asistentes. A continuación, reproducimos lo más relevante de estas intervenciones.*



**Sr. Ricardo Nicolau del Roure.**

—Muchas gracias, Carlos, por esta presentación con una visión amplia, realista de lo que requiere el país.

Las formas de financiamiento no se ven tan claras como hace unos años, se han ido complicando y hay que buscar entonces fórmulas imaginativas como lo han hecho otros países, hay que copiar, que es una herramienta indispensable para progresar. Y mirar lo que Australia, lo que hace Nueva Zelanda con respecto a esto, y lo que están haciendo algunos países desarrollados, también tienen carencias de recursos para afrontar el desarrollo. Gracias por la presentación y ahora abrimos a las consultas de quienes participan en este evento.

Muchas gracias otra vez.

**Sr. Elías Arze.**

—Respecto a las APR, veo problemas de gestión y arbitrariedad en derechos de acceder, ¿se ha pensado algo al respecto?

**Sr. Carlos Cruz.**

—Entiendo que hay una ley recientemente aprobada que transfiere al Ministerio Obras Públicas la responsabilidad del desarrollo de los programas de agua potable rural y, por tanto, el soporte de la tecnificación, identificación, fuentes de agua, etcétera, estimo que habría que hacer algún tipo de acuerdo con el Ministerio de Obras Públicas, con la Dirección de Hidráulica, de manera que las Compañías de servicios sanitarios se pongan a disposición de este esfuerzo.

Creo que de otra manera sería muy difícil poder contar con la tecnología, con los soportes, con el conocimiento y con la forma de abordar las soluciones que se requiere. Ha quedado demostrado en situaciones críticas que ha sido necesario recurrir a las compañías para desarrollar fuentes de agua en las zonas de agua potable rural. En ese sentido, creo que el trabajo conjunto entre las dos áreas debiera ser mucho más intenso.

No tengo noción de las arbitrariedades que se puedan haber cometido, espero que eso se regule a través de los mecanismos normativos existentes, pero creo que ahí sí hay un esfuerzo de invitación a una participación mucho

más colegiada, entre el sector público y el sector privado, para ir abordando los problemas de déficit de agua que todavía existen en las en las distintas comunidades.

**Sr. Javier Romero.**

—¿Tiene usted ejemplos de cómo incrementar el rol del Estado en la transmisión de energía eléctrica?

**Sr. Carlos Cruz.**

—Ejemplos no, pero sí tengo identificadas claramente las necesidades. Pienso que si uno mira los esfuerzos que se han hecho por construir las líneas de transmisión —las dos últimas líneas de transmisión que han dado motivo a una cantidad enorme de conflictos entre el Estado demandante y la empresa privada ejecutora— da la impresión de que ahí hay algo que no está funcionando. No lo está porque no existe claridad respecto de cuál es el rol de uno y otro. Como país no tenemos tiempo para buscar las formas de entendimiento entre las partes de acuerdo al cuadro normativo que realmente existe, y es en este sentido que mi propuesta es de nuevo un acercamiento; una búsqueda de entendimiento entre las empresas que ejecutan y prueban los servicios con el Estado, que es el que diseña las políticas públicas para resolver problemas tan simples como identificar las líneas principales, identificar los desplazamientos que esas líneas principales deben tener, conseguir las servidumbres necesarias para que eso pueda desarrollarse, conseguir los permisos de impacto ambiental y conseguir la anuencia de las comunidades que van a verse afectadas, producto de la instalación de esas líneas de transmisión.

**Sra. Cristina Pardo.**

—Excelente presentación del panorama y desafío chileno, ¿Cuál sería el rol de la Comisión que propone reforzar institucionalmente el Estado en materia de infraestructura?

**Sr. Carlos Cruz.**

—Tengo la impresión de que tiene tres funciones principales, una es mirar el país de largo plazo, o sea, hacer un trabajo prospectivo, cuál es el espacio que Chile como país

va a ocupar en los próximos 10, 20 o 30 años. A fines de los ochenta se discutieron las características de Chile como país a futuro, que requería abrirse al mundo aceleradamente para poder generar condiciones que permitieran construir por la vía de la apertura su desarrollo económico.

En ese momento surgió la idea de hacer un esfuerzo por avanzar hacia una segunda fase de desarrollo exportador, que tenía por propósito los productos naturales que Chile exportaba e incorporarles valor agregado, de manera de ir sembrando en el resto de las actividades económicas los beneficios que podían tener ciertas ventajas competitivas naturales para participar en el mundo. Eso se ha ido resolviendo, todavía queda mucho que hacer.

Ese tipo de reflexión que se hizo fue parte de un gran consenso nacional y originó una cantidad importante de políticas públicas de apertura, de infraestructura, etcétera. Hoy estamos todavía pensando con la vieja lógica de fines de los ochenta, y hoy amerita una discusión de futuro respecto a cuál es el espacio que Chile puede ocupar en el mundo para proyectarse en su desarrollo. Por lo tanto, el primer rol es el trabajo prospectivo.

Un segundo rol es traducir ese trabajo prospectivo en políticas de infraestructura con mirada de largo plazo. ¿Cuáles son las actividades que a esa visión prospectiva le va a dar soporte a la infraestructura que nos imaginamos es necesario desarrollar? Esto ya lo mencioné, no lo estamos inventando nosotros, esto lo hacen los australianos, los neozelandeses, lo han hecho los ingleses, lo han hecho distintos países del mundo, ese trabajo de priorizar cuáles son los esfuerzos estructurales que hay que hacer en función del espacio que el país debe ocupar en el mundo del futuro es un trabajo que una institución de esta naturaleza debe hacer.

Y un tercer rol, es asegurar de que estás políticas de infraestructuras o la identificación de los proyectos que le den sustento jurídico de infraestructura, pueda ser abordada coherentemente por las distintas instituciones del Estado.

Por eso puse el tema del ferrocarril porque involucra al Ministerio de Transporte, que supuestamente piensa, las políticas de infraestructura, de transporte en el largo plazo y el desarrollo de los servicios. Una empresa del Estado que tiene por propósito funcionar con la lógica de una empresa del Estado, a la cual se le exigen ciertas condiciones de rentabilidad y de venta, que son fundamentales

cautelar, pero que obedecen a una lógica de empresa, no a una lógica de política pública. Y un Ministerio de Obras Públicas que tiene, a su vez, la función de desarrollo de la infraestructura de transporte en otros dominios, como es el caso de la infraestructura vial y la infraestructura aeroportuaria.

La necesidad de que estas tres entidades conversen se ha planteado –probablemente haya esfuerzos importantes que hacer de parte de los Ministros para ponerse de acuerdo– pero las dinámicas que tiene cada institución son de tal vértigo que es imposible asegurar que esas conversaciones se suspendan en el tiempo y, por lo tanto, tienen que haber ciertos mandatos a los Ministerios desde una instancia política superior, que obligue a que esas coordinaciones sean obligatorias. Esta es la tercera función que, a mi juicio, esa entidad debiera tener para optimizar el esfuerzo del país en inversión en infraestructura.

### **Sr. Felipe Andrés Quintanilla.**

*—Sigo viendo con preocupación la crisis hídrica. Según su experiencia, ¿cómo podemos acelerar la implementación de plantas desalinizadoras en diversas ciudades?*

### **Sr. Carlos Cruz.**

—Desde el punto de vista del abastecimiento de las grandes ciudades, me incomoda cuando las empresas sanitarias a cargo de resolver el problema de abastecimiento hídrico de las ciudades anuncian su preocupación por el abastecimiento hídrico de 12 meses adelante. Creo que esas empresas deberían estar haciendo propuestas concretas para resolver el problema, y no solo anunciarlo. Mi impresión es que el proceso de desalinización para el abastecimiento de las ciudades debe ser internalizado por las empresas sanitarias como parte de su desarrollo, para efectos de asegurar el abastecimiento hídrico de las principales ciudades de este país. Cosa distinta es el abastecimiento en las zonas productivas, agrícolas, esencialmente, y ahí yo creo que hay que tener más cautela, porque es cierto que todavía la desalinización es cara para el desarrollo de algunos productos.

Sin embargo, la pregunta es: ¿dadas las disponibilidades hídricas que tenemos, Chile va a seguir contando con una agricultura para asegurar su subsistencia alimentaria? o

esos recursos hídricos van a ser utilizados preferentemente por las empresas agroindustriales que exportan buena parte de su producción. Es una conversación compleja. Yo soy partidario de que exista una política de instalación de plantas desaladoras multipropósito, que abastezcan a las ciudades en primer lugar, a la agricultura de subsistencia en segundo lugar con subsidios y, en tercer lugar, a la agricultura agroexportadora la cual deberá pagar por la generación de los recursos hídricos que se le pongan a disposición.

Creo que eso es parte de un diseño de política de Estado, la cual debiéramos estar discutiendo en este momento con urgencia, para abordar la crisis hídrica que se nos viene encima.

### **Sr. Raúl Oberreuter.**

—*Chile comenzó a tener alguna estructura e infraestructura viejas o que llegaron a su vida útil de diseño, ejemplo típico son algunos puertos o carreteras. Muchos de los temas expuestos se orientan a obras nuevas; sin embargo, es urgente el desarrollo para el reforzamiento y la transformación de obras que ya tienen su vida útil de diseño. ¿Cuál es su postura respecto a esta variable?*

### **Sr. Carlos Cruz.**

—Estoy totalmente de acuerdo, creo que en ese sentido lo que ha estado haciendo el Ministerio de Obras Públicas de llamar a nuevos proyectos concesionales para las principales obras viales del país, en la Ruta 5 y algunas vías de acceso a los puertos es correcta en el sentido de reponer, a la mayor brevedad posible, esas obras que han ido quedando obsoletas. Creo que se han hecho algunas cosas interesantes, pero nos hemos quedado atrás, ya lo comentábamos, en Valparaíso ha habido problemas de diseño y de forma, y también de venta del proyecto a nivel de la ciudad, lo que ha ido rezagando la ampliación del puerto de Valparaíso y que es necesario reponer si la ciudad pretende mantener su vocación portuaria. Hay avances en el puerto San Antonio, todavía no se notan mayormente ya que el puerto a gran escala todavía está en fase de evaluación, pero se han ido modernizando los distintos sitios de atraque, ya hay buenas condiciones técnicas en ese puerto. Ha habido inversiones –o están en curso– en el puerto de Coquimbo. Hay una importante inversión en

el puerto de Antofagasta, de Arica, de Iquique, por tanto, diría que la mayoría de los puertos sujetos a la llamada Ley Emporchi, de 1997, han ido haciendo inversiones en conjunto entre las empresas portuarias que operan como agentes concedentes con inversionistas privados, que son los que desarrollan la actividad al interior de puerto.

Creo que la insuficiencia en el caso portuario tiene que ver más con el acceso a los puertos, y con todo lo que es la convivencia puerto-ciudad, que implica restricciones importantes para asegurar la cadena logística, que con el desarrollo mismo de los puertos. Mi impresión es que debiéramos hacer ahí un esfuerzo mayor por ver cómo se facilita la entrada y salida de carga de los distintos puertos y luego pensar si es que los puertos requieren modernizarse. Mi impresión es que los puertos están teniendo una dinámica de modernización razonablemente buena, lo que falta es el mejoramiento del acompañamiento a la inversión, a efectos de facilitar la logística portuaria que hoy si puede tener problemas como consecuencia de la falta de acceso ferroviario, falta de acceso carretero, conflictos al interior de las ciudades, del alto tránsito de camiones que implica la actividad portuaria; creo que ahí tenemos un nudo que es necesario abordar más que el puerto en sí mismo.

### **Sr. José Luis Galassi.**

—*¿Quién lidera estos cambios? Si seguimos actuando y funcionando como lo estamos haciendo, difícilto que se pueda seguir avanzando en el desarrollo sustentable de la infraestructura.*

### **Sr. Carlos Cruz.**

—Una muy buena pregunta la que hace José Luis, nosotros como Consejo de Políticas de Infraestructura justamente hemos querido promover liderazgo de este tipo de iniciativas a partir del Estado. Es muy difícil pensar que una entidad privada pueda liderar este tipo de discusiones, esto tiene que ser asumido por parte de algún organismo del Estado, particularmente el Gobierno, a efecto de producir todos los cambios que se requiere. Debo reconocer que en esto no nos ha ido bien, no hemos logrado concretar ese reconocimiento a la necesidad de que desde el Estado se lideren estos cambios. Esperamos que con la próxima administración podamos tener la posibilidad de

conversar con quien sea la autoridad y seducirlos para que puedan asumir ese rol y nosotros ayudarles en lo que sea necesario. Pero, claramente, esto tiene que ser asumido desde el Estado.

### **Sr. Fernando Agüero.**

—Señalaste que la inversión en Chile en infraestructura alcanza el 4,4% del PIB, incluido el sector público, concesiones de inversión privada, en sanitaria, técnico de electricidad, y debiésemos aspirar a un 6% del PIB. ¿En qué plazo deberíamos razonablemente alcanzar el 6%? ¿el actual 4% cuánto era hace 3-10 años y en promedio de los pasados 30 años?

### **Sr. Carlos Cruz.**

—Respecto a alcanzar el 6% es urgente. Aquí se requiere hacer un esfuerzo mayor por poner en marcha, yo diría que esencialmente el sector privado, porque veo difícil que el sector público pueda expandir su inversión en infraestructura. En el caso de las concesiones, si uno mira lo que se ha licitado en el último año, son 5.000 y tantos millones de dólares. Digamos que eso se distribuye los próximos tres o cuatro años, va a haber un salto importante, por lo tanto, ahí vamos a estar contribuyendo desde el sector público por medio de la Ley de Concesiones en forma significativa. Esto nos da margen para pensar que de aquí a tres años más debiéramos tener desplegadas las inversiones necesarias del sector privado, particularmente en el sector de las telecomunicaciones y agua potable. En el sector energético es una urgencia, pero no sé cuánto nos iremos demorar en lograr que eso sea posible, por lo tanto, tengo la confianza de que somos capaces de dar un salto, fundamentalmente digo del esfuerzo que ha hecho el Gobierno en acelerar el proceso de licitación de obras concesionadas. Vamos a ser capaces de llevar adelante un aumento importante de inversión pública en infraestructura.

Creo que en esto también cumplen un rol muy importante las empresas, lo que está haciendo el Metro, lo que está haciendo Ferrocarriles, es significativo y lo que pueda hacer el puerto de San Antonio próximamente, si destraban todas las necesidades de inversión que requiere el puerto a gran escala.

### **Sr. Rolando Tolosa.**

—¿Cuál es su visión para la conectividad desde Puerto Montt al sur, en un área que cada día toma más relevancia, el medio físico natural?

### **Sr. Carlos Cruz.**

—Quiero entender que es conectividad física. Pienso que esa es una de las zonas de mayor despliegue y de mayor potencial turístico que tiene Chile y cuando uno dice esto resulta amenazante, porque no falta quién dice: “bueno, pero el despliegue turístico va a significar el deterioro de las condiciones naturales que tiene esta maravillosa zona de Chile”. Es que hay que hacerlo de manera que eso no suceda. Creo que hemos aprendido que no necesariamente el desarrollo de las actividades productivas, las actividades de servicio tienen que ir asociadas con la generación de zonas de sacrificios. Tenemos que tomar las precauciones necesarias para que eso no suceda y administrar de tal manera de que podamos desplegar el potencial riquísimo que tiene esa zona del país para efectos de poder darla a conocer. Creo que, en ese sentido, la infraestructura cumple una función muy importante en la medida que se identifique debidamente lo que hay que hacer. Por eso es que partimos en esta nueva visión de la infraestructura, definiendo la identificación de la solución como elemento principal, el diseño es muy importante, pero no cabe en esa zona diseñar una carretera de 120 km/h, creo que tenemos que mirarlo desde la perspectiva de lo que lo que queremos alcanzar y en ese sentido el diseño es muy relevante. Y, posteriormente, todo lo que tiene que ver con la construcción, y en ese sentido lo que se ha dicho ahora de la economía circular pasa a ser fundamental: de qué manera podemos reciclar, minimizar el costo, minimizar el impacto residual, etcétera. Ahora, la mantención y operación es un requisito *sine qua non* perfecto de poder asegurar las buenas prestaciones sin poner en riesgo lo que se quiere potenciar, que es justamente la riqueza que tiene esa zona desde el punto vista paisajístico. Eso es lo que se me ocurre como algo relevante a desarrollar en estos momentos.

### **Sr. Dante Bacigalupo.**

—¿Interconexión con Argentina?

**Sr. Carlos Cruz.**

—Esa es una larga discusión. Tengo la impresión de que, si hay un elemento de desarrollo potencial de Chile, ese es constituirse en una plataforma de servicios importante para una economía más grande y con más potencial que la nuestra: la Argentina. Independientemente de las concesiones institucionales que uno puede hacer y las consideraciones políticas que uno pueda tener. Pero claramente, la economía argentina es una mucho más potente, tiene más habitantes, tiene más territorio, tiene más riquezas naturales, tiene más extensión, y creo que en ese sentido debemos tener un rol muy activo en la búsqueda de conectividad física permanente con Argentina; creo que los esfuerzos que se han hecho, fallidos la mayor parte de ellos, son realmente un elemento de frustración importante que hay que ver cómo revertir.

Pienso que hay que dar por lo menos dos o tres pasos que aseguren la conectividad permanente con Argentina a la mayor brevedad, de aquí a 10 años; debemos ser mucho más activos en la conexión física con Argentina que asegurar el intercambio comercial y el intercambio de personas con ese país, de manera de ser parte del potencial que Argentina tiene en su desarrollo económico.

**Sr. Ricardo Nicolau del Roure.**

—*Ahí está el tema del túnel Las Leñas que sigue hace 20 años pendiente.*

**Sr. Carlos Cruz.**

—Salió recién ahora otra iniciativa en la Región de O’Higgins. Hay varias iniciativas, pero lo relevante es concentrarse en una, dos o tres para concretarlas y generar las condiciones para que suceda y se potencie debidamente.

**Sr. Juan Carlos Latorre.**

—*Creo que el Instituto de Ingenieros, el CPI y el Colegio de Ingenieros debiesen convocar a las candidaturas presidenciales a tomar compromisos en torno a estas propuestas, es urgente insistir en esto.*

**Sr. Carlos Cruz.**

—Cada vez que hemos hecho el esfuerzo nos ha ido mal. Tengo la impresión de que se deba a que existe gran consenso y escaso esfuerzo por diferenciarse entre las candidaturas. O bien porque no se comprende debidamente el impacto, la importancia que tiene la infraestructura es que no hemos tenido la acogida, nosotros nos sumamos a cualquier iniciativa que provenga del Instituto o del Colegio de Ingenieros, para participar en una conversación con los candidatos o con sus equipos técnicos sobre esto, porque nos parece de principal importancia. Pero nosotros como Consejo —debo reconocerlo— no hemos tenido éxito en convocarlos a una conversación de esa naturaleza.

**Sra. Jocelyn Price.**

—*En el ámbito de las concesiones en salud, ¿Cuáles son los desafíos que se debieran incorporar?*

**Sr. Carlos Cruz.**

—Es muy interesante, porque acá hemos tenido distintas formas de mirar la infraestructura de salud. Hay una reacción bien compleja de parte de los gremios vinculados a la salud respecto de la concesión de hospitales. Creo que tiene mucho que ver con la forma en que está diseñado el contrato, que no dilucida debidamente dónde está radicada la responsabilidad final de la administración del establecimiento hospitalario.

En esto hay que avanzar rápido, hay que resolver el problema, creo que la obligación del mundo concesional es poner a disposición del mundo de la salud la infraestructura necesaria para que el mundo la salud pueda cumplir debidamente con sus objetivos.

¿Cuáles son los límites de eso? Habrá que conversarlo caso a caso, o probablemente conversarlo con el gremio de la salud, pero claramente hay que resolver los problemas que han existido para efectos de una buena dotación de infraestructura, para un buen despliegue de los servicios de salud. Esto debemos resolverlo y creemos que están las condiciones para hacerlo. Veo una buena disposición por parte del sector privado para replegarse en algunos servicios que hoy día resultan útiles para el mundo la salud, y creo

que debiera haber una buena disposición del mundo de la salud de contar con buena infraestructura para poder llevar adelante un servicio. Se debe buscar entendimiento para que en Chile podamos contar con los establecimientos hospitalarios que necesarios para resolver los problemas de salud que el país todavía tiene.

### **Sr. Ricardo Nicolau del Roure.**

*—Y en ese sentido no hay un benchmarking que uno puede hacer con países como Reino Unido o Canadá.*

### **Sr. Carlos Cruz.**

—Hay distintas experiencias, vamos a concesionar con bata blanca, con línea amarilla, hay distintas experiencias, algunas son exitosas otras lo son menos. Acá tenemos que buscar una solución propia. Hay buena disposición del sector privado en invertir en infraestructura y en mantenerla; debiera haber habido una buena disposición del sector privado también para prestar servicios dentro del establecimiento. A lo mejor está generando ciertas incomodidades en los directores hospitalarios, hay que resolverlo, pero claramente tenemos recursos para desarrollar estructuras hospitalarias y hay necesidades del mundo de la salud para resolver los problemas de infraestructura, por lo tanto, creo que tenemos que ver una forma propia de resolver esto y tal vez pueda ser región a región. Ni siquiera tiene que ser una política nacional, puede haber soluciones de conjunto con los gobiernos regionales para poder ir resolviendo los problemas de acuerdo con las características propias de cada región. Estoy seguro de que existe la flexibilidad suficiente para ir avanzando en esa dirección, pero claramente acá hay que juntar el hambre con las ganas de comer, para poder avanzar debidamente en este tipo de situaciones.

### **Sra. Jocelyn Price.**

*—En términos de la resiliencia y su relación con la gestión de riesgo de desastres, ¿cuáles son los puntos de mayor impacto para la nueva infraestructura?*

### **Sr. Carlos Cruz.**

—Es una pregunta bien técnica, varios de los presentes saben más que yo de eso. Pero, creo que los temas de resiliencia han sido debidamente discutidos y aclarados por las instancias técnicas correspondientes. Mi única observación: la resiliencia no es solo hacer mejor y más resiliente obra a obra, la resiliencia tiene que ver también con las complementariedades, creo que ahí estamos en un déficit, y ahí los mecanismos de participación social en proyectos tienen que adecuarse. Contar con una red vial, resilientes, desdoblar la red vial, los mecanismos de evaluación social de proyectos no permiten calificar eso. Entonces tenemos un problema de cómo se asignan los recursos, y cuando digo que es necesario revisar los criterios de evaluación social estoy apuntando también en esa dirección.

El ferrocarril es complementario en la red la red vial, no tiene por qué ser competitivo con la red vial, entonces si queremos asignarle al ferrocarril un valor, una rentabilidad social, solamente a partir del ahorro de tiempo de las personas que usan el ferrocarril, creo que tenemos un problema, un problema de conceptualización de los mecanismos de asignación de recursos, no solo basta con hacer bien lo que hay que hacer en términos de resiliencia y dar los soportes necesarios para que los distintos proyectos tengan la capacidad de resistir. Pero que también tengan la capacidad de recuperarse lo antes posible y también creo que las complementariedades son importantes para ir creando redes resilientes en toda su expresión.

Eso es algo que no está presente y creo que deberíamos incorporarlo en la discusión.

### **Sr. Elías Arze.**

*—¿Puedes comentar sobre oportunidades de mejora mediante la gestión de obras de infraestructura existente?*

### **Sr. Carlos Cruz.**

—También es una difícil pregunta porque no estoy metido directamente en la gestión de los proyectos, pero ahí hay mecanismos de tecnificación que yo creo que hay que

ir incorporando como parte de las exigencias, pues eso entrega elementos de gestión que hacen que se permita una conversación más fluida entre el diseño y la ejecución de las obras. Creo necesario avanzar también en las fórmulas contractuales, de apoyo a las distintas entidades fiscalizadoras por parte de los mandantes públicos, todo lo que tiene que ver con la empresa de asesoría fiscal adquiere un rol relevante. Entonces calidad de proyecto, los mecanismos de hacer conversar debidamente a los proyectistas con los ejecutores de las obras, todo lo que tiene que ver con la fiscalización y el seguimiento son los elementos que a mí me parecen más relevantes en este momento, a los cuales yo he tenido acceso a ser parte de la discusión, pero no tengo más antecedentes respecto de cómo mejorar en ese sentido.

#### **Sr. Rogelio Torres.**

—Soy de México y estudio un Doctorado en la Universidad de Chile, quiero hacer un comentario. En 1994, el Gobierno mexicano decidió privatizar los ferrocarriles y prácticamente desaparecieron. Se utilizaron para la especulación financiera y no para el desarrollo del país. Y aquí tenemos un aprendizaje con respecto a las privatizaciones, quería comentarles esto.

#### **Sr. Carlos Cruz.**

—Estoy de acuerdo con eso, que no se debe que confundir concesión con privatización. Creo que parte importante de la discusión que había en torno al tema de las concesiones tiene que ver con que sea asimilada la diferencia entre la

concesión y la privatización. En el caso de la concesión las obras y los proyectos siguen siendo del Estado, se les transfiere, se le concede al privado la posibilidad de desarrollarlos y operarlos, pero no es una privatización y por lo tanto el Estado no pierde la propiedad sobre ese proyecto, no pierde la autoridad sobre quién lo ejecuta, no pierde el compromiso con la comunidad de asegurar un buen servicio y, en consecuencia, es parte de la responsabilidad irrenunciable del Estado. Eso significa reconocer que las obras siguen siendo del Estado y no son privadas. Tiene razón, espero que en Chile esa confusión podamos aclararla, porque se ha prestado para muchos malentendidos.

#### **Sr. Ricardo Nicolau del Roure.**

—Bueno, muy buena pregunta para tu aclaración. Me parece muy importante, a veces hay una mala concepción de lo que significan las Concesiones de Obras Públicas que han sido muy virtuosas en el mundo entero, no solo en Chile.

Usted estuvo contestando preguntas casi 40 minutos, ya casi lo mismo que estuvo exponiendo. Ha resultado muy motivante y muy buenas las preguntas, muy buenas las respuestas que complementaron una excelente presentación con una visión amplia y a futuro. Así que don Carlos Cruz Lorenzen, nuestro agradecimiento nuevamente por tu muy buena presentación y, además tu siempre buena voluntad para compartir experiencias y conocimientos con el Instituto de Ingenieros.

Muchas gracias.

**Fin de la Conferencia.**

# FORO: “LA MINERÍA FRENTE AL PROCESO CONSTITUCIONAL, SUS APORTES Y DESAFÍOS”

Organizado por el Instituto de Ingenieros de Chile,  
Colegio de Ingenieros de Chile A.G. y el Instituto de Ingenieros de Minas de Chile.



Sr. Elías Arze.



Sr. Jorge Pedrals.



Sr. Gustavo Lagos.



Sr. Willy Kracht.



Sr. Sergio Bitar.

*El día martes 14 de diciembre de 2021 a las 11:00 horas, vía zoom, se dio inicio ante una gran cantidad de asistentes al Foro: “La Minería frente al Progreso Constitucional, sus Aportes y Desafíos”, evento organizado por el Instituto de Ingenieros de Chile, el Colegio de Ingenieros de Chile A.G. y por el Instituto de Ingenieros de Minas de Chile.*

*Contó con la participación de don Elías Arze, como Consejero Nacional del Colegio de Ingenieros, don Jorge Pedrals, como Presidente de la Comisión de Política Minera del Instituto de Ingenieros de Minas, y con los panelistas Sres. Gustavo Lagos, Willy Kracht y Sergio Bitar.*

*Gustavo Lagos, Magister en Ingeniería de Minas e Ingeniería Minera de la Universidad de Chile. Doctorado (Ph.D) en Electroquímica, Universidad de Leeds, Inglaterra. Fue Director Ejecutivo del Centro de Estudios del Cobre y la Minería, CESCO. Ha sido Director del Centro de Minería de la PUC. Fue Director del Centro de Investigación Minero Metalúrgico, CIMM. Actualmente, Profesor Titular Honorario del Departamento de Ingeniería de Minería. Consejero de la Escuela de Ingeniería de la PUC.*

*Willy Kracht es Ingeniero Civil Químico y Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Metalurgia Extractiva, de la Universidad de Chile. PhD en Ingeniería de Minas y Materiales en la Universidad McGill de Canadá. Ha sido Director del Centro de Estudios del Cobre (CESCO). Actualmente, Director del Departamento de Ingeniería de Minas e Investigador Principal del Centro de Tecnología Avanzada para la Minería, AMTC, de la Universidad de Chile.*

*Sergio Bitar Chacra es Ingeniero Civil de la Universidad de Chile, tiene un postgrado en el Centre d'Etudes de Programmes Economiques en Francia y en la Universidad de Harvard, EEUU. Fue Profesor de Economía, Director del Departamento de Industrias de la FCFM de la Universidad de Chile. Ha sido Visiting Fellow del Harvard Institute for International Development, Visiting Fellow de la Smithsonian Institution, Latin American Program. El Sr. Bitar ha sido Ministro de Minería del Gobierno del Presidente Allende, de Educación con el Presidente Lagos y de Obras Públicas con la Presidenta Bachelet. Además, fue Senador de la República y ha sido Presidente del Partido por la Democracia en tres ocasiones. Ha sido miembro de los Consejos Directivos de las Universidades de Chile, Católica de Temuco, Mayor y de Santiago.*

*A continuación, se reproducen las intervenciones de cada uno de los participantes.*



## El Presidente.

—Estimados socios del Instituto de Ingenieros de Chile, socios del Colegio de Ingenieros de Chile y socios del Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, las tres instituciones que están organizando este foro; amigos que nos acompañan, señoras y señores, muy buenos días y muchas gracias por su asistencia a este foro, “La Minería frente al proceso Constitucional, sus aportes y sus desafíos”.

Como ustedes bien saben, la minería es la principal actividad económica del país y ha colaborado sustantivamente en su desarrollo y en las mejoras en la calidad de vida de sus habitantes. Bajo esta realidad, el Colegio de Ingenieros consideró un deber hacer una contribución al entendimiento y el tratamiento de la actividad minera en una nueva constitución y, para estos efectos, nombró una Comisión que estudió el tema y elaboró un documento titulado “Los Recursos Mineros y La Constitución”, documento que ya ha sido publicado y distribuido y es la base de lo que vamos a conversar hoy día.

En este Foro se presentan las conclusiones en este Estudio y también sus fundamentos para luego tener una conversación con tres profesionales destacados en el ámbito de la minería.

En el Programa tenemos, en primer lugar, a don Elías Arze Cyr, que es Consejero Nacional del Colegio de Ingenieros y también Director del Instituto Ingenieros, quién hará una introducción en la que presentará las conclusiones del trabajo desarrollado por el Colegio de Ingenieros; a continuación don Jorge Pedrals, destacado ingeniero en minas, Director del Instituto de Ingenieros de Minas y también Director del Instituto de Ingenieros, hará una presentación respecto a los aportes y los desafíos de la minería en Chile, donde resumirá no solo los temas que aborda el Informe del Colegio, sino que también aportará fundamentos adicionales que enriquecen la discusión.

A continuación, vamos a invitar a tres panelistas para que conversen sobre estos temas entregando su visión y sus enfoques particulares.

En primer lugar, don Gustavo Lagos, profesor de la Pontificia Universidad Católica de Chile y especialista en minería, luego don Willy Kracht, Director del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile, darán su visión al respecto, y para resumir y sintetizar le hemos

pedido a don Sergio Bitar que es miembro del Consejo Consultivo del Instituto de Ingenieros de Chile, y ha sido Ministro de Minería que haga una síntesis de lo esencial.

Finalmente, si el tiempo lo permite, tendremos una sesión de preguntas y respuestas para lo cual los asistentes pueden hacer sus preguntas vía Q&A.

## Sr. Elías Arze Cyr.

—Me corresponde presentar las conclusiones de la propuesta del Colegio de Ingenieros para la nueva Constitución en lo que se refiere a recursos mineros.

Se trata del primero de cuatro trabajos del Colegio sobre recursos mineros, medio ambiente, recursos hídricos y desarrollo sostenible, abordados por una Comisión presidida por el Vicepresidente del Colegio, Fernando Echeverría, e integrada por su Presidente Raúl Alcaíno, el abogado Carlos Lledó, Luis Valenzuela, María Luisa de la Maza, Juan Carlos Latorre, Sergio Bitar y el que habla. Además, en el trabajo de RRMM tuvimos la importante colaboración de Jorge Pedrals. Fue sometido a la consideración de dos personas de Centros de Estudio, Leonidas Montes del CEP y Patricio Meller de CIEPLAN, y fue aprobado con el Consejo Nacional del Colegio.

Como pueden apreciar, tanto en la elaboración como en las revisiones ha habido bastante transversalidad desde el punto de vista de las sensibilidades políticas. El Informe tiene tres Capítulos, el primero referido al contexto constitucional y legal de la minería en Chile y en otros países mineros, el segundo sobre el impacto y los desafíos de la minería y un tercero de conclusiones. El Informe aborda tanto los conceptos constitucionales como aspectos que debieran ser abordados mediante leyes o políticas públicas.

En primer lugar, hemos considerado que es importante que la nueva Constitución tenga disposiciones relativas a la minería, como existe en Chile desde la Reforma de 1971, cuando se nacionalizó el cobre. Con anterioridad, lo referente a minería estaba sólo en las leyes, desde que se creó el Código de Minería en 1874.

El texto constitucional actual tiene una importante continuidad jurídica respecto a la reforma de 1971, en que el Estado es dueño absoluto de todas las minas y otros tipos de minerales. La Constitución de 1980 es también

consistente con el Código de Minería que distingue entre el régimen de propiedad del subsuelo respecto de los terrenos superficiales, así como en el rol de los Tribunales de Justicia en el otorgamiento y extinción de las concesiones, entre otros aspectos. El Proyecto de Reforma Constitucional de la ex Presidenta Michelle Bachelet a fines de su segundo mandato no incorporó cambios relativos a la minería.

Por otra parte, la organización del actual régimen minero en Chile es consistente con la estructura legal que rige la actividad en países mineros como Canadá, Australia, Sudáfrica y Perú.

Por último, hay que reconocer que la estructura constitucional que tenemos ha permitido el desarrollo de la minería, al establecer un régimen claro, transparente y estable para la ejecución de las inversiones y no se constata en las principales discusiones públicas y académicas que exista una notoria controversia sobre su texto o sus elementos centrales.

Basado en lo anterior, las principales conclusiones del estudio son:

- i. La Constitución debe establecer ciertos elementos esenciales que representan las bases para el adecuado funcionamiento de la actividad: (a) la propiedad absoluta, exclusiva, inalienable e imprescriptible de los minerales por parte del Estado según se ha establecido en nuestra Constitución desde la nacionalización del cobre en 1971; (b) la distinción entre la propiedad de los terrenos superficiales y aquella que tiene el Estado respecto de los minerales; (c) la posibilidad de otorgar los minerales en concesión a privados para su exploración y explotación, debiendo el titular desarrollar la actividad necesaria para satisfacer el interés público que justifique su otorgamiento; (d) que las concesiones se constituirán siempre por resolución judicial, con el régimen de propiedad sobre la concesión amparado en la misma Constitución; y (e) que será la Ley la que establecerá los requisitos para el otorgamiento, mantención, caducidad y extinción de las concesiones.
- ii. Por otra parte, la Constitución debiera incorporar el deber del Estado de generar condiciones adecuadas para el crecimiento sostenible del país, manteniendo un equilibrio entre el desarrollo económico, social, ambiental y cultural, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sustentable 2030 de Naciones Unidas, que Chile suscribió.
- iii. Por último, están los desafíos que enfrenta la minería y que eventualmente deberían ser tratados por las leyes o las políticas públicas, y no en la Constitución, ya que se trata de cuestiones específicas de política pública, que no poseen las características de generalidad, abstracción y vocación de permanencia que debe tener una Constitución. Por ejemplo, si la Constitución establece la posibilidad de entregar concesiones a privados debiendo estos desarrollar la actividad necesaria para satisfacer el interés público, debiera ser una norma o política pública la que establezca las actividades específicas que deben realizar los titulares de estas concesiones.

La Constitución y las Leyes deben velar por dos aspectos: Por un lado, la creciente preocupación por la preservación del medioambiente, y por otro, la necesidad de mantener un desarrollo económico y social sostenible en el tiempo, donde la minería resulta esencial. Teniendo presente lo anterior, como complemento a lo propuesto para el texto constitucional se proponen los siguientes cambios en la legislación minera, que deben hacerse respetando criterios de razonabilidad y transitoriedad:

- i. Se propone revisar el régimen de concesiones de exploración y explotación para permitir al país expandir su actividad minera con la entrada de nuevos actores. Se trata de evitar la acumulación de concesiones inactivas, así como evitar el otorgamiento de concesiones mineras para fines especulativos o distintos de la minería. En este sentido, la Comisión Nacional de Productividad ha hecho valiosas recomendaciones, en base a un estudio realizado por CESCO, sobre restricciones que impiden el aumento de la exploración minera en Chile en el sentido, por ejemplo, de contar con un Sistema de Patentes Progresivas para las concesiones que no se encuentren en etapa de explotación.
- ii. Remover al litio como sustancia estratégica no susceptible de concesión, con el fin de promover las inversiones necesarias a futuro.
- iii. Aumentar la transparencia en la actuación de los distintos órganos del Estado, incorporando dentro del régimen de tramitación judicial toda la actividad relativa a minerales no metálicos, tales como el litio y sales en general, lo que actualmente es realizado por CORFO.
- iv. Revisar las actuales políticas de fomento de la pequeña minería, para que, unido a la modificación de las obligaciones de los concesionarios mineros, se generen nuevas herramientas de apoyo conectadas con los

capitales de riesgo de las principales Bolsas de países mineros del mundo.

Además, hay temas de política pública que requieren ser implementados, por ejemplo:

- Mejorar los niveles de información sobre la tributación y las condiciones particulares que se aplican a las diferentes compañías.
- Junto con aplicar un sistema de patentes progresivas a las concesiones de explotación inactivas, facilitar la llegada de capitales de riesgo y el acceso a la propiedad minera a través de la Bolsa de Valores. Esto permitiría incrementar la participación de empresas junior enfocadas en la exploración y lograr una mayor integración de la minería a la actividad económica nacional.
- Velar por que se cumpla a cabalidad la entrega de la información geológica, hidrogeológica, geoquímica y mineralógica que se recopile en la exploración.
- Confirmar la propiedad o derechos sobre el agua de mar desalada en plantas construidas por las compañías mineras, que han hecho fuertes inversiones para aliviar la situación de estrés hídrico.
- Favorecer el desarrollo productivo en las zonas geográficas, donde actúa, de actividades como transporte, energía, agua, tecnología, capital humano y otros.

Para terminar, respecto de una posible Reforma Tributaria en la Minería, cualquiera sea la modificación que se diseñe, ésta debe permitir que se sigan realizando las inversiones de largo plazo que son necesarias para el desarrollo del país y la satisfacción de las necesidades sociales. La estructura impositiva debe garantizar estabilidad en el tiempo, otorgar certidumbre y permitir prever su impacto en las inversiones futuras.

### Sr. Jorge Pedrals.

—Primero que nada, mi agradecimiento a los tres Presidentes, a Raúl Alcaino, Ricardo Nicolau y Juan Rayo por la organización de este Foro.

Esta presentación (Figura 1) es el fruto de un trabajo de más de un año del Instituto de Ingenieros de Minas en la Comisión de Política Minera, donde invitamos a mucha gente a participar a discutir los distintos temas que toca la minería; el medioambiente, las comunidades, productividad, etcétera. Hicimos varias encuestas dentro del Instituto de Ingenieros de Minas para alimentar este documento, luego,

los borradores se compartieron con distintos colegas, se recibieron comentarios, incluso se agregó un Capítulo para dejar también constancia de aquellas opiniones que eran de disenso. Lo entendemos como un documento vivo, eso quiere decir que invitamos a todas las personas que están escuchando esta presentación, para que hagan comentarios y aportes, digan lo que les parece bien, lo que les parece mal. Mientras más rica sea esta conversación, mejor.



Figura 1

Documentos que existen en este minuto a nivel nacional respecto de la minería; menciono algunos de ellos, Sonami, el del Consejo Minero y el del Ministerio de Minería. Estos documentos están en las páginas web de cada una de estas instituciones (Figura 2) y estos dos documentos –los del Instituto de Ingenieros de Minas y el del Colegio de Ingenieros– son a los que nos vamos a referir hoy día (Figura 3).



Figura 2



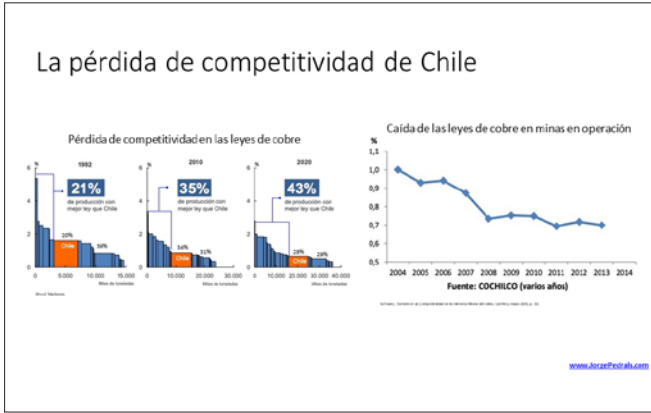


Figura 5



Figura 7

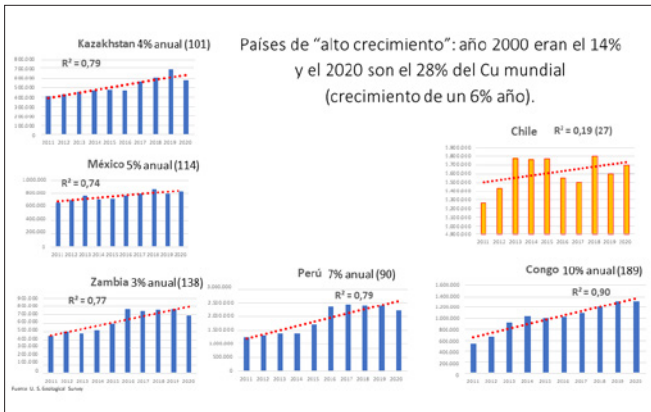


Figura 6

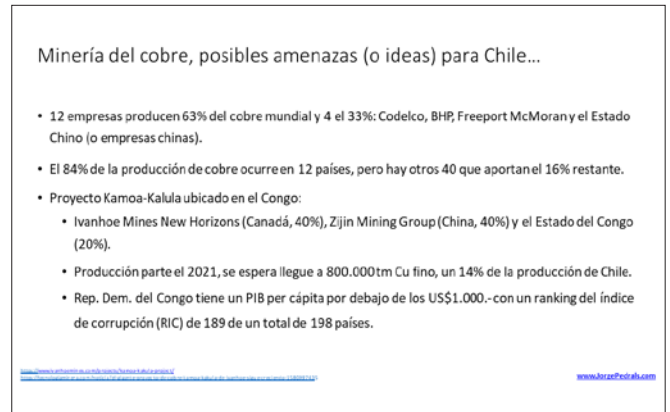


Figura 8

En este mapa (Figura 7), podemos ver cómo las distintas empresas mineras están buscando yacimientos en todas partes del mundo: Oceanía, África, América del Sur, América del Norte, Asia y Europa y, ¿quiénes son?: Anglo American, Empresas Polacas, BHP, Southern Copper, etc. Todas son empresas que están buscando las mejores oportunidades en el mundo, o sea donde están aquellos yacimientos que se pueden desarrollar mejor. Algunas cifras: son 12 empresas las que producen el 63% del cobre mundial y solamente 4 producen el 33%, dentro de las cuales Codelco es la más importante, seguida muy de cerca por BHP. La diferencia es que BHP está en muchas partes del mundo buscando proyectos, a diferencia de Codelco que fundamentalmente se está desarrollando en Chile con alguna iniciativa en Ecuador. Mencionemos al Estado chino que es muy importante; es el tercer productor de cobre en el mundo y ya tiene un 28% de participación en empresas que están produciendo cobre en África (Figura 8).

El 84% de la producción de cobre en el mundo está sólo en 12 países, pero hay otros 40 países que aportan el 16% y traigo como ejemplo el proyecto Kamo-a-Kalula ubicado en el Congo. Una operación de Ivanhoe Mines New Horizons que está abierta en la Bolsa de Toronto, con un 40%, asociada con una empresa china que tiene otro 40% y el Estado del Congo que tiene un 20%. La producción de esta faena partirá el año 2021 y se espera llegue a 800 mil toneladas de cobre fino, que representa un 14% de la producción de Chile.

Y algunas cifras con respecto de la República del Congo, tiene un producto interno bruto per cápita por debajo de los 1000 dólares, con un ranking en el índice de corrupción de 189 respecto de 198 países, lo que vinculo al comentario que hacía Elías Arze respecto de la importancia de la tramitación judicial de la propiedad minera, de tal manera de poner las barreras más altas a la entrada de la corrupción en la minería.



Quiero hacer una definición que la saco de mi amigo y mentor Juan Gastó, sobre el ecosistema, que puede ser entendido como el conjunto o colección de elementos que están conectados y relacionados de manera que actúan o constituyen una unidad o un todo. Esta definición está muy de moda; hoy día hablamos del ecosistema de los emprendedores y en la idea de ecosistema se usan muchos aspectos de la economía y la biología. Más adelante se define que la salud del ecosistema tiene relación con la cantidad diversidad y variedad de empresas presentes en él y las conexiones que logran establecer entre ellas, lo que generará una red, produciéndose círculos virtuosos a través de la convivencia de distintas personas con diferentes intereses y motivaciones (todo esto regulado por el Estado y por el mercado) (Figura 12).

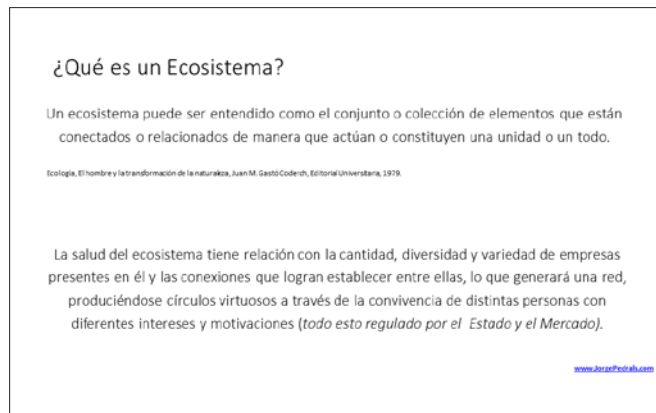


Figura 12

Y acá una foto para pensar en un mundo como una selva donde solo conviven elefantes con búfalos respecto de una selva mucho más rica en su ecosistema (Figura 13) y acá para provocar la conversación, planteo que Chile es un ecosistema que tiene más bien búfalos y elefantes, que un ecosistema rico como el que hay en otros países, tales como Australia y Canadá.

En varias partes de nuestro trabajo se menciona la idea de parecernos a Canadá o parecernos de alguna manera a Australia, guardando todas las proporciones o dimensiones diferentes que tienen cada uno de esos países con Chile.

Y aquí, algunas cifras para plantear por qué Canadá (Figura 14). En la tabla de la derecha, aparecen las empresas mineras abiertas en la Bolsa de Toronto que tienen un valor bursátil de 392.000 millones de dólares de las cuales

264.000 millones de dólares tienen presencia en Canadá. Dentro de la misma Bolsa en el área de capitales de riesgo hay 40 mil millones de dólares de empresas mineras, específicamente empresas especialistas en exploración. De esos 40 mil millones de dólares, aproximadamente 20.000 millones de dólares son faenas que están explorando o desarrollando actividades en Canadá.



Figura 13

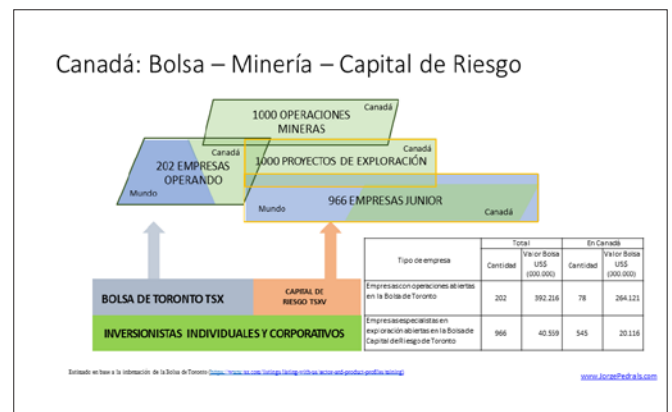


Figura 14

¿Y qué pasó en Canadá?, lograron conectar a los inversionistas individuales y corporativos a través de la Bolsa de Toronto normal, o la parte de capital de riesgo, para inyectar flujos de inversión a las empresas Junior, o sea aquellas empresas que no tienen faenas de explotación, pero son especialistas en exploración. Les inyectan fondos, de tal manera que puedan desarrollar sus exploraciones en todo el mundo y también en Canadá; generando un círculo virtuoso de inversión, exploración y finalmente, crecimiento. A diferencia de lo que hace Chile, con instituciones cómo





que puede aportar la minería, ya sea en fundiciones o en un cluster minero aguas arriba; tema que se conversa constantemente a nivel nacional.

Aquí pongo una serie de declaraciones o afirmaciones que, fundamentalmente están sacadas de un seminario que se hizo en el año 2020 por parte del Centro de Estudios del Cobre (Cesco), con respecto a las fundiciones. La primera declaración plantea que construir una fundición en China cuesta 100 dólares por tonelada métrica de cátodo respecto del resto del mundo, donde cuesta 178 dólares, en Australia 279 dólares y en Indonesia 287 dólares (Figura 17).



Figura 17

La otra declaración, es que las fundiciones han sido construidas fundamentalmente en China. Si ustedes van al documento que preparó el Instituto de Ingeniero de Minas, pueden ver la cantidad de fundiciones instaladas en China y en otras partes del mundo. Cuando el transporte terrestre es importante, como es el caso de Zambia y el Congo, en que las minas están muy alejadas de la costa y ese transporte terrestre tiene un costo muy alto, las empresas tienden a fundir el cobre al lado de la mina para después ser transportado. También cuando el país huésped pone como condición inicial, que, junto con la mina tiene que construirse una Fundición, como es el caso de Indonesia y Pakistán, en algunas de las inversiones que están ocurriendo hoy en día.

Después, hay una gran diferencia entre la rentabilidad de la inversión en las fundiciones, que es mucho más baja que la rentabilidad del negocio minero. Lo anterior también está asociado a que China ha construido una gran cantidad de fundiciones, lo que ha hecho que bajen los costos de tratamiento.

Esta ventana de oportunidades de crecer con mayor producción de cobre se va a ir cerrando gradualmente, en la medida que vaya pasando el tiempo, por lo tanto, es el minuto en el que se discutan estas cosas a nivel nacional.

Por otro lado, se menciona la evidente necesidad de tener certeza jurídica, tanto para los productores de cobre como para la potencial inversión en una fundición, si es que la hubiera en Chile. Después hacemos mención a un dato, ya producimos el 27% del cobre mundial y aproximadamente el 60% de lo que estamos produciendo, se exporta como concentrado, por lo tanto, parece ser que una nueva fundición tiene relación más con las empresas existentes que con una definición por parte del Estado.

Y, finalmente, pero no menos importante, una consideración respecto del tema de la huella de carbono. Mientras nosotros estemos exportando concentrado de cobre, nuestra huella de carbono va a ser muy alta, por lo tanto, sería deseable que nosotros no exportáramos concentrado, sino que cobre fino. Lo anterior también tiene relación con qué nuestro principal comprador es China, país que declaró hace tiempo atrás en Glasgow, que va a seguir aumentando su huella de carbono hasta el 2030 y solo a contar de ese año, va a reducirla. Esta es una consideración geopolítica que uno tiene que tener presente en los análisis que hagamos a nivel nacional.

Voy cerrando la presentación y vinculándola a lo que planteaba Elías Arze dentro de las conclusiones que sacó el Colegio de Ingenieros, una segunda oportunidad más allá del cobre.

Lo que mencionaba respecto la propiedad minera anteriormente (Figura 18), las barras azules en el gráfico siguiente muestran las concesiones de exploración entregadas; podemos ver que junto con el peak de gastos en la exploración que hubo en el 2012-2013 en el mundo, llegamos también al peak también de concesiones de exploración entregadas a distintas empresas.

Estas fueron decayendo posteriormente porque las concesiones de exploración no se pueden tener eternamente, uno las puede renovar en una sola oportunidad y tiene que reducir la superficie cuando la renueva. Lo anterior no obsta para exista una serie de acciones que permiten a las empresas mantenerlas más allá de lo que se establece en la ley. En esta misma lámina se puede ver cuál ha sido el comportamiento de las concesiones de explotación;

en las concesiones de explotación no pasa lo mismo, sistemáticamente han ido subiendo. En esto pasa lo que mencionaba Elías Arze, que en algunos casos aparece algo de especulación o el uso de las concesiones de explotación para proteger infraestructura que tiene otras características. Eso es lo que plantea el documento del Colegio de Ingenieros; hay que buscar una forma para que esto no ocurra y que haya una rotación en la propiedad en minera.

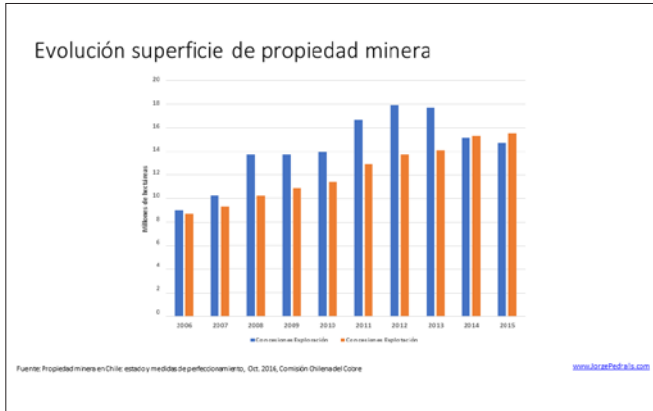


Figura 18

Y lo que se plantea en el documento que hicimos en el Instituto de Ingenieros de Minas, es que el 60% de los descubrimientos mineros de los últimos años han sido hechos por estas empresas Junior, empresas que se dedican únicamente a la exploración y que no tienen una operación minera funcionando. Son habitualmente geólogos muy talentosos o algunos especuladores también, que conocen distritos en distintas partes del mundo, logrando levantar capitales de riesgo ya sea en Australia y en Canadá, que son las más importantes o, en Estados Unidos, Inglaterra, Sudáfrica; lo que les permite ejecutar exploraciones. Son lo que muestran una parte significativa de los yacimientos descubiertos en este último tiempo, sin hacer un análisis respecto del tamaño de lo que ellos han encontrado.

El Informe que mencionaba Elías Arze respecto de las restricciones que impiden el aumento de exploración minera, se emitió en el 2016 y que fue considerado por la Comisión Nacional de Productividad, lo hizo el Centro de Estudios del Cobre (Cesco), con la participación de varios geólogos.

Canadá, en la década de 1990 cuando estaba en una situación similar a la de Chile hoy, se dio cuenta de que no

estaba con el dinamismo suficiente en su exploración, que la minería no estaba creciendo de la manera como esperaban, entonces juntaron 5 estamentos distintos a discutir cuál iba a ser la licencia social necesaria a obtener para operar en el territorio. Estos mismos cinco estamentos de ahí en adelante, constantemente se están juntando para discutir cómo mejorar la minería en Canadá. Y algunas estadísticas (Figura 19), en esta lámina aparecen tres colores que representan; el mundo en azul, el naranja es Canadá y Chile es el gris. El gráfico muestra la relación de cuánto dinero han invertido empresas Junior dividido por el dinero que han gastado empresas Major en exploración. En el mundo podemos ver que es entre el 0,5 y 1,4 veces la inversión de las empresas junior explorando respecto de las Major. En Canadá esa cifra sube a entre 1,2 y 3 veces, lo que se debe ir monitoreando porque va cambiando en función de los precios de los metales. En el caso de Chile, la proporción muestra que la actividad de las empresas junior es mucho más baja que aquella que existe, tanto en el mundo como en Canadá.

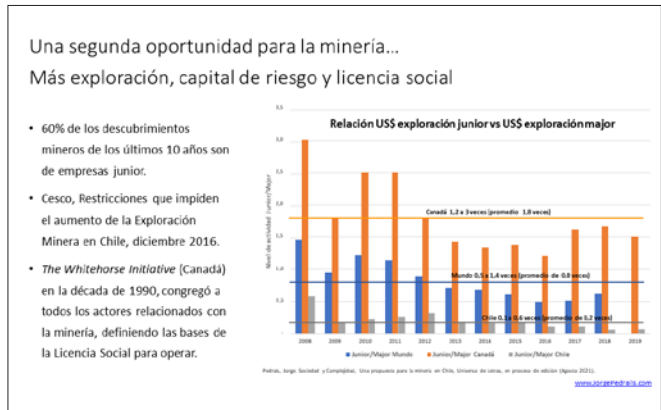


Figura 19

Minería y territorio (Figura 20), sin lugar a dudas que este es un tema clave. Cuando conversábamos con los colegas de la Asociación Geológica de Chile, ellos mencionaban su gran preocupación respecto al territorio y coincidían en que la palabra clave era Territorio. ¿Cómo vamos a enfrentar la minería para poder hacerlo con una visión de territorio? y aquí, yo vuelvo a citar al profesor Juan Gastó, que plantea que el espíritu de la época es el que demanda la necesidad de materias primas y que también hay un espíritu del lugar; el que la minería debe tener en consideración cuando llega a un sitio. Y ahí tenemos una serie de cosas que hay que tener presente en el desarrollo

de los proyectos mineros, que siempre van a ser un desafío, buscando minimizar los impactos en los territorios; los que deben ser conversados y consensuados con las comunidades que viven allí. Y guardando todas las proporciones respecto de lo centralizado que está el país, hay proyectos que son altamente deseados en las comunas y en las provincias donde se están desarrollando, pero se levantan voces en Santiago, muy alejadas del territorio donde están pasando las cosas, generando un ruido que no necesariamente aporta en la discusión.

generar cambios en la legislación, que permitan que esas concesiones de explotación que no están teniendo la rotación adecuada, puedan volver al sistema y haya otras empresas que las tomen. Cada cierto tiempo aparecen noticias que las grandes empresas mineras le entregan a Enami ciertas propiedades; yo creo que ese no es el sentido que tiene la ley, el sentido de la ley es que el que no la usa, la pierde. En esto recojo lo que decía Elías Arze: hay que ser muy cuidadoso con los cambios que se hagan de tal manera que no afecten las operaciones que actualmente existen. Con relación a la entrega de la información geológica básica por parte de las empresas, las leyes tienen que funcionar, o sea, cuando una empresa hace una exploración básica, geofísica y geoquímica, esa información tiene que quedar adosada a la propiedad minera. De esta forma, cuando viene el nuevo propietario que quiere explorar, ya tiene una información básica que es fundamental. El Sernageomin debiera ser un promotor de las inversiones, que es lo que hace el organismo equivalente en Australia.

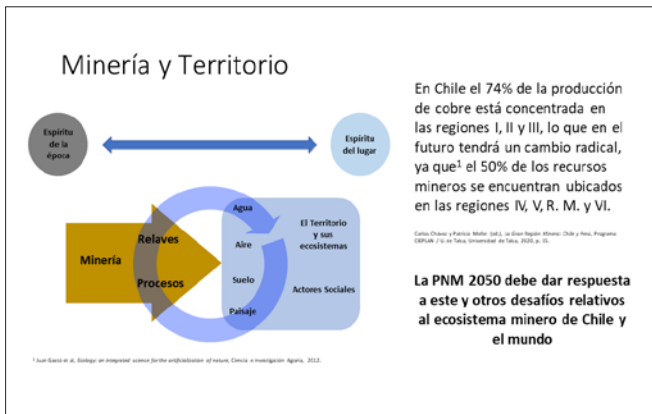


Figura 20

En un libro que editó Patricio Meller con Carlos Chávez: La Gran Región Minera, Chile y Perú, se plantea que el 74% de la producción de cobre está concentrada en las regiones I, II y III, lo que a futuro va a cambiar de manera significativa ya que el 50% de los recursos, o sea, esos minerales que están en el subsuelo, se encuentran en las regiones IV, V y VI.

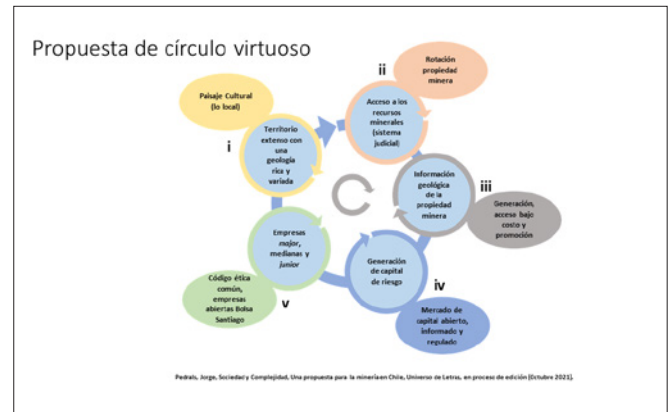


Figura 21

Esto significa que si no somos capaces de tener una visión distinta de cómo nos vamos a acercar al territorio, se va a ir agudizando este problema, la tensión entre minería y comunidades. Y no cabe ninguna duda, Chile es una potencia mundial, pero en Chile no nos hemos dado cuenta de ello, y no necesariamente tiene el reconocimiento y la apreciación de la comunidad en general y ahí hay una deuda que nosotros, los profesionales que estamos en la minería, tenemos pendiente y sin lugar a duda las empresas mineras también.

La generación y la llegada de capital de riesgo para un mercado abierto, informado y regulado y, sobre todo, dado que son concesiones mineras en que se va a explotar un bien que es del Estado, tiene que ser muy claro y transparente. Tal como mencionaba Elías Arze, en una de las conclusiones del Colegio. Finalmente debería existir un código de ética común de las empresas y ojalá muchas de ellas abiertas en la Bolsa, con el acuerdo de mirar el territorio de manera conjunta, minimizando las intervenciones que se producen en él. Y en eso el rol del Consejo Minero y de los Institutos es fundamental. No es posible que cada empresa resuelva sus problemas en cada región y proliferen un montón de puertos y otras instalaciones, en

El círculo virtuoso por crear en Chile (Figura 21), son el paisaje cultural, lo local, y cómo somos capaces de mirar el territorio, la rotación de la propiedad minera que implica

muchos lugares. Debiera haber un esfuerzo común de las empresas para resolver las cosas de manera colaborativa.

Y en una apretada síntesis (Figura 22), me voy a aprovechar de la presentación que hizo Gustavo Lagos en el Instituto de Ingenieros de Minas, que citaba un gráfico y una frase que se derivaba de un coloquialismo inglés que dice algo así como ¿qué del valor minado es tuyo? Vale decir, las empresas mineras llegan y sacan algo de valor del subsuelo, que es del Estado, ¿cuánto de eso que se están llevando en realidad es un valor que al extraerlo, se comparte?

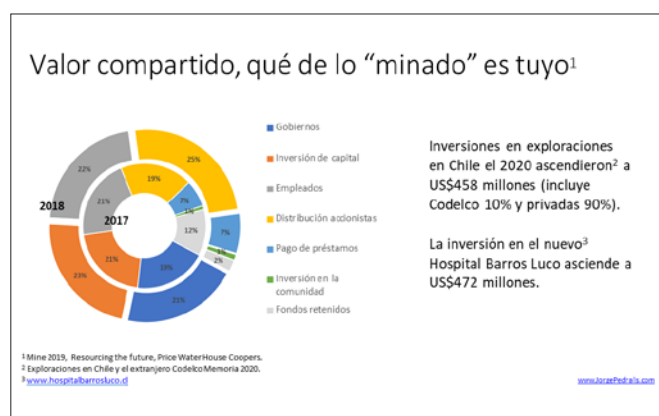


Figura 22

En esta lámina aparecen graficados los años 2017 y el 2018, mostrando cuánto del valor extraído queda en la forma de impuestos en el Estado y cuánto queda como inversión de capital que vuelve al país y a su economía (los 170 mil millones de dólares que se mencionaban inicialmente con inversión de la minería en Chile). En este mismo gráfico se señala también cuánto queda como remuneraciones de los empleados, cuánto se le distribuye a los accionistas, cuánto va como devolución de los préstamos bancarios, inversión a la comunidad. Claro, estas cifras son extraídas de las empresas abiertas en la Bolsa –lo que genera un alto grado de transparencia en el sistema. Y aquí insisto en algo que me parece relevante, mientras más abiertas estén las empresas en la Bolsa de comercio, mientras más acuerdo tengan las empresas en una forma común de actuar en el territorio y esa información esté disponible para todas las personas, vamos a lograr insertarnos de mejor manera en la economía del país y finalmente en la sociedad en general.

Y una cifra al término de la presentación, en Chile, el 2020 se gastó una cifra algo así como 450 millones de dólares

en exploración, entre las empresas privadas y Codelco. La inversión en el hospital Barros Luco asciende a una cifra que es muy similar, entonces ahí uno ve, que es una de las conclusiones que mencionaba Elías Arze, la importancia de los capitales privados y de las empresas de Gobierno en la minería. Si solo fuesen empresas de Gobierno, el Estado tendría la disyuntiva de invertir 460 millones de dólares en exploraciones anuales, algunas de las cuales tienen un muy alto riesgo porque puede que no concluyan en nada, respecto a invertir en las grandes demandas sociales que tiene el país hoy.

Esta era mi presentación, muchas gracias.

### Sr. Gustavo Lagos.

—Muchas gracias, yo agradezco también el patrocinio del Instituto de Ingenieros de Minas y del Colegio Ingenieros, para este Seminario y aprovecho de agradecer las presentaciones tanto de Elías Arze como de Jorge Pedrals, ya que me queda poco por decir después de estas presentaciones, pero creo que algo voy a aportar.

Lo que yo voy a comentar por supuesto tiene que ver con la minería y la constitución (Figura 1).



Figura 1

Lo primero que quiero decir, es que estoy muy de acuerdo con lo que plantea el Informe del Colegio de Ingenieros, y también tomo como base una presentación que hizo CESCO hace pocos meses atrás, que plantea cosas parecidas y complementarias con lo que aportó el Colegio de Ingenieros.

El contenido de esta presentación, primero, es el aporte de la minería al desarrollo de Chile, en segundo lugar, voy a hablar de ciertos aspectos para la nueva constitución, porque coinciden en muchas materias con lo que mencionó Elías Arze y también voy a hablar de elementos para la nueva Ley Minera, porque es obvio, que sí tenemos una nueva constitución, con algunos aspectos nuevos, también va a haber que modificar la Ley Orgánica Constitucional que regula la minería (Figura 2).

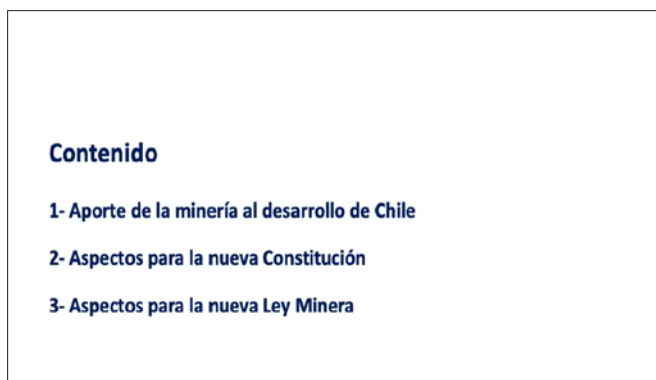


Figura 2

Y la primera lámina que quiero mostrar es que el aporte histórico de la minería al desarrollo nacional es el más importante de todas las actividades económicas del país, y que ello ocurrió preferencialmente en cuatro periodos de la historia de Chile, entre el año 1800 hasta el 2020, con la participación de Chile en la producción mundial de cobre. Entonces, aquí hay tres períodos muy importantes en términos de la participación mundial del cobre de Chile. El primero de ellos se produjo a mediados del siglo XIX en que llegó a producir casi 50% el cobre mundial y en que el primer contrato que tuvo la Bolsa de Metales de Londres, cuando se creó, fue el Chilean Copper Wirebar, ni más ni menos (Figuras 3 y 4).

El segundo periodo, fue de declinación tecnológica de Chile; no se agotaron las reservas, se agotó la tecnología, y vino la época del salitre que, afortunadamente existió, porque relevó al cobre de ser soporte económico y, cuando el salitre fue sustituido, entonces vino la segunda ola del cobre, que fue la instalación de las empresas extranjeras importantes que son: Teniente, Chuquicamata y Salvador - Potrerillos, de tal forma que a mediados del siglo pasado, de 1900, el cobre también era muy importante y suscitó una serie de intervenciones políticas.

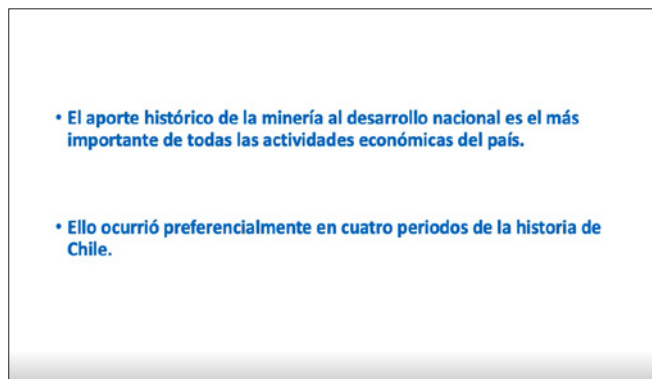


Figura 3

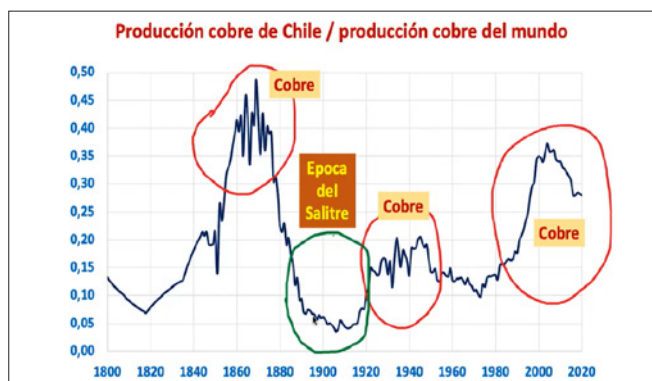


Figura 4

Pero después, hay una reducción de la inversión en Chile de esas empresas hasta 1971. Posteriormente viene la tercera ola del cobre que es la que tenemos ahora, pero que fue quebrada en el 2004, ya que a partir de este año hay una reducción de la participación de Chile en la producción mundial. Entonces hay periodos en que el cobre ha contribuido más que en otros. Ese es el primer mensaje.

El segundo mensaje que quería mostrar aquí, es que la nacionalización ocurre justamente en el período de menor participación del cobre en el siglo pasado, porque a principios del siglo Chile, producía cerca del 5% el cobre mundial y justamente la nacionalización trajo consigo una inversión muy importante en las empresas nacionalizadas y posteriormente vino el boom de la inversión extranjera, que llegó a un 36-37% de la producción mundial. Posteriormente, esto se estancó, y estamos estancados en producción prácticamente, desde hace 16 años.

Los motivos de eso son demasiados como para poder comentarlo acá y respecto a la contribución del cobre,

ya Jorge Pedrals mencionaba muchos aspectos y yo voy a mencionar solamente cuatro. El primero es que representa más del 9% del empleo nacional y eso es muy significativo; en segundo lugar, la infraestructura del norte, de la zona central de Chile, serían totalmente distintas sin la minería y eso la gente realmente no lo aprecia. La electrificación, las plantas de desalación, los caminos, los puertos, son muy importantes en el desarrollo del país y la minería ha sido responsable de la construcción de una parte fundamental de esa infraestructura de la zona central y norte del país.

El otro aspecto que quiero mencionar es que, con una alumna mía, Laura Castro, hicimos un trabajo de tesis el año pasado, sobre la pobreza multidimensional (PM) que es una suerte de medición de calidad de vida; es distinta de la pobreza que se mide por el ingreso. La PM es una medición internacional y depende de cuatro indicadores grandes que son: la educación, la seguridad social, la vivienda y la salud. Encontramos dos cosas fundamentales en ese Estudio. La primera es que, en las comunas mineras, que identificamos debido al número de personas de la comuna que trabajan en minería, y estudiamos todas las comunas de Chile, en base a la encuesta CASEN, de cuatro años; descubrimos que efectivamente la pobreza multidimensional de las comunas mineras que nosotros definimos, es menor que la pobreza multidimensional de Chile, es menor hasta tres o cuatro puntos en los años más favorables, o sea, es una diferencia significativa. La pobreza multidimensional en Chile es un poco menos de 20% en este momento y es la pobreza a la que se refiere el Informe de Naciones Unidas para 2030, que son las metas de desarrollo sostenible y es la primera meta (Figura 5).

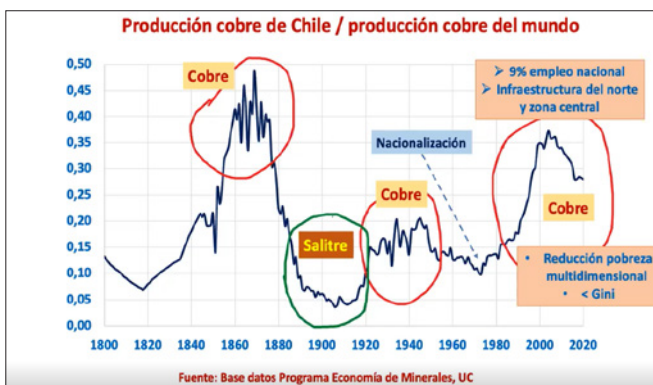


Figura 5

¿Por qué esto es tan importante? Porque es una suerte de calidad de vida y la calidad de vida es lo que los chilenos quieren mejorar. Entonces, si podemos demostrar que en nuestras comunas mineras tenemos una mejor calidad de vida que en las comunas no mineras, sería una demostración que puede hacer mucho peso en el país, y que el país no conoce.

Un segundo hallazgo, es que el coeficiente GINI de las comunas mineras es sistemáticamente inferior al de las comunas no mineras. Y esto es muy importante, porque la desigualdad es una de las bases de la discordia y del estallido social que hemos tenido recientemente. No es el único responsable y tal vez ni siquiera el más importante, porque el más importante puede ser el respeto, el respeto a las personas mediante una administración apropiada de la justicia y de las leyes.

Ahora, la otra cosa que descubrimos, es que esta pobreza multidimensional, está causada por tres variables: la primera es la escolaridad, la segunda es la seguridad social, descubrimos que efectivamente las personas que pagan impositivos, tienen menor pobreza multidimensional que las que no pagan impositivos, que es la mayor parte de Chile y en tercer lugar el estado de la Vivienda. ¿Qué significa esto? que posiblemente estos son los temas que podría abordar objetivamente el Estado, y no solamente el Estado, sino que también la minería, en su acción voluntaria dentro de los territorios, además de abordar los temas ambientales.

Esto es lo que yo quería mencionar de la contribución de la minería al desarrollo de Chile.

Por supuesto, es un tema mucho más largo e intensivo en información, como lo acaba de mostrar Jorge Pedrals (Figura 6).

Nosotros pensamos que la minería debe seguir siendo palanca de desarrollo, y para ello es necesario que se desarrolle el aporte a la sostenibilidad del país, en eso coincidimos con todos los Informes que se han elaborado al respecto (Figura 7).

Me voy a saltar eso y voy a hacer referencia, en lo que resta de la presentación, a lo que mencionaron tanto Elías Arze como Jorge Pedrals. En primer lugar, pienso que la nueva Constitución debe contener una referencia a un royalty; no lo contiene en este momento. El royalty

es un cobro adicional por el uso de los recursos; eso no existe en la Constitución y creo que debería estar contemplado, porque lo tienen los más importantes países del mundo en su legislación, y eso causó entre otras cosas que nosotros instauráramos el impuesto específico a la minería. En realidad, el impuesto específico a la minería en mi opinión es mucho más ventajoso para la minería y cumple el mismo rol, ya que un Royalty sobre las ventas o sobre el precio, representa realmente un aumento de los costos de la minería.



Figura 6

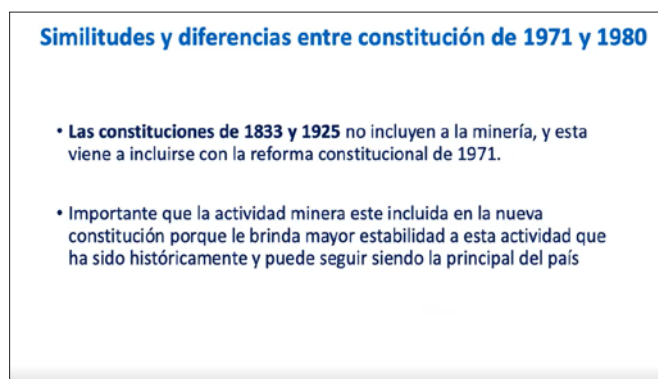


Figura 7

En segundo lugar, creemos que la Constitución debería mencionar de alguna manera, que haya una contribución a las regiones que originan la riqueza minera, y esos son los dos aportes a la Constitución. Respecto a los impuestos, nosotros escribimos un paper muy recientemente para el Senado y está en mi sitio web [gustavolagos.cl](http://gustavolagos.cl); lo escribimos en conjunto con Michelle Jorratt y David Peters y ustedes lo pueden rescatar de ahí, y ¿qué decimos básicamente respecto al royalty nuevo?

Decimos un par de cosas importantes: primero, que tiene que garantizar la inversión futura. Como dijo Elías Arze, tiene que garantizar que los ingresos del Fisco se maximicen, pero no en el corto plazo, sino que en el largo plazo. Tiene que elevarse un poco la tributación minera porque nuestro principal competidor Perú, tributa un poco más que Chile, del orden de 3 a 4 puntos más, y por lo tanto nosotros hicimos una propuesta muy creíble. Todas las opiniones que hemos recibido de un aumento señalan que es bastante más aceptable que el proyecto que aprobó la Cámara de Diputados el 6 de mayo de este año, que realmente termina con la minería como la conocemos.

Este es el primer tema. En segundo lugar, creo que hay que modificar el régimen de amparo a las concesiones; estoy totalmente de acuerdo con las conclusiones del Colegio de Ingenieros. El régimen de amparo tiene que considerar condiciones que sean más realistas y que den más dinamismo a la minería chilena. También creo que todas las decisiones de concesiones e incluso de los contratos especiales de operación tienen que ser sancionados por los Tribunales de Justicia y no por la autoridad administrativa, en línea con el Código de Minería de 1982.

Ahora respecto a la posibilidad del litio, pienso que más del 50% de las reservas mundiales están en el Salar de Atacama, y el Salar de Atacama pertenece a la Corfo en su mayor parte, entonces está excluido de esta consideración de la ley, del decreto-ley que pasó la Junta Militar en 1979, por lo tanto, esa propiedad no se puede afectar; va a quedar en propiedad de la Corfo, y la Corfo la puede administrar, y por cierto podría administrarla en forma más dinámica de lo que lo ha hecho. No estoy diciendo que lo haya hecho mal, creo que los dos contratos que se hicieron con Albemarle y posteriormente con SQM, fueron positivos en los últimos 4-5 años en muchos aspectos. Respecto al resto de los recursos de litio tengo que decir que Codelco tiene pertenencias que son anteriores de 1979, entonces, los salares que van quedando que no tienen pertenencias otorgadas antes de esa fecha, son numerosos y son importantes. Si no se decreta la concesibilidad del litio, obviamente que eso va a estar afectado y por eso nosotros proponemos una medida más flexible, porque pueden no estar los acuerdos políticos para hacer del litio una materia concesible. Creemos que hay que legislar con un quorum calificado los contratos especiales de operación que fueron realizados por la minería y que efectivamente son los que se podrían desarrollar.

Quiero hacer dos o tres alcances adicionales antes de terminar. El alcance medioambiental. Personalmente pienso que hay que mejorar y avanzar en la legislación que tenemos; una legislación que ha avanzado rápidamente los últimos 30 años; hemos cometido muchos errores, pero es parte del proceso de aprendizaje, todos los grandes conflictos son parte del proceso aprendizaje. Pero soy un ferviente creyente de qué hay que respetar la legislación y no es posible que la autoridad política, (me refiero particularmente al Parlamento y al Ejecutivo) intervenga en las decisiones ambientales, cuando hay una Ley Ambiental que debería estar sujeta solamente a los Tribunales de Justicia. Por eso que estoy muy de acuerdo con la eliminación del Comité de Ministros e incluso con un cambio profundo en la autorización de los Estudios del Impacto Ambiental por los Comités Regionales, porque estos son instancias políticas, y las personas que están ahí dependen de la autoridad política y por lo tanto tienen que hacerle caso al Presidente de la República.

Habiendo dicho eso, creo que el principal problema que enfrenta el medio ambiente es justamente el ordenamiento territorial de Chile, que es muy deficiente. Hay grandes partes del territorio que no tienen ordenamiento territorial adecuado y el caso Dominga lo demuestra claramente. Y creo que no es posible que usemos el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental para hacer ordenamiento territorial a posteriori, eso es una mala praxis y si nos vamos a saltar la legislación ambiental, entonces ¿por qué no nos saltamos la legislación económica? Por eso, soy partidario de que las instituciones tienen que funcionar.

Ese es mi mensaje ambiental en forma resumida. Finalmente, el tema de las fundiciones de cobre.

Escribimos un paper el año pasado, y otro para este año en la Cepal, ambos disponibles en mi sitio web, sobre fundiciones de la cadena de valor y en ambos identificamos dos problemas fundamentales: primero que hay que mantener la integridad de la cadena de valor hasta el cátodo porque no hacerlo, o sea exportar concentrado solamente nos restringe tecnológica y científicamente y restringe nuestras posibilidades de reducir nuestra huella de carbono. Las razones que mencionó Jorge Pedrals están en nuestros papers de 2020 y 2021.

Sabemos que una fundición en Chile, en Mejillones, por ejemplo, libera muchas menos emisiones que una fundición exactamente igual, con la misma tecnología en China,

por el transporte concentrado y porque la matriz eléctrica china que está altamente carbonizada, de tal forma que esto es una responsabilidad del Estado, esta no es una responsabilidad de las empresas; las empresas tienen que aplicar sus principios económicos. Codelco ha descuidado las fundiciones, ahora le va a costar mucho traer esas funciones a tierra firme, no me voy a referir más al tema.

Finalmente, quiero mencionar el tema de las empresas estatales. Codelco fue creada en 1976 después de la nacionalización que ocurrió en 1971. Considero que he estudiado el tema a fondo y conozco las razones por las cuales hubo nacionalización y me parece que son muy importantes en la historia de Chile, porque permitieron recuperar una parte nuestro orgullo que estaba sobrepasado por ese inmenso peso que tenían las empresas de extranjeras en el manejo económico y político del país; eso ya no ocurre, no es lo mismo, no podemos trasladar la situación política de 1971 a la actualidad y tenemos otro antecedente muy claro. La mayor vulnerabilidad que tiene Codelco es su enorme deuda, y eso se debe exclusivamente a que el Estado no ha reinvertido en forma adecuada en Codelco, y eso es una señal de que tampoco va a invertir en otra empresa estatal, entonces, por favor, seamos realistas, ese mi mensaje. Esa es mi contribución señor Presidente.

### **Sr. Willy Kracht.**

—Muchas gracias. Quiero partir por agradecer al Instituto de Ingenieros de Chile, Colegio de Ingenieros de Chile y al Instituto de Ingenieros de Minas por haber organizado esta discusión y por habernos invitado a comentar los distintos documentos. Son documentos que contribuyen mucho a la discusión que viene, no solo en el debate constitucional, sino más allá de él.

Para esta ocasión preparé algunos temas que no son necesariamente centrales al desarrollo minero, pero que sí lo tocan directamente. Sabía que, estando al final en la lista de panelistas, al momento de mi intervención probablemente se habría abordado ya de manera exhaustiva el aporte de la minería, como efectivamente ocurrió a lo largo de las intervenciones que me antecedieron. Entonces, quiero complementar con algunos otros temas que me parece son de mucha importancia en una discusión que ya se viene dando hace algún tiempo en torno al desarrollo minero. Si tuviera que ponerle un título a mi intervención, este título sería: “Desarrollo Responsable y Minería en un



Escenario de Crisis Climática y Social”. Esto último, la crisis social, no es menor, y de hecho es lo que nos tiene hoy conversando de un cambio constitucional.

Si revisamos los temas que atañen a la minería en la Constitución actual, probablemente gran parte de esos textos se mantengan en la versión que se discuta en la Convención Constituyente. En el texto vigente de la Constitución, el tema minero se aborda en el Capítulo III, de los derechos y deberes constitucionales, en particular en el artículo sobre el derecho a la propiedad. Ahí es donde aparece que el Estado tiene dominio absoluto, exclusivo, inalienable e imprescriptible de todas las minas. Se delinean también en el texto algunas reglas del juego para la actividad minera, incluido el tema de cómo se asignan las concesiones. Todo esto es algo que muy probablemente va a estar también en el nuevo texto constitucional que se proponga para su aprobación el próximo año. Creo que en este Foro nos hemos referido mucho a esa parte de la Constitución, pero no es la única que merece atención. Considero que es necesario prestar especial atención a otros temas, en particular a otro de los derechos constitucionales que aparece en el artículo 19. Me refiero aquí al derecho a vivir en un ambiente libre de contaminación. En este caso el texto indica que es deber del Estado velar para que este derecho de vivir en un medio ambiente libre de contaminación no sea afectado, y tutelar por la preservación de la naturaleza.

Vivimos hace mucho tiempo ya una tensión entre desarrollo minero y protección por el medio ambiente. Gustavo Lagos decía muy bien que aquí hay un problema en el ordenamiento territorial, que falta discutir algunas reglas del juego y que finalmente terminamos enfrentando protección del medio ambiente con el desarrollo una actividad como la actividad minera. ¿Por qué esto es relevante?, no solo por el hecho de que haya habido hasta ahora una discusión muy intensa en torno a la protección del medio ambiente, sino en particular porque asistimos hoy a un escenario de crisis climática, que, más que una discusión científica, es un escenario que ya nos impone un tremendo desafío a nivel nacional.

Chile está muy expuesto a los desafíos y los impactos del cambio climático. De hecho, puedo comentar algunos datos del año 2019 al respecto. Ese año fue uno de los tres años más secos del último siglo Chile. Hubo en algunas partes del país intensas precipitaciones con consecuencias sobre vidas humanas e infraestructura, nos tocó también enfrentar olas de calor e incendios forestales. Tuvimos ese año una muestra clara de cómo la crisis climática impone una tensión

adicional al territorio. Por lo tanto, cuando hablamos de la protección del medio ambiente, antes incluso de pensar en que vamos a desarrollar una actividad industrial, vemos un territorio que está muy tensionado por la crisis climática.

Hemos visto cómo esto ha impactado al sector minero. Aparece información cada cierto tiempo en medios de circulación nacional y medios especializados sobre cómo las distintas compañías ajustan a la baja sus proyecciones de producción, debido a la escasez de agua. Esto a pesar de que ya ha habido esfuerzos de adaptación del sector mediante el desarrollo de proyectos de desalación-impulsión. Por otro lado, vemos que esos proyectos de desalación e impulsión de agua están siendo objeto de mucho cuestionamiento de parte de distintos grupos de la sociedad por el impacto que podrían tener en el borde costero.

El cambio climático configura un escenario desafiante, pero que también representa una oportunidad. Una oportunidad porque la forma de enfrentarlo a nivel internacional es principalmente mediante la transición energética y ya se ha dicho antes que todas las tecnologías que podemos desarrollar e implementar para producir energía baja en emisiones requieren de cobre. Esto implica que hay una proyección al alza de la demanda de cobre, pero no solo debido a la producción de energía de bajas emisiones, sino también porque es necesario para la electromovilidad. De hecho, en conjunto, transición energética y electromovilidad deberían implicar algo así como 3,4-3,9 millones adicionales de demanda de cobre anual, respecto de la demanda actual. Esto quiere decir que, a causa del cambio climático, necesitamos más minería.

A nivel nacional hemos recogido bastante bien este mensaje. De hecho, yo creo que aquí aparece un elemento interesante para quienes estamos en el sector minero. Es un elemento que tiene que ver con la construcción de un relato, de un propósito superior para la producción de cobre. El problema es que este propósito superior de alguna manera entra en tensión con los impactos locales que se generan a consecuencia de la propia actividad. Se trata de una actividad masiva, con impactos locales que debemos ser capaces de minimizar.

Aparece ahí un primer elemento que es muy importante, con o sin discusión constitucional, y es que el solo hecho de estar enfrentando una crisis climática impone un desafío mucho mayor sobre el territorio, tensiona aún más la relación entre quienes están defendiendo el entorno

y el medio ambiente y el minero o la minera que está defendiendo la actividad.

En este contexto de cambio climático, se requiere de un enfoque de transformación para el desarrollo minero. Esto porque la minería es una actividad de complejidad creciente, es un sistema que es cada vez más complejo en su esencia, en términos operacionales ya sea porque el yacimiento se hace más difícil de explotar, o el mineral más complejo de tratar. Pero también es un sistema complejo en su relación con el entorno, entonces, sin considerar todavía la discusión constitucional, requerimos un enfoque de transformación y adaptación a estos nuevos escenarios. Se requiere de un esfuerzo permanente y a la vez necesitamos que sea mucho más dinámica la forma en cómo vamos adaptando la actividad minera a estos nuevos desafíos. Esto supone que, tanto desde la estructura del Estado, como desde los cuerpos normativos, Constitución, leyes y decretos, debemos ser capaces de darle dinamismo al sector.

Ahora bien, esto es casi accesorio a la discusión constitucional que tenemos hoy en día, porque si bien esta ocurre en un escenario de crisis climática, también se da en un contexto de crisis social y de un profundo cuestionamiento al modelo desarrollo que hay en Chile. Esos son elementos que aparecen repetidamente en las discusiones mineras y en otras discusiones que se dan en torno a actividad industrial en general, lo que nos lleva a que pensar en una transición ecológica justa, es decir, en la transformación de nuestro modelo productivo con el objetivo de minimizar el impacto sobre el medio ambiente, hacerlo de la manera justa y sin afectar el mundo del trabajo y las comunidades.

La discusión gira también en torno a la redefinición del rol del Estado y eso implica definir cuál es el rol, por ejemplo, en ordenamiento territorial, en institucionalidad ambiental y cuál es el modelo de desarrollo que el Estado busca privilegiar. Por otro lado, y esto no menor, el contexto de crisis social lleva acompañada una profunda demanda por mayor participación y democracia, lo que tiene un impacto en la forma en que nos ponemos de acuerdo para desarrollar distintos proyectos, incluidos los mineros.

La discusión constitucional es una salida política a una crisis social. Los procesos políticos y los procesos sociales tienen tiempos que no son necesariamente iguales y por lo tanto allí tenemos que hacernos cargo de las expectativas que surgen de cada uno de esos procesos. Vamos a tener una nueva Constitución que va a definir un rayado

de cancha en la cual se seguirá dando una discusión que ya traemos. No obstante, los cambios que ocurran no van a ser instantáneos. En ese sentido, la salida política asociada al cambio constitucional, efectivamente libera presión a esta crisis social, pero no podemos suponer, a priori, que no habrá momentos en que se acumule presión nuevamente por un problema de expectativas temporales y tenemos que adelantarnos a eso. Lo que hay de fondo es un cuestionamiento sobre la legitimidad del modelo y ahí no podemos hacernos los ciegos y tenemos que hacernos cargo de que lo que asoma en la discusión es un cuestionamiento también de la legitimidad de la actividad minera.

Creo que aquí debería aparecer un tercer elemento. Ya tocamos los elementos político y social, pero también hay un asomo de batalla cultural de las regiones mineras que tienen una identidad arraigada profunda. Allá uno no tiene que decirle a la gente lo que es Chile país minero, porque lo viven en el día a día, pero cuando vemos oposición al desarrollo de nuevos proyectos ya no en la región minera, sino en el centro del país, en Santiago, de gente que no reconoce necesariamente el aporte que hace la minería al desarrollo de Chile, entonces tenemos un problema. Son esas distintas visiones las que debemos intentar conciliar y ahí me parece que, como mundo minero, desde las ingenierías, desde los Centros de Estudio, desde la Academia, estamos llamados a jugar un rol importante en esta suerte de batalla cultural que se manifiesta en conjunto con la crisis social y de legitimidad y que nosotros estamos tratando de resolver con un cuerpo normativo como es la Constitución.

Entonces, hay una serie de elementos que van a estar en discusión y que cruzan todo lo que he planteado. El derecho de propiedad, la propiedad de los recursos, la retribución por la explotación de recursos no renovables. Probablemente todo eso va a estar en la constitución. También va a haber una discusión relevante sobre el rol del Estado en la protección del entorno. En este punto se observa un compromiso del sector, un compromiso con el desarrollo sustentable. Y esto es importante porque si no nos hacemos cargo de esa parte de la discusión, probablemente vamos a ver dificultades para mantener la actividad minera en el futuro. Falta agregar a esta lista la demanda por mayor participación, mecanismos de participación democrática, y lo que decía Gustavo Lagos que era de ordenamiento territorial.

Si queremos más minería, esta debe ser desarrollada de manera responsable. Para lograrlo debemos ser capaces de conciliar el relato global de reducción de emisiones en

la lucha contra el cambio climático, con la reducción del impacto local. Hay ahí para nosotros, desde el mundo de la ingeniería, desafíos técnicos interesantes que abordar, además de la posibilidad de aportar desde Chile con soluciones tecnológicas que puedan ser exportadas. Eso además nos permitiría superar el calificativo de extractivista con que se identifica a la industria minera.

Conceptualmente la industria minera extrae un recurso natural no renovable, pero para hablar con propiedad de extractivismo se debe mirar más allá de la operación unitaria, se debe mirar el modelo completo y es ahí donde tenemos una tremenda oportunidad. Podemos aprovechar la minería como un motor de generación de conocimiento y desarrollo de tecnologías, hechas en Chile, que se puedan exportar al mundo. Si somos capaces de demostrar eso, difícilmente se va a poder decir que aquí estamos en presencia de un modelo extractivista.

Había hablado antes sobre identidad cultural, de las regiones mineras versus los centros urbanos. Esto es relevante y lo vuelvo a traer para finalizar mi intervención: nos toca asumir el desafío cultural de mantener el orgullo de ser Chile país minero, ese es el gran desafío a largo plazo, que no se agota con la aprobación de un texto constitucional, ni con la posterior adecuación de las normas.

### **Sr. Sergio Bitar.**

—¿Qué podemos sugerir desde el Instituto de Ingenieros en los temas de minería y desarrollo económico a la Convención Constitucional?

#### **EL DEBATE CONSTITUCIONAL ES UNA GRAN OPORTUNIDAD DE PENSAR EL FUTURO**

Pensar en una nueva constitución es imaginar un futuro deseado y, por lo tanto, los chilenos tenemos que definir los principios que inspiran esa Constitución. La Constitución define los valores y principios que orientan la convivencia, y la estructura de poder del Estado y las instituciones para avanzar en esa dirección.

Es muy relevante que los ingenieros se ocupen con mayor intensidad de los temas políticos. Para contribuir al desarrollo integral de Chile es indispensable mejorar su formación con una visión interdisciplinaria que complemente los temas estrictamente técnicos.

Necesitamos más profesionales de la ingeniería dedicados a elaborar políticas públicas y estrategias de desarrollo de largo plazo; necesitamos más evidencia y cálculos numéricos, necesitamos más ciencia. Este debate constitucional es una oportunidad para asumir mayor responsabilidad ciudadana. Los ingenieros podemos aportar en una estrategia de desarrollo de largo plazo, y esta debe armonizarse con los principios democráticos, de participación, igualdad y diversidad que emanen de la nueva Constitución.

Pensar el futuro es una disciplina de creciente importancia en el mundo, especialmente en los países desarrollados. En Chile, el Senado ha constituido la Comisión de Futuro, de alto valor educativo. También hemos creado el Consejo Chileno de Prospectiva y Estrategia para ayudar a elaborar una mirada estratégica, con deliberación amplia. El análisis de las tendencias mundiales, el diseño de escenarios alternativos, y una estrategia de largo plazo son esenciales para el buen Gobierno.

Una variedad de procesos complejos se está desplegando e interactuando simultáneamente, en el mundo y en Chile, y exigen un seguimiento y análisis para discernir sus consecuencias: el cambio tecnológico acelerado, la digitalización, la amenaza medio ambiental, los conflictos geopolíticos, la irrupción de nuevas generaciones con otros valores, el movimiento femenino.

Chile tiene una oportunidad de pensar su futuro acompañando el debate sobre la nueva Constitución. Por ello, algunos hemos propuesto incluir en la Constitución el concepto de la función anticipatoria del Estado. La Constitución debiera incluir los derechos de las nuevas generaciones, de modo que las decisiones públicas estén informadas y contemplen los efectos en hijos, nietos y bisnietos.

Es un momento muy especial, por tanto, entender la Convención como un instante decisivo para pensar permanentemente en la construcción de futuro. Podemos contribuir a perfilar el país que deseamos en 2040-2050.

#### **ANALIZAR EL CONCEPTO DE EXTRACTIVISMO Y DEFINIR UNA NUEVA ESTRATEGIA MINERA**

El documento elaborado por el Colegio de Ingenieros es de alta calidad como expresión de los aportes de la Ingeniería, y este encuentro del Instituto de Ingenieros agrega mayor valor. Una de las bondades del texto presentado es que reconoce los avances de generaciones

anteriores, tomando en cuenta la historia. En el caso de la minería, las propuestas constitucionales se afincan en dos anclajes, la Reforma Constitucional de la Nacionalización del cobre de 1971 y el proyecto de nueva Constitución que la presidenta Bachelet envió al Congreso en 2017. O sea, reivindica y respeta esas dos etapas.

Coincidiendo con las definiciones prescritas en ambos momentos constitucionales, y que espero se mantengan, es necesario un debate esclarecido para elucidar el concepto de extractivismo. Hay un sector de la ciudadanía que cuestiona la actividad minera en cuanto extrae recursos naturales con escasa elaboración, destruye la naturaleza y retiene escasa proporción de las utilidades, especialmente en el cobre. Es imperioso informar sobre los datos y avances, la complejidad de los desafíos productivos y sugerir como potenciar el avance tecnológico, la ampliación del capital humano, la creación de capacidad nacional para trascender estos desafíos. Hay que descifrar el concepto de extractivismo y desvirtuar su connotación negativa, corregir lo que hay que corregir, y trazar nuevas metas.

Es útil para la deliberación de la Convención relevar cómo el cambio tecnológico y las metas ambientales del mundo brindan una gran oportunidad para la minería chilena. Nuestras actividades de futuro tienen sinergia con la economía del futuro a través de la energía renovable, el litio, el cobre verde, y contribuyen de manera decisiva a la meta global de cero emisiones en 2050.

Ese relato debe sustentar el nuevo esfuerzo de aumentar la capacidad nacional que aproveche las enormes inversiones que se materializarán y participar en las innovaciones de la electrificación y la electromovilidad, a través del cobre, del litio, las baterías, las energías renovables, solar, hidrógeno verde, la desalación de agua con tecnologías avanzadas. La crítica sin propuesta sirve poco.

También debemos advertir los riesgos de una política errada que ignore la realidad global y cause una caída de la inversión y de la productividad. Hay que estudiar permanentemente el avance de China, su estrategia e impacto global de mediano y largo plazo para adelantarse y articular formas de asociaciones favorables a Chile. Es muy alto el porcentaje que estamos exportando a China, nos expone en caso de un giro. Con respecto a las fundiciones, el grueso está en China, y hay proyecciones que muestran que en 2030-40 estaríamos exportando el 70% de cobre como concentrado, y eso es insostenible. Hay

que actuar ya, crear otras empresas que se dediquen a fundición y refinación. También debemos monitorear cómo crecerá la producción de cobre en el Congo y otros países competidores, y cómo mantener el 28% de la producción mundial, con 9 millones de toneladas en 2050. Son cifras enormes. En la COP26 se convino que en 2030 el 80% de las fuentes de energía fueran renovables. Chile, planteó allí que el hidrógeno verde aportaría el 20% de nuestros combustibles en 2040. ¿Cómo podemos cumplir estos enormes retos?

Chile ha estado trabajando en una estrategia minera al 2050, hay que dar valor al hecho de que pensemos a largo plazo, y poner en conocimiento de los convencionales y de la ciudadanía.

### TRES OBSERVACIONES PARA MEJORAR EL TEXTO DEL COLEGIO DE INGENIEROS

Quisiera ahora señalar tres puntos específicos en royalty, agua y litio.

#### Royalty

Coincidió con los criterios definidos para una política tributaria que otorgue estabilidad. Muchas de las ideas planteadas en el Informe del Colegio no competen a la Convención Constitucional, sino a la Ley. Es bueno entonces que el documento contenga un anexo con propuestas de políticas. Debemos tener presente que 2023 termina la invariabilidad tributaria, y se debe estudiar seriamente cómo actuar, sin improvisar.

Respecto del texto del Colegio, creo que debe afirmar claramente que es necesario aumentar la proporción de excedente que queda en Chile. La palabra Royalty debe incluirse. La política tributaria es un instrumento indispensable para captar un excedente mayor, expandir la capacidad nacional, y diversificar la producción y crecer rápido y de manera sustentable.

Además, comparto lo que señala el Informe del Colegio, en cuanto a elevar las patentes de las concesiones inactivas o recuperar concesiones inactivas para alentar la exploración y explotación.

#### Agua

En el tema del agua el Informe del Colegio de Ingenieros se inclina por “confirmar la propiedad o derecho sobre el agua de mar desalada para las compañías mineras que han

hecho fuertes inversiones.” En la nueva Constitución se consagrará que el agua es un bien nacional de uso público, en todas sus formas; no puede hacerse una excepción para el agua de mar desalada. A quien invierte se le concesionan los derechos de uso, pero no se puede entregar la propiedad ni el usufructo perpetuo, en medio de la nueva realidad de la humanidad y el particular impacto del cambio climático en nuestro país.

En el sector minero se ha propuesto alcanzar al 50% de agua desalada en sus procesos productivos en 2050, y eso supone otorgar las garantías necesarias a las empresas para que inviertan. Pero también debe atenderse a la necesidad de planificar el otorgamiento de derechos, esto no puede ser una carrera de empresas o personas individuales. No podemos terminar con mil plantas desaladoras en todo el borde costero.

¿Dónde radica la responsabilidad de un política nueva y enérgica en materia de aguas? Pronto el MOP se transformará en el ministerio encargado de los recursos hídricos. Y sobre él existirá un Consejo o Autoridad superior del agua. La desalación debe planificarse y acelerarse, puede ser empleando la Ley de Concesiones. O crear una empresa pública, o modificar ECONSA para actuar más allá de las Sanitarias. Además, las grandes inversiones que Chile deberá realizar en desalación también pueden crear y mantener una demanda suficiente para desarrollar capacidad industrial en esta área y aprovechar economías de escala.

### Litio

En el Informe del Colegio de Ingenieros se propone que el Litio sea concesionable. La norma actual, impuesta en la constitución de 1980, fija la no concesionabilidad. Dudo que esta Norma se cambie. Soy partidario de explorar la creación de una empresa pública, separada de Codelco, que puede asociarse con privados. Conviene que Codelco concentre sus capacidades en los enormes proyectos de cobre.

*En conclusión:* Necesitamos una nueva estrategia minera, un nuevo relato que integre los desafíos globales, una misión que fortalezca la capacidad nacional para el desarrollo en el siglo XXI. Esa es la mejor contribución al desafío que abre una nueva Constitución.

*A continuación, don Ricardo Nicolau del Roure y don Elías Arze finalizan el Foro en los siguientes términos.*

### Sr. Ricardo Nicolau del Roure.

—Muchas gracias, Sergio, brillante la exposición, muy bueno el resumen, una visión integral y holística del problema, y además precisiones bien hechas. Creo que Elías Arze tomó nota de unas cosas que tu mencionaste muy precisas, que están en el Informe que merecen atención. Por otro lado, es muy importante lo señalado sobre las oportunidades que tiene el país con su minería en el escenario mundial en este momento, que es crucial para la humanidad.

Llegando al término de este Panel, las presentaciones y las conversaciones han sido todas importantes e interesantes, prácticamente copamos las dos horas que teníamos para esta actividad, hay algunas preguntas, no muchas, pero muy buenas, pero estamos con el tiempo ya cumplido y lo que haremos, como es costumbre, es que las vamos a recoger, incluso hay preguntas dirigidas a algunas personas en particular y van a quedar contestadas en la expresión escrita de este Foro. Este Foro se registra completo, y va a estar disponible en la página web del Instituto y en la Revista Chilena de Ingeniería, así que solo me resta agradecerles a los panelistas. Voy a dejar la palabra a Elías Arze, en representación del Colegio de Ingenieros, para que cierre este Foro, que tuvo por largos minutos más de 100 personas presentes y todavía hay un alto número que está participando.

De manera que, muchas gracias, ha sido muy interesante, muy provechoso. Don Elías Arze, tiene la palabra para que usted cierre.

### Sr. Elías Arze.

—En representación del Colegio de Ingenieros quiero agradecer al Instituto, a través de su Presidente Ricardo Nicolau, por haber acogido nuestro Informe y organizar este Foro. Agradezco asimismo a Gustavo, Willy y Sergio por acceder a este Panel, así como por sus interesantes comentarios.

No quisiera terminar sin referirme al resto de los Informes. El de Medio Ambiente está publicado en la página del Colegio [www.ingenieros.cl](http://www.ingenieros.cl), así como el de RRMM. El de RRHH está en sus etapas finales y próximo a ser publicado y el de Desarrollo Sostenible aún en elaboración.

Muchas gracias.

Fin del Foro.

## ENTREVISTA A INGENIEROS DESTACADOS



Como una necesidad de preservar la historia de ingenieros destacados y de la Ingeniería, la Comisión de Ingenieros en la Historia Presente, dio inicio a una serie de entrevistas, con el objeto señalado.

En esta ocasión se presentan dos extractos de las entrevistas realizadas al Ingeniero Álvaro Fischer Abeliuk y al Ingeniero Rodolfo Saragoni Huerta. Estas entrevistas, como las que se hagan en el futuro, serán objeto de una publicación especial.

**ÁLVARO FISCHER:**  
*Un curioso intelectual*

Por algún tiempo pensó estudiar Licenciatura en Matemáticas, pero su padre lo llevó a conversar con algunos ingenieros para que lo convencieran de estudiar Ingeniería, porque eso podía ampliar sus opciones de vida. Ahí descubrió que existía la carrera de Ingeniería Matemática en la Universidad de Chile, y entonces, cambió su opción original.

Entre las personas que influyeron en su formación académica y profesional recuerda a dos profesores: Igor Saavedra, gran profesor y eminente científico, y Arturo Arias, cuyas habilidades matemáticas le impresionaban y con cuyos intereses filosóficos coincidían. Con el tiempo, se transformó, además, en admirador de Moisés Mellado.

Ingresó a la Universidad de Chile en 1970 donde disfrutó de los ramos de matemáticas y de física, que, junto a la programación lineal y finanzas, le han servido para la vida.

Sus primeros pasos en el mundo de la ingeniería fueron acompañando algunos proyectos que realizaba Raúl Alcaíno Silva, aunque rápidamente comenzó una carrera de emprendedor con su hijo Raúl Alcaíno Lihn, lo que luego dio lugar a una amistad y sociedad que ha durado hasta ahora.

En su vida profesional se destaca el haber participado en la formación de varias empresas (Resiter, Clínica Las Nieves, Factoring SMB), haber adquirido algunas con otros socios (Le Grand Chic y Sandrico), y haber sido director de grandes Compañías como Empresas Copec, Farmacias Ahumada, Salcobrand y Cruz Blanca. Asimismo, fue presidente del Instituto de Ingenieros, de la Fundación Chile, de la Fundación Ciencia y Evolución, y actualmente es presidente del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (CTCI). Además, fue el primer Rector de la Universidad Tecnológica de Chile, INACAP y ha escrito tres libros sobre temas de evolución, que le han valido para ser invitado a dictar cursos y charlas, además de participar en sociedades internacionales y en congresos.

Los principales desafíos que ha tenido que enfrentar en su vida personal y profesional son el haber tenido que combinar sus intereses intelectuales con los profesionales, que, con el tiempo, ha podido conciliar y desarrollar, siendo ello una fuente de gran satisfacción para él. Entender el mundo que nos rodea ha sido un gran impulsor de su vida, y por



ello, siempre le interesó la filosofía, la historia, la ciencia en general, y el funcionamiento de las sociedades, en sus aspectos políticos, económicos y de convivencia social.

También, ha estado involucrado en la interfaz entre la empresa, la ciencia, la tecnología y la innovación, haciendo aportes a ese mundo desde la presidencia de la Fundación Chile y actualmente desde la presidencia del Consejo Nacional de CTCI.

Piensa que el rigor intelectual, que proviene de la formación ingenieril y matemático-científica aprendida en la universidad, ha sido clave en su desempeño en todas sus actividades, en particular, en las disciplinas distintas de la ingeniería.

En pocas palabras, se define como un ingeniero matemático por formación, emprendedor por profesión y curioso intelectual por vocación.

Entre sus experiencias memorables, señala haber tenido la fortuna de viajar a distintos lugares, y entre ellos tiene una particular predilección por la Patagonia chilena, la zona subantártica y la Antártica. Cada vez que ha estado allí, ha sentido una profunda satisfacción y el goce de sentir la vida. También recuerda con especial emoción los seminarios que se hicieron en 2009 para celebrar los 200 años del nacimiento de Darwin con más de 2000 asistentes.

De sus talentos, menciona a las matemáticas, que le gustaron desde muy pequeño. Aunque reconoce no tener un talento para la música, la disfruta mucho y ha participado en algunos coros. También se ha transformado en escritor de no ficción, de libros y también de artículos sobre temas de actualidad que ha publicado en la prensa. Se define como un judío, ateo y liberal en el más amplio sentido de la palabra, y cree que eso determina sus puntos de vista que comparte con personas que percibe como tolerantes y respetuosas del pensamiento de los demás.

Quisiera dejar como legado que vivir la vida con ansias por saber y entender, como él lo ha intentado, es interesante, estimulante y entretenido.

En su mirada de futuro opina que la ingeniería ha cambiado mucho. De lo mecánico a lo digital, de lo físico a

los datos, de las obras de infraestructura a los procesos, además de adentrarse cada vez más en los temas sociales, y eso le parece muy bien. Cree que todo seguirá cambiando y acota: *“Estamos en una era espacial, con satélites transmitiendo todo tipo de información a todo tipo de lugares, en el que la ingeniería es una protagonista; pero también estamos construyendo un universo digital paralelo al análogo en el que vivimos, en el que la realidad virtual o aumentada nos llevará a lo que ahora se denominan metaversos, todo lo cual estará mediado por la ingeniería. A mí todo eso me resulta fascinante”*.

Al finalizar, se refiere a las nuevas generaciones, a quienes les aconseja que tengan ductilidad de mente para ponerse en distintos escenarios, para ver las cosas de distintas maneras, para cambiar sus puntos de vista, y para intentar comprender y respetar los puntos de vista del resto.



## RODOLFO SARAGONI HUERTA:

*Humor, ironía y profundidad*

El ingreso del ingeniero Saragoni a la Universidad de Chile fue siguiendo la tradición familiar y además el ejemplo de su madre, egresada de Derecho de la Casa de Bello, en años que no era nada de fácil estudiar para las mujeres en la Universidad. De su padre, grabador reconocido internacionalmente y dibujante, heredó su amor por el arte y de él y su abuelo un gran amor por la ópera.

En sus estudios en el Liceo N° 8, Arturo Alessandri, tuvo como profesora de Física a la Sra. Ortrud Von Bischoffshausen, con lo que nació en él un entrañable amor por la Física, que lo guía en su quehacer hasta hoy día.

Su primer contacto con los terremotos se remonta al terremoto de La Ligua del 28 de marzo de 1965, en que participó como estudiante de ingeniería voluntario en el grupo de la FECH. En la ciudad de Llay-Llay le correspondió ayudar a los damnificados en la reconstrucción construyendo mediaguas. Fue el primero de muchos que inspeccionaría después alrededor del mundo, pudiendo apreciar el sufrimiento de los damnificados cuando pierden a sus personas queridas y sus viviendas. Ello, sumado a



que el terremoto había sido registrado en el edificio de Física de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, sellaron su interés por la naciente ingeniería sísmica.



El profesor Luis Rosemberg, de la Sección Estructuras, le propuso una Memoria empleando el registro de movimiento fuerte de este terremoto, para analizar el efecto dinámico, interacción suelo – estructura. Luego fue contratado por la Sección Estructuras del recién creado Departamento de Obras Civiles de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile donde desarrolló su carrera académica por más de 50 años.

Posteriormente a su titulación en 1968, fue comisionado por la Universidad de Chile a través del Convenio Chile-California para doctorarse en la Universidad de California, Los Ángeles (UCLA). En su estadía trabajó con el profesor Gary Hart en la generación de terremotos artificiales. Su tesis doctoral realizada hace 50 años, aún se cita todos los meses mostrando su carácter seminal en el análisis tiempo historia. Trabajo además con el profesor Martín Duke, gran impulsor del Programa Chile – California en ingeniería sísmica, que permitió formar a varios académicos de la Universidad de Chile.

A su regreso a Chile, gracias a la tesis de magister de ingeniería sísmica de Rodrigo Araya, con quien definió el Potencial Destructivo o Intensidad Araya – Saragoni, citado internacionalmente en libros y publicaciones, constituyendo su máxima contribución a la ingeniería sísmica internacional, comparable a la intensidad definida por el profesor Arturo Arias. El Poder Destructivo se emplea en el diseño de importantes estructuras en Chile. El potencial destructivo predice además que los terremotos chilenos no son tan destructivos, no obstante, sus grandes magnitudes, comparados con los de California u otros países del mundo, abriendo con ello la posibilidad de desarrollar en Chile el diseño sísmico resiliente o de continuidad de operación después de ocurrido un mega terremoto.

Ello le ha significado ser nombrado miembro honorario de la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica. Su reconocimiento internacional se expresa además como Miembro Correspondiente a la Sociedad Mexicana de Ingeniería, Presidente de la Sociedad Iberoamericana de Ingeniería Sísmica y Premio OEA 1983 al Investigador Joven.

Posteriormente se dedicó a medir un terremoto con epicentro marítimo frente a Valparaíso, similar al que destruyó Santiago en 1647 y Valparaíso en 1906. El terremoto efectivamente ocurrió en 1985, comprobándose con ello

que los terremotos de Valparaíso ocurren cada  $83 \pm 9$  años por lo que ahora se sabe que el próximo de estos terremotos ocurrirá aproximadamente en 2060.

Esto marca el diseño sísmico chileno con un rasgo determinístico por esta alta frecuencia de ocurrencia de estos terremotos, a diferencia del probabilístico que se usa en EEUU.

Con los acelerogramas que se obtuvieron en 35 Estaciones en este terremoto se pudo verificar que los terremotos subductivos chilenos eran muy diferentes a los californianos, los que junto a los datos obtenidos en el terremoto de El Maule de 2010 confirmaron que los registros chilenos son diferentes a los norteamericanos. Una materia en la que Saragoni insistió por 50 años y que hoy ha internalizado la comunidad nacional.

Uno de los principales aportes en su carrera ha sido la formación de ingenieros, ya que como Profesor o Guía de Tesis de Título. Muchos de ellos son destacados y reconocidos académicos en ingeniería sísmica en las principales universidades del país y del extranjero.

En la recuperación de la democracia le correspondió desempeñarse por 4 años como Vicerrector Económico de la Universidad de Chile.

Como parte de su trabajo profesional, fundó S y S Ingenieros Consultores junto a Mauricio Sarrazin. En ella se han desarrollado los estudios de riesgo sísmico de proyectos icónicos del país como el Congreso Nacional, los edificios Costanera y Titanio en Santiago. La reconstrucción de los puertos de Valparaíso y San Antonio, el puente Chacao, el Manual de Puentes del Ministerio de Obras Públicas, Chuquicamata Subterránea, entre otros, y en el extranjero estudios en Dubái, Argentina, Perú y Honduras.

En su relación con otros ingenieros, destaca haber sido Presidente de la 16ª Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, Presidente de ACHISINA y Presidente de la especialidad de Ingeniería Civil del Colegio de Ingenieros de Chile.

Está casado con Yoly Biondi, educadora de párvulos y pintora, con quien tiene dos hijas y dos nietos. Se define como humanista, tolerante y cosmopolita, y según Tomás Guendelman, en una entrevista, de un “italian style”, en

que humor, ironía y profundidad son una sola cosa. Es muy aficionado a la paleoantropología y un gran admirador de Darwin. Dispone de una amplia colección de sus trabajos de geología, botánica y zoología.

Piensa que el mayor desafío de las próximas generaciones de estudiantes de ingeniería civil en la disciplina de ingeniería sísmica en Chile es el diseño sísmico resiliente, en que las estructuras se mantienen sin daño en continuidad de operación después del terremoto, en el que el Metro

de Santiago ha mostrado que es posible después de los terremotos de 1985 y 2010.

Como ingeniero reconoce un vacío generacional en el desarrollo de investigación aplicada endógena, investigación original desarrollada en el país, no la transferencia tecnológica, que es lo que mayoritariamente se hace hoy en día en el país. Concluye, manifestando con esperanza: *“cuando alcancemos esas alturas el país alcanzará su anhelado desarrollo sustentable”*.



ISSN 0716 - 2340



**ANALES  
DEL INSTITUTO  
DE INGENIEROS DE CHILE**

**Vol. 134, N° 1 - ABRIL 2022**

*“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. 134, N° 1, abril de 2022.**

### **Contenido**

**DISEMINACIÓN DE RESISTENCIA A ANTIBIÓTICO: RIESGOS ASOCIADOS EN EL REÚSO DE AGUAS SERVIDAS TRATADAS Y BIOSÓLIDOS ESTABILIZADOS PROVENIENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS.**

Pág. 1

Ana María Leiva, Gloria Gómez y Gladys Vidal.

**TOPOLOGICAL NAVIGATION AND LOCALIZATION IN TUNNELS-APPLICATION TO AUTONOMOUS LOAD-HAUL-DUMP VEHICLES OPERATING IN UNDERGROUND MINES.**

Pág. 13

Mauricio Mascaró, Isao Parra-Tsunekawa, Carlos Tampier and Javier Ruiz del Solar.

Editor

**Raúl Uribe Sawada**, Instituto de Ingenieros de Chile.

Comité Editorial

**Jorge Carvalho W.**, Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ACHISINA)

**Alexander Chechilnitzky Z.**, Asociación Interamericana de Ingeniería (AIDIS)

**Scarlett Vásquez P.**, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID)

**Roberto Gesche S.**, Sociedad Chilena de Geotecnia (SOCHIGE)

**Marisol Castro A.**, Sociedad Chilena de Ingeniería de Transporte (SOCHITRAN)

**Alonso Barraza San M.**, PMI Santiago Chile Chapter (PMI, Capítulo Chileno)

**Raúl Benavente G.**, Sociedad Chilena de Educación en Ingeniería (SOCHEDI)

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.

# DISEMINACIÓN DE RESISTENCIA A ANTIBIÓTICO: RIESGOS ASOCIADOS EN EL REÚSO DE AGUAS SERVIDAS TRATADAS Y BIOSÓLIDOS ESTABILIZADOS PROVENIENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS

Ana María Leiva<sup>1</sup>, Gloria Gómez<sup>2</sup> y Gladys Vidal<sup>3</sup>

## RESUMEN

*El reúso de aguas servidas tratadas (AST) y de biosólidos estabilizados (BE) provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas han sido considerados una alternativa factible para ser utilizados en la agricultura. A pesar de las múltiples ventajas, esta práctica puede contribuir a la diseminación de la resistencia a antibióticos, poniendo en riesgo la salud humana y del medio ambiente.*

*En este contexto, los nuevos desafíos para asegurar un reúso seguro de AST y BE en la agricultura deben ser enfrentados desde una perspectiva interdisciplinaria, incorporando la visión de diferentes actores. Es importante considerar la implementación de tecnologías avanzadas de tratamiento de AS que permitan obtener efluentes de calidad para un reúso seguro en la agricultura, así como también biosólidos para estos fines. En esta línea, es necesario promover políticas públicas que permitan mejorar las regulaciones y normativas asociadas al reúso de AST y BE y que incorporen la evidencia científica proveniente de la academia y la necesidad de resguardar seguridad y salud del medioambiente y las personas.*

*El objetivo de este artículo es presentar los principales riesgos asociados al reúso de AST y de BE, haciendo énfasis en la evidencia científica que existe a nivel mundial relacionada con la resistencia a antibióticos (RA).*

---

<sup>1</sup> Candidata a Doctor en Ciencias Ambientales mención Sistemas Acuáticos Continentales, Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental (GIBA-UDEC), Departamento de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad de Concepción. Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM).

<sup>2</sup> Bioingeniera, Diplomada en Análisis y Gestión del Medio Ambiente y Diplomada en Ciencia de Datos. Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental (GIBA-UDEC), Departamento de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad de Concepción. Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM).

<sup>3</sup> Ingeniera Civil Industrial mención Agroindustrias, Dra. en Ciencias Químicas (Programa Biotecnología Ambiental). Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental (GIBA-UDEC), Departamento de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad de Concepción. Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM).

# 1. QUÉ ES LA RESISTENCIA A ANTIBIÓTICOS

## 1.1 Qué es un antibiótico

Los antibióticos son sustancias químicas de origen natural o sintético que permiten combatir infecciones causadas por bacterias en los seres humanos y animales. Los antibióticos, ya sean citotóxicos o citostáticos para los microorganismos, permiten que las defensas naturales del organismo, como el sistema inmunológico, los eliminen. A menudo actúan inhibiendo la síntesis de una célula bacteriana, síntesis de proteínas, ácido desoxirribonucleico (ADN), ácido ribonucleico (ARN), por un agente desorganizador de la membrana u otras acciones específicas. Los antibióticos también pueden entrar en la pared celular de las bacterias uniéndose a ellas, utilizando los mecanismos de transporte dependientes de la energía en los sitios ribosomales, lo que posteriormente conduce a la inhibición de la síntesis de proteínas (Zaman *et al.* 2017).

El tratamiento con antibióticos es uno de los principales enfoques de la medicina moderna que se utiliza para combatir las infecciones. La "era dorada" de los antibióticos se extendió desde la década de 1930 hasta la de 1960, lo que dio lugar a la fabricación de diversos antibióticos, que son utilizados hasta la fecha para el tratamiento de enfermedades. Desafortunadamente, esta era terminó, ya que los investigadores no pudieron mantener el ritmo del descubrimiento de antibióticos frente a los patógenos resistentes emergentes. El fracaso persistente para desarrollar o descubrir nuevos antibióticos y el uso descontrolado de antibióticos son factores asociados con la aparición de resistencia a los antibióticos (Aslam *et al.* 2018)

## 1.2 Resistencia a antibióticos

Actualmente, la resistencia a antibióticos (RA) es uno de los principales problemas de salud pública que amenaza la prevención y el tratamiento efectivo de infecciones causadas por

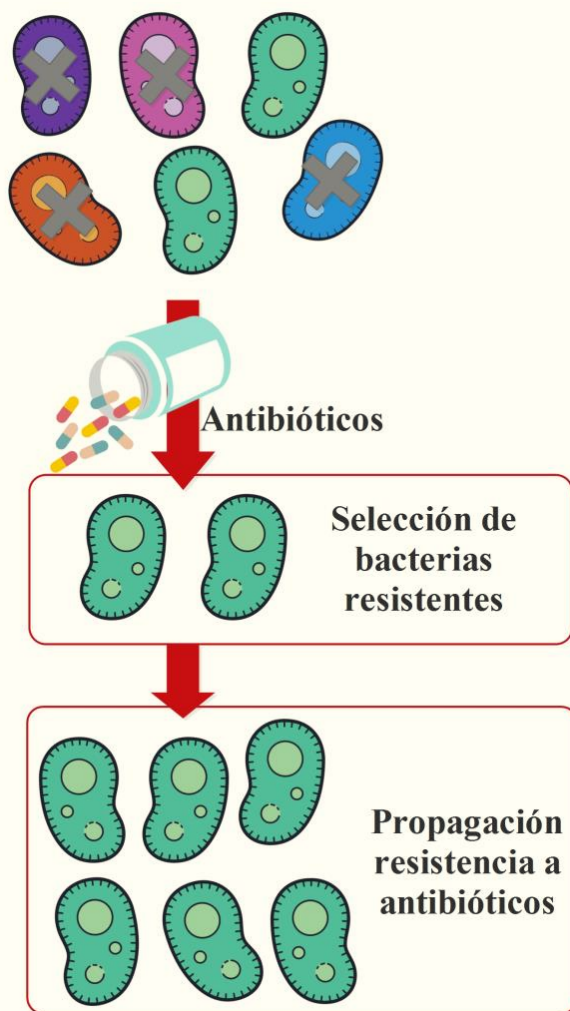
bacterias, parásitos, virus y hongos, los cuales ya no son susceptibles a los medicamentos comúnmente utilizados para su tratamiento. Entre estos, la resistencia a los antibióticos por parte de las bacterias es de suma urgencia, pues éstas han ido desarrollando resistencia a diferentes antibióticos, utilizados en diferentes áreas por ya varias décadas (Prestinaci *et al.* 2015). Este fenómeno biológico ocurre en la naturaleza cuando los microorganismos son expuestos a la presencia de un antibiótico. Bajo esta presión selectiva, se inhibe el crecimiento de los microorganismos susceptibles mientras que se seleccionan los microorganismos que son naturalmente resistente o que han adquirido esta resistencia. La Figura 1 muestra de manera esquemática la selección de bacterias resistentes a antibiótico. Los responsables de otorgar esta característica son los genes de resistencia a antibiótico (GRA) los cuales codifican proteínas que participan en diferentes mecanismos de resistencia como la inhibición enzimática, alteración del blanco y alteraciones en la permeabilidad de la membrana celular (Kidwell 2001; Oromí 2014).

Las principales causas asociadas a la diseminación de RA son:

- Uso excesivo de antibióticos tanto en la medicina humana y animal como también en la industria ganadera, acuícola y agrícola.
- Malas condiciones de higiene y saneamiento.
- Aumento de las migraciones a nivel mundial.
- Liberación de estos compuestos al medio ambiente.

De acuerdo a un estudio realizado por OMS (2018), la tasa de consumo de estos compuestos a nivel mundial varía ampliamente entre los diferentes países con valores que fluctúan entre 4-64 dosis diaria definida (DDD)/1000 habitantes por día. En Chile, Bavestrello and

Cabello (2011) estimaron que las tasas de consumo de antibióticos entre los años 2000-2008 fluctuaron entre 7,6-10,1 DDD/1000 habitantes por día con un aumento de 22% entre estos años. Sin embargo, en este estudio, sólo se consideraron unidades de envases vendidas en farmacias privadas o comerciales y no consideraron los entregados bajo prescripción médica en Centros de Salud, públicos y/o privados. A nivel mundial, se prevé que la tasa de consumo de antibióticos aumente en un 200% si no existen cambios en las políticas públicas (Klein *et al.* 2018).



**Figura 1.** Selección de bacterias resistentes a antibióticos (BRA).

## 2. IMPACTO AMBIENTAL DE LA RESISTENCIA A ANTIBIÓTICOS

En la actualidad, el medio ambiente es considerado como un potencial actor en la diseminación de RA. Entre las principales fuentes asociadas al medio ambiente y el uso de antibiótico se encuentran (Singer *et al.* 2016):

- Acuicultura
- Ganadería
- Aguas servidas (AS) domésticas y provenientes de recintos hospitalarios.

De acuerdo con Millanao *et al.* (2018), del total de antibióticos importados a Chile (tetraciclinas, fenicoles y quinolonas principalmente) entre 1998 y 2015, un 95% (7.775 toneladas) están destinados a uso veterinario y sólo un 5% del total (381 toneladas) son utilizados para tratamientos clínicos humanos. Debido a esto, la acuicultura y la ganadería parecieran ser las principales actividades responsables de la diseminación de RA en el medio ambiente. Sin embargo, las AS junto con sus cuerpos de aguas receptores, están siendo investigados como posibles fuentes que contribuyen a esta problemática (Xu *et al.* 2016; Kumar and Pal, 2018; Harrabi *et al.* 2018; Huang *et al.* 2019), más aún, se considera que una de las principales presiones para la calidad del agua es la presencia de antibióticos en las AS (GEO6 2019).

## 3. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS COMO FUENTE DE DISEMINACIÓN DE RESISTENCIA A ANTIBIÓTICOS

### 3.1 Qué son las aguas servidas

Las AS corresponden a una mezcla de compleja de residuos líquidos originados a partir de diferentes actividades humanas ya sean domésticas o industriales (Mara 2004). Dentro de los principales contaminantes que conforman las AS, se encuentran las grasas y aceites, sólidos en suspensión (SS), materia orgánica

(MO) biodegradable y refractaria, nutrientes (nitrógeno y fósforo), metales pesados, microorganismos patógenos (virus y bacterias), sólidos inorgánicos disueltos. En las aguas servidas existe una gran cantidad de compuestos en bajas concentraciones que se denominan microcontaminantes. Dentro de estos compuestos microcontaminantes, se encuentran contaminantes emergentes, tales como fármacos en general, pesticidas, artículos de cuidado personal (shampoo, pastas de dientes, etc), antimicrobianos y los denominados GRA (Dulekgurgen *et al.* 2006; Metcalf and Eddy 2003).

Para eliminar muchos de estos contaminantes, las AS son llevadas a las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) donde se son tratadas bajo diversos tratamientos de manera secuencial, y que incluyen principalmente un pre-tratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario (Henze *et al.* 2002).

### 3.2 Diseminación de RA en PTAS

Dependiendo del tipo de tecnología utilizada, las PTAS están diseñadas para alcanzar eficiencias de eliminación de MO, nutrientes y patógenos que varían entre 80-95%, 40-90% y 80-99%, respectivamente (Chai *et al.* 2019; Neumann *et al.* 2016; Vera *et al.* 2013). Sin embargo, estas tecnologías no son capaces de eliminar contaminantes emergentes como los antibióticos, bacterias resistentes a antibióticos (BRA) y GRA (Christou *et al.* 2017). Más aún, se ha evidenciado que las PTAS contribuyen a la diseminación de RA, principalmente durante el tratamiento secundario donde se lleva a cabo la degradación microbiana de la MO (Rizzo *et al.* 2013; Manaia *et al.* 2018) mediante sistemas de tratamiento biológicos. La tecnología biológica de tratamiento secundario, más utilizada, es la de lodos activados (LA), proceso biológico de tratamiento aeróbico de cultivo suspendido de donde la MO es eliminada por bacterias heterótrofas aeróbicas contenidas en un reactor (Vera *et al.* 2013).

Las PTAS reciben efluentes que contienen una gran variedad de bacterias (de origen humano o ambiental) que interaccionan con las bacterias encargadas del tratamiento (bacterias aeróbicas heterótrofas). Por lo tanto, una alta densidad celular combinada con una rica fuente de carbono y nutrientes y presencia de antibióticos ejerciendo una presión selectiva sobre las bacterias son las condiciones ideales para que ocurran mecanismos que permitan la diseminación de RA (Rizzo *et al.* 2013; Leiva *et al.* 2021).

Algunos autores han determinado que luego del tratamiento secundario, los efluentes generados presentan una carga mayor a  $10^{12}$  BRA/día o  $10^{18}$  GRA/día (VazMoreira *et al.* 2013; Manaia *et al.* 2016, 2018). Por otro lado, luego de la desinfección (posterior a tratamiento secundario), ya sea por cloración, radiación UV u ozono (Alexander *et al.* 2016), la carga bacteriana se reduce entre 2-4 unidades logarítmicas (uLog). Sin embargo, a pesar de esta reducción, algunos estudios han evidenciado que la abundancia de GRA aumenta luego del proceso de desinfección y que algunas BRA entran en estado de latencia y luego se recuperan cuando se liberan los estresores (Becerra-Castro *et al.* 2016; Sousa *et al.* 2017; Moreira *et al.* 2018).

Finalmente, el efluente generado por la PTAS es vertido directamente a cuerpos de agua o puede ser utilizado para la irrigación en la agricultura. Adicionalmente, durante el tratamiento secundario se generan lodos, los cuales son estabilizados y llevados a rellenos sanitarios, pero de igual manera, estos se han utilizado para la enmienda de suelo en la agricultura ya que son una alternativa para el reciclaje de la materia orgánica, macro y micronutrientes y al mismo tiempo reducen el uso de fertilizantes artificiales (Venegas *et al.* 2018). Por tanto, en la actualidad, las PTAS han estado implementando los principios de la economía circular (EC) en sus cadenas de valor de productos reconociendo las AST y los



biosólidos estabilizados (BE) (Mansilla *et al.* 2021).

#### **4. DESAFIOS DEL REUSO DE AGUAS SERVIDAS TRATADAS Y USO DE BIOSÓLIDOS ESTABILIZADOS EN LA AGRICULTURA PROVENIENTES DE ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS SERVIDAS**

##### **4.1 Qué es el reúso de aguas servidas y biosólidos estabilizados**

El uso de AST para riego se ha propuesto como una fuente alternativa para enfrentar la escasez hídrica. En Europa se han tomado medidas en cuanto a esta herramienta y el Consejo Europeo ha adoptado un reglamento para facilitar el reúso seguro de estas AS para riego agrícola (Consejo Europeo 2020). En Israel, se ha implementado con éxito esta práctica desde hace 60 años, debido principalmente a la amplia utilización de la tecnología de riego por goteo, reusando un 86% de las AST, la cual sirve para proporcionar el 50% del agua de riego para el país, y logrando un incremento de la productividad agrícola de 1600% (Tal 2016).

Pero no solamente Israel ha implementado este sistema, pues también ha tomado relevancia en zonas con escasez hídrica, como Pakistán donde el 26% de la producción nacional de hortalizas es regada con AST. Asimismo, en Ghana se utiliza el riego con AS diluidas el cual se desarrolla en alrededor de 11.500 ha (hectáreas) y en México se riegan alrededor de 260.000 ha con AS en su mayoría sin tratamiento (Pedrero *et al.* 2010).

La implementación del riego en zonas agrícolas con AST presenta las siguientes ventajas:

- Reducir la demanda sobre el recurso hídrico.
- Reducir la degradación de los ecosistemas acuáticos debido al vertido de AS.

- Obtener elementos valiosos para los cultivos, tales como minerales, materia orgánica y nutrientes.

Asimismo, el reúso de BE en la agricultura permite el abono de los suelos agrícolas aportando nutrientes y materia orgánica para el crecimiento de las hortalizas, árboles frutales y otros cultivos.

Es por estas ventajas que el reúso en agricultura, se presenta como una alternativa económicamente viable que podría sustituir los requerimientos de nutrientes y agua de los cultivos (Norton-Brandão *et al.* 2013). A pesar de esto, se deben asegurar una calidad suficiente para no poner en riesgo la salud de la población ni la de los ecosistemas, debido a que aún, existen grandes interrogantes relacionada con la presencia de antibióticos, BRA y GRA y la diseminación de RA hacia los cultivos que siguen sin ser respondidas (Christou *et al.* 2019).

##### **4.2 Riesgos asociados a la resistencia a antibióticos en las AS y BE**

Uno de los principales riesgos asociados a la EC en términos de reúso de AST y BE es la propagación de antibióticos y GRA a los cultivos agrícolas. Esto representa una preocupación especial para la salud humana debido a la entrada en la red alimentaria humana y por la diseminación de la RA en todo el mundo (Christou *et al.* 2017a). Recientemente, diferentes autores han centrado sus investigaciones en esta área y han investigado la ocurrencia y destino de antibióticos y GRA en diferentes partes de especies vegetales y en suelos utilizados con fines agrícolas (Chen *et al.* 2016; Piña *et al.* 2018; Yang *et al.* 2018; Christou *et al.* 2019; Cerqueira *et al.* 2019a, Mansilla *et al.* 2021). La acumulación potencial de antibióticos en el suelo y las plantas depende de la sorción/desorción y los procesos bióticos y abióticos que influyen en la concentración disponible para la biodegradación, el transporte

y la absorción por las plantas (Christou *et al.* 2017b). Algunos antibióticos son moléculas polares ionizables que interactúan con la materia orgánica del suelo, las superficies minerales y la materia orgánica disuelta (Malchi *et al.* 2014). En algunos estudios se han informado concentraciones de sulfametoxazol (SMX) y tetraciclina (TC) en suelo regado con AST que variaron entre 0,4-2,0 y 12,7-145,2  $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{DW}$ , respectivamente (Christou *et al.* 2017a, Malchi *et al.* 2014). En el caso de la aplicación de BE al suelo, las concentraciones de ciprofloxacina (CIP) y azitromicina (AZM) fueron cercanas a 0,4 y 0,03  $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{DW}$ , respectivamente (Sidhu *et al.* 2019).

Por otra parte, se ha reportado que los cultivos pueden absorber antibióticos de forma pasiva y luego translocarse y concentrarse en las partes aéreas de las plantas como hojas y frutos (Norton-Brandão *et al.* 2013, Mansilla *et al.* 2021), comprometiendo la entrada de estos compuestos en la cadena alimentaria humana (Becerra-Castro *et al.* 2015). Al igual que la acumulación en el suelo, la absorción de antibióticos por los cultivos está determinada por las propiedades fisicoquímicas, por el genotipo de la planta y el estado fisiológico (20). Se ha detectado SMX y ofloxacino (OFL) en diferentes partes comestibles, en el grano de trigo (*Triticum aestivum*) las concentraciones variaron entre 0,6-2,3  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (Franklin *et al.* 2015). Para la lechuga (*Eruca sativa*), la concentración de OFL fue de 0,1  $\mu\text{g}/\text{kg}$  y para la zanahoria (*Daucus carota*), la concentración alcanzada de SMX varió entre 0,05-0,2  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (Marsoni *et al.* 2014).

La aplicación de BE y AST a suelos agrícolas también puede aumentar la exposición humana a GRA (Urrea *et al.* 2019). Estos pueden ser transferidos por mecanismos de transferencia horizontal de genes (THG) cambiando los microbiomas del suelo y de las plantas y haciéndolos potencialmente patógenos (Cerqueira *et al.* 2019b) Además, las bacterias

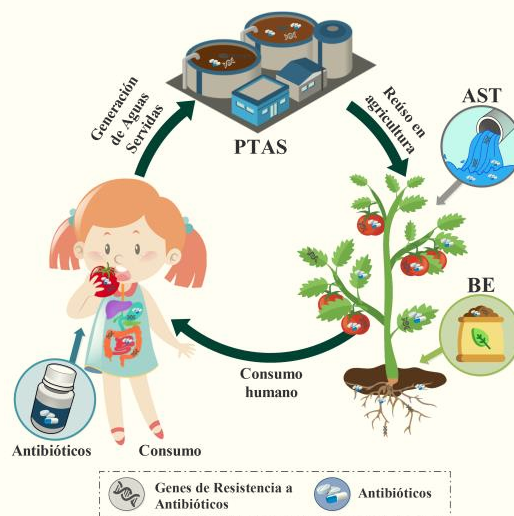
son capaces de ingresar al sistema vascular de la planta, para translocarse a las partes aéreas (hojas, frutos) y colonizar el microbioma endofítico o perifítico (Piña *et al.* 2018). Muchos estudios revelaron la internalización potencial de GRA por plantas irrigadas con AST o que crecen en suelos modificados con BE (Chen *et al.* 2016; Manaia *et al.* 2018; Yang *et al.* 2018; Cerqueira *et al.* 2019a). Entre los GRA más reportados encontramos *int11*, *sul1* y *tetM*. Estos genes tienen una relevancia clínica y ambiental. Por ejemplo, *int11* codifica una integrasa que tiene un papel importante en los mecanismos THG. Comparando la abundancia absoluta de GRA en las diferentes muestras de AST y BE, se puede determinar que la presencia de estos elementos es mayor en las muestras de suelo.

Cerqueira *et al.* (2019b) observaron que las abundancias absolutas de algunos GRA son entre 3,0 a 17 veces mayores en el suelo que en la fruta cuando irrigaban tomates (*Lycopersicon esculentum*) con AST. La misma tendencia fue observada por Yang *et al.* (2018), en el cultivo de lechugas (*Lactuca sativa*) y zanahorias (*Daucus carota*) utilizando BE como enmienda del suelo. En este caso, las abundancias de *int11* y *sul1* fueron 12-15% y 15-20% más altas en el suelo que en las hojas. Asimismo, Cerqueira, *et al.* (2019a) observaron que las abundancias de *int11* y *sul1* en haba (*Vicia faba L*) fueron mayores a 62-97% en suelo que en fruto. Estos resultados podrían indicar que la calidad del suelo puede verse afectada por la presencia de GRA, en particular los microorganismos presentes en el suelo (Hurtado *et al.* 2017). Por esta razón, se necesitan futuras investigaciones en esta área para determinar las graves implicaciones para la salud humana de la entrada en la red alimentaria de estos elementos (Christou *et al.* 2017).

## 5. POTENCIALES EFECTOS PARA LA SALUD HUMANA Y EL MEDIOAMBIENTE

La Figura 2 muestra un diagrama esquemático de diferentes vías de difusión de antibióticos y GRA debido a la implementación del reúso de AST y BE en la agricultura. A pesar de los numerosos estudios que han investigado la aparición de antibióticos y GRA en AST y BE, solo algunos autores se han centrado en determinar los impactos potenciales de su uso para fines agrícolas (Prosser and Sibley 2015; Chen et al. 2016; Spataro *et al.* 2019). La evaluación de las posibles implicaciones ecológicas es necesaria para hacer un uso adecuado de estos recursos sin riesgos para la salud humana y el medio ambiente. Spataro et al. (2019) evaluaron los riesgos ecológicos potenciales preliminares de AST determinando los cocientes de riesgo (RQs) para diferentes antibióticos como amoxicilina (AMX), CIP, SMX y clorotetraciclina (CTC). En este caso, los RQ se calcularon utilizando la relación entre las concentraciones ambientales medidas (MEC) y las concentraciones previstas sin efecto (PNEC) de cada compuesto. Los resultados generales de este estudio destacaron que las concentraciones de antibióticos detectadas en AST plantean un riesgo potencial alto para el medio ambiente con valores de RQ superiores a 1. Asimismo, Prosser and Sibley (2015) determinan el peligro para la salud humana de las concentraciones de diferentes contaminantes emergentes, incluidos los antibióticos, en tejido vegetal cultivado en suelos con BE modificados o regado con AST. Para ello, estimaron los valores de ingesta diaria y los compararon con ingestas diarias aceptables. Para BE, los cocientes de riesgo asociados a CIP y norfloxacino (NFL) fueron superiores a 0,1. El mismo comportamiento se observó para AST donde estos valores asociados a eritromicina (ERN), NFL, sulfametazina (SMZ), SMX y tetraciclina (TC) también fueron menores de 0.1. Estos resultados indican un bajo riesgo para la salud humana. A

pesar de que los cocientes de peligro de los compuestos individuales no son relevantes, un efecto sinérgico o aditivo podría presentar un peligro y, por esta razón, es necesario realizar más investigaciones en esta área. En cuanto a los riesgos para la salud humana y el medio ambiente asociados a la ocurrencia de GRA en AST y BE, hasta la fecha existe una falta de información. Chen et al. (2019) calcularon las puntuaciones de riesgo de utilizar BE como enmiendas al suelo que contiene concentraciones de antibióticos. Esta puntuación se define como un índice relativo que compara la co-ocurrencia de secuencias correspondientes a GRA, elementos genéticos móviles y patógenos putativos entre suelos modificados con estiércol, modificados con composta y suelos de control (Oh *et al.* 2018). Este estudio indicó que el suelo enmendado con BE redujo la puntuación de riesgo de los suelos enmendados con BE y es similar a los suelos de control. A pesar de estos resultados, Manaia (2017) consideró que se necesita urgentemente un modelo cuantitativo para determinar el riesgo de transmisión de resistencias del ambiente al ser humano y debe basarse en BRA y GRA que sean capaces de colonizar y proliferar en el cuerpo humano.



**Figura 2.** Diseminación de la resistencia a antibiótico por medio del reúso de AST y BE. Adaptada de Leiva et al. (2022).

## 6. CONSIDERACIONES FINALES

Debido al escenario de escasez hídrica y potenciar suelos productivos en la agricultura, el reúso de AST y BE va a ser una práctica cada vez más utilizadas en los países. Sin embargo, preguntas relacionadas a los riesgos asociados a la diseminación de la resistencia en el medio ambiente limitan su aplicación en la agricultura. En este contexto, los nuevos desafíos para asegurar un reúso seguro de AST y BE en la agricultura deben ser enfrentados desde una perspectiva interdisciplinaria e incorporando la visión de diferentes actores. En esta línea, es necesario promover políticas públicas que permitan mejorar las regulaciones y normativas asociadas al reúso de AST y BE donde se incorpore la evidencia científica existente, que promueva la implementación de tecnologías avanzadas de tratamiento de AS que permitan obtener efluentes de calidad para un reúso seguro en la agricultura, así como una fuerte fiscalización de estas prácticas.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen al Proyecto ANID/FONDAP/15130015. A. M. Leiva agradece a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID)/Programa Beca/Doctorado Nacional/2019-21191116.

## 8. REFERENCIAS

Alexander J., Knopp G., Dötsch A., Wieland A., Schwartz T. 2016. Ozone treatment of conditioned wastewater selects antibiotic resistance genes, opportunistic bacteria, and induces strong population shifts. *Science of The Total Environment*, **559**, 103–112.

Aslam B., Wang W., Arshad M.I., Khurshid M., Muzammil S., Rasool M.H., Baloch Z. 2018. Antibiotic resistance: a rundown of a global crisis. *Infection and Drug Resistance*, **11**, 1645.

Bavestrello L., Cabello A. 2011. Consumo comunitario de antimicrobianos en Chile, 2000-2008. *Revista Chilena de Infectología*, **28**(2), 107–112.

Becerra-Castro C., Lopes A.R., Vaz-Moreira I., Silva E.F., Manaia C.M., Nunes O.C. 2015. Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. *Environment International*, **75**, 117–135.

Becerra-Castro C., Macedo G., Silva A.M.T., Manaia C.M., Nunes O.C. 2016. Proteobacteria become predominant during regrowth after water disinfection. *Science of The Total Environment*, **573**, 313–323.

Cerqueira F., Matamoros V., Bayona J., Elsinga G., Hornstra L.M., Piña B. 2019a. Distribution of antibiotic resistance genes in soils and crops. A field study in legume plants (*Vicia faba L.*) grown under different watering regimes. *Environmental Research*, **170**, 16-25.

Cerqueira F., Matamoros V., Bayona J., Piña B. 2019b. Antibiotic resistance genes distribution in microbiomes from the soil-plant-fruit continuum in commercial *Lycopersicon esculentum* fields under different agricultural practices. *Science of The Total Environment*, **652**, 660-670.

Chai H., Xiang Y., Chen R., Shao Z., Gu L., Li L., He Q. 2019. Enhanced simultaneous nitrification and denitrification in treating low carbon-to-nitrogen ratio wastewater: Treatment performance and nitrogen removal pathway. *Bioresource Technology*, **280**, 51–58.

Chen J., Wei X.D., Liu Y.S., Ying G.G., Liu S.S., He L.Y., Su H.Ch., Hu L.X., Chen F.R., Yang Y.Q. 2016. Removal of antibiotics and antibiotic resistance genes from domestic sewage by constructed wetlands: Optimization of wetland substrates and hydraulic loading. *Science of The Total Environment*, **565**, 240–248.

Chen J., Deng W. J., Liu Y.S., Hu L.X., He L.Y., Zhao J.L., Wang T.T., Ying G.G. 2019. Fate and removal of antibiotics and antibiotic resistance genes in hybrid constructed wetlands. *Environmental Pollution*, **249**, 894–903.

- Christou A., Agüera A., Bayona J.M., Cytryn E., Fotopoulos V., Lambropoulou D., Manaia C.M., Michael c., Revitt M., Schröder P., Fatta-Kassinoshk D. 2017a. The potential implications of reclaimed wastewater reuse for irrigation on the agricultural environment: The knowns and unknowns of the fate of antibiotics and antibiotic resistant bacteria and resistance genes – A review. *Water Research*, **123**, 448-467.
- Christou A., Karaolia P., Hapeshi E., Michael C., Fatta-Kassinos D. 2017b. Long-term wastewater irrigation of vegetables in real agricultural systems: Concentration of pharmaceuticals in soil, uptake and bioaccumulation in tomato fruits and human health risk assessment. *Water Research*, **109**, 24-34.
- Christou A., Papadavid G., Dalias P., Fotopoulos V., Michael C., Bayona J.M., Piña B., Fatta-Kassinos D. 2019. Ranking of crop plants according to their potential to uptake and accumulate contaminants of emerging concern. *Environmental Research*, **170**, 422-432.
- Consejo Europeo. 2020. Water reuse for agricultural irrigation: Council adopts new rules (Comunicado de Prensa). Disponible en: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2020/04/07/water-reuse-for-agricultural-irrigation-council-adopts-new-rules/>
- Dulekgurgen E., Doğruel S., Karahan Ö., Orhon D. 2006. Size distribution of wastewater COD fractions as an index for biodegradability. *Water Research*, **40**(2), 273–282.
- Global Environment Outlook 6 (GEO6). 2019. Healthy Planet, Healthy People. Nairobi, Kenya. University Printing House, Cambridge, United Kingdom.
- Harrabi M., Varela Della Giustina S., Aloulou F., Rodriguez-Mozaz S., Barceló D., Elleuch B. 2018. Analysis of multiclass antibiotic residues in urban wastewater in Tunisia. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, **10**, 163–170.
- Henze M., Harremoës P., Jansen J.L.C., Arvin E. 2002. Wastewater Treatment. Verlag Berlin Heilderberg New York: Springer.
- Huang H., Zeng S., Dong X., Li D., Zhang Y., He M., Du P. 2019. Diverse and abundant antibiotics and antibiotic resistance genes in an urban water system. *Journal of Environmental Management*, **231**, 494–503.
- Hurtado C., Parastar H., Matamoros V., Piña B., Tauler R., Bayona J.M. 2017. Linking the morphological and metabolomic response of *Lactuca sativa* L exposed to emerging contaminants using GC × GC-MS and chemometric tools. *Scientific Reports*, **7**(1), 18–26.
- Kidwell M.G. 2001. Horizontal Transfer. *Encyclopedia of Genetics*, 973–975.
- Klein E.Y. Van Boeckel T.P., Martinez E.M., Pant S., Gandra S., Levin S.A., et al. 2018. Global increase and geographic convergence in antibiotic consumption between 2000 and 2015. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **115**(15), E3463-E3470.
- Kumar A., Pal D. 2018. Antibiotic resistance and wastewater: Correlation, impact and critical human health challenges. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **6**(1), 52–58.
- Leiva A.M., Piña B., Vidal G. 2021. Antibiotic resistance dissemination in wastewater treatment plants: a challenge for the reuse of treated wastewater in agriculture. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, **20**(4), 1043-1072.
- Leiva A.M., Piña B., Vidal G. 2022. Risks associated with the circular economy: Treated sewage reuse in agriculture. In *Circular Economy and Sustainability* (pp. 37-48). Elsevier.
- Malchi T., Maor Y., Tadmor G., Shenker M., Chefetz B. 2014. Irrigation of root vegetables with treated wastewater: evaluating uptake of pharmaceuticals and the associated human

- health risks. *Environmental Science & Technology*, **48**(16), 9325-9333.
- Manaia C.M. 2017. Assessing the risk of antibiotic resistance transmission from the environment to humans: non-direct proportionality between abundance and risk. *Trends in Microbiology*, **25**(3),173–181.
- Manaia C.M., Macedo G., Fatta-Kassinou D., Nunes O.C. 2016. Antibiotic resistance in urban aquatic environments: can it be controlled? *Applied Microbiology and Biotechnology*, **100**(4), 1543–1557.
- Manaia C.M., Rocha J., Scaccia N., Marano R., Radu E., Biancullo F., Cerqueira G., Fortunato I.C. Iakovides I., Zammit I., Kampouris I., Vaz-Moreira I., Nunes O.C. 2018. Antibiotic resistance in wastewater treatment plants: Tackling the black box. *Environment International*, **115**, 312–324.
- Mara D. 2004. Domestic wastewater. Treatment in developing countries. London, UK: Earthscan
- Marsoni M., Mattia F.D., Labra M., Bruno A., Bracale M., Vannini C. 2014. Ecotoxicology and environmental safety uptake and effects of a mixture of widely used therapeutic drugs in *Eruca sativa L.* and *Zea mays L.* plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **108**, 52-57.
- Mansilla, S., Portugal J., Bayona, J.M., Matamoros, V., Leiva, A. M. and Vidal, G. and Piña, B. 2021. Compounds of emerging concern as new plant stressors linked to water reuse and biosolid application in agriculture. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **9**, 105198.
- Metcalf L., Eddy H.P. 2003. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Boston, USA: McGraw-Hil
- Millanao A.R., Barrientos-Schaffeld C., Siegel-Tike C.D., Tomova A., Ivanova L., Godfrey, H.P., Dölz h., Buschmann A.H., Cabello F.C. 2018. Resistencia a los antimicrobianos en Chile y el paradigma de Una Salud: manejando los riesgos para la salud pública humana y animal resultante del uso de antimicrobianos en la acuicultura del salmón y en medicina. *Revista Chilena de Infectología*, **35**(3), 299–308.
- Moreira N.F.F., Narciso-da-Rocha C., Polo-López M.I., Pastrana-Martínez L.M., Faria J.L., Manaia C.M., et al. 2018. Solar treatment (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>-P25 and GO-TiO<sub>2</sub> photocatalysis, photo-Fenton) of organic micropollutants, human pathogen indicators, antibiotic resistant bacteria and related genes in urban wastewater. *Water Research*, **135**, 195–206.
- Neumann P., Pesante S., Venegas M., Vidal G. 2016. Developments in pre-treatment methods to improve anaerobic digestion of sewage sludge. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, **15**(2), 173–211.
- Norton-Brandão D., Scherrenberg S.M., Van Lier J.B. 2013. Reclamation of used urban waters for irrigation purposes – A review of treatment technologies. *Journal of Environmental Management*, **122**, 85–98.
- Oh M., Pruden A., Chen C., Heath L.S., Xia K., Zhang L. 2018. MetaCompare: a computational pipeline for prioritizing environmental resistome risk. *FEMS Microbiology Ecology*, **94**(7), 1-9.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). 2018. WHO Report on Surveillance of Antibiotic Consumption, Geneva, Switzerland: WHO Edition.
- Oromí, J. (2014). Resistencia bacteriana a los antibióticos. *Medicina Integral*, **36**(10), 367–370.
- Pedrero F., Kalavrouziotis I., Alarcón J.J., Koukoulakis P. Asano T. 2010. Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture. Review of some practices in Spain and Greece. *Agricultural Water Management*, **97** (9), 1233-1241.
- Piña B., Bayona J.M., Christou A., Fatta-Kassinou D., Guillon E., Lambropoulou D,

- Michael C., Polesel F., Sayen S. 2020. On the contribution of reclaimed wastewater irrigation to the potential exposure of humans to antibiotics, antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes – NEREUS COST Action ES1403 position paper. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **8**(1), 102131.
- Prestinaci F., Pezzotti P., Pantosti A. 2015. Antimicrobial resistance: a global multifaceted phenomenon. *Pathogens and Global Health*, **109**(7), 309–318.
- Prosser R.S., Sibley P.K. 2015. Human health risk assessment of pharmaceuticals and personal care products in plant tissue due to biosolids and manure amendments, and wastewater irrigation. *Environment International*, **75**, 223-233.
- Rizzo L., Manaia C., Merlin C., Schwartz T., Dagot C., Ploy M.C., et al. 2013. Urban wastewater treatment plants as hotspots for antibiotic resistant bacteria and genes spread into the environment: A review. *Science of The Total Environment*, **447**, 345–360.
- Sidhu H., Angelo E.D., Connor G.O. 2019. Retention-release of ciprofloxacin and azithromycin in biosolids and biosolids-amended soils. *Science of the Total Environment*, **650**, 173-183.
- Singer A.C., Shaw H., Rhodes V., Hart A. 2016. Review of antimicrobial resistance in the environment and its relevance to environmental regulators. *Frontiers in Microbiology*, 1–22.
- Sousa J.M., Macedo G., Pedrosa M., Becerra-Castro C., Castro-Silva S., Pereira M. F. R., et al. 2017. Ozonation and UV 254 nm radiation for the removal of microorganisms and antibiotic resistance genes from urban wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, **323**, 434–441.
- Spataro F., Ademollo N., Pescatore T., Rausedo J., Patrolecco L. 2019. Antibiotic residues and endocrine disrupting compounds in municipal wastewater treatment plants in Rome, Italy. *Microchemical Journal*, **148**, 634-642.
- Tal A. 2016. Rethinking the sustainability of Israel's irrigation practices in the Drylands. *Water Research*, **90**, 387-394.
- Urza J., Alkorta I., Mijangos I., Epelde L., Garbisu C. 2019. Application of sewage sludge to agricultural soil increases the abundance of antibiotic resistance genes without altering the composition of prokaryotic communities. *Science of the Total Environment*, **647**, 1410-1420.
- Vaz-Moreira I., Egas C., Nunes O.C., Manaia C.M. 2013. Bacterial diversity from the source to the tap: a comparative study based on 16S rRNA gene-DGGE and culture-dependent methods. *FEMS Microbiology Ecology*, **83**(2), 361–374.
- Venegas M., Leiva A.M., Vidal G. 2018. Influence of Anaerobic Digestion with Pretreatment on the Phytotoxicity of Sewage Sludge. *Water, Air, & Soil Pollution*, **229**(12), 381.
- Vera I., Sáez K., Vidal G. 2013. Performance of 14 full-scale sewage treatment plants: Comparison between four aerobic technologies regarding effluent quality, sludge production and energy consumption. *Environmental Technology*, **34**(15), 2267–2275
- Yang L., Liu W., Zhu D., Hou J., Ma T., Wu L., et al. 2018. Application of biosolids drives the diversity of antibiotic resistance genes in soil and lettuce at harvest. *Soil Biology and Biochemistry*, **122**, 131–140.
- Zaman S.B., Hussain M.A., Nye R., Mehta V., Mamun K.T., Hossain N. 2017. A review on antibiotic resistance: alarm bells are ringing. *Cureus*, **9**(6).





# TOPOLOGICAL NAVIGATION AND LOCALIZATION IN TUNNELS—APPLICATION TO AUTONOMOUS LOAD-HAUL-DUMP VEHICLES OPERATING IN UNDERGROUND MINES

Mauricio Mascaró, Isao Parra-Tsunekawa, Carlos Tampier and Javier Ruiz-del-Solar \*

## *Abstract*

*Mobile robots are no longer used exclusively in research laboratories and indoor controlled environments, but are now also used in dynamic industrial environments, including outdoor sites. Mining is one industry where robots and autonomous vehicles are increasingly used to increase the safety of the workers, as well as to augment the productivity, efficiency, and predictability of the processes. Since autonomous vehicles navigate inside tunnels in underground mines, this kind of navigation has different precision requirements than navigating in an open environment. When driving inside tunnels, it is not relevant to have accurate self-localization, but it is necessary for autonomous vehicles to be able to move safely through the tunnel and to make appropriate decisions at its intersections and access points in the tunnel. To address these needs, a topological navigation system for mining vehicles operating in tunnels is proposed and validated in this paper. This system was specially designed to be used by Load-Haul-Dump (LHD) vehicles, also known as scoop trams, operating in underground mines. In addition, a localization system, specifically designed to be used with the topological navigation system and its associated topological map, is also proposed. The proposed topological navigation and localization systems were validated using a commercial LHD during several months at a copper sub-level stoping mine located in the Coquimbo Region in the northern part of Chile. An important aspect to be addressed when working with heavy-duty machinery, such as LHDs, is the way in which automation systems are developed and tested. For this reason, the development and testing methodology, which includes the use of simulators, scale-models of LHDs, validation, and testing using a commercial LHD in test-fields, and its final validation in a mine, are described.*

---

Advanced Mining Technology Center & Department of Electrical Engineering, Universidad de Chile, Santiago 8370451, Chile; mauricio.mascaro@amtc.cl (M.M.); isao.parra@amtc.cl (I.P.-T.); carlos.tampier@amtc.cl (C.T.)

\* Correspondence: jruizd@ing.uchile.cl

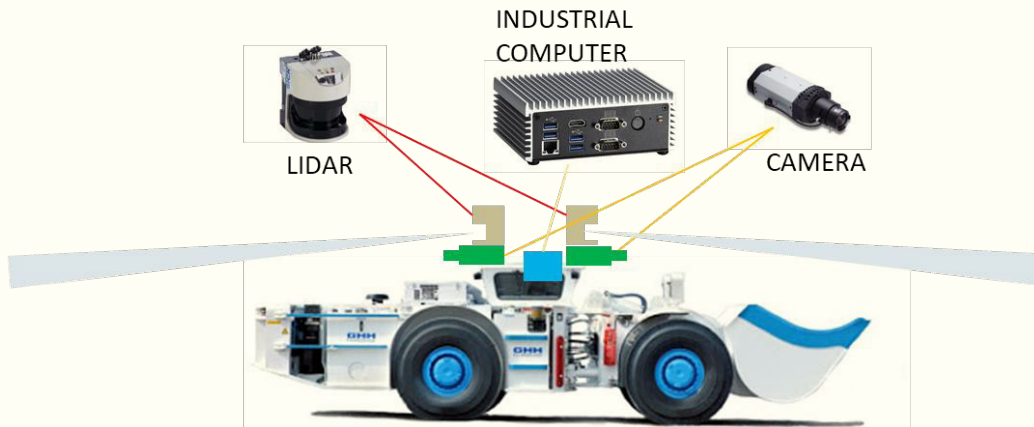
## 1. Introduction

The development of robotic applications has increased significantly in the last decade, and currently, robotic systems are being utilized for many purposes, in various environments. Mobile robots are no longer used exclusively in research laboratories and indoor controlled environments, but are now also used in dynamic industrial environments and outdoor sites. Moreover, the efforts for developing autonomous cars and drones have had the effect of strengthening the development and use of other autonomous machines and vehicles in various industries.

Mining is one industry in which autonomous vehicles have been in use for at least 13 years. Industrial use of autonomous hauling trucks started in 2008 in the Gabriela Mistral copper open-pit mine, located in the north of Chile. Currently, the use of autonomous mining equipment, mainly vehicles, is an important requirement in the whole mining industry. This is because mining operations need to increase the safety of the workers, as well as to augment the productivity, efficiency, and predictability of the processes. Safety is, without doubt, a key factor, and has been the top

priority of mining companies in recent years. This is true, especially, in underground mining operations with their hazardous environments in which workers are constantly exposed to the risks of rock falls, rock bursts, and mud rushes, and where the presence of dust in the air can result in a number of associated occupational diseases in the workers [1].

In an underground mine, autonomous vehicles navigate inside tunnels. This kind of navigation has different precision requirements from those where they are navigating in an open environment. First, tunnels are GNSS-denied environments and thus vehicles cannot use any GNSSs (Global Navigation Satellite Systems) to self-localize. Secondly, when driving inside tunnels, it is not relevant to have an accurate localization system, but it is essential to be able to move safely through the tunnel, and to make appropriate decisions at its intersections and access points. This is completely different from most robotic applications, where safe navigation requires an accurate determination of the robot's position and orientation at every moment.



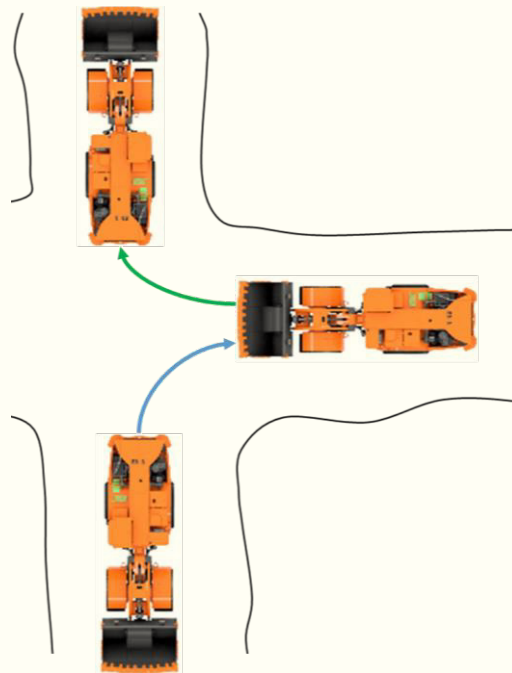
**Figure 1.** LHD and sensors for the Autonomous Navigation System.

To address this need, a topological navigation system for mining vehicles operating in tunnels is proposed and validated in this paper. This system was specially designed to be used by Load-Haul-Dump (LHD) vehicles, also known as scoop trams, operating in underground mines. An LHD is a four-wheeled, center-articulated vehicle with a frontal bucket used to load and transport ore on the production levels of an underground mine (See Figure 1). These machines are a key

component in the extraction of ore from underground mines because the ore extraction rate from the mine depends directly on the efficiency of the LHD. The proposed system permits a commercial LHD, which is a very large vehicle, to navigate inside tunnels that are just a couple of meters wider than the LHD. In addition, it allows bi-directional navigation and so-called *inversion* maneuvers, both required in standard LHD operations inside productive sectors of underground mines. (See an

example in Figure 2). In addition, a localization system, specifically designed to be used with the topological

navigation system and its associated topological map, is also proposed.



**Figure 2.** Example of *inversion* maneuver.

An important aspect to be addressed when working with heavy-duty machinery, such as the LHDs, is the way in which automation systems are developed and tested. In order to address this important issue, we use a development process for autonomous systems for mining equipment, which is comprised of the following four-stages: (i) development using specific simulation tools, which are fed with real data from mining environments, (ii) development using scale-models of the actual machines, (iii) validation and testing using real machines in test-fields, and (iv) validation and testing using real machines in actual mine operations. This development process was used for achieving autonomous navigation of LHDs. The proposed topological navigation and location systems were validated using a commercial LHD, during several months at a medium-scale sub-level stoping mine, located in the Coquimbo Region of Chile.

The main contributions of this paper are the following:

- A topological navigation system for mining vehicles operating in tunnels, which can be used in any tunnel network by any articulated vehicle.

- A novel localization system specifically designed for tunnel-like environments, which estimates the vehicle's global and local pose using the topological map.
- A development and testing methodology that can be used in the development process of heavy-duty machinery.
- Full-scale navigation experiments using a commercial LHD on a productive level of a sublevel stoping mine.

This paper is organized as follows: First, related work on autonomous LHD navigation is presented in Section 2. The proposed topological navigation system for LHD is described in Section 3. Then, in Section 4, the development and testing methodology is described, and in Section 5, validation results achieved in an actual mine are presented. Finally, conclusions of this work are drawn in Section 6.

## 2. Related Work

Autonomous navigation of LHDs has been a subject of scientific research since the late 1990s [2–4]. The main objectives have been to improve productivity and increase safety for the personnel, but simultaneously to benefit from reduced machine maintenance due to less wear of components. The theoretical development, and experimental evaluation, of a navigation system for an autonomous articulated vehicle is described in [4]. This system is based on the results obtained during extensive in-situ field trials and showed the relevance of wheel-slip for the navigation of center-articulated machines. In [5], one of the earlier industrial automation implementations is reviewed. It is mentioned there, that the use of automation in day-to-day operations offers flexibility and convenience for the operators. The development of what would become the first commercially available solutions for autonomous navigation of LHD machines followed shortly thereafter.

The work of Mäkelä [6] set the basis for the AutoMine software of the LHD manufacturer Sandvik, while the work of Duff, Roberts, and Corke [7–9] set a similar precedent for the software MINEGEM of Caterpillar. Only a few years later, the work by Marshall, Barfoot, and Larsson [10–12] configured what would become Scooptram Automation of the company Atlas Copco (now Epiroc). These companies have applied their automation solutions directly to their articulated vehicles [13]. Because of their commercial application, only the initial work on the development of the autonomous systems from LHD manufacturers is available in the literature. For instance, autonomous navigation from the manufacturer Sandvik is based on an absolute localization paradigm, i.e., it relies on odometry and detection of natural markers of the tunnel network [6]. Localization is achieved by taking a profile of the tunnel in a 5 [m] long section and comparing it to a known map. Caterpillar, on the other hand, initially based its system on mainly reactive techniques (wall following), in conjunction with a

topological map with information about loading points, dump points, intersections, and other markers that are used in an opportunistic location scheme [9]. Finally, Epiroc made use of a hybrid navigation paradigm [11]. A set of behaviors was programmed under a fuzzy logic scheme to form the reactive part, while a higher level (deliberative) planner was used at intersections or open spaces.

Despite its success in delivering a product to market, research in autonomous navigation for underground tunnels continues to be a relevant topic. In [14], a review is given on the performance of automated LHDs in mining operations. It also mentions some issues and challenges that remain. The dynamic and highly variable nature of mining operations underlines the need for flexible and quickly deployable systems, features that earlier commercial solutions lacked [15, 16]. These shortcomings are also known to LHD manufacturers, who continue to improve their systems [17].

Automation in mining is, most certainly, a widespread trend that has already shown corporate benefits, and it will continue to drive the modernization of the mining industry [18]. Cost, productivity, and safety are still the driving forces for investments in automated systems. Recent publications in the field also suggest the increasing interest of China in the application of automation technologies [19–21]. Particular attention has been paid to modeling, and control techniques.

The autonomous navigation system presented in this paper is based on topological navigation, and model predictive control (MPC). Underground mining environments have been shown to be suited for the extraction of features needed to build topological maps [22], and a mixture of topological and metric maps has been used successfully to map and navigate in large environments [23]. MPC has also been proven to perform well in the high-speed control of vehicles with nonlinear kinematics [24–26].

### 3. Topological Navigation and Localization for LHD

#### 3.1. General System Overview

LHD are large vehicles used in underground mining. In this work a LHD model LF-11H, from the GHH Fahrzeuge manufacturer, is used. The vehicle's size is 9.71 [m] in length, 2.45 [m] in width, and 2.45 [m] in height. The LHD's navigation is based on the data provided by two laser scanners (2D LIDARs), one pointing towards the front of the machine, and the other pointing towards the back. For supervision and occasional teleoperation, two cameras give the front and back images to the control station [27]. All on-board processing is done on an industrial computer running Linux OS, while the direct machine control is handled by an internal PLC unit. The LHD and the hardware components mentioned above can be seen in Figure 1.

In order to navigate autonomously inside the network of tunnels of an underground mine a proper representation of the mine is required, in this case a navigation map that includes the topological structure of the mine, tunnels, and intersection, as well as LIDAR measurements. The LHD, therefore, builds a map of the operation area during the system setup, using measurements from LIDAR sensors, as it

#### 3.2. Topological Map and Physical Representation

The main component of the representation of the mine is the "Topological Map" (TM). Two types of nodes are defined on this map: (i) tunnel nodes and (ii) intersection nodes. A tunnel node is a section of the mine that can be traversed back and forth, i.e., it corresponds to a single path or trajectory between two physical points. Topologically, a tunnel node has two edges, connecting it with two intersection nodes. An intersection node may have multiple edges that connect it to other nodes, and it can also traverse back and forth. An example would be a fork in the tunnel, where the vehicle must choose one of the possible path alternatives.

Each topological node contains a number of access points (APs) and waypoints (WPs), which are represented by a 2D pose within the node's

navigates the tunnels. This map is then linked to a topological representation, thus giving names to all the relevant locations, henceforth referred to as "nodes". The map, once built, allows for route planning and self-localization of the machine. The latter is carried out by means of scan matching between current LIDAR measurements and the LIDAR landmarks stored in the map. The scan matching is implemented using the ICP (Iterative Closest Point) algorithm, and the final pose estimation is the result of applying a Kalman Filter.

Every time a new mission in which the LHD is requested to move to a target node in the mine is executed, a topological route composed of nodes is defined, and then target poses inside each node are calculated. Afterwards, the path required to reach each target pose is computed, and a reactive control algorithm is put in charge of following the path, keeping the vehicle away from colliding with the walls of the tunnel. A model predictive control strategy is implemented because of the complexity of following the path with this articulated machine, which normally moves at a speed of between 12 and 24 km per hour inside the mine.

coordinate system. APs connect different topological nodes; they signal the transitions between map nodes. WPs, on the other hand, correspond to specific poses within the topological node, each one containing relevant information for the navigation system, such as maximum driving speed. Examples of waypoints can be a location for dumping ore, a place to park the vehicle, or a location the vehicle must go through when traversing the node.

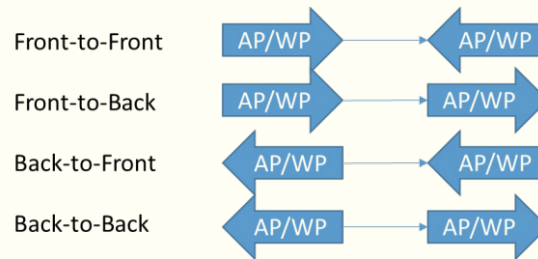
As an example, Figure 3 shows a portion of a real mine, where a TM has been created. In this scenario, four main tunnels, T6, T7, T9, and T10, and one intersection, I0 (in green), define the map. It can also be seen that T9 contains a number of waypoints throughout its path, shown by arrows.



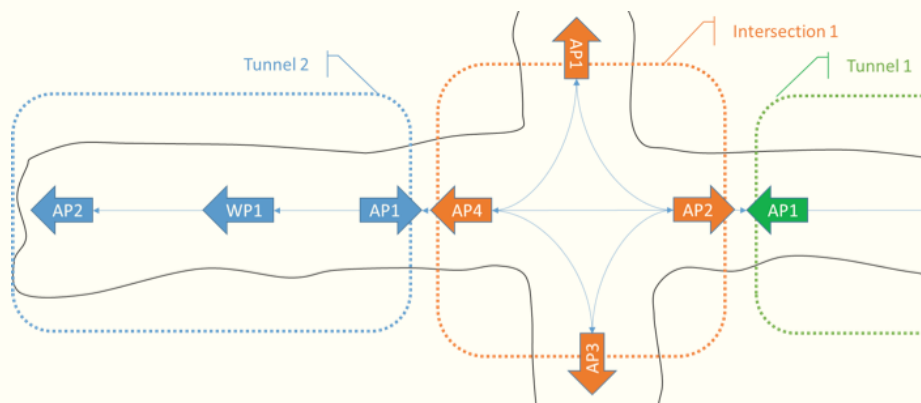
**Figure 3.** Example of a topological map of a real mine.

Besides their associated 2D pose, APs and WPs have a defined heading. APs always face the outer side of the node they are in, but WPs always face in the predefined direction of the node. Because of this, APs and WPs can be connected in 4 different ways: front-

to-front, front-to-back, back-to-front, and back-to-back (see Figure 4, the orange arrow is the default direction of the node). In Figure 5, a TM with 2 tunnel nodes, 1 intersection node, and its AP, WP, and the connections between them, is shown.



**Figure 4.** Types of connection between AP and WP.



**Figure 5.** TM example showing one intersection node (Intersection 1), two tunnel nodes (Tunnel 1 and Tunnel 2), and the corresponding APs, WPs and connections between them.

One of the problems that articulated vehicles face while traversing an underground mine is that they sometimes need to change their direction of movement, using a maneuver known as *inversion*. (See Figure 2). To tackle this problem, a Topological Movement's Map (TMM) is built automatically from the TM. To do this, for each AP and each WP in the TM, 6 nodes are created in the TMM. These 6 nodes represent how the vehicle would move through an AP or WP in the TM:

- (i) Vehicle going towards the AP/WP moving forward (bucket facing the AP/WP).
- (ii) Vehicle going towards the AP/WP moving backwards (rear bumper facing the AP/WP).
- (iii) Vehicle going away from the AP/WP moving forward.
- (iv) Vehicle going away from the AP/WP moving backwards.

- (v) Vehicle standing on the AP/WP facing in its same direction.
- (vi) Vehicle standing on the AP/WP facing in its opposite direction.

These new nodes in the TMM are then connected using the information on the topological map and a predefined set of rules that reflect how a vehicle would move between two different pairs of nodes in the TM. These rules are presented on Tables 1 and 2. Rules are slightly different when considering the special case of connecting APs from different TM nodes (see Table 2), because as these APs connect different TM nodes, they have the same physical location, and then connections between "stopped" nodes must be allowed.

**Table 1.** TMM's connection rules for connections within the same TM node.

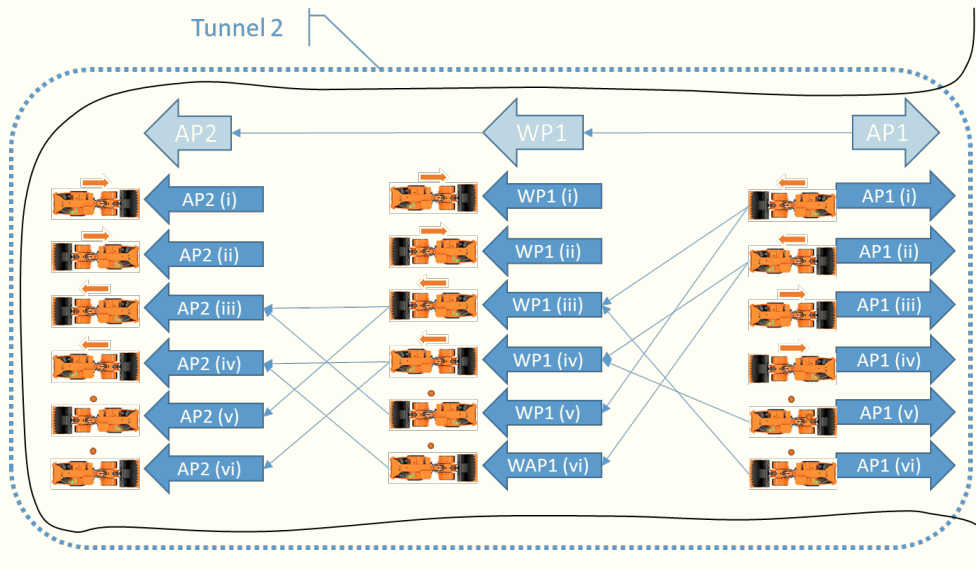
Origin Node's Type	Destiny Node's Type of Connection for Different AP/WP Connection Types			
	Front-to-Front	Front-to-Back	Back-to-Front	Back-to-Back
(i)	-	-	(i) & (vi)	(iii) & (v)
(ii)	-	-	(ii) & (v)	(iv) & (vi)
(iii)	(i) & (vi)	(iii) & (v)	-	-
(iv)	(ii) & (v)	(iv) & (vi)	-	-
(v)	(i)	(iii)	(i)	(iv)
(vi)	(ii)	(iv)	(ii)	(iii)

**Table 2.** TMM’s connection rules for connections between different TM nodes.

Origin Node’s Type	Destiny Node’s Type of Connection for Different AP/WP Connection Types			
	Front-to-Front	Front-to-Back	Back-to-Front	Back-to-Back
(i)	-	-	(i) & (vi)	(iii) & (v)
(ii)	-	-	(ii) & (v)	(iv) & (vi)
(iii)	(i) & (vi)	(iii) & (v)	-	-
(iv)	(ii) & (v)	(iv) & (vi)	-	-
(v)	(i) & (vi)	(iii) & (v)	(i) & (vi)	(iv) & (vi)
(vi)	(ii) & (v)	(iv) & (vi)	(ii) & (v)	(iii) & (v)

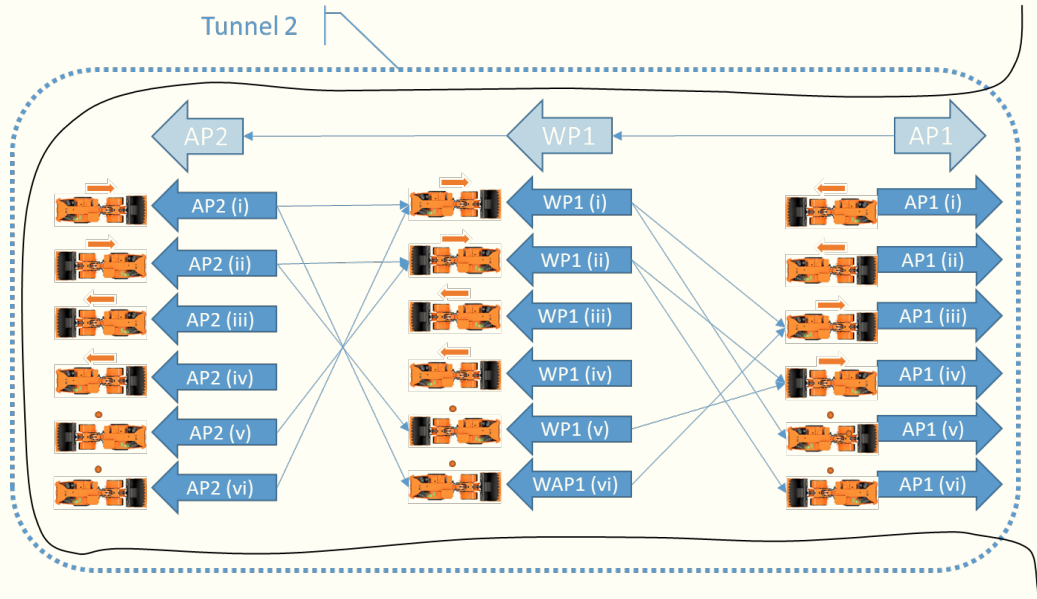
It is important to note that these connections are directional, and it is required to go through a “stopped” node ((v) or (vi)) to change the vehicle’s direction of movement. Therefore, these rules must be applied in both directions of each connection. Nodes (v) and (vi), with the same origin AP/WP, are always connected. An example of the TMM creation from the TM of Tunnel 1 (in Figure 5) is shown in Figures 6 and 7. For clarity of purpose, only half of the

connections are shown in each figure. In Figure 6, only connections in the direction of the tunnel are shown, while in Figure 7, only connections against the direction of the tunnel are shown. Each node in the TMM is represented by a blue arrow. Each node has an associated LHD heading and movement direction. The heading is represented by the LHD image and the movement direction by the orange arrow next to the LHD.



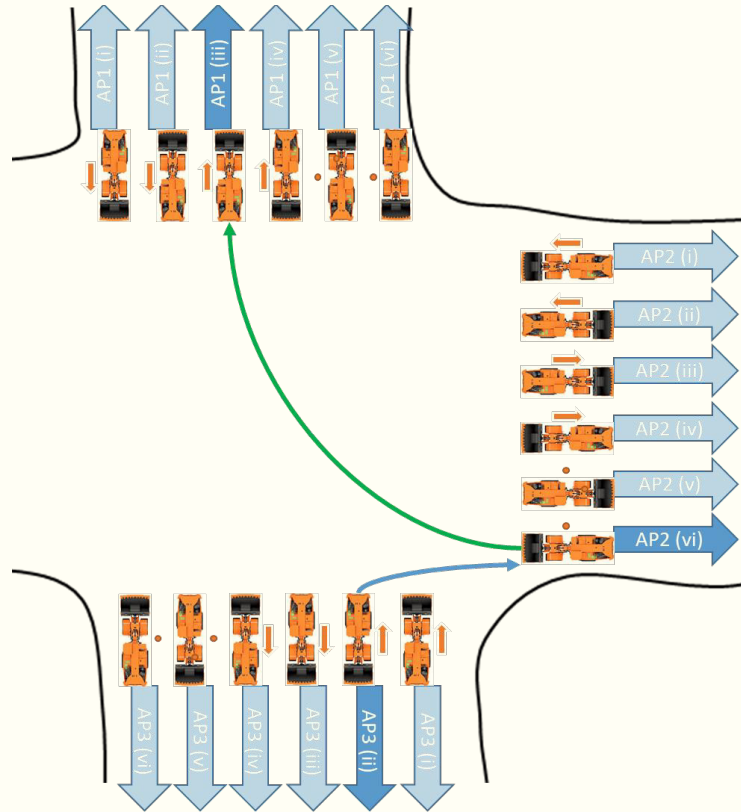
**Figure 6.** TMM construction example. Connections heading in the same direction of the Tunnel are shown.





**Figure 7.** TMM construction example. Connections heading in the opposite direction of the Tunnel are shown.

An example is shown in Figure 8 for the inversion maneuver. Relevant TMM nodes involved in the inversion movement are highlighted.



**Figure 8.** Representation of an *inversion* maneuver in the TMM.

Once the TMM is set up, topological paths can be calculated upon demand. When a new request is received, the vehicle's current state is pushed to the TMM as a starting point, and then the optimal route to the desired destination is calculated using Dijkstra's algorithm [28]. Traveling costs between TMM nodes are set up initially based on the distance between AP/WP, but can be fined-tuned with additional considerations such as: the change in the vehicle's movement direction, the feasibility of the movement (sometimes a curve is too sharp for the vehicle to turn in a certain direction), and unwanted paths for other reasons such as road repairs, narrow spaces, or uneven tracks.

Path planning using the TMM is extremely fast. Its

### 3.2.1. Map Building—Determination of LIDAR-landmarks

For map building the LHD needs to visit all the tunnels of the mine in one direction. In order to achieve this, the LHD is teleoperated. At the end of this process the LIDAR-landmarks need to be determined.

The following procedure is followed for the tunnel nodes:

1. LIDAR point clouds are stored at fixed positions inside each node (e.g., every 2 [m] in our current implementation). Each of these point clouds are built by joining the LIDAR scans acquired using the front-facing and the rear-facing LIDARs. Then, a filtering process is applied: points colliding with the LHD's body are removed, points that are located too far (>10 [m]) to the center of the LHD are also removed, and finally, the density of the point cloud is normalized. This final point clouds will be the LIDAR-landmarks.

2. The similarity among all pairs of stored LIDAR-landmarks is computed using the ICP algorithm, generating a similarity matrix. The ICP's fitness value is used as a measurement of the geometric similarity between two LIDAR-landmarks (a low fitness value means that ICP managed to fit both landmarks correctly). Using the similarity matrix, representative/key LIDAR-landmarks are chosen. The selected representative LIDAR-landmarks have two important characteristics: (i) They can be matched with their local neighbors using the ICP algorithm (a radius is used for determining the local neighbors); (ii) they are different from other representative LIDAR-landmarks, guaranteeing that two different representative LIDAR-landmarks cannot be mistaken. This selection process is done by the following algorithm:

- For each LIDAR-landmark:
  - The values of similarity with other LIDAR-landmarks are ordered from lowest to highest.
  - A delta threshold and a radius are defined:
    - The last LIDAR-landmark for which the

execution in a very large mine layout was simulated in a layout similar to that of the new Chuquicamata underground mine, with eight parallel streets, each one having 19 intersections. Under these conditions, the TMM contained 5378 nodes and 8760 vertices, and path planning using the TMM took less than 5 [ms] on an i7 Intel processor [27].

Each node contains so-called LIDAR-landmarks that are stored when the map is built, and are used for the LHD self-localization. In regard to tunnel nodes, the LIDAR-landmarks correspond to LIDAR point clouds acquired at certain selected positions of the tunnel. In the case of intersection nodes, the LIDAR-landmark corresponds to an integration of the point clouds acquired inside the intersection.

next highest similarity value does not belong to one of the current LIDAR-landmark's local neighbors is selected (searching from lowest to highest similarity value).

- This similarity value between the current LIDAR-landmark and the selected LIDAR-landmark is stored as the threshold of this LIDAR-landmark. This value represents the minimum ICP's fitness value that must be met for a valid geometric fit.

- The difference between the threshold and the next similarity value is stored as the delta threshold of this LIDAR-landmark. This value represents how different the current LIDAR-landmark is from the other LIDAR-landmarks that are not its neighbors.

- The distance to the selected LIDAR-landmark is stored as the radius index of the current LIDAR-landmark. This value represents the distance (in LIDAR-landmark measurement/sample distance units) from which a valid geometric fit can be achieved.

- An empty list is created for the LIDAR-key-landmarks.

- The LIDAR-landmark with the largest radius among the first 10 LIDAR-landmarks is added to the list.

- The LIDAR-landmark with the largest radius among the last 10 LIDAR-landmarks is added to the list.

- The remaining LIDAR-landmarks are ordered by highest to lowest radius, and highest to lowest delta threshold (if they have the same radius).

- For each of these sorted LIDAR-landmarks with radius greater than 2 LIDAR-landmark measurement distances (4 [m] in this case):

If it is not near an existing LIDAR-key-landmark (farther than 5 LIDAR-landmark measurement distance) then it is added to the LIDAR-key-landmark list.

In the case of an intersection node, the LIDAR point clouds obtained in the intersection are integrated and stored as a single cloud point. This cloud point is the LIDAR-landmark of the intersection.

### 3.3. Self-Localization

Self-localization is composed of two modules: a global topological localization estimation, and a local node localization estimation. The topological localization estimates the location of the LHD inside the TMM (and also the TM, because each node in the TMM has an equivalent in the TM), as well as the distance between its current location and the closest AP/WP. The intra-node localization estimates the localization inside the current tunnel or intersection node.

#### 3.3.1. Localization Inside Tunnel Nodes

Inside tunnels the LHD's pose is defined as the one-dimensional distance or trajectory  $\rho$ , measured from the beginning of the tunnel. This distance is updated incrementally as:

$$\rho_{t+1} = \rho_t + v_t \cdot dir_t \cdot \Delta t \quad (1)$$

where  $v_t$  is the current linear speed of the LHD, and  $dir_t$  is the current direction of movement, with the value 1 meaning that the LHD is oriented to the tunnel orientation and  $-1$  if it is not. The values of  $\rho_t$ ,  $v_t$ , and  $dir_t$  are estimated using a standard Kalman filter. The filter is updated using two different observations sources: first, using the LHD wheel's odometry obtained directly from the LHD encoders, and second, using the LIDAR point cloud. In the latter case, the ICP algorithm is used to match the current LIDAR point cloud with the LIDAR-landmarks that are near the current LHD position and the key LIDAR-landmarks within 50 [m] of distance. The result of the ICP matching is the distance to the most similar LIDAR-landmark, which is then used to estimate the relative position of the LHD in the node's coordinates, and its orientation. Both the wheel's

odometry, and the ICP-estimated position and orientation, are used in the corrective stage of the Kalman filter asynchronously, i.e., every time they arrive.

It is important to mention that the ICP matching is local, not global, meaning that the matching is made only with LIDAR-landmarks that are near the current position of the LHD. The main reasons for this decision are time efficiency and to avoid wrong matching due to the similarity that different LIDAR-landmarks may have. (Mining tunnels have regular surfaces and LIDAR-landmarks computed in different tunnels may be similar). This also prevents the self-localization from changing drastically in its localization estimation.

#### 3.3.2. Localization Inside Intersection Nodes

Inside intersections, the LHD's pose is defined as its 2D position and orientation. Considering that intersections are small, of just a few meters, the wheel's odometry, and the results of the ICP matching between the LIDAR point cloud and the LIDAR-landmark that describes the intersection node are used directly to update the LHD pose.

#### 3.3.3. Global Localization

This module knows in each moment the node in which the LHD is located. The module also receives the current LHD's pose in the current node's coordinate frame. Using this information, it evaluates if the LHD is still in the current node, or if it has moved to a neighbor node. If this is the case, then the estimation of the LHD's pose is transferred into the neighbor node's coordinate system. Each node has the geometric transformation to adjacent nodes so the transition is smooth.

### 3.4. Navigation

The navigation scheme is composed of two layers of nodes that enable the path planning and autonomous hauling through the underground tunnels of the mine: the high level and the low level. The high level encompasses two modules: "Navigation Control" and "Deliberative Path Planning", while the low level is comprised of another two modules: "Guidance" and "Command Executor" (see Figure 9).

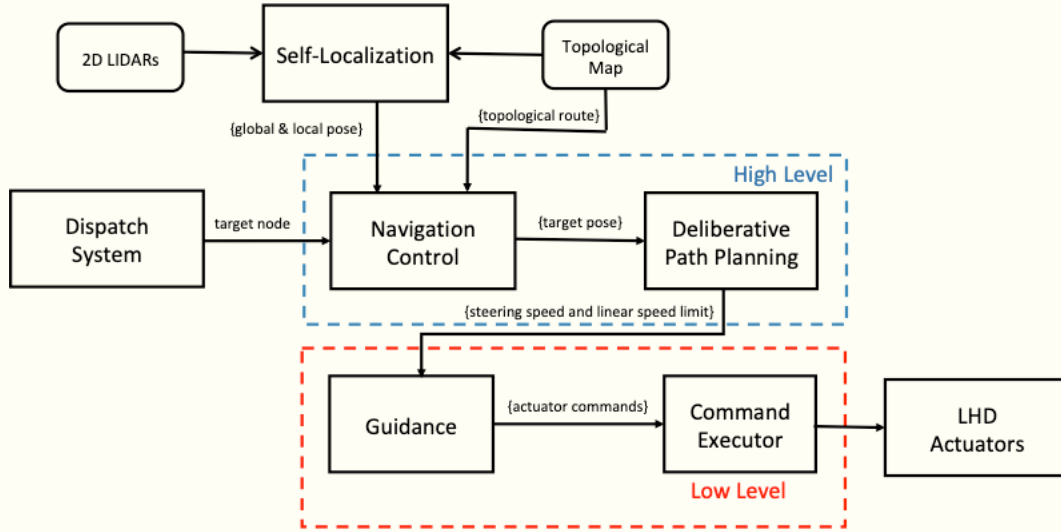


Figure 9. Diagram of the navigation system.

### 3.4.1. Navigation Control

This module receives a target for the LHD navigation, which could be a relevant location within the mine, such as an extraction/draw point or a dumping point. This target is usually defined by a dispatch system, or in some cases by a human operator. It consists of a destination node and a topological route, which is computed using the TMM as is explained in Section 3.2. This path is represented as a sequence of TMM nodes, each one containing information about the position, orientation, heading direction of the vehicle, and an indication of whether the vehicle must go through the node or come to a full stop on it.

Given that the topological route is composed of TMM nodes that are originated from tunnel and intersection nodes, this module has two navigation modes: *tunnel tramming*, used inside tunnels, and *path-following*, used inside intersections. In tunnel tramming mode, the navigation modules follow the path of the tunnel's

walls, while in path-following mode, the navigation modules follow a trajectory in an area where more than a single path can be taken. In addition, inside tunnel nodes, intermediate sub-goals may be generated depending on the defined waypoints (See Section 3.2).

To achieve a smooth navigation across TMM nodes, transitions between different goals must be seamless. A naive implementation to identify when a goal has been reached would be to check when the global localization estimation equals the current goal, but this often makes the movement of the vehicle not continuous and clumsy. A better approach requires that *Navigation Control* anticipates when the LHD is going to reach a certain goal. In order to do this, a set of conditions are applied in addition to monitoring the global localization estimation:

$$P(\vec{x}_{LHD} = \vec{x}_T) = \frac{1}{2\pi\sqrt{|\sigma|}} e^{-\frac{1}{2}[\vec{x}_{LHD} - \vec{x}_T]^T \sigma^{-1} [\vec{x}_{LHD} - \vec{x}_T]_{1,1}} > P(\vec{x}_{LHD} = \vec{x}_T)_{MIN} \quad (2)$$

$$\dot{d}(\vec{x}_{LHD}, \vec{x}_T) > \dot{d}_{MIN} \quad (3)$$

$$|\theta_{LHD} - \theta_T| < \Delta\theta_{MAX} \quad (4)$$

where:

$\vec{x}_{LHD}$  = 2D position estimation of the LHD.

$\vec{x}_T$  = 2D position of the current navigation target.

$\sigma$  = 2D Self-localization estimation variance (without orientation estimation).

$P(\vec{x}_{LHD} = \vec{x}_T)_{MIN}$  = Minimum 2D target reached likelihood threshold.

$\dot{d}$  = Euclidean distance function derivative with respect to time.

$\dot{d}_{MIN}$  = Minimum Euclidean distance function derivative threshold.

$\theta_{LHD}$  = LHD orientation (heading) estimation.

$\theta_T$  = Current target orientation (heading).

$\Delta\theta_{MAX}$  = Maximum orientation difference threshold.

The condition (2) is the probabilistic estimation of actually reaching the desired target position. Condition (3) measures if the LHD is actually getting closer to the target and condition (4) measures the difference between the LHD's orientation and the current target's orientation. When navigating in *tunnel tramming* mode, only condition (2) is used, but when navigating in *path-following* mode, conditions (2)–(4) must be met. This way, lower values for

$P(\vec{x}_{LHD} = \vec{x}_T)_{MIN}$  on condition (2) can be used (which helps to anticipate transitions and obtain a smooth movement), because conditions (3) and (4) indicate that the vehicle is going to the target goal (often a tunnel entrance) in an intersection.

In *tunnel tramming* node, Navigation Control also checks that the LHD does not miss the tunnel end, checking the following conditions:

$$d_{ODOM}(t) - d_{TUNNEL} > e_{MAX}^{ODOM} \quad (5)$$

$$\frac{d_{ODOM}(t)}{d_{TUNNEL}} > e_{MAX}^{ODOM} \% \quad (6)$$

where:

$d_{ODOM}(t)$  = Accumulated linear odometry of the current tunnel.

$d_{TUNNEL}$  = Total length of the tunnel.

$e_{MAX}^{ODOM}$  = Maximum odometry error magnitude threshold.

$e_{MAX}^{ODOM} \%$  = Maximum odometry error percentage threshold.

If both of these conditions are true, Navigation Control stops the vehicle and asks for assistance to the operator/supervisor of the system. Both conditions are required because, for short tunnels, condition (6) can trigger false alarms, while for long tunnels, condition (5) can trigger false alarms.

maximum speed at which a node should be transited, and an indicator forcing the vehicle to drive closer to one of the walls of the road (instead of trying to remain in the center of the road). Both of these parameters can be manually tuned to optimize the way the vehicle approaches certain curves or traverses through the mine.

Other important information stored in the TMM is the

### 3.4.2. Deliberative Path Planning

This module receives the next target position, which needs to be reached with a certain speed, as a relative pose from *Navigation Control*. Then, it calculates the path to be followed between the current pose and the desired destination, as a spline  $S(t) = [S_x(t), S_y(t)]$ . The desired steering speed ( $\bar{\omega}$ ) and speed limit

( $v_{MAX}$ ) are then computed, and sent to *Guidance*. (See Figure 9).

In order to calculate the spline's coefficients, the following border conditions are used:

$$S(t=0) = X_0; S\left(t=t^* = \frac{\bar{d}}{v}\right) = X_1 \quad (7)$$

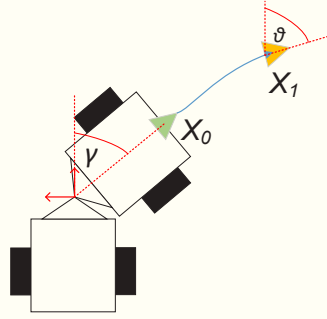
$$\dot{X}_0 = (v \cos \gamma, v \sin \gamma); \dot{X}_1 = (v \cos \theta, v \sin \theta) \quad (8)$$

where:

$X_0, \dot{X}_0$  = Position and speed of the front bumper of the vehicle. (See Figure 10).

$X_1, \dot{X}_1$  = Position and speed at the desired target destination. (See Figure 10).

$\bar{d}$  = Estimated distance between  $X_0$  and  $X_1$ .



**Figure 10.** Graphic representation of the kinematic variables of the vehicle.

Using the calculated derivative of the spline, and the vehicle's kinematic model, given by (10) and (11), the desired steering rate  $\dot{\gamma}$  can be calculated as:

$$\dot{\gamma} = \frac{(L_f \cos \gamma + L_r) \dot{\alpha}(t = 0) - v_i \sin \gamma}{L_r} \quad (9)$$

with  $\dot{\alpha}(t = 0)$  the calculated angle derivative of the spline, evaluated in  $t = 0$ ;  $L_r$  the length from the LHD's pivot to the rear wheel axis;  $L_f$  the length

from the LHD's pivot to the front wheel axis;  $v_i$  the linear speed of the LHD;  $\gamma$  the steering angle in the LHD's pivot;  $\omega = \dot{\gamma}$  the steering speed in the LHD's pivot.

### 3.4.3. Guidance

This module performs the task of selecting the appropriate commands for the machine's actuators, given the high-level general directives of the expected motion and, at the same time, ensuring that the LHD will not hit any obstacles or mine infrastructure. For that purpose, a model-based predictive control (MPC) scheme was implemented using the vehicle's kinematic equations and a cost function that simultaneously considers the following: the high

level reference commands, the distance to the walls of the tunnel, and the smooth variation of the actuator commands over time.

The kinematic model of a center-articulated vehicle has been presented in a number of previous publications, such as in [11]. Equations (10) and (11) show an incremental model for the machine's pose.

$$\Delta[x, y, \theta] = \Delta t \cdot [v \cos(\theta), v \sin(\theta), (v \sin(\gamma) + L_r \omega) / (L_f \cos(\gamma) + L_r)] \quad (10)$$

$$\Delta\gamma = \Delta t \cdot \omega \quad (11)$$

where:

- $[x, y, \theta]$  = pose of the LHD (2D position and angle).
- $\Delta t$  = sampling time of the discrete model.
- $v$  = linear speed of the LHD.
- $\gamma$  = steering angle in the LHD's pivot.
- $\omega = \dot{\gamma}$  = steering speed in the LHD's pivot.
- $L_r$  = length from the LHD's pivot to the rear wheel axis.
- $L_f$  = length from the LHD's pivot to the front wheel axis.

The previous model is used in the MPC to predict the trajectory of the machine over a predefined timespan. Then, the optimization process is carried out, in

which the best actuator command ( $u = [u_v, u_\omega]$ ) for each time step is selected to minimize the following cost function:

$$Q = Q_{map} + Q_{steering} + Q_{smooth} \quad (12)$$

This equation shows that the cost function is composed of three parts: one for keeping the vehicle away from the tunnel walls ( $Q_{map}$ ), another ( $Q_{steering}$ ) for following the high-level reference commands, and a final one to smooth the optimization result over time ( $Q_{smooth}$ ).

In Equation (13), it can be seen that the cost associated with keeping the machine away from the walls relies on maximizing the distance between certain key points of the vehicle and the closest data point in the registered point cloud of the environment. These key points are the corners of the front and rear vehicle bodies.

$$Q_{map} = \sum_{i=1}^n R_F \frac{|D_{FL,i} - D_{FR,i}|}{D_{FL,i}^2 D_{FR,i}^2} + R_M \frac{|D_{ML,i} - D_{MR,i}|}{D_{ML,i}^2 D_{MR,i}^2} + R_R \frac{|D_{RL,i} - D_{RR,i}|}{D_{RL,i}^2 D_{RR,i}^2} \quad (13)$$

With  $D_{FL,i}$  the distance between the front left corner of the machine and the closest point of the tunnel walls, predicted at time step  $i$  of the optimization process. Similarly,  $D_{FR}$ ,  $D_{ML}$ ,  $D_{MR}$ ,  $D_{RL}$ , and  $D_{RR}$ , refer to the distances from the front right, middle left, middle right, rear left, and rear right corners of the vehicle, respectively. The cost function weights,  $R_F$ ,  $R_M$ , and  $R_R$ , are selected to obtain proper behavior.

Equation (14) details the cost related to following the command directives issued from the high-level software modules. Here, only the reference for the steering speed ( $\bar{\omega}$ ) is considered, since the reference for the machine's maximum speed ( $v_{MAX}$ ) is directly set as an upper bound restriction for the optimization function. Again, the cost function weight  $R_\omega$  is selected to obtain proper behavior.

$$Q_{steering} = \sum_{i=1}^n R_\omega |\omega_i - \bar{\omega}| \quad (14)$$

Finally, the smoothing component of the cost function ( $Q_{smooth}$ ), is intended to ensure that the command has a controlled variation (i.e., limits the change in the command between time steps), and that

a newly computed optimal command vector has some degree of continuity after the time span for which it was selected. Namely, the  $Q_{smooth}$  component comprises, in turn, two other terms, as stated above.

$$Q_{smooth} = Q_{acc} + Q_{proj} \quad (15)$$

The first term assigns an additional cost to commands that cause a linear or steering acceleration above predefined limits, as stated in Equation (16), while the second term, shown in Equation (18), rewards

commands that, when maintained past their time horizon, for up to twice as long as originally intended, will not cause a collision with a tunnel wall.

$$Q_{acc} = \sum_{i=2}^n R_{\delta\omega} \cdot f(\omega_i - \omega_{i-1}, \Delta\omega_m, \Delta\omega_M) + R_{\delta v} \cdot f(v_i - v_{i-1}, \Delta v_m, \Delta v_M) \quad (16)$$

$$f(x, x_{min}, x_{MAX}) = \begin{cases} x - x_{MAX} & \text{if } x_{MAX} < x \\ 0 & \text{if } x_{min} < x < x_{MAX} \\ x_{min} - x & \text{if } x < x_{min} \end{cases} \quad (17)$$

$$Q_{proj} = \sum_{j=1}^m R_p \frac{\Delta[x_j, y_j, \theta_j | v_n, \omega_n] \cdot crash(x_j, y_j)}{\Delta[x_j, y_j, \theta_j | v_n, \omega_n]} \quad (18)$$

$$crash(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if position } (x, y) \text{ is in collision} \\ 0 & \text{if position } (x, y) \text{ is not in collision} \end{cases} \quad (19)$$

where  $R_{\delta\omega}$ ,  $R_{\delta v}$ , and  $R_p$  are the cost weights, selected for proper behavior;  $\Delta\omega_m$ ,  $\Delta\omega_M$ ,  $\Delta v_m$  and  $\Delta v_M$  are the parameters for the minimum and maximum steering acceleration and linear acceleration, respectively;  $\Delta[x_j, y_j, \theta_j | v_n, \omega_n]$  are the displacement caused by the kinematic model of the machine, at time step  $j$  when the last optimization command of the previous process is applied.

The outcome of the former process is a command vector for every time step in the selected timespan ( $\bar{u} = [u_{t_0}, \dots, u_{t_f}]$ ), in which each element ( $u_{t_i} = [u_v, u_\omega, t_i]$ )

represents a speed and steering command pair, alongside the timestamp on which this command is to be executed.

#### 3.4.4. Command Executor

In opposition to the traditional philosophy of an MPC, the result of the *Guidance* module is not directly fed to the machine's actuators. It is first filtered and merged with previous results of the optimization process in order to always keep a consistent queue of commands that will sustain the operation of the vehicle for a short period of time. This filtering is carried out by the *Command Executor* module. The goal of this module is to ensure that the signals sent to the actuators will be appropriate, both for avoiding long-term damage of the devices involved and also for keeping the operation running as expected.

The *Command Executor*'s input is a "trajectory" of commands to be executed at specific times. Each

command of the trajectory is inserted in a command queue. The queue insertion process entails finding the time at which the current command is to be inserted, erasing any command previously queued from that moment onwards. Then, the new command is appended at the end of the queue, effectively overriding outdated directives.

Before the *Command Executor* issues a new command to the machine actuators, the upcoming command is filtered. The velocity command  $u_v$  is limited to a maximum value  $u_{v,max}$  and a "dead zone" is applied to the steering command  $u_\omega$ , namely:

$$u_v = \begin{cases} u_v & \text{if } u_v < u_{v,max} \\ u_{v,max} & \text{if } u_{v,max} < u_v \end{cases} \quad (20)$$

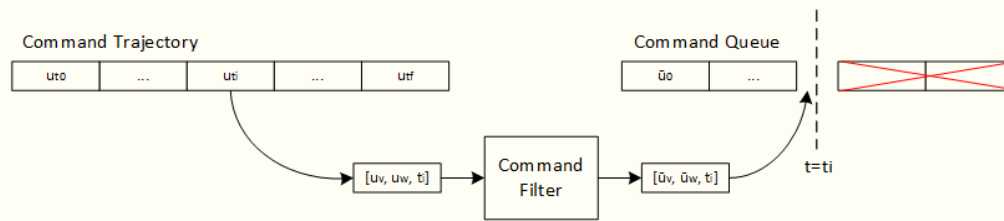
$$u_\omega = \begin{cases} u_\omega & \text{if } u_\omega < -u_{\omega,min} \text{ or } u_{\omega,min} < u_\omega \\ 0 & \text{if } -u_{\omega,min} < u_\omega < u_{\omega,min} \end{cases} \quad (21)$$

where  $u_{\omega,min}$  is a predefined constant value for the steering command "dead zone" and  $u_{v,max}$  is a value computed, so that if the machine were to be commanded to stop at the present time, it would effectively stop before the last queued command. That is, given a command queue with a total duration of  $Q_{dt}$  seconds and a machine deceleration of  $\bar{D}_v$  meters per second squared, then:  $u_{v,max} = \bar{D}_v \cdot Q_{dt}$ , where  $\bar{D}_v$  is the mean deceleration of the machine when a full brake is applied, a parameter that can be determined experimentally.



A diagram of the described process is shown in Figure 11 for a single command of the input command

trajectory. As mentioned, the same steps are executed for all elements.



**Figure 11.** Command management process of the command executor node.

#### 4. Development and Testing Methodology

The methodology used for the development and testing of the proposed navigation system consists of four steps. The first is the development of the automation system in a simulated environment, which is a safe and cost efficient platform for that purpose. The second is the use of scale models to verify the behaviors that are too complex or impractical to be tested on a simulated environment. The third is validation and testing in real equipment, using a safe location intended for that purpose. Fourth is the validation and testing in a real operation environment under controlled conditions before moving on to production. Details are discussed further in the following section.

##### 4.1. Development in a Simulated Environment

The system was initially developed and tested in a simulated environment using Gazebo [29] and integrated with ROS [30]. At first, an underground scenario with wide tunnels and perfect self-localization, using the real position from the simulator, was used as a testing environment. When the system could perform reasonably well, the wide tunnels were substituted by realistic tunnels, using laser scans acquired in a real underground mine. The realistic tunnels were much narrower and had irregular shapes. Finally, when the challenges of the

new scenario were solved, the system was tested with a functional self-localization module, and with other factors that added complexity, such as a simulation of the LHD's controller, in order to validate all low-level communication and security schemes.

##### 4.2. Development Using Scale Models

Not all of the functions of the system can be tested in a simulated environment, either because of the complexity of the problem, which makes the simulation approach impractical, or because not enough data is available to simulate certain interactions between the equipment and the environment. To address this issue, a scale model can be built in order to validate some of the design assumptions before implementing the solution on a commercial vehicle. The scale models need to have a certain similarity in the aspects related to the phenomena that needs to be validated. In the case described here, a 1:5 scale model was built based on a commercial 5 [yd<sup>3</sup>] LHD, shown in Figure 12, with an electric power train and hydraulic actuation for the steering and bucket movements, mimicking real equipment. A scaled-down ore extraction point was built, including ore from an actual mine. The scale model was used to perform navigation in the laboratory before installing the control system in the commercial LHD.



**Figure 12.** 1:5 scaled LHD built for testing and validation.

### 4.3. Validation in Test-Fields

The LHD automation navigation was installed in a GHH's LF11H LHD (GHH Fahrzeuge). The installation required mechanical and electrical modifications of the equipment to place the system's sensors, processing units, and wireless communication equipment. All the automation software runs in an industrial fan-less computer equipped with an Intel i7 processor and with 4 logical cores. The interface between the automation and the machine was implemented on the machine controller (IFM mobile mini controller), based on GHH's factory program (implemented in Codesys).

After the system was installed and all basic control,

communications, and safety functions were thoroughly tested, the equipment was moved to a test-field nearby the OEM (Original Equipment Manufacturer) facilities in Santiago, Chile. The test-field emulated an underground tunnel by using light material to mimic the walls of the mine (Figure 13), which was enough to trick the system. It also had a dummy loading point, a dumping point, and a truck loading point. These tests were used to calibrate the system controller's parameters and the kinematic characteristics of the vehicle's model, such as the acceleration, steering, and breaking response to different operation inputs.



**Figure 13.** Test-field close to GHH facilities in Santiago de Chile.

Because the test-field was located just outside the city where our development team is based (Santiago, Chile), it was possible to make a short trip to test new versions of the software, which contained bug fixes or improvements to the system. Usually a team of developers would go to the test-field two or three times a week to try out different modifications in the algorithms of the automation system.

The last milestone of this stage was to validate the

reactive navigation algorithm. In order to do this in a safe manner, a hybrid operation mode was used, in which the speed of the LHD was remotely controlled by an operator while the autonomous navigation system handled the steering of the vehicle in an assisted tele-operation mode. To ensure safety precautions, an onboard operator who could shut down or override the automation system commands was on the vehicle for every test.

### 4.4. Validation in a Real Mining Operation

In order to carry out the final stages of development, the equipment had to be tested in its real operation environment, where the last design assumptions and algorithms needed to be validated, and the presence of personnel from the operation site were required.

In the case of the automation system described here, after test site validation, the LHD was transported to a real sublevel stopping mine in the north of Chile, where the development team, the OEM, and the mine personnel coordinated the final system validation and tests.

## 5. Results and Discussion

The validation in the test-field was executed from March to June of 2017, requiring approximately 300 h of work. On-site tests were carried out in a medium-scale sublevel stoping mining operation called the *Mina 21 de Mayo* (21st of May Mine), the property of *Compañía Minera San Gerónimo*, located in the north of Chile. The tests were comprised of two phases:

- During the first batch of tests in 2017, approximately 2300 work-hours were needed to test the system, of which about 800 were on-site; 600 were for remote support and system troubleshooting; 800 were with OEM remote support on-site; 100 h were spent traveling from the nearest city, La Serena, Chile, to the mine. The first batch included 66 days of testing, including installation of hardware on the LHD, network infrastructure on the tunnel, teleoperation station, and CCTV cameras. First underground tele-operation tests were done on day 32, which were followed by assisted tele-operation and self-localization tests.
- During the second batch of tests, performed in 2018, about 2900 work-hours were required, including 1000 on-site, 1000 with OEM support onsite, 750 with remote support, and 150 spent traveling from the nearest city to the mine. This second batch of tests lasted for 77 days. First, autonomous navigation tests took place on day 32. Further tests included approximately 150 h of autonomous navigation. It is important to note that the LHD was also used to test an autonomous loading system, so not all on site test were for the autonomous navigation system.

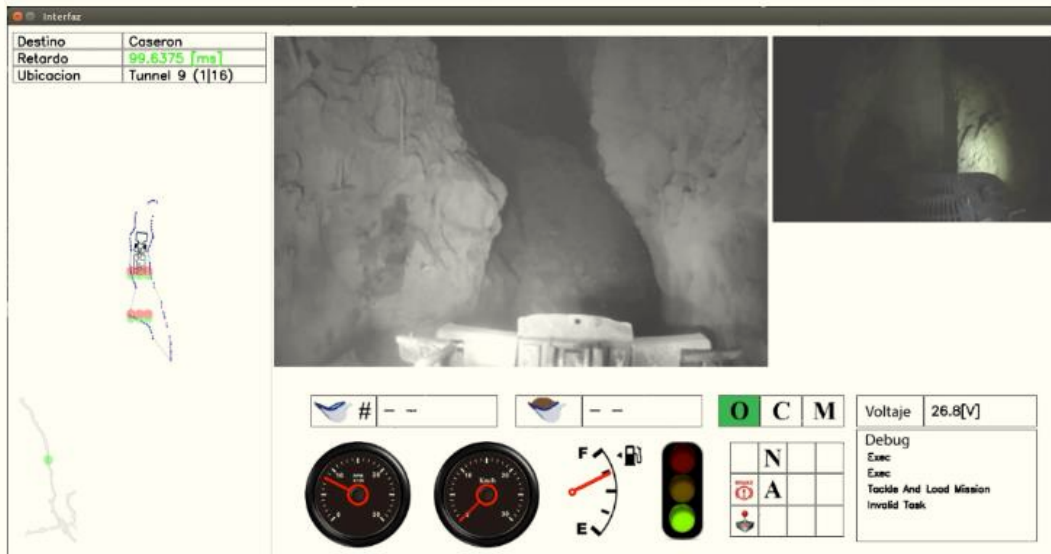
Between the first and second phases, several upgrades were made to the system in order to improve its robustness, consistency, and performance. The most important improvement was on the self-localization system, because the first batch of tests proved that the initial method (not described here) could not maintain the self-localization estimation along the test tunnel. Assisted tele-operation tests during the first phase were mainly used to tune the parameters of the *Guidance* module for the tunnel and intersection navigation modes (Equations (13), (14), (16), and (18)). Once the autonomous navigation was operating properly, further adjustments were made to all system's parameters, including the parameters for the *Command Executor* module (Equations (20) and

(21)). Parameters of the map were tuned, such as the maximum speed for certain segments of the tunnel, 2D poses of APs/WPs, and navigation modes for different parts of the tunnel.

On-site, at the mine, two validations were carried out: surface level tests, and underground tests. Surface level tests were done to test all the modules before entering the mine, and to visualize any problem that the LHD or the implemented automation system could have. After the arrival of the machine at the mine site, all sensors, antennas, and communication modules were re-installed and tested. The first teleoperation tests were carried out on the surface, on one of the dump sites of the mine, to verify that the operation of the LHD was correct.

The second validation was done inside the mine in a production tunnel. The system was tested incrementally from teleoperation to full autonomous operation. A network infrastructure was installed inside the test tunnel, and an operating station, consisting of a computer, screens, and controls, was installed inside the mine. Communication tests were carried out between the LHD inside the mine and the computer in the operation center. Teleoperation and assisted teleoperation modes were the first functionalities tested. In the first mode, the operator drives the equipment just as would be done aboard, and in the second mode the operator mainly indicates the direction of movement and the system keeps the LHD away from the walls keeping it from colliding with them. The system was successful in avoiding collisions between the equipment and the inner walls of the tunnel, and the general performance of the operation was similar to manual navigation.

The autonomous navigation tests showed that the system allowed tramping along a 180 [m] tunnel from its entrance to the loading point. The LHD took approximately 2 [min] to go from one point to another, which is comparable to the performance achieved by an experienced human operator. Some of the difficulties that were found included the tunnel being too narrow for the LHD (sized according to the manufacturer's specifications), and the floor having a large number of irregularities, pot holes, and varying inclinations. Of these factors, only the narrowness of the tunnel was included in the simulated environment. A view of the operator's control interface is shown in Figure 14.

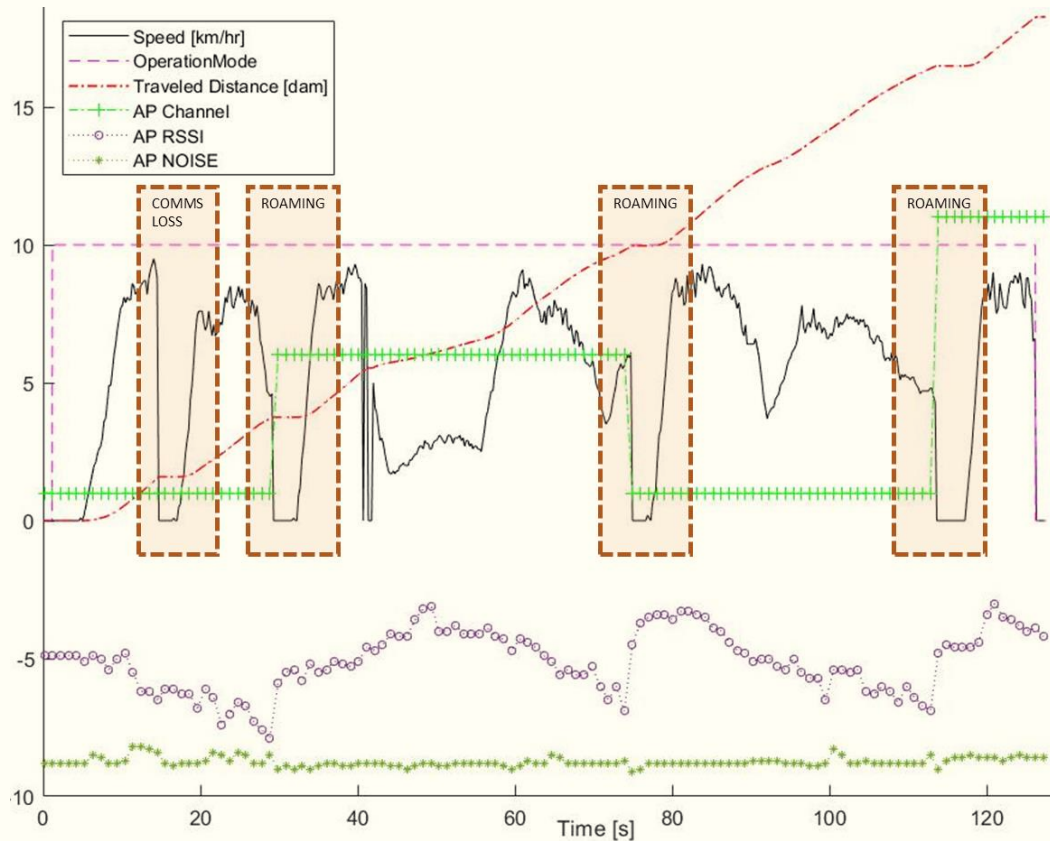


**Figure 14.** Operator's graphical interface of the navigation system.

Because of time constraints in the mine, testing, development and parameter tuning were done simultaneously. Because of this, most datasets of the tests in the mine are from a work-in-progress version of the navigation system. Results presented in this section are from 14 datasets (labeled 1, 2, 3, etc.), taken on a single afternoon two weeks before the end of on-site tests. 4 manual operation datasets (labeled M1, M2, M3, and M4) are also presented to have a reference for the performance of an experienced human LHD operator. These manual operation datasets were compiled a week later than the autonomous navigation datasets.

An important problem during tests was roaming between different Wi-Fi access points inside the tunnel. For safety reasons, the system stops accelerating the LHD if communication with the

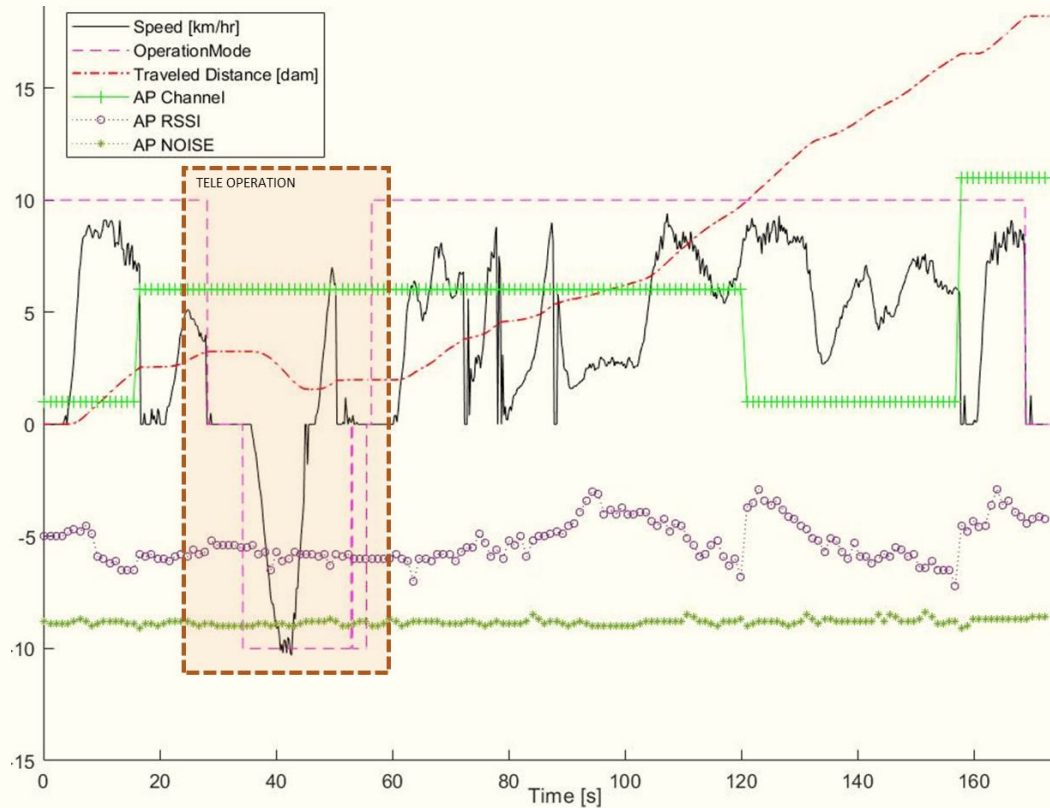
operation station becomes unstable, generating an emergency stop if the loss of communications is longer than a few seconds. Because of this, and a wireless network that did not have fast roaming capabilities, the system often stopped when switching from one access point to another. This can be seen in Figure 15, where stops produced by roaming, and by unstable communications, are shown. The Figure 15 also shows the instant speed of the vehicle (in km/h), the operation mode (with a value of 10 for autonomous navigation, 0 for idle, and -10 for tele-operation), distance traveled (in decameters), the Wi-Fi channel of the access point, at which the LHD is connected (different channels are used for faster roaming), and, finally, the RSSI and Noise values reported by the wireless modem of the vehicle. All the scales have been selected to fit in a single figure, to show the relation better between these variables.



**Figure 15.** Instant speed, operation mode, distance traveled, wireless communication channel, RSSI, and noise for dataset 1. It can be seen in the selected areas that the LHD comes to a stop when switching between different access points, or when the communication network becomes unstable.

Another consideration for these datasets, since the navigation map was still being tuned, is the intervention of the operator through tele-operation (or assisted teleoperation) to help the LHD go through some narrow passages, or to get back and try again to pass autonomously through a given part of the tunnel.

This is shown in Figure 16, as the vehicle needed to stop, then go back a couple of meters (with teleoperation assistance), to later reengage in the autonomous navigation mode, this time getting to the desired destination without further intervention.



**Figure 16.** Instant speed, operation mode, distance traveled, and wireless communication channel for dataset 5.

Taking these factors (stops because of communication problems and tele-operation) into account, a series of performance indicators were computed for all the datasets. The mean and max speed of the LHD are presented in Table 3. When analyzing the results, it is important to consider that some datasets were compiled with the LHD having a fully loaded bucket, and others with an empty bucket. In some of these datasets, the LHD is moving forward, towards the draw point of the tunnel, and in others, it is moving backward, towards the dump point of the tunnel. To better understand the performance of the system, and the effects of roaming and tele-operation, other indicators are presented, such as the length of the dataset, the total distance of the movement, and the total distance that the LHD was driven by the autonomous system. With an empty bucket, the seasoned operator drove through the tunnel at an average speed of 6.4 [km/h], while the autonomous system did the same at 5.8 [km/h], thus slightly underperforming. The maximum speed

achieved by the autonomous system was 11.3 [km/h] with a loaded bucket, while the seasoned operator achieved a maximum speed of 10.6 [km/h] with an empty bucket.

The Navigation time is either an autonomous navigation time or a manual operation time, depending on the dataset. Stop time is the time the machine was stopped, which includes the time at the start and the end of each dataset. Tele-operation time is the amount of time spent tele-operating the LHD so that it is able to resume autonomous tele-operation, usually because the autonomous navigation system didn't approach a curve appropriately, and reached a point where it didn't know how to proceed. The LHD was able to go through the tunnel without remote assistance in only 6 datasets, but it is important to remember that these were done during development, and small tweaks and adjustments, some of them that worked and some of them did not, were made in between.

**Table 3.** Mean Speed, Maximum Speed, Navigation Time, and Navigation Distance for autonomous navigation and manual operation datasets. ID: Dataset Identifier. T.Op Time: Tele-operation Time. TD: Total Distance. TAD: Total Autonomous Distance. E/L B: Empty or Loaded Bucket. H F/B: Heading Forward or Backwards.

ID	Mean Speed [km/h]	Max Speed [km/h]	Length [s]	Nav. Time [s]	Stop Time [s]	T.Op Time [s]	TD [m]	TAD [m]	E/L B	H F/B
1	6.01	9.50	127.4	109.3	18.1	0.0	182.6	182.6	E	F
2	4.80	10.80	189.7	139.4	38.1	12.2	184.4	185.8	L	B
3	6.06	9.80	215.6	112.1	21.6	81.8	183.2	188.7	E	F
4	4.23	9.60	300.8	154.2	117.1	29.5	187.2	181.7	L	B
5	5.91	9.90	150.8	109.5	41.3	0.0	179.6	179.6	E	F
6	4.58	9.00	169.0	105.6	63.4	0.0	134.4	134.4	L	B
7	5.98	9.70	143.6	111.4	25.3	6.9	191.0	185.4	E	F
8	4.15	10.50	336.0	192.2	69.0	74.8	174.8	221.8	L	B
9	5.54	9.40	172.9	126.1	25.7	21.1	182.1	194.6	E	F
10	4.94	10.20	205.6	134.5	46.6	24.5	172.8	184.6	L	B
11	5.33	9.70	323.9	159.0	84.7	80.2	174.3	235.1	E	F
12	4.44	10.80	165.9	147.5	18.4	0.0	181.8	181.7	L	B
13	6.04	9.50	122.9	109.2	13.7	0.0	183.7	183.3	E	F
14	4.93	11.30	147.6	133.3	14.3	0.0	182.9	182.9	L	B
M1	5.84	7.80	124.8	124.6	0.2	0.0	200.6	-	L	F
M2	6.39	8.70	116.7	116.5	0.2	0.0	205.7	-	E	B
M3	6.37	9.20	120.9	119.8	1.0	0.0	208.0	-	E	F
M4	6.44	10.60	109.8	109.6	0.2	0.0	195.0	-	E	B
$\mu(1-14)$ w/E	5.84	9.64	179.6	119.5	32.9	27.1	182.3	192.8	E	F
$\sigma(1-14)$ w/E	0.29	0.18	71.0	18.4	24.4	37.5	5.0	19.3	E	F
$\mu(1-14)$ w/L	4.58	10.31	216.4	143.8	52.4	20.1	174.0	181.8	L	B
$\sigma(1-14)$ w/L	0.32	0.79	72.8	26.3	35.2	27.0	18.2	25.4	L	B
$\mu(M2-M4)$	6.40	9.50	115.8	115.3	0.5	0.0	202.9	-	E	-
$\sigma(M2-M4)$	0.04	0.98	5.6	5.2	0.5	0.0	7.0	-	E	-

To further assess the driving abilities of the autonomous system, the smoothness of its operation is considered. For this, two different metrics are used. The first measures the change between two consecutive command inputs (propel and steering), as

$$E_u(k) = (u_v(k+1) - u_v(k))^2 \Delta t + (u_\omega(k+1) - u_\omega(k))^2 \Delta t \quad (22)$$

$$E_{LHD}(k) = (v(k+1) - v(k))^2 \Delta t + (\gamma(k+1) - \gamma(k))^2 \Delta t \quad (23)$$

The average and maximum values of both metrics for all datasets are presented in Table 4. Again, the human operator shows a better performance than the autonomous system. The consistency of the human operator is quite remarkable, and it shows its expertise and knowledge of the machine and the

is shown in equation (22). The second, in a similar way, measures the difference between two consecutive measures of the dynamic state of the LHD, namely, its speed and the angle of its articulation, as is shown in Equation (23).

tunnel. The autonomous system is also quite consistent on these metrics, but that is usually expected of an automation system. In order to have a better idea of the difference between them, Figures 17–20 show the machine inputs (propel and steering) as well as the instant speed and steering angle of the

LHD. Figures 17 and 19 show dataset 14, while Figures 18 and 20 show dataset M1. For clarity, Steering command and steering angle have been plotted separately from and propel command and LHD's speed. Both were made with the LHD having a fully loaded bucket, and with the vehicle moving backward, towards the dump point of the tunnel.

Straight lines can be seen in Figure 16 on the propel command line, showing a constant output by the autonomous system. Looking at both figures, it can be seen that the human operator uses fewer steering commands, perhaps showing a better understanding of the LHD kinematics, and, therefore, greater abilities to predict the behavior of the vehicle.

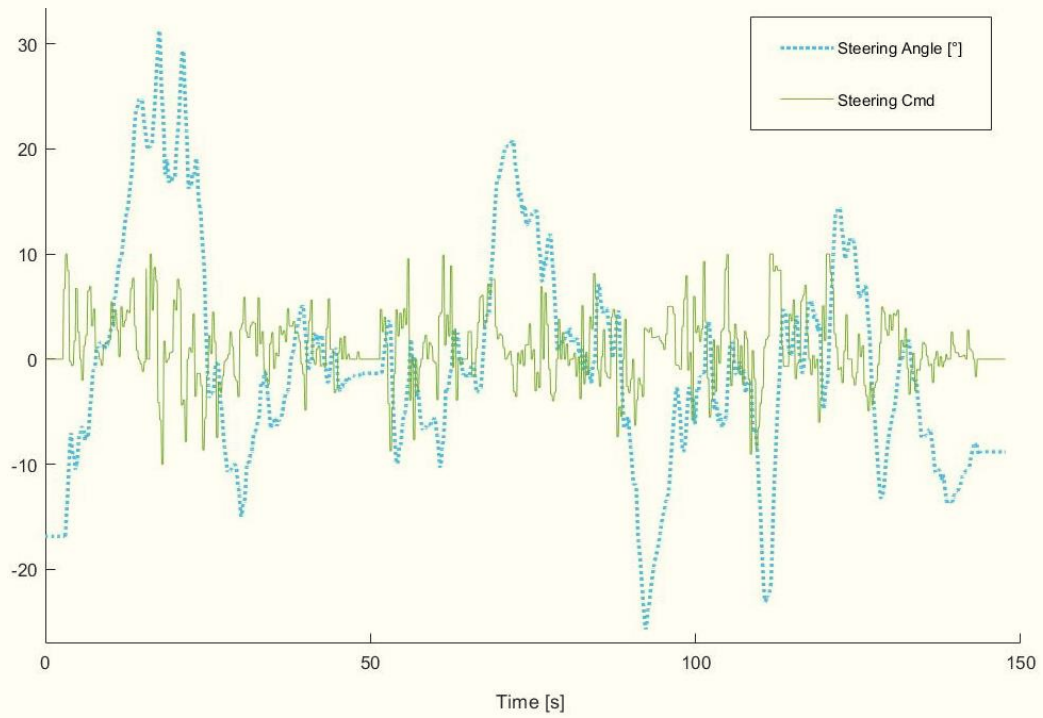
**Table 4.** LHD input difference, state difference and distance to the walls for autonomous navigation and manual operation. ID: Dataset Identifier. ACD: Average Command Difference ( $E_u$ ). MCD: Max Command Difference ( $E_u$ ). ASD: Average State Difference ( $E_{LHD}$ ). MSD: Max State Difference ( $E_{LHD}$ ). H F/B: Heading Forward or Backwards. ADLW: Average Distance to Left Wall. MDLW: Minimum Distance to Left Wall. ADRW: Average Distance to Right Wall. MDRW: Minimum Distance to Right Wall.

ID	ACD	MCD	ASD	MSD	ADLW [m]	MDLW [m]	ADRW [m]	MDRW [m]
1	0.0060	0.2776	0.0451	5.0400	0.62	0.19	0.67	0.16
2	0.0053	0.3941	0.0358	3.4820	0.84	0.10	0.47	0.10
3	0.0066	0.2510	0.0380	4.7157	0.62	0.12	0.64	0.19
4	0.0043	0.3777	0.0347	6.8018	0.71	0.10	0.43	0.10
5	0.0068	0.2184	0.0484	5.4908	0.62	0.20	0.61	0.23
6	0.0058	0.2607	0.0323	1.9258	0.55	0.10	0.46	0.10
7	0.0059	0.3070	0.0309	5.3291	0.61	0.10	0.64	0.12
8	0.0058	0.2110	0.0558	5.8182	0.68	0.10	0.41	0.10
9	0.0071	0.3096	0.0514	7.8898	0.63	0.17	0.65	0.11
10	0.0056	0.2268	0.0717	6.1329	0.71	0.11	0.50	0.10
11	0.0059	0.2157	0.0583	5.7393	0.56	0.10	0.65	0.17
12	0.0056	0.2526	0.0361	3.4673	0.73	0.10	0.51	0.10
13	0.0072	0.3440	0.0359	4.3288	0.64	0.16	0.63	0.11
14	0.0048	0.1749	0.0383	4.5030	0.78	0.13	0.49	0.10
M1	0.0018	0.0406	0.0076	0.1779	0.60	0.10	0.56	0.10
M2	0.0016	0.0339	0.0090	0.1044	0.47	0.10	0.63	0.11
M3	0.0016	0.0452	0.0091	0.2017	0.48	0.10	0.69	0.10
M4	0.0013	0.0260	0.0070	0.1617	0.44	0.10	0.70	0.12
$\mu(1-14)$	0.0053	0.2711	0.0435	4.5901	0.66	0.13	0.55	0.13
$\sigma(1-14)$	0.0006	0.0834	0.0147	1.7500	0.08	0.04	0.10	0.04
$\mu(M1-M4)$	0.0016	0.0364	0.0082	0.1614	0.50	0.10	0.65	0.11
$\sigma(M1-M4)$	0.0002	0.0083	0.0010	0.0414	0.07	0.00	0.06	0.01

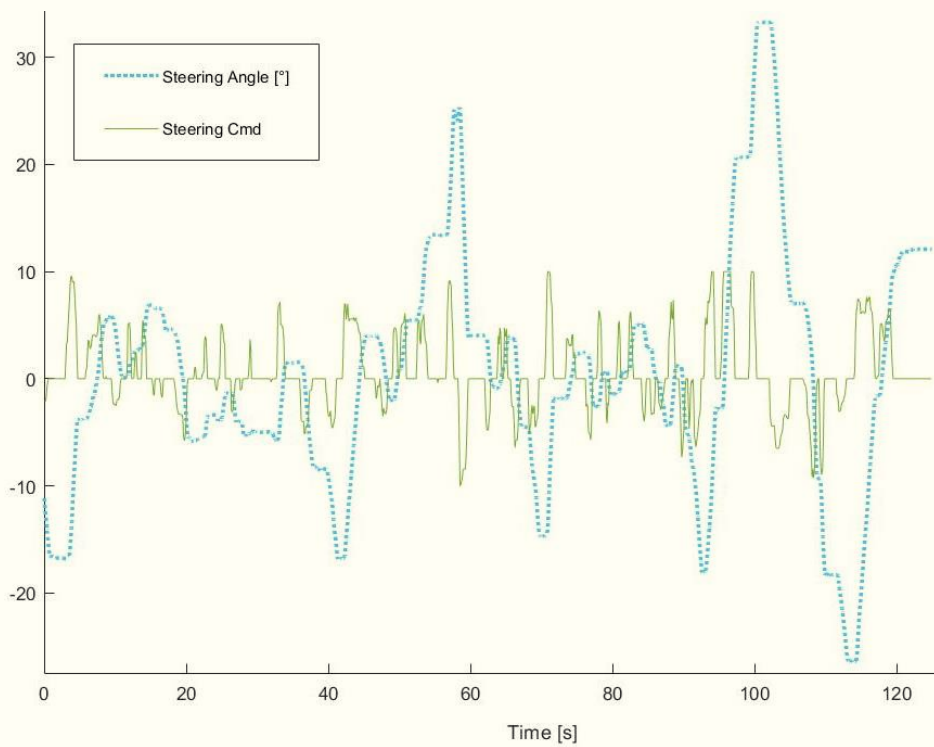
The average and minimum distances to both tunnel walls are also shown on Table 4. In this regard, the system and the human operator have similar performance, with the human operator preferring to

be slightly closer to the left wall (since the cabin is on that side, therefore the operator has better visibility on that side), while the autonomous system is usually closer to the right side of the tunnel.

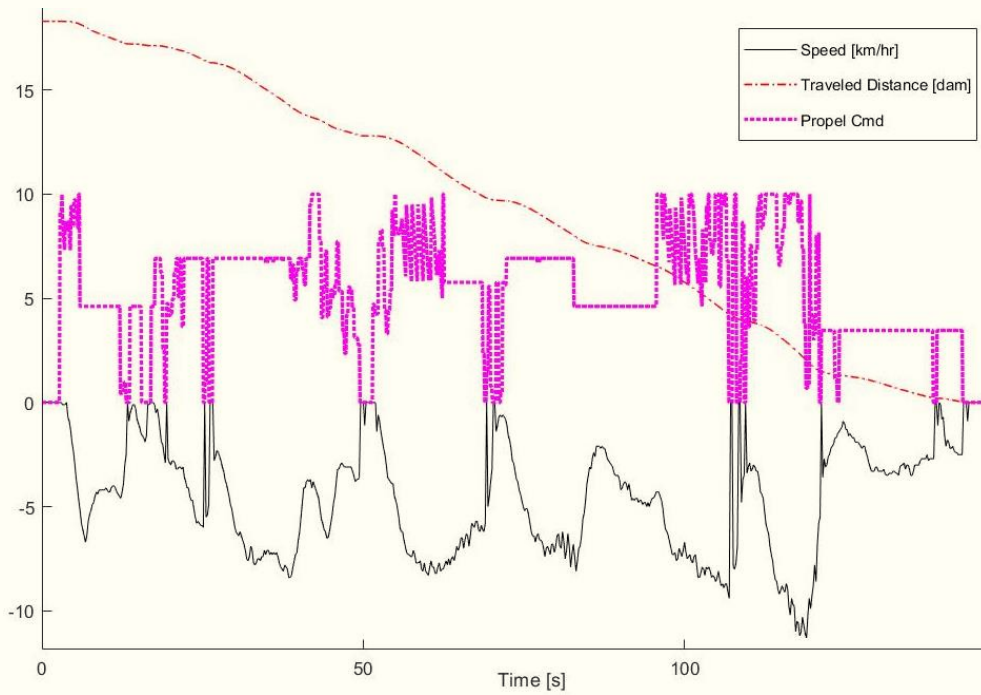




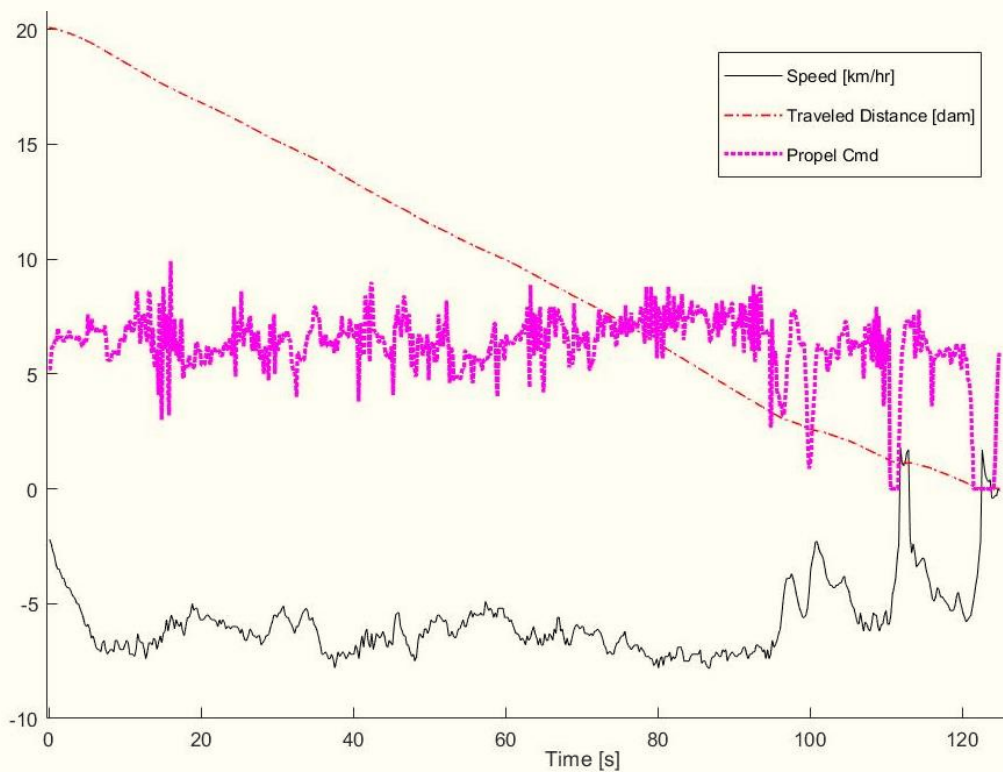
**Figure 17.** Autonomous System steering commands and LHD steering angle on dataset 14.



**Figure 18.** Human operator steering commands and LHD steering angle on dataset M1.



**Figure 19.** Autonomous System propel commands and LHD speed on dataset 14.



**Figure 20.** Human operator propel commands and LHD speed on dataset M1.

## 6. Conclusions

The proposed topological navigation and localization simulation, field trials, and finally, in a production tunnel of a copper, underground, sublevel stoping mine. Using this system, the LHD was able to navigate safely inside the mine, maintaining a safe distance between the LHD and the tunnel's walls at all times.

Parameterization of the navigation conditions for each individual TM node was crucial for achieving the desired behavior on the underground industrial tests. The software modularization allowed the development of specific software components for tackling the different challenges of the autonomous navigation. The *Navigation Control* module manages the mission requests and the overall navigation behavior. *Deliberative Path Planning* generates local driving trajectories for the *Guidance* module to follow, while avoiding the tunnel walls and obstacles. *Command Executor* maintains a queue of consistent and smooth commands to guarantee short-term operation, while simultaneously maintaining system safety. Finally, global and local localization allows maintaining an estimation of the pose of the LHD inside the mine.

When comparing the automation system with a seasoned human operator, it shows a slightly slower performance (about 10% in terms of average instant speed), which is not that serious when taking into

consideration all the safety and operational benefits of the system. Besides being faster, the human operator showed smoother driving and more control of the LHD, but this did not necessarily reflect on the performance of the system, or at least it was not noticeable when supervising the operation. It needs to be considered that the tunnel was very narrow and the system needed to be tuned to drive very near to the walls, at a distance of about 10 [cm], in order to be able to drive through some parts of the tunnel (the LHD manufacturer recommends a minimum distance of 50 [cm] to each side of the tunnel).

One of the major problems during testing on site was the lack of a wireless communication infrastructure with the capabilities of high speed roaming. This caused preemptive stops and/or speed reductions while going through the tunnel, hindering the optimizing process of the system and hurting the overall performance. A video showing the operator's graphic interface while the system is driving the LHD autonomously through the tunnel can be found at <https://youtu.be/4Q34N25XjpA> (accessed on July 14th, 2021).

The system is now being installed and tested in a room and pillar mine in Germany, where a more robust, and better performing, network infrastructure will be used.

## Acknowledgments

We thank Dr. Paul Vallejos for the valuable discussions and support for on-site execution of the experiments, and Felipe Inostroza and Daniel Cárdenas for their valuable help in computing metrics

for the results section. We acknowledge Compañía Minera San Gerónimo for providing the mine infrastructure for testing the system, and GHH Chile for supplying the LHD machine needed for this work.

## References

1. Salvador, C.; Mascaró, M.; Ruiz-del-Solar, J. Automation of unit and auxiliary operations in block/panel caving: Challenges and opportunities. In Proceedings of the MassMin2020—The 8th International Conference on Mass Mining, Santiago, Chile, 9–11 December 2020.
2. Scheduling, S.; Dissanayake, G.; Nebot, E.; Durrant-Whyte, H. Slip modelling and aided inertial navigation of an LHD. In Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, NM, USA, 25 April 1997; Volume 3, pp. 1904–1909.
3. Madhavan, R.; Dissanayake, M.W.M.G.; Durrant-Whyte, H.F. Autonomous underground navigation of an LHD using a combined ICP-EKF approach. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium 16–20 May 1998; Volume 4, pp. 3703–3708.
4. Scheduling, S.; Dissanayake, G.; Nebot, E.M.; Durrant-Whyte, H. An experiment in autonomous navigation of an underground mining vehicle. *IEEE Trans. Robot. Autom.* **1999**, *15*, 85–95.
5. Poole, R.A.; Golde, P.V.; Baiden, G.R.; Scoble, M. A review of INCO's mining automation efforts in the Sudbury Basin. *CIM Bull.* **1998**, *91*, 68–74.

6. Mäkelä, H. Overview of LHD navigation without artificial beacons. *J. Robot. Auton. Syst.* **2001**, *36*, 21–35.
7. Roberts, J.M.; Duff, E.S.; Corke, P.I.; Sikka, P.; Winstanley, G.J.; Cunningham, J. Autonomous control of underground mining vehicles using reactive navigation. In Proceedings of the 2000 ICRA: Millennium Conference—IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, USA, 24–28 April 2000; Volume 4, pp. 3790–3795.
8. Ridley, P.; Corke, P. Autonomous control of an underground mining vehicle. In Proceedings of the Australian Conference on Robotics and Automation, Sydney, Australia, 14–15 November 2001.
9. Duff, E.S.; Roberts, J.M.; Corke, P.I. Automation of an underground mining vehicle using reactive navigation and opportunistic localization. In Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, NV, USA, 27–31 October 2003; Volume 3, pp. 3775–3780.
10. Larsson, J. Reactive Navigation of an Autonomous Vehicle in Underground Mines. Ph.D. Thesis, Örebro University, Örebro, Sweden, 2007.
11. Marshall, J.; Barfoot, T.; Larsson, J. Autonomous underground tramming for center-articulated vehicles. *J. Field Robot.* **2008**, *25*, 400–421.
12. Larsson, J.; Appelgren, J.; Marshall, J. Next generation system for unmanned lhd operation in underground mines. In Proceedings of the Annual Meeting and Exhibition of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration—SME, Phoenix, AZ, USA, 28 February–3 March 2010.
13. Gleeson, D. Sandvik to automate new LHD fleet at Codelco’s El Teniente copper mine. 2016. Available online: <https://im-mining.com/2021/02/16/sandvik-to-automate-new-lhd-fleet-at-codelcos-el-teniente-copper-mine> (accessed on July 15th, 2021)
14. Schunnesson, H.; Gustafson, A.; Kumar, U. Performance of automated LHD machines: A review. In Proceedings of The International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. Banff, AB, Canada, 16–19 November 2009. Available online: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-38494> (accessed on July 14th, 2021).
15. Walker, S. The drivers of autonomy. *Eng. Min. J.* **2012**, *213*, 52.
16. Paraszczak, J.; Gustafson, A.; Schunnesson, H. Technical and operational aspects of autonomous LHD application in metal mines. *Int. J. Min. Reclam. Environ.* **2015**, *29*, 391–403.
17. Dekker, L.G.; Marshall, J.A.; Larsson, J. Experiments in feedback linearized iterative learning-based path following for center-articulated industrial vehicles. *J. Field Robot.* **2019**, *36*, 955–972.
18. Jang, H.; Topal, E. Transformation of the Australian mining industry and future prospects. *Min. Technol.* **2020**, *129*, 120–134.
19. Li, J.G.; Zhan, K. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment. *Engineering* **2018**, *4*, 381–391.
20. Gao, L.; Ma, F.; Jin, C. A model-based method for estimating the attitude of underground articulated vehicles. *Sensors* **2019**, *19*, 5245.
21. Bai, G.; Liu, L.; Meng, Y.; Luo, W.; Gu, Q.; Ma, B. Path tracking of mining vehicles based on nonlinear model predictive control. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 1372.
22. Silver, D.; Ferguson, D.; Morris, A.; Thayer, S. Feature extraction for topological mine maps. In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, 28 September–2 October 2004; Volume 1, pp. 773–779.
23. Konolige, K.; Marder-Eppstein, E.; Marthi, B. Navigation in hybrid metric-topological maps. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, 9–13 May 2011; pp. 3041–3047.
24. Yoon, Y.; Shin, J.; Kim, H.J.; Park, Y.; Sastry, S. Model-predictive active steering and obstacle avoidance for autonomous ground vehicles. *Control Eng. Pract.* **2009**, *17*, 741–750.
25. Backman, J.; Oksanen, T.; Visala, A. Navigation system for agricultural machines: Nonlinear model predictive path tracking. *Comput. Electron. Agric.* **2012**, *82*, 32–43.
26. Ji, J.; Khajepour, A.; Melek, W.W.; Huang, Y. Path planning and tracking for vehicle collision avoidance based on model predictive control with multiconstraints. *IEEE Trans. Veh. Technol.* **2016**, *66*, 952–964.
27. Ruiz-del-Solar, J.; Vallejos, P.; Correa, M.

- Robust autonomous navigation for underground vehicles. In Proceedings of the Automining—5th International Congress on Automation in Mining, Antofagasta, Chile, 30 November–2 December 2016.
28. Dijkstra, E. A note on two problems in connexion with graphs. *Numer. Math.* **1959**, *1*, 269–271. Available on: <http://www.cs.yale.edu/homes/lans/readings/routing/dijkstra-routing-1959.pdf> (accessed on July 14th, 2021)
29. Koenig, N.; Howard, A. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. In Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, Sendai, Japan, 28 September–2 October 2004; Volume 3, pp. 2149–2154.
30. Quigley, M.; Conley, K.; Gerkey, B.; Faust, J.; Foote, T.; Leibs, J.; Wheeler, R.; Ng, A. ROS: An open-source robot operating system. In Proceedings of the ICRA Workshop on Open Source Software, Kobe, Japan, 12–17 May 2009.
-



# INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

---

## Empresas Socias

AGUAS ANDINAS S.A.

ALSTOM CHILE S.A.

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.

COLBÚN S.A.

CyD INGENIERÍA LTDA.

EMPRESA CONSTRUCTORA BELFI S.A.

EMPRESA CONSTRUCTORA GUZMÁN Y LARRAÍN LTDA.

EMPRESA CONSTRUCTORA PRECON S.A.

EMPRESA NACIONAL DE TELECOMUNICACIONES S.A.

EMPRESAS CMPC S.A.

ENAEX S.A.

ENEL GENERACIÓN CHILE S.A.

FLUOR CHILE S.A.

INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN SIGDO KOPPERS S.A.

SOCIEDAD QUÍMICA Y MINERA DE CHILE S.A.

SUEZ MEDIOAMBIENTE 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.

ZAÑARTU INGENIEROS CONSULTORES LTDA.



# Lleva a tu empresa por un camino diferente



Wholesale & Investment Banking de Bci te acompaña en la transformación de tu empresa, para que se convierta en un negocio cada vez más **sostenible**.

Conoce más en [bci.cl/empresas/asg](http://bci.cl/empresas/asg)

**Acción  
diferente**

Infórmese sobre la garantía estatal de sus depósitos en su banco o en [www.cmfchile.cl](http://www.cmfchile.cl)



**Wholesale & Investment Banking**