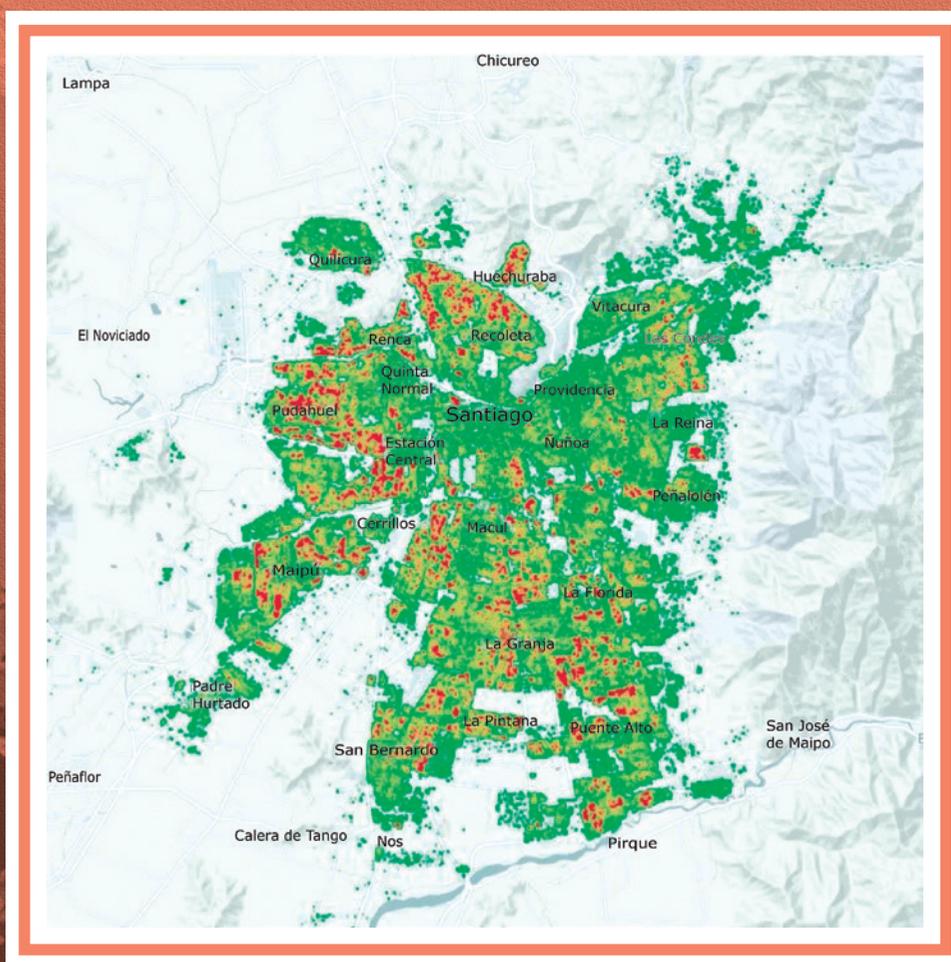


Revista Chilena de

INGENIERIA

ISSN 0370 - 4009 - N° 490 - Agosto 2020



Anales del Instituto de Ingenieros

Vol. 132, N° 2 - 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

Presidente

Ricardo Nicolau del Roure G.

Primer Vicepresidente

Luis Nario Matus

Segundo Vicepresidente

Carlos Mercado Herreros

Tesorera

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Protesorero

Jorge Pedrals Guerrero

Secretaria

Ximena Vargas Mesa

Prosecretaria

Germán Millán Valdés

DIRECTORIO 2020

Iván Álvarez Valdés

Elías Arze Cyr

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Juan E. Cannobbio Salas

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Alex Chechilnitzky Zwicky

Raúl Demangel Castro

Andrés Fuentes Torres

Roberto Fuenzalida González

Javier García Monge

Rodrigo Gómez Álvarez

Cristian Hermansen Rebolledo

Carlos Mercado Herreros

Germán Millán Valdés

Rodrigo Muñoz Pereira

Ricardo Nanjarí Román

Luis Nario Matus

Ricardo Nicolau del Roure G.

Jorge Pedrals Guerrero

Humberto Peña Torrealba

Luis Pinilla Bañados

Daniela Pollak Aguiló

Miguel Ropert Dokmanovic

Mauricio Sarrazin Arellano

Alejandro Steiner Tichauer

Ximena Vargas Mesa

Luis Valenzuela Palomo

René Vásquez Canales

Jorge Yutronic Fernández

Secretario General

Carlos Gauthier Thomas

SOCIEDADES ACADÉMICAS MIEMBROS DEL INSTITUTO

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

Presidente: Rodolfo Saragoni H.

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

Presidente: Alexander Chechilnitzky Z.

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

Presidente: José Vargas B.

SOCIEDAD CHILENA
DE GEOTECNIA, **SOCHIGE**.

Presidente: Gonzalo Montalva A.

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

Presidenta: Carolina Palma A.

PMI SANTIAGO CHILE CHAPTER.

Presidente: Alfonso Barraza San M.

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

Presidente: Mario Letelier S.

COMISIONES DEL INSTITUTO

ECONOMÍA CIRCULAR.

Presidente: Javier García M.

INGENIERÍA Y ÉTICA.

Presidente: Elías Arze Cyr.

**INTELIGENCIA ARTIFICIAL
Y EL BIG DATA.**

Presidente: Juan Carlos Barros M.

INGENIEROS EN LA HISTORIA PRESENTE.

Presidente: Ricardo Nanjarí R.

INGENIERÍA Y CIENCIAS DE LA VIDA.

Presidente: Alejandro Steiner T.

**LA GESTIÓN Y CALIDAD DEL DISEÑO
DE LOS PROYECTOS DE INGENIERÍA.**

Presidente: Ricardo Nicolau del Roure G.

PROSPECTIVAS DE LA INGENIERÍA.

Presidente: Jorge Yutronic F.

VISIÓN DEL NEGOCIO DEL COBRE.

Presidente: Andrés Fuentes T.

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

Luis Court Moock

Alex Chechilnitzky Zwicky

Raúl Espinosa Wellmann

Álvaro Fischer Abeliuk

Roberto Fuenzalida González

Tristán Gálvez Escuti

Alejandro Gómez Arenal

Tomás Guendelman Bedrack

Diego Hernández Cabrera

Jaime Illanes Piedrabuena

Agustín León Tapia

Jorge López Bain

Jorge Mardones Acevedo

Carlos Mercado Herreros

Germán Millán Pérez

Guillermo Noguera Larraín

Luis Pinilla Bañados

Rodolfo Saragoni Huerta

Mauricio Sarrazin Arellano

Raúl Uribe Sawada

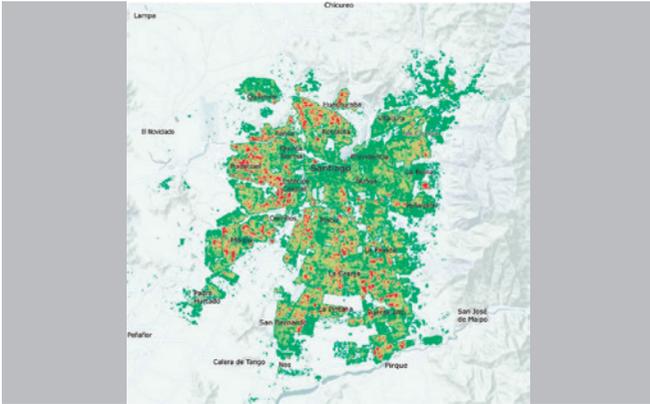
Luis Valenzuela Palomo

Solano Vega Vischi

Hans Weber Münnich

Andrés Weintraub Pohorille

Jorge Yutronic Fernández



Nuestra portada

El mapa de calor, producido por la empresa Big Data Unholster, muestra la distribución del riesgo de muerte por COVID-19 en Santiago. Las manzanas señaladas en rojo son aquellas donde el riesgo de muerte es más alto porque concentran gran número de adultos mayores. Las manzanas señaladas en verde son aquellas donde la concentración de adultos mayores es menos significativa. Fuente de la fotografía: www.unholster.com

REVISTA CHILENA DE INGENIERÍA N° 490, agosto de 2020

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

Ricardo Nicolau del Roure G.
Dirección: San Martín N° 352, Santiago

SECRETARIO GENERAL

Carlos Gauthier T.

SECRETARÍA

Patricia Núñez G.

DIAGRAMACIÓN E IMPRESIÓN

versión productora gráfica SpA

EDITORIAL.

Pág. 2

CRISIS DEL COVID-19. ¿POSIBLE SALIDA?

Pág. 3

Conferencia del Sr. Alexander Galetovic,
Economista, Senior Fellow de la
Universidad Adolfo Ibáñez.

METRO: EL VIAJE DE LA RECONSTRUCCIÓN.

Pág. 16

Conferencia del Sr. Louis de Grange C.,
Presidente de METRO S.A.

ENTREVISTA A INGENIEROS DESTACADOS.

Pág. 30

- Sr. Ricardo Baeza Yates.
- Sr. Víctor Pérez Vera.

Comisión de Ingenieros en la Historia Presente.
Presidente: Ricardo Nanjarí R.

A partir del conflictivo periodo que se inició en octubre de 2019 y que continuó con la pandemia del Covid-19, todas las actividades del país debieron acomodarse a las circunstancias para poder seguir operativas. El Instituto de Ingenieros de Chile no escapó a esta situación y organizó sus actividades de manera virtual, incluidas las tradicionales conferencias mensuales que, con esta modalidad, solo se pudieron reactivar en julio de 2020. Estas conferencias fueron dictadas por el Economista Alexander Galetovic, en el mes de julio, y por el Ingeniero Louis de Grange, en agosto. Los textos completos se incluyen en la presente edición de la Revista.

El profesor Alexander Galetovic, destacado Economista de la Pontificia Universidad Católica de Chile, doctorado en el University College de Londres, se refirió a la crisis del Covid-19 y a su posible salida, toda vez que esta pandemia despierta temor, e incluso pánico en muchas personas debido a la creencia de que, si no se hacen cosas drásticas, tales como las cuarentenas generales, la enfermedad se expandiría de manera exponencial, los servicios de salud colapsarían y mucha gente moriría.

En su exposición, el Profesor Galetovic desarrolló un profundo análisis interpretativo del fenómeno, examinando una ecuación estándar en modelos epidemiológicos, dando origen a diversas denominaciones del fenómeno, siendo la palabra “pandemia” la de mayor uso en todas las comunicaciones.

Comparando lo observado en diferentes países, señala que el comportamiento del virus y del Covid-19 es similar en casi todas partes y que no correspondería a un crecimiento de tipo exponencial. Considera que las premisas fundamentales son equivocadas y sus predicciones no calzan con lo que ha pasado. Concluye con una proposición alternativa a base de tres pilares: exámenes, registros y trazado, con la debida coordinación con las autoridades de salud.

En la siguiente conferencia, el Presidente de METRO S.A. don Louis de Grange Concha, ingeniero civil industrial de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Máster en Economía de Transporte y Doctor en Planificación de Sistemas de Transporte, expuso detalladamente el proceso de reconstrucción del Metro de Santiago.

En la primera parte de la exposición, el señor de Grange realizó un análisis cuantitativo de la situación de la Empresa, separando lo realizado en forma previa al 18 de octubre de 2019, de los trabajos posteriores de recuperación de las instalaciones y servicios.

Los servicios de Metro habían subido desde 721 millones de pasajeros transportados en 2018 a 770 millones en 2019, y con los nuevos proyectos de las Líneas 7, 8 y 9, más la extensión de la Línea 4 Bajos de Mena, llegaría en 2027 a cerca de 1.423 millones de pasajeros. La Empresa había ascendido en el ranking MERCO de 2018, del lugar 27 al lugar 10, con significativos avances en el Plan de Inclusión, proyectando tener el 100% de las Estaciones con ascensores y permitiendo el ingreso desde fuera de la Estación, de las personas con movilidad reducida.

A partir del 18 de octubre de 2019, un 87% de las Estaciones tuvieron daños, muchos de los cuales alcanzando destrucción total. La Empresa se puso inmediatamente en campaña de trabajos y hacia fines de 2019, ya había recuperado el 81% de las Estaciones. En la actualidad, agosto de 2020, se han recuperado 124 de las 136 Estaciones, lo que equivale a más de un 90% de la red operativa.

Otras actividades que se pudieron realizar por la vía virtual, se enmarcaron en el Programa de la Comisión de Ingenieros en la Historia Presente. En esta ocasión, la Comisión solicitó a los destacados ingenieros señores Ricardo Baeza Yates y Víctor Pérez Vera, que completaran un extenso cuestionario-entrevista, aumentando así el catastro histórico que ya registra un amplio número de entrevistas a profesionales que han sido trascendentes en la ingeniería nacional. En esta edición se transcriben extractos de ambas entrevistas, las que serán posteriormente publicadas íntegramente.

CRISIS DEL COVID-19. ¿POSIBLE SALIDA?

*Conferencia del
Sr. Alexander Galetovic,
Economista.*



Sr. Alexander Galetovic.

El día martes 7 de julio de 2020, se dio inicio al tradicional ciclo de conferencias del Instituto de Ingenieros de Chile, y en forma muy especial, por la contingencia mundial que estamos viviendo –COVID-19– nuestra corporación ha iniciado este ciclo mediante videoconferencias gracias al aporte de REUNA.

En nuestra primera videoconferencia, ante la participación de una numerosa asistencia de personalidades del ámbito público, académico y privado, se contó con la exposición del Sr. Alexander Galetovic, quien expuso: “Crisis del COVID-19 ¿Posible Salida?”.

El Sr. Galetovic, es Senior Fellow en la Universidad Adolfo Ibáñez, Research Fellow en la Hoover Institution de Stanford, Research Associate en CRIEP de las Universidades de Padua, Verona y Venecia, y Profesor Visitante en el Sim Kee Boon Institute of Financial Economics de la Singapore Management University.

Antes fue Profesor en la Universidad de Los Andes, en el Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Chile, Visiting Scholar en el Instituto del FMI, Tinker Visiting Professor en Stanford, Rita Ricardo-Campbell National Fellow en la Hoover Institution en Stanford y Profesor Visitante en la Universidad de Padua.

Es autor de más de 45 artículos académicos publicados en revistas internacionales. También editó el libro “Santiago: dónde estamos y hacia dónde vamos” (Santiago: Centro de Estudios Públicos, 2006) y, en conjunto con Eduardo Engel y Ronald Fischer, escribió The Economics of Public Partnerships: A Basic Guide, publicado por Cambridge University Press en 2014, que rápidamente se ha convertido en la referencia estándar sobre concesiones de infraestructura y que ha sido traducido al castellano, chino y japonés, y próximamente al italiano y al portugués.

Alexander Galetovic.

—Muchas gracias por la invitación; es un honor para mí dar la primera videoconferencia en la historia del Instituto. Presentaré un trabajo que estoy haciendo actualmente sobre COVID-19 en conjunto con Stephen Haber de la Universidad de Stanford y de Ignacio Núñez, de la Universidad de Texas.

El pánico.

Creo que es apropiado decir que el COVID-19 despierta temor e incluso el pánico en mucha gente, y es bueno retroceder un poco y ver cuál es el origen del pánico. Éste se debe en gran medida a la creencia de que, si no hacemos cosas drásticas tales como las cuarentenas generales, la enfermedad se expandirá de manera exponencial, los servicios de salud colapsarán y mucha gente morirá. ¿De dónde viene esa creencia?

Aunque tal vez cueste creerlo, el origen es una ecuación, viz.

$$\frac{\Delta I_t}{I_t} = \beta \frac{S_t}{N} - \gamma.$$

Esta ecuación es estándar en modelos epidemiológicos (se trata del modelo SIR, por susceptible, *infected*, *recovered*) y se originó en 1927. El lado izquierdo es la tasa de crecimiento del número de personas infectadas y que pueden infectar a otros (I) en el instante (o día) t.

El lado derecho dice que la magnitud de la tasa de crecimiento es igual a la diferencia de dos términos. El primero es el producto del parámetro β , que mide la tasa de contactos que causan una infección, y la razón entre los individuos susceptibles de contagiarse (S_t) y la población total (N). Mientras más alta es la tasa de contactos y mayor es el número de personas susceptibles, más rápido crece el número de personas que están infectadas y pueden infectar a otros en un momento del tiempo. El parámetro γ , por su parte, es la tasa a la cual los infectados salen de ese estado, sea para mejorarse o para morir. De hecho, el modelo SIR más simple supone que una fracción fija de los que salen del estado de infectados se mueren.

Al principio de la pandemia se supuso que todos éramos susceptibles. Y si la epidemia está partiendo, entonces

$S_t \approx N$, y la tasa a la cual crece el número de personas infectadas es:

$$\approx \beta - \gamma \equiv \gamma (\mathfrak{R}_0 - 1),$$

donde $\mathfrak{R}_0 \equiv \beta/\gamma$ es el famoso número reproductivo básico, el número de personas que un infectado contagia cuando toda la población es susceptible. Y ahí está la exponencial: en la medida que $\mathfrak{R}_0 > 1$, por un tiempo el número de infectados crece exponencialmente –Jorge contagia a Pedro y María, Pedro y María contagian a Manuel, Romina, Roberto y Andrea, y así sucesivamente– y eventualmente se infecta una fracción igual a:

$$e^* = - \frac{\ln(1 - e^*)}{\mathfrak{R}_0}.$$

Entonces se alcanza la inmunidad de rebaño porque se infectó una fracción suficientemente grande de la población y el número de susceptibles (quienes aún no se han contagiado) es suficientemente bajo. Las simulaciones iniciales suponían que \mathfrak{R}_0 variaba entre 2 y 4 y eso implicaba que se infectarían en cuestión de meses, alrededor del 80-90% de la población (para comprobarlo basta con resolver la ecuación que determina e^*).

Más aún. Como dije, el modelo supone que la relación entre infectados y muertes es lineal –se muere un porcentaje fijo de los infectados (aunque la tasa de muerte varíe con la edad)–, por lo que el crecimiento de las muertes también es exponencial por un tiempo. Por lo tanto, el número total predicho de muertos es δe^* , donde δ es la frecuencia o tasa de muerte condicional a contraer COVID-19 (la *infection fatality ratio*).

Como sea, en marzo, las predicciones eran catastróficas. La Organización Mundial de la Salud estimaba la tasa de muerte, condicional a contagiarse, en 3,4%. Un estudio del epidemiólogo Neil Ferguson de *Imperial College* y sus coautores afirmaba que 510.000 británicos podían morir y alrededor del 60% de la población se podía contagiar en el transcurso de los siguientes 12 meses. De manera similar la Canciller Merkel anunciaba que, de no tomarse medidas drásticas, el 70% de los alemanes podría contagiarse. Y en los Estados Unidos, el Dr. Ezekiel Emanuel, presidente del Departamento de Ética Médica de la Universidad de Pensilvania, advertía que a la tasa de propagación que revelaban los primeros casos, era probable que hubiera 100 millones de estadounidenses infectados en cuatro

semanas. A la tasa de muerte de la OMS eso implicaba 3,4 millones de muertos y, quizás más, porque los hospitales hubiesen colapsado.

Las predicciones catastróficas generaron pánico y no es sorprendente que muchos abogaran por cuarentenas drásticas y generales. De acuerdo con el modelo, lo único que se puede hacer es bajar la tasa de contacto β (γ es un parámetro biológico), y eso requiere distanciamiento social entre las personas y una nueva forma de vivir. En esencia, se trata de retardar las infecciones para aplanar la curva de contagios, evitar que los hospitales colapsen, y así esperar una cura o vacuna.

Sin embargo, las predicciones fueron quedando obsoletas rápidamente. Aunque hubo países tales como Italia, España y Bélgica donde la epidemia cobró muchas vidas, los datos muestran que casi en ninguna parte los infectados y las muertes han crecido de manera exponencial, con independencia de cuán fuertes o débiles hayan sido las cuarentenas y las políticas de distanciamiento social. De acuerdo con los contagios reportados en todo el mundo al 27 de julio, recién se ha contagiado el 0,21% de la población mundial. Aun si los casos medidos subestimasen en un orden de magnitud al número verdadero, recién llegaríamos al 2%, muy lejos del 80-90% que, el modelo predecía se alcanzaría en un par de meses. La discrepancia entre realidad y predicción es tan grande, que simplemente no es creíble que la diferencia se deba a un cambio del comportamiento de las personas o de políticas que hayan adoptado los Gobiernos y que hayan disminuido el β . Más aún. Para que el modelo prediga que el 2% de las personas se contagiará y entonces se alcanzará la inmunidad de rebaño el \mathfrak{R}_0 tiene que caer a 1,01, que casi no es distinguible de 1. ¡Enorme peso el que lleva encima un parámetro que nadie nunca ha sido capaz de medir directamente!

Rápidamente, también, empezó a emerger evidencia de que la tasa de muerte era a lo menos de un orden de magnitud menor que el 3,4% de la OMS; del orden de 0,4% o menos (dependiendo del porcentaje de infectados que sea asintomático). Y, similarmente importante, casi de inmediato quedó en claro que el COVID-19 era una enfermedad extremadamente desigual, porque se mueren sobre todo los mayores de 60-65 años y las personas que padecen de ciertas enfermedades –v.gr. diabetes, hipertensión, SIDA, enfermedades coronarias o respiratorias–, cosa que el informe del *Imperial College* reconocía, pero no enfatizaba.

Con todo, y a pesar de que la evidencia indica que el COVID-19 no es como se le describió al principio (lo veremos a continuación), me parece que no exagero si digo que el pánico que sigue de la ecuación que les mostré está aún con nosotros. Lo sugiere, entre otras cosas la retórica que usamos –“pandemia”, “matadero”, “batalla” son términos de uso habitual para referirse a lo que vivimos; el que mucha gente cree que vive amenazada de muerte; o el que los padres temen que mandar a sus niños al colegio los pone en peligro mortal. En realidad, a casi cuatro meses de la llegada del primer caso no tenemos la idea de cómo volver a cierta normalidad.

No estoy juzgando a quienes usan la retórica de pánico, mucho menos el temor que pueden sentir muchos. Mucha gente ha sido tocada por esta enfermedad directamente, hay gente que ha muerto, hay gente que ha lamentado la muerte de personas queridas y cercanas. Pero lo que quiero hacer en esta charla es preguntarme si esta es la manera apropiada de mirar el problema que tenemos, en vista de que el modelo que se ha usado para informar las decisiones ha fracasado al predecir lo que va a pasar, y peor aún, sus premisas no tienen mucho que ver con el COVID-19. Voy a plantear que el modelo está equivocado, que es el momento de repensar anclado en lo que sabemos de esta enfermedad que, tal parece, aún es poco.

Algunos hechos del COVID-19.

Uno no le puede creer a la dinámica predicha por un modelo basado en premisas equivocadas y que no representa la dinámica de la enfermedad. Lamentablemente, hay muchas cosas sobre el COVID-19 que los expertos aún no saben. Por eso no tenemos aún un buen modelo del COVID-19 y tenemos que avanzar un poco a tientas. En esos casos hay que volver a un principio básico y fundamental: generalmente es más fácil descartar lo que “no es”, que saber qué “es”; al menos de esta manera podemos evitar errores grandes. En lo que sigue les mostraré evidencia que, creo, es suficientemente concluyente de que, al contrario de lo que se suele creer, el COVID-19 es una enfermedad extremadamente desigual –desde el punto de vista de la enfermedad, la “persona media” es un gran equívoco. Les mostraré evidencia, también, de que la tasa de muerte de la enfermedad es considerablemente más baja que el 3,4% inicial que estimó la OMS. Finalmente, también argumentaré, basado en el trabajo conjunto que estoy haciendo con Stephen Haber e Ignacio Núñez, que

las predicciones clave del modelo –infectados y muertos crecen de manera exponencial hasta que se alcanza la inmunidad de rebaño– son contradichas por lo observado.

¿Qué tan alto es el riesgo de morir por COVID-19? La pregunta es ¿comparado con qué? En la Figura 1 la línea continua muestra en escala logarítmica la frecuencia de muerte por todas las causas de personas de distintas edades según el censo chileno de 2017 y las Estadísticas Vitales del INE de 2017. Podemos ver que la frecuencia crece con la edad. La fracción promedio de la gente que se muere a una determinada edad, crece o se duplica más o menos cada 8 años. Así, por ejemplo, la frecuencia con la que se mueren personas de 45 años (0,00021 ó 0,21%), aproximadamente es el doble que la frecuencia con la que se mueren personas de 37 años (0,00011 ó 0,11%). Los puntos en la Figura 1 provienen de un estudio de otro grupo de investigadores de *Imperial College*, que calculó la frecuencia con que se mueren personas de distintos grupos etarios por COVID-19, condicional a contraer la enfermedad (la *infection fatality rate*). Tres cosas llaman la atención. La primera es que a partir de los 35 años la probabilidad de morir habiendo contraído el COVID-19 se comporta más o menos como la probabilidad de muerte en general, pero es considerablemente más baja para personas de 25 años. Para alguien de 25 años, la probabilidad de morir condicional a contraer COVID-19 es la mitad; para alguien de 15 años es un tercio; y para alguien de cinco años es un quinto. La segunda es que, condicional a la edad y a tener COVID, la probabilidad de morir se duplica¹. Puesto de otra forma, para los mayores de 35 años contraer COVID-19 es parecido a envejecer 8 años durante las semanas que dura la enfermedad (los riesgos se suman). La tercera es que el COVID-19 es extremadamente desigual –condicional a contraerlo, la probabilidad de muerte es alta para personas mayores de 60-65 años, y considerablemente más baja para personas menores de 60-65 años.

En realidad, la Figura 1 crea un equívoco, porque oculta que el riesgo de muerte promedio no tiene que ver con el riesgo de la “persona media”, porque para el COVID-19, no existe la persona media. La Figura 2 muestra cómo varía el riesgo diferencial de muerte por COVID-19 con la edad, de acuerdo con datos del Ministerio de Ciencias. Si tomamos como punto de comparación el riesgo de

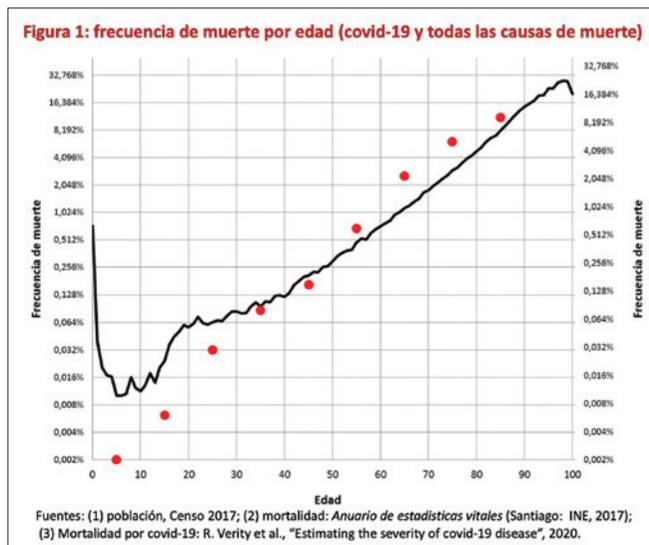


Figura 1

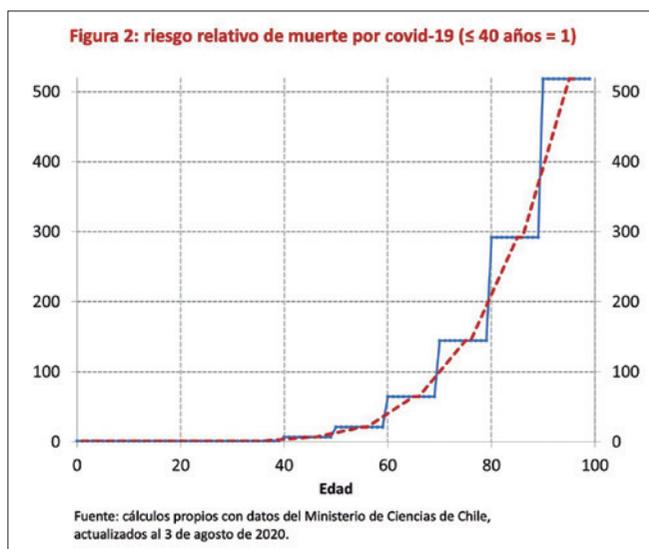


Figura 2

muerte de una persona menor de 40 años (condicional a tener COVID) y lo hacemos igual a 1, podemos ver que para una persona de 60 años el riesgo es alrededor de unas 40 veces; el riesgo de una persona de 70 años es unas 100 veces el riesgo de una persona de 40 años; y cuando llegamos a 100 años es unas 500 veces. Por eso, podemos concluir que casi todo el riesgo de morir por COVID-19 se concentra en adultos mayores de 60-65 años, y (aunque la figura no lo muestra) en personas que ya padecen de ciertas enfermedades –v.gr. hipertensión, la diabetes, el SIDA, las enfermedades respiratorias o al corazón. Vale

¹ Suponiendo que morir por COVID-19 o por cualquier otra cosa son eventos independientes.

decir, condicional a tener COVID-19, una persona joven y sana tiene una probabilidad de muerte considerablemente más baja que una persona de la misma edad que tiene una de estas enfermedades o es mayor de 60-65 años. Y otra cosa más: es realmente arriesgado vivir en un hogar de ancianos: ahí se concentran alrededor de la mitad de las muertes por COVID-19, el que generalmente llega por quienes trabajan ahí.

Vamos ahora a la principal predicción del modelo: mientras no se alcance la inmunidad de rebaño los contagios crecerán exponencialmente. Junto con mis coautores en este trabajo, Stephen Haber de Stanford e Ignacio Núñez de la Universidad de Texas, examinamos la evolución del número de casos y de muertes en prácticamente en todos los países del mundo que producen datos, buscando encontrar crecimiento exponencial. ¿Crecen exponencialmente el número de casos y de muertes por COVID-19?

Partamos por Chile, con la Figura 3. Les voy a mostrar varias transparencias con gráficos similares, así que les explico los ejes para que después podamos ir un poco más rápido. Las curvas empiezan cuando se completan 200 casos, y el periodo que está graficado es entre el 1 de marzo y el 27 de julio. En cada gráfico el eje horizontal es tiempo en días y el eje vertical es el logaritmo natural de la variable. El primer gráfico, son los casos acumulados de COVID-19; el segundo son las muertes acumuladas; el tercer gráfico es el más importante, porque son los casos activos en los últimos 14 días (el periodo en que se cree que el virus permanece activo), que es la variable de la ecuación del modelo del *Imperial College*. Las muertes durante los últimos 14 días se muestran en el primer gráfico del panel inferior.

Ahora bien, la escala de estos gráficos es logarítmica, por lo tanto, si el crecimiento de estas cantidades fuese exponencial, deberían aparecer líneas rectas o, lo que es lo mismo, pendientes constantes. En realidad, aunque un segmento de la curva del número total de casos se asemeja a una línea recta, se curva al inicio y también al final. La pendiente del número acumulado de muerte también va decreciendo. Más importante, es claro que las curvas del número de casos activos como del número de muertes durante los últimos 14 días nada tiene que ver con una exponencial –de hecho, no es solo que la pendiente vaya cayendo, sino que en algún momento se torna negativa porque el número de infectados y muertos empieza a caer. Se trata de curvas cóncavas, no de líneas rectas.

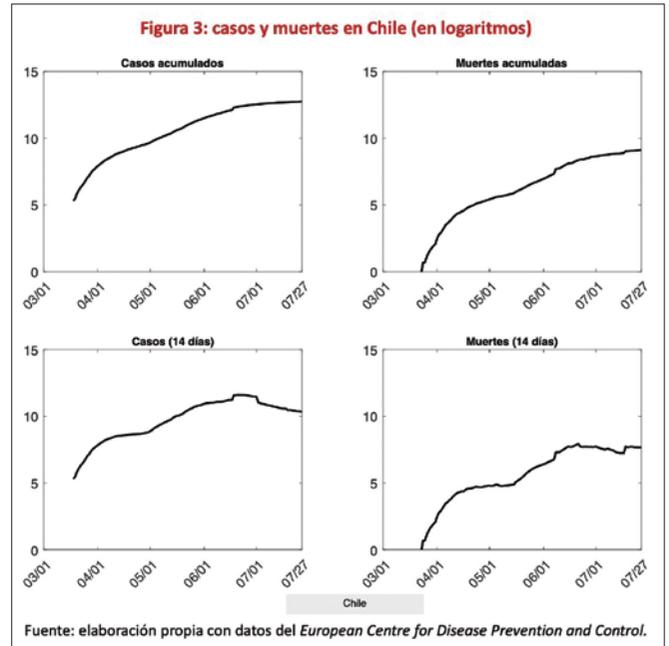


Figura 3

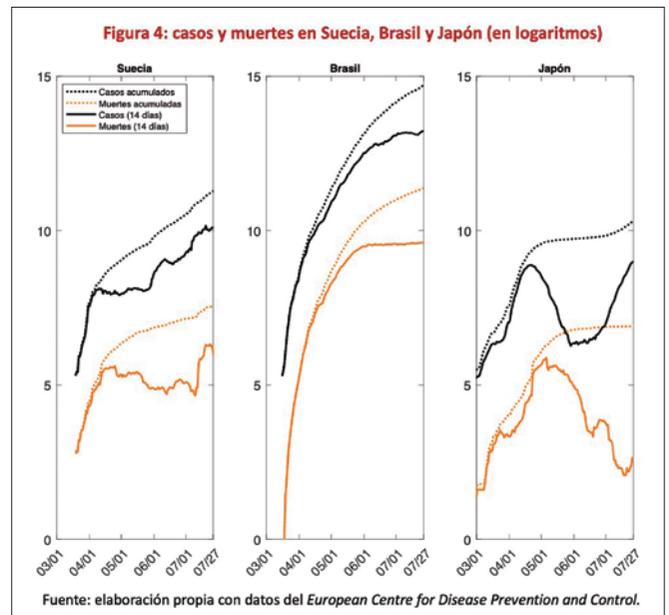


Figura 4

Algunos atribuirían el hecho de que no aparezca la exponencial a las cuarentenas obligatorias. Por eso, vale la pena mirar países donde las cuarentenas no se han impuesto, por ejemplo, Suecia, Brasil y Japón, cuyos casos muestro en la Figura 4 (en la Figura 4 presento las cuatro curvas en el mismo gráfico).

En Suecia las medidas de distanciamiento social han sido voluntarias y la gente ha seguido con su vida normal, los colegios no han cerrado, la gente sigue yendo a las oficinas, los restaurantes están abiertos, aunque están prohibidas las reuniones de más de 50 personas. Si hay un lugar donde el crecimiento debiera ser exponencial es Suecia, pero ustedes pueden ver que están aún más lejos de la exponencial que Chile.

En Brasil, al decir de la mayoría, no se ha hecho nada y, más aún, el presidente Bolsonaro parece oponerse a tomar medidas. Aunque el número de casos es grande, la exponencial tampoco aparece. De hecho, se aplanan las curvas de casos activos y, sobre todo, de nuevas muertes.

Japón ha sido excepcionalmente exitoso en contener la epidemia, a pesar de que tampoco ha impuesto cuarentenas, no se han cerrado los comercios y el país sigue funcionando. Más aún, en Japón se testea poco. Con todo, en Japón tampoco se ven exponenciales. Todo lo contrario, las curvas de casos y muertes acumuladas se aplanan, mientras que las curvas de casos activos y de muertes son sinuosas y nada tienen que ver con líneas rectas.

Estados Unidos es otro caso interesante, porque las políticas difieren entre Estados. Algunos aplicaron cuarentenas bastante estrictas, otros no tanto. La Figura 5 muestra las muertes durante los últimos 14 días en los 56 Estados. Lo que vemos son curvas que se aplanan rápidamente, y muchas muestran trayectorias decrecientes. Y si bien hay muchas diferencias entre Estados, el patrón sistemático no es una línea recta, todo lo contrario.

Si ustedes se fijan bien, en la Figura 5, las curvas tienen segmentos rojos y tienen segmentos negros. Los segmentos negros son períodos durante los cuales hay una instrucción del Gobernador del Estado de quedarse en la casa. Y fíjense que, por ejemplo, que New Hampshire (NH), el sexto en la cuarta fila, tuvo un largo periodo con cuarentena. Sin embargo, la curva de Nebraska (NE), el cuarto en la misma fila, que ha pasado todo el período sin cuarentenas es muy parecida. O sea, hay muchas diferencias entre las políticas que ha seguido estos dos Estados y, sin embargo, las dinámicas de la enfermedad no parecen obedecer un patrón sistemático relacionado con esas políticas.

Desde luego, hay países que han sido muy estrictos y en que el número de casos y de muertes ha sido pequeño. Nueva Zelandia prácticamente se ha cerrado a la entrada

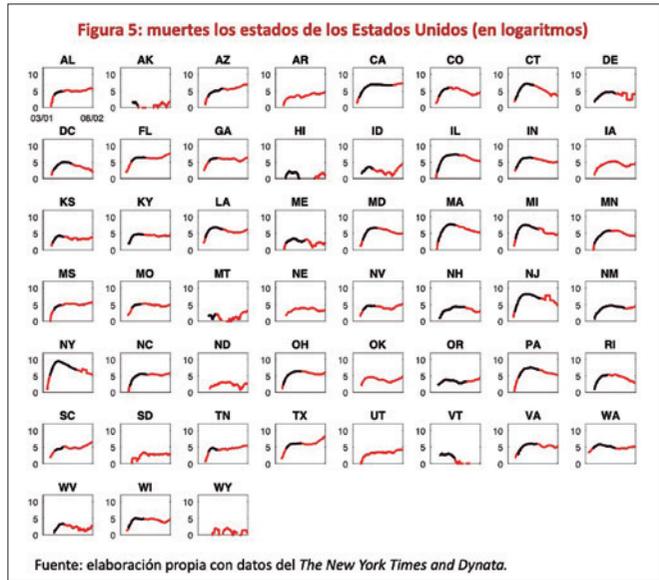


Figura 5

de personas desde el extranjero. Si usted consigue llegar a Nueva Zelandia (no es fácil) tiene que pasar en cuarentena 14 días, en un lugar designado por el Gobierno. En Singapur también hay que guardar cuarentena por 14 días en un lugar designado por el Gobierno y en Corea del Sur hay que hacerse un test PCR a más tardar tres días después de llegar. La Figura 6 muestra las curvas de estos tres países.

Evidentemente, las curvas no son líneas rectas y ahí no hay exponenciales.

Para dejarlo claro: el modelo SIR no implica que la tasa de crecimiento de los casos no declina. El punto es que, en la práctica, la tasa de crecimiento de casos activos y de muertes declina mucho antes de alcanzarse los niveles de contagio necesarios para que ello ocurra. Como dije, de acuerdo con este modelo, la inmunidad de rebaño se alcanza cuando se contagia alrededor del 80-90% de la población. Sin embargo, los estudios serológicos muestran que estamos muy lejos del 80-90%, que según los epidemiólogos se necesita para tener inmunidad de rebaño. Incluso eso es así en el Estado de Nueva York, donde el COVID-19 golpeó muy fuerte y se estima que el 20% de la gente se infectó. Ese es un número que está en el tope de la distribución, pero aún está muy lejos de lo que se afirma es necesario para alcanzar la inmunidad de rebaño. Así, si bien no podemos testear esa predicción del modelo, al saber que la epidemia se acaba cuando el 80-90% de la población se

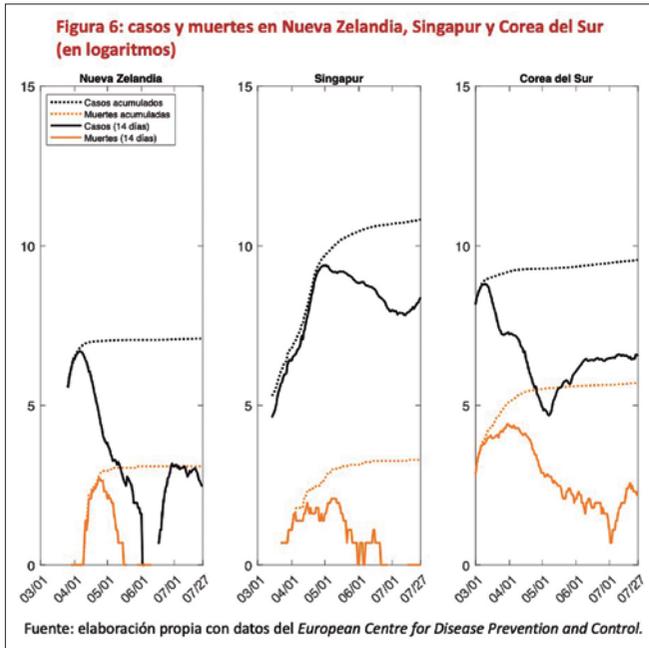


Figura 6

infectó porque estamos muy lejos de eso. Como dije líneas arriba, de acuerdo con los contagios reportados en todo el mundo al 27 de julio, recién se ha contagiado el 0,21% de la población mundial. Aun si los casos medidos subestimaran en un orden de magnitud al número verdadero, recién llegaríamos al 2%, muy lejos del 80-90% que, el modelo predecía, se alcanzaría en un par de meses. Tal parece que la epidemia pierde fuerza mucho antes.

Por supuesto, uno puede ajustar el β del modelo SIR para que la fracción contagiada sea similar a la observada. Pero si se hace tal cosa, habría que ajustar hacia abajo el \mathfrak{R}_0 y hacerlo apenas algo mayor que 1. De lo contrario, la segunda ecuación no es capaz de producir el aplanamiento de la curva con una fracción tan pequeña de la población contagiada.

En conclusión, el comportamiento del virus y del COVID-19 es similar en casi todas partes en el sentido de que, en casi ninguna, el crecimiento ha sido exponencial. Tampoco pareciera haber una relación sistemática entre el comportamiento de la enfermedad y las medidas que se han tomado. Las cuarentenas generalizadas, aparte de causar acaloradas discusiones, no parecen tener un efecto sistemático sobre la evolución de la epidemia; hay países que han adoptado cuarentenas estrictas y en donde hay muchos muertos (Italia, España, Bélgica) y otros donde hay muy

pocas muertes (Nueva Zelanda). Y hay países donde no se ha hecho mucho y hay muchas muertes (Brasil) y otros donde no se han impuesto cuarentenas y hay muy pocos casos y menos muertes (Japón). Al decir de un amigo mío, pareciera que “la enfermedad se comporta como buenamente quiere donde quiere”. No está de más recordar que estas enfermedades parecen ser así. Por ejemplo, durante la epidemia mundial de influenza de 1957-1958 el país con la mayor mortalidad fue Chile, por razones que permanecen desconocidas. (Afortunadamente para el Presidente Ibáñez, los chilenos no somos muy adeptos a rememorar la historia; ide lo contrario, seguramente hoy en día le echarían la culpa de la epidemia por lo que haya hecho o no haya hecho entonces!)

Por eso, yo no estoy planteando una teoría de por qué el número de infectados y de personas que se mueren no crece de manera exponencial, y no quiero hacerlo. Mi intención fue mostrarles que, incluso en Chile, donde durante los últimos meses hemos estado muy preocupados, el crecimiento no es exponencial y que el riesgo que causa el COVID-19 varía enormemente entre personas. Sin embargo, la manera de pensar el problema y las políticas que se adoptan (y otras que no se adoptan), siguen siendo influidas por la lógica del modelo, los supuestos que aceptaron quienes lo aplicaron para pronosticar, y sus predicciones, todo esto a pesar de que sus premisas fundamentales son equivocadas y sus predicciones no calzan con lo que ha pasado. Quizás el modelo sigue siendo influyente porque no hay una alternativa en oferta y, por eso, a continuación, quiero proponer una mirada alternativa.

Repensando el problema: ¿qué hacer cuando la curva se aplana?

El marco conceptual que se ha utilizado para enfrentar esta enfermedad implica que los países tienen tres opciones. Una es parar la enfermedad con aislamiento permanente del resto del mundo y medidas estrictas de aislamiento social –lo que Ferguson y sus coautores llamaron “supresión”. Esa es la política que sigue actualmente Nueva Zelanda. La limitación de esta política es que causa una gran recesión cuando la economía depende del comercio internacional o del turismo y que la única salida posible sin rebrote es que se encuentre una vacuna. Y en todo caso, no parece que sea una solución sostenible en el tiempo, porque si Nueva Zelanda se abre nuevamente al mundo, el virus le va a llegar de nuevo.

La segunda política u opción que se tiene, de acuerdo con ese modelo, es disminuir la tasa de contacto (β) mediante cuarentena y “aplanar” la curva –lo que Ferguson y sus coautores llamaron “mitigación”. Esa estrategia no colapsa el sistema de salud, pero también causa una recesión prolongada porque está sostenida sobre la caída de los contactos. Cada vez que la cuarentena se relaja y β aumenta, se debería esperar un rebrote y por eso seguramente la mitigación deviene en supresión. Por eso, también, en este caso, la única salida real es que se descubra una cura o vacuna.

La tercera opción es dejar que todos se contagien rápido para lograr la inmunidad de rebaño. Eso seguramente, se parece al modelo brasilero o al sueco. Pero los datos están mostrando que alcanzar la inmunidad de rebaño rápido no está dentro del conjunto factible de opciones.

Así, las dos primeras políticas que se sustentan en el marco conceptual de los modelos epidemiológicos estándar no son sostenibles (no son “equilibrios” al decir de los economistas) y alcanzar la inmunidad de rebaño no es una meta realista.

Para discutir qué hacer, permítaseme partir con cuatro hipótesis de trabajo. La primera es que hay que aprender a convivir con el Coronavirus porque la inmunidad de rebaño no está dentro del conjunto factible de opciones. Eso requiere calmarse, porque el pánico no es una manera apropiada de pensar un problema difícil sobre el cual sabemos poco.

La segunda hipótesis de trabajo, es que los contagios seguramente van a ocurrir, pero no van a llevar a contagios exponenciales. Es probable que haya rebrotes incluso rebrotes que se vean grandes, pero es improbable, dado lo que hemos visto, que los contagios sean exponenciales.

La tercera hipótesis de trabajo, es que controlamos y afectamos mucho menos de lo que quisiéramos y no estamos prestándole atención a lo que podríamos controlar. En otras palabras, hay que cambiar los focos de atención.

Y por último, algunas estrategias no son sostenibles, particularmente aquellas que implican una recesión permanente o muy prolongada o aquellas en que cada salida de cuarentena implica un rebrote grande del número de casos y una vuelta atrás. En algún momento nos va a golpear en la discusión pública la realidad de la recesión; ya está

golpeando muy fuerte, en el día a día, a las personas que, si no van a su lugar de trabajo, no reciben ingresos –mozos, aseadores, trabajadores de la construcción, asesoras del hogar. Al decir de un dirigente sindical, el desempleo es la peor pandemia.

¿Cómo convivir con el COVID-19? Lo más directo y obvio es cuidar a los adultos mayores. Primero hay que partir con los hogares de ancianos. No tenemos buenos datos en Chile, pero un reportaje del diario La Tercera a fines de mayo informó que el 22% de los muertos por COVID-19 en la Región Metropolitana (uno de cada cuatro) era un anciano que vivía en un hogar. En casi todas partes los hogares de ancianos fueron dejados a la deriva y lo que se reporta es que el 50% más o menos de los muertos por COVID-19 vivían en uno. Claramente en todas partes han fallado, al ignorar que el COVID-19 es una enfermedad extremadamente desigual y me atrevo a especular que en parte eso es consecuencia de la premisa –equivocada– de que todos estamos similarmente expuestos a morir por COVID-19.

En un hogar de ancianos el principal riesgo proviene de los cuidadores, quienes contagian a los ancianos. Cuando el virus entra en un hogar se propaga muy rápido porque el sistema inmunológico de muchos ancianos ya está debilitado. Por eso, hay que testear constantemente al personal y a los ancianos y aislar rápidamente en cuarentena a los contagiados. Eso no se está haciendo. Yo no creo que las cuarentenas masivas ayuden mucho a los ancianos que están en hogares, porque la gran mayoría de nosotros no va a tener contacto con un anciano que vive en un hogar. Por lo tanto, las cuarentenas masivas son un instrumento tosco si es que el objetivo es proteger a los ancianos en los hogares.

¿Qué pasa con los adultos mayores que viven solos o con más gente? El plano de Santiago que les estoy mostrando (Figura 7), y que construyó la empresa de *big data* Unholster con datos del padrón electoral, señala dónde se concentran los adultos mayores en riesgo –mientras más adultos mayores viven en una dirección y mayor es su edad, mayor es el riesgo acumulado de muerte por COVID-19. Lo que vemos es que los adultos mayores se tienden a concentrar geográficamente. Los podemos identificar, podemos saber dónde viven y podemos hacer cosas para evitar que estén en contacto con personas infectadas. Por ejemplo, los equipos de personas que les llevan alimentos o que están en contacto con ellos deberían

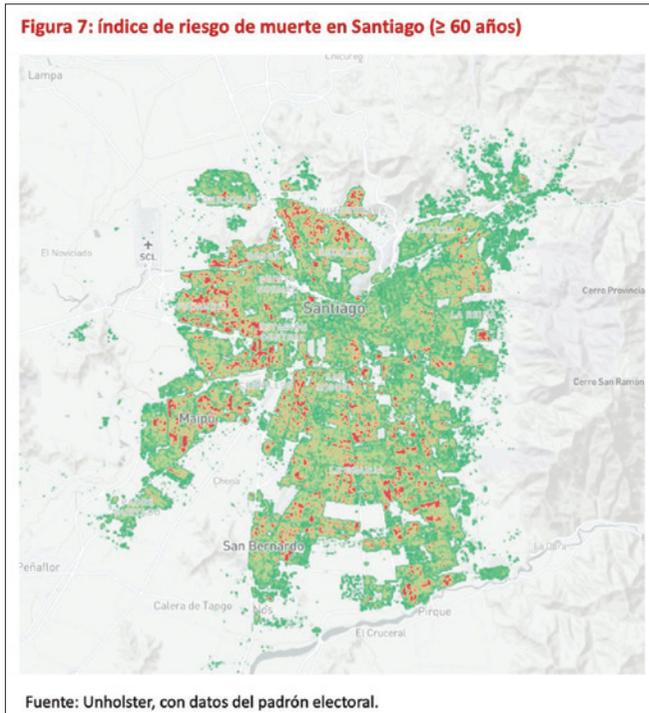


Figura 7

ser testeados continuamente, tal como los cuidadores de hogares de ancianos, y cuando se detecta que uno de ellos está contagiado, debería ser aislado en cuarentena, y sus contactos trazados y testeados también.

La distribución etaria de los hogares chilenos aporta información adicional que sugiere por qué y cómo es conveniente focalizar esfuerzos. En un tercio de los hogares chilenos vive al menos una persona de 65 o más años –hogares que deberían concentrar la atención. Tres de cada cuatro personas menores de 65 años no viven con una persona mayor de 65. Como vimos, las personas menores de 65 que no padecen de ciertas enfermedades, enfrentan riesgos de muerte por COVID-19 considerablemente más bajos y que son similares o menores que el riesgo de muerte con que se vive todos los años de nuestras vidas.

De lo anterior se siguen implicancias que nos dan una base para pensar cómo retomar cierta normalidad. De un lado, los hogares con adultos mayores deberían ser el foco de atención y cuidado. Esos hogares y las personas que interactúan y viven con los adultos mayores deberían ser monitoreados y seguramente testeados y trazados. Quizás se justifiquen las cuarentenas de adultos mayores (aunque hay aquí un delicado punto, qué es lo que cada adulto

mayor quiere –se trata de personas que tienen derechos, entre ellos a decidir cómo viven–) y tal vez, de las personas que viven con ellos. Son muchos de hogares ciertamente, pero no son todos los hogares ni la mayoría, y esto abre la posibilidad de hacer políticas focalizadas para proteger a esos adultos mayores, particularmente aquellos que viven con gente más joven. Seguramente esa es la gente más joven que debiera ser testeada constantemente.

Del otro lado están las personas que viven sin adultos mayores o personas que padecen de ciertas enfermedades, quienes deberían retomar sus actividades con cierta normalidad. Para ellas las cuarentenas y el aislamiento no son necesarios porque su riesgo es bajo y aislarlos tampoco ayuda a los adultos mayores y a las personas que padecen de ciertas enfermedades que las ponen en riesgo. Ciertamente, y en vista del bajísimo riesgo de las personas de menos de 15 años, deberíamos pensar en reabrir los colegios.

Para convivir con el COVID-19 también se necesita testeo y trazabilidad. Les tengo que confesar que yo partí pensando que idealmente había que testear y trazar a todos, todo el tiempo. Trazar significa que se testea a alguien y, por ejemplo, se encuentra que tiene COVID-19 y se busca a todos sus contactos, se los testea, a los enfermos se les aísla en cuarentena, y así sucesivamente. Hay tres cosas que me llevan a dudar un poco hoy día de la trazabilidad general en Chile. Una, es que ha probado ser difícil de implementar –no es fácil averiguar por medios electrónicos cerca de quién ha estado una persona. Para trazar se necesitan personas entrenadas y que tengan acceso a información, y no basta con los medios electrónicos. También, la trazabilidad es vital para evitar poner en riesgo a los adultos mayores, pero es menos necesaria cuando se trata de quienes no están en riesgo alto. Quizás la estrategia que resulte sea una en que el énfasis se pone en rastrear a los contagiados que están cerca de personas en riesgo y al personal de salud; una meta más modesta quizás sea más fácil de cumplir.

Por último, porque los países que testean y trazan bien –v.g.: Corea del Sur, Singapur, Vietnam– y que han conseguido aplanar la curva de contagios sin cuarentenas y cierre de la economía empezaron hace años a enfrentar epidemias, partiendo por el SARS en 2004. No es solo que el COVID-19 los pilló con camino ya recorrido; también, y sobre todo, es que aprendieron de los errores que cometieron durante epidemias pasadas y ese aprendizaje se materializó en procedimientos eficaces durante esta epidemia.

Por ejemplo, en Corea del Sur el Gobierno, la comunidad científica y el sector privado han colaborado eficazmente. Muy rápido los coreanos montaron alrededor de 600 centros de testeo y han usado los tests para tamizaje (*screening*). En esto los coreanos nos llevan gran ventaja, porque entienden que la finalidad del tamizaje es manejar y gestionar el riesgo de contagio y aislar en cuarentena a los que testean positivo antes de que lleguen y congestionen los hospitales. En Chile, por contraste, se ha trabajado con la premisa de que los tests sólo se deben usar para diagnosticar, y esto nos ha hecho lentos (casi ciegos, en realidad) en apreciar el potencial que tienen los tests de anticuerpos, y también de PCR, para manejar el riesgo de contagio y gestionarlo, sobre todo en los lugares de trabajo. Como sea, en Corea del Sur los resultados de los tests y el acceso a la información generada por los teléfonos celulares, las transacciones de tarjetas de crédito e, incluso, de video cámaras, le ha permitido a trazadores especializados rastrear minuciosamente a los contactos de los contagiados.

Pero en Corea del Sur no solo se testea y traza. Los coreanos sido eficaces aislando a los casos confirmados y posibles, en cuarentena en sus casas cuando sólo han estado en contacto con un contagiado y en residencias especiales cuando se trata de casos confirmados que requieren más cuidado, reservando los hospitales para los casos más graves. El cumplimiento de las cuarentenas es monitoreado dos veces al día y se apoya materialmente a quien guarda cuarentena, para facilitar el cumplimiento. Quizás tan importante como lo anterior, y menos conocido, es que Corea del Sur definió siete grupos de personas de alto riesgo, partiendo por los mayores de 65 años. No sólo se tomaron medidas especiales para protegerlos, sino que se estimaron los requerimientos del sistema de salud para atenderlos.

De esta forma, yo creo que testear y trazar es la estrategia correcta para contener los contagios y, sobre todo, calmar a la gente y reducir el pánico. En lo que me caben más dudas es que tengamos la disciplina necesaria para hacer lo que han hecho los coreanos (y también singapurenses y vietnamitas).

El tercer hecho es que el COVID-19 ha causado una gran recesión y para salir de ella es necesario aprender a convivir con él. Las características de esta recesión no tienen precedente. En efecto, las recesiones suelen ser causadas ya sea porque la demanda agregada y el gasto caen (por

ejemplo, cuando hay una crisis financiera y mucha gente queda desempleada y deja de consumir y de gastar y los proyectos de inversión se postergan); o porque cae la oferta agregada (por ejemplo, porque hay un terremoto que daña la capacidad productiva). En este caso la recesión es causada simultáneamente por un shock de demanda, porque la gente deja de gastar en una parte importante de la canasta que antes consumía, porque sus ingresos caen y porque ya no quiere ir a determinadas partes; y un shock de oferta, porque el distanciamiento social, el temor a contagiarse en el trabajo y las cuarentenas disminuyen la capacidad productiva. Por ejemplo, ya no es posible producir PIB en las salas de cine, los centros comerciales, las zonas de alto tráfico de personas, porque nadie quiere ir a comprar ni tampoco nadie puede ir a trabajar. Y algo más: en esta recesión las industrias más afectadas son las que emplean a más gente.

Las estimaciones de caída del PIB durante este año rondan el 7%, lo cual está en línea con lo que está pasando en otros países del mundo. La Figura 8, que puedo usar por gentileza de Leonardo Suárez de Larraín Vial, muestra la recesión desagregada por sector de actividad, según una estimación de junio de 2020². El eje vertical muestra el pronóstico de la variación del PIB sectorial este año. El eje horizontal muestra la fracción del sector en el empleo total. Se puede apreciar que el PIB de los tres sectores que suman casi el 50% del empleo –servicios personales, comercio y restaurantes y hoteles– caerá violentamente. Por contraste, seis de los siete sectores que expandirán su PIB emplean cada uno a menos del 3% de la fuerza laboral (la excepción es la administración pública, que jamás tiene recesión).

Así, los sectores más golpeados son aquellos que emplean a más gente. El desempleo aumentó mucho, desde alrededor del 7% antes del 18 de octubre a 12,2% en el trimestre abril-junio de este año³. Pero esta cifra, aunque dramática, es equívoca y subestima el problema, porque no da cuenta de aquellos que dejaron la fuerza de trabajo porque no están buscando empleo (y por lo tanto no aparecen como “desempleados” en la estadística),

² Véase Leonardo Suárez *et al.*, “Chile: secuelas de la pandemia frenarían el crecimiento de 2021. Estímulo fiscal y monetario se prolongan” (Santiago: Larraín Vial, 19 de junio de 2020).

³ Estas cifras provienen del Boletín estadístico: empleo trimestral, N° 261, del INE, del 31 de julio de 2020.

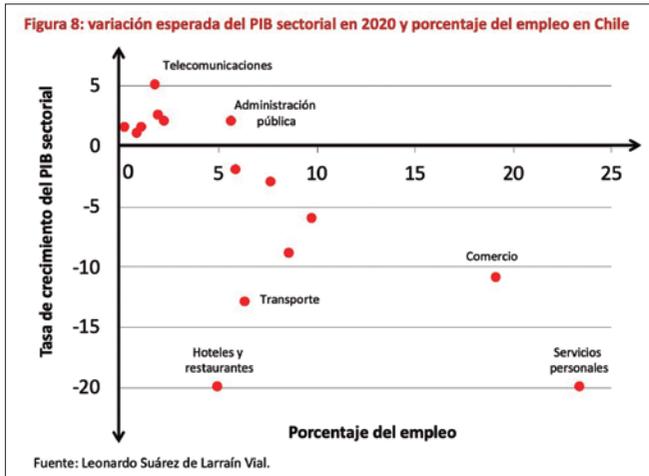


Figura 8

pero que están disponibles para trabajar si alguien les ofreciera uno. Así, con respecto a abril-junio del año pasado, el total de ocupados (el número de empleos) cayó en 20%. Las caídas más violentas son en aquellos sectores intensivos en empleo cuyo PIB se contrajo violentamente: comercio (-24%), construcción (-30,6%) y servicios de comida (-48,5%). Y la recesión ha golpeado particularmente fuerte a los trabajadores informales: uno de cada tres empleos informales desapareció (-35,9%). Más aún. Cerca de 800.000 personas, o poco más del 11% de la fuerza de trabajo, pasó a la categoría de “ocupado ausente” (aquellos que tienen un empleo, pero no están trabajando activamente), la mayoría por haberse acogido a la Ley de Protección del Empleo. La evolución del empleo confirma que esta es una recesión mucho más cruel con el empleo que con el PIB, siendo que, como recesión de PIB, ya es gravísima. En realidad, es la peor recesión que hemos tenido desde 1982, afectando el empleo de manera brutal y ese es un problema del cual tenemos que hacernos cargo.

El Gobierno ha expandido su gasto y el acuerdo fiscal al que llegaron los economistas de derecha e izquierda con el Gobierno en junio es una respuesta adecuada a la crisis. Pero tenemos que tener claro que la respuesta fiscal no nos va a sacar de la recesión, porque no se puede hacer cargo de la caída de la oferta agregada. Si el comercio, los restaurantes y hoteles siguen cerrados y las personas no quieren retomar la normalidad, en Chile y en el mundo, por temor a contagiarse, no habrá salida de la recesión. Y el problema es que cuesta creer que las transferencias fiscales sean sostenibles por mucho más que un año.

Así, la reapertura de la economía es necesaria, casi indispensable diría yo. La reapertura va a tomar tiempo, porque una parte no despreciable de la caída de PIB y de la recesión se debe a que la gente le tiene miedo a contagiarse y a que ya no quiere hacer las cosas que antes hacía y que generaban el PIB. Por eso, más vale que empecemos al tiro a trabajar y a enfrentar el problema de frente.

Una parte muy importante de la recuperación es superar la retórica y el sentimiento de pánico y aprender a vivir con el coronavirus, para que retomemos la normalidad, tanto “por el lado de la demanda” (es decir, como consumidores), como “por el lado de la oferta” (es decir, como trabajadores). Seguramente por un tiempo hay que evitar las actividades en donde el virus se puede esparcir rápidamente: *v.gr.* los cines o los partidos de fútbol. En público seguramente deberíamos andar con buenas máscaras y bien puestas. Hay que asumir que van a haber rebrotes, pero lo importante es que no afecten a los vulnerables. Y aunque suene raro decirlo (y a algunos incluso los *infurie*), no es tan grave que haya casos de COVID-19 en la medida de que los sistemas de salud no colapsen y que no afecten a la gente más vulnerable. Lo importante es que no haya muertes por COVID-19 y eso se logra protegiendo con especial atención a la gente más vulnerable. De nuevo hay que remarcarlo, el COVID-19 es una enfermedad extremadamente desigual.

En los lugares de trabajo el pánico se mitiga mediante la acción colectiva de trabajadores, empresas y el Gobierno para establecer estándares que digan cómo manejar el riesgo de contagio. Estos estándares son necesarios para que las autoridades de salud y del trabajo actúen con eficacia y coherencia, los trabajadores estén y se sientan seguros, y las plantas, faenas y obras continúen funcionando. Debe haber coordinación con el Ministerio de Salud para que los protocolos estandarizados sean válidos para acceder a la Red de Protección Social. O sea, cuando una empresa adopta protocolos de seguridad y se detecta un caso gracias a esos protocolos, rápidamente se tiene que activar el Sistema de Protección Social. Hoy en día eso es burocrático y cuesta hacerlo.

Una parte de los estándares son los cuidados básicos que deben adoptar las empresas y los trabajadores –mascarillas, distanciamiento, lavado de manos. También ayudaría introducir los testeos sistemáticos en los lugares de trabajo para mitigar el riesgo de contagio. Y aquí yo creo que la profesión médica debería prestar atención a los usos

alternativos que tienen los test. Los test no solamente sirven para diagnosticar, sino que también sirven para manejar el riesgo y la probabilidad de contagio. Lamentablemente tengo que decir que, a la profesión médica, quizás por razones entendibles, la veo extremadamente cerrada a escuchar a gente que tenga la intención de usar los test de manera distinta a la que ellos creen que deben usarse.

Y para terminar quisiera contradecirme un poco. A pesar de haber dicho que me caben dudas de que el testeo y la trazabilidad se pudieran introducir masivamente en Chile —puesto en chileno, me caben dudas de que seamos capaces de dar el ancho—, también creo que sería una gran ayuda para disminuir el pánico y convivir con el COVID-19. Tenemos el capital humano necesario para introducir los testeos masivos y la trazabilidad, pero no lo hemos hecho por razones que cuesta entender. Nos falta disciplina y, definitivamente, para la acción colectiva somos bastante ineptos. Como sea, el testeo y la trazabilidad se basan en tres pilares.

Uno es contar con un estándar de testeo generalizado creíble, tanto para la autoridad como para la gente. Establecerlo, como dije, requiere la acción colectiva.

El segundo pilar es la identificación, notificación y testeo las personas que hayan estado cerca de los contagiados, lo que requiere un sistema de trazabilidad que diga con quién interactuó la persona contagiada y a quién podría haber contagiado. Construir la malla de contactos de cada persona requiere usar bases de datos de distintos órganos del Estado. Es indispensable, por tanto, aunar fuerzas y tener un punto de contacto entre el sector privado, que debe hacer los testeos masivos, y el Estado, que tiene los datos. Por supuesto, los datos deben ser anonimizados y encriptados para mantener la privacidad de las personas. La entrega de datos del Estado, debería ocurrir a través de una plataforma creada para el propósito.

Y el último pilar es la coordinación entre los que testean, registran y trazan a personas en riesgo, y las autoridades de salud. Las autoridades de salud tienen que confirmar los diagnósticos, aun de aquellas personas asintomáticas, y aislar en cuarentena a los contagiados. La idea es que sólo los casos que lo requieran lleguen a los hospitales, porque el diagnóstico se hizo antes. Además, la autoridad de salud también debe usar su información sobre contagiados para alertar a través de los privados a quienes tienen que ser testeados.

Y con esta flagrante contradicción termino.

Muchas gracias.

Sr. Nicolau del Roure.

—*Muchas gracias, Alexander, realmente una charla con una mirada diferente, con fundamentos y lo más interesante, a la vez, es que estimula el pensamiento crítico que es propio de la Ciencia y de la Ingeniería. O sea, no nos quedamos con las percepciones y lo que dice la mayoría, sino que se miran las cosas de una manera diferente en que se muestran con claridad y cifras las consecuencias que pueden ser muy graves para el país. Muchas gracias.*

Juan Carlos Barros ya tiene seleccionadas algunas preguntas, no nos queda mucho tiempo, pero unas 3 ó 4 preguntas puede ser interesante escucharlas.

Juan Carlos Barros.

—*Hay una pregunta que hace Jorge Pedrals, él dice: Sería interesante que pudieras complementar esta presentación con un análisis de las consecuencias de la futura depresión económica de la Salud, delincuencia y pobreza en general, por ejemplo, haciendo un análisis de las consecuencias de la depresión del 82, ¿es posible que se logre esto con algo más de racionalidad?*

Sr. Galetovic.

—La recesión del 82 es un buen punto de comparación tanto por las similitudes como por las diferencias. La gran diferencia es que la recesión del 82 fue causada por un shock externo y por una crisis financiera. Por contraste, esta crisis nos tocó con un nivel de deuda bajo comparativamente hablando y también, debo decirlo, con un Ministerio de Hacienda que se ha movido de manera prudente, pero decisiva y rápida y por lo tanto creo que en cuanto a la respuesta y en cuanto a las condiciones para enfrentar esto, tenemos que dar gracias por lo que se ha hecho durante más de 30 años, porque de lo contrario esto sería mucho más grave aún.

Dicho eso, tenemos tiempo limitado porque las políticas que se han adoptado a mi modo de ver con mucha

habilidad y mucha pertinencia, incluyendo por lo demás el acuerdo fiscal que firmaron el Gobierno con la Oposición, pareciera de otra época en Chile, pero que muestra todo el potencial que tenemos cuando nos ponemos a trabajar como adultos y con los hechos, gente que tiene diferencias, pero que también tiene un interés común. Creo que ese es el camino en adelante.

Ese camino es muy incierto, porque los recursos son limitados, se han usado bien, pero son limitados y es perentorio evitar una recesión. Y para eso es necesaria acción colectiva. Creo que mucha gente que está en posiciones de influencia de decisiones, aún no le ha tomado el peso a la gravedad de la situación, particularmente porque la gente que toma decisiones o la gente que tiene influencia esta crisis no le ha afectado mucho y mantiene su nivel de vida. Tiende a ser gente que trabaja en los sectores donde no hay recesión. Parto por los empresarios, sigo por el Gobierno, continúo por los políticos y por la gente que está en el Parlamento porque tiene una responsabilidad enorme y ya es hora que se empiece a comportar de la manera que la circunstancia lo requiere. Esto porque el costo va a ser para la gente más vulnerable, la gente que es informal, la gente que construye su ingreso día a día, de manera que le ha permitido alcanzar cierto estándar de vida, pero que ese estándar de vida está radicalmente amenazado por el hecho de que las interacciones sociales son menores. Por lo tanto, es necesario agotar los medios para que la gente pueda volver a trabajar. Creo que, en ese sentido, esta es una recesión muy distinta a la recesión del 82, aunque en magnitud se le está pareciendo.

Sr. Barros.

—Bernardo Stern pregunta si las autoridades siguen ocupando el modelo del Imperial College o han ido cambiando de opinión.

Sr. Galetovic.

—Yo creo que el modelo del *Imperial College* nos recuerda la frase célebre de Keynes: los hombres prácticos de hoy día suelen ser esclavos de un economista muerto hace mucho. El prestigio de Neil Ferguson (que no está muerto) decayó, su modelo está desacreditado, pero la forma de pensar de ese modelo sigue con nosotros, porque muchos

seguimos pensando que es clave bajar las interacciones de todo el mundo para controlar la epidemia y enfrentarla.

Uno se pregunta ¿por qué usted va a bajar las interacciones de todo el mundo si la población en riesgo está concentrada en determinados grupos? Tiene que dedicarle atención especial a esos grupos, sino, hay entonces una mala asignación de los esfuerzos si es que usted no está protegiendo a los hogares de ancianos. Yo creo que ese es el problema con el modelo, sus fundamentos más bien sus implicancias son las que todavía se están usando para tomar decisiones. Esta casi en el nivel de creencia, más que de idea, como decía Ortega y Gasset, lo que es más peligroso todavía. Seguramente, también tiene que ver que no hay ninguna alternativa creíble en oferta, y de ahí la urgencia de repensar el problema.

Sr. Barros.

—Javier González pregunta si consideramos que la estimación de asintomáticos es entre 80 y 90%, el comportamiento del contagio se puede convertir en exponencial, si se incluye a este grupo que está en la estadística debido a que no se realiza el test.

Sr. Galetovic.

—Lo que ha salido en varios estudios es 50%. El 80 y 90%, es una conjetura que viene de observar que cuando se hace el estudio serológico se tiende a concluir que el número de infectados es alrededor de 10 veces del número de infectados efectivamente medido. Entonces, uno se pregunta de dónde viene ese 90%, hay algo que no calza en los números y la verdad no lo entendemos bien. Si es que efectivamente se contagia mucha más gente, en Estados Unidos debería estar contagiada alrededor del 20% de la población si así fuera, lo que querría decir que es más cercano a exponencial, pero, al mismo tiempo, querría decir que para la gran mayoría de las personas es una enfermedad que no tiene consecuencias. Para los que sí tiene consecuencias es para la gente con las que esas personas están en contacto y particularmente aquellos que están en grupos vulnerables y por lo tanto la gente entra en contacto con gente grupos vulnerables si tiene que ser testeado y trazado.

Fin de la conferencia.

METRO: EL VIAJE DE LA RECONSTRUCCIÓN

*Conferencia del
Sr. Louis de Grange,
Presidente de METRO S.A.*



Sr. Louis de Grange Concha.

El día martes 4 de agosto de 2020, ante una numerosa asistencia de personalidades del ámbito público y privado, se realizó la segunda videoconferencia del Instituto de Ingenieros. En esta ocasión, se contó con la conferencia de don Louis de Grange, Presidente de METRO S.A., quien expuso: “METRO: El Viaje de la Reconstrucción”.

El Sr. Louis De Grange es ingeniero civil industrial de la Pontificia Universidad Católica de Chile, tiene un máster en Economía de Transporte y también un doctorado en Planificación de Sistemas de Transporte. Se inició muy joven trabajando en estudios de evaluación social de proyectos, especialmente del Metro y desde el año 2006 es profesor de la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad de Universidad Diego Portales y desde el año 2011 su director.

También en los años 2012 y 2014 fue Director de Metro y desde abril del año 2018 es Presidente del Directorio. Tiene más de 30 publicaciones indexadas en el área de su especialidad y recientemente fue premiado por el Colegio de Ingenieros con la distinción Premio a la Gestión, que reconoce al ingeniero por su buena gestión en su trabajo profesional. En el año 2008 fue reconocido entre las 100 personas jóvenes con mayor futuro del país.

Sr. Louis de Grange C.

—Quiero agradecer especialmente a todos los que se conectaron a esta presentación, gracias al Instituto por la invitación. Muchas gracias por el interés.

Voy a partir con una introducción –en orden cronológico– de cómo venía Metro, qué era lo que estábamos haciendo; cómo fue el 2019 antes del 18 de octubre. Es importante también ver el contexto de lo que era el 18 de octubre, lo que significó eso, no solo para la ciudad sino para los equipos de Metro, para después empezar con el proceso de reconstrucción propiamente tal. Y no puedo dejar de mencionar que cuando estábamos en medio de la reconstrucción aparece el COVID, que es una pandemia mundial y cómo eso nos vuelve a pegar en diferentes aspectos. Para terminar, básicamente voy a comentarles qué es lo que nos falta para terminar este viaje de la reconstrucción.

Antes de iniciar el viaje, ¿en qué estábamos en Metro? Teníamos operativos 140 kilómetros de la Red, con 136 estaciones; estábamos transportando en promedio de 2,8 millones de pasajeros al día, con un *peak* de casi 3 millones una vez y llegábamos a 36 de las 34 comunas de nuestra provincia de Santiago. La Línea 6, que fue inaugurada en noviembre de 2018, empezó a transportar 15% más de pasajeros de lo que teníamos programado. Y ese año 2018 batimos el record anual de pasajeros.

El año 2019 íbamos muy bien prospectados; el 2018 habíamos transportado 721 millones de pasajeros y el 2019, previamente al 18 de octubre estábamos proyectando llegar a los 770 millones. Por lo tanto, desde el punto de vista operacional, desde el punto de vista del transporte de pasajeros, íbamos bien, íbamos creciendo de manera sostenida y también teníamos bastantes proyectos (Figura 1).



Figura 1

A la Línea 7, que fue un proyecto anunciado por la Expresidenta Michelle Bachelet, y que le da continuidad el Presidente Sebastián Piñera, se le suman las Líneas 8 y 9 y la extensión de la Línea 4 Bajos de Mena, para llegar al 2027 con cerca de 215 kilómetros de red, 191 Estaciones, 28 Estaciones de Combinación y con eso pensábamos llegar a cerca de 3,9 millones de pasajeros al día. Por lo tanto, estábamos con harta pega y numerosos desafíos, enfocados básicamente en la excelencia operacional y en la expansión de la Red (Figura 2).

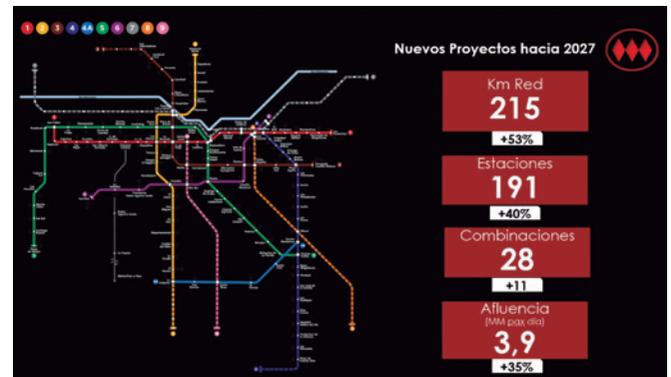


Figura 2

El año 2019 fue un año especialmente importante y ocurrieron bastantes cosas y es importante relatar cómo veníamos, antes del 18 de octubre.

Partimos el 22 de enero con la inauguración de la Línea 3, que fue una tremenda noticia para los vecinos de Quilicura, Conchalí, Independencia, La Reina, Ñuñoa, y pasa por el Centro de Santiago. Los vecinos de Conchalí iban a pasar de demorarse 45 minutos en llegar a Plaza de Armas, a 12 minutos, entonces era un impacto enorme. Esto generó una tremenda alegría en los vecinos de Independencia que durante muchos años esperaban esta línea. Siempre se hablaba del Metro por Independencia, y el 22 de enero del año pasado logramos inaugurarla y fue una fiesta, la noticia de la semana. La verdad que los goles hay que celebrarlos. Por lo tanto, yo creo que así ocurrió: fue una fiesta, los vecinos tremendamente contentos, todos emocionados, felices, todos satisfechos, con ganas de seguir creciendo.

En enero también tuvimos la inauguración de los nuevos MetroArte; nosotros tenemos más de 40 MetroArte dentro de la Red. Es como dice la Ministra de Cultura que es el Museo abierto más grande de Chile, incluso el más grande

de Sudamérica, que cuenta con Estaciones abiertas para los millones de pasajeros que usan el Metro de Santiago. Están, por ejemplo, en Lo Valledor con 2 MetroArte preciosos (Figuras 3 y 4).



Figura 3



Figura 4

Seguíamos avanzando con la extensión de la Línea 3. Recordemos que es muy importante insistir en que los proyectos de Metro, son proyectos de Estado que trascienden los Gobiernos y la extensión de la Línea 3, es cierto, fue definida en el Gobierno anterior. Y el Gobierno actual le da continuidad, lo que es tremendamente importante. La continuidad de los proyectos, que a veces tardan 3 Gobiernos sucesivos en ser inaugurados, desde que son definidos y que se inician las obras, todo ese concepto, creo que es muy importante destacarlo en lo que ha sido la historia de Metro.

Estábamos muy bien rankeados, en el ranking MERCOS del 2018, que fue publicado el 2019, en reputación y gobierno corporativo. Mejoramos del lugar 27 al lugar 10, somos de las empresas que más mejoró dentro del 10% por decirlo de alguna forma.

En mayo inauguramos un nuevo Metro Arte en Fernando Castillo Velasco, que es mi favorito, y que además tiene

la gracia de que fue diseñado por niños de escuelas de La Reina. Todos los dibujos que están ahí fueron hechos por niños y el artista lo que hizo fue consolidar, unir, darle sentido a todos estos dibujos, transformarlos en un mural de 200 metros cuadrados que está en la Estación y yo encuentro que quedó precioso y es un aporte al día a día de nuestros pasajeros (Figura 5).



Figura 5

También estábamos avanzando en los rankings de marca ciudadana, éramos la empresa de transporte con la mejor percepción de parte de la ciudadanía. Estábamos sobre otras que también son destacadas como LATAM, SKY. Íbamos bien, con harta actividad y motivación. Además, destacábamos entre las instituciones respecto a las marcas, los nombres que tienen más confianza de entre diferentes instituciones después de las Universidades estatales venía Metro. Entonces, la verdad es que bajo diferentes aspectos estábamos trabajando bien, estábamos llegando a diferentes audiencias, avanzando en proyectos, etc. Estábamos con una tendencia creciente, en este ranking de confianza en las instituciones (Figura 6).

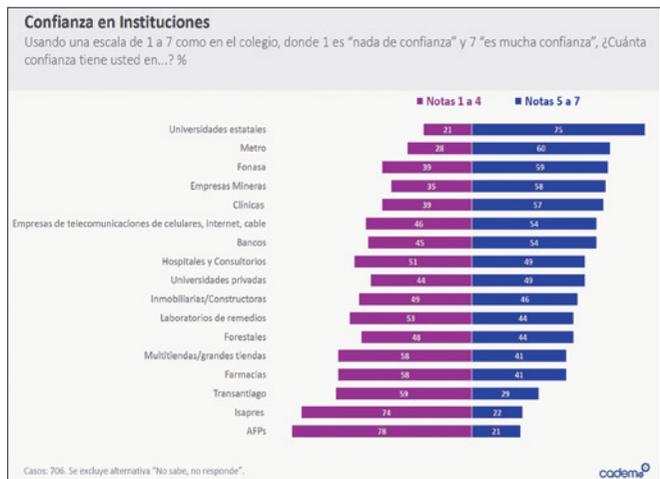


Figura 6

Y continuamos con más inauguraciones de MetroArte en las nuevas líneas de Metro. Tenemos este MetroArte en la Estación Biobío, que tiene toda una connotación por el entorno de donde se encuentra ubicada, con la cultura Mapuche (Figura 7).



Figura 7

También tuvimos el Festival de Música a Un Metro que fue en la explanada de la Plaza Chacabuco en la Línea 3 de Independencia, donde participan muchos músicos locales, muchos de ellos, por ejemplo, que tienen su espacio en las Estaciones de Metro con el programa Música a Un Metro y que es una forma de ingreso para ellos, de manera coordinada con nosotros. Este Festival fue todo un éxito. Y seguíamos avanzando con los MetroArte, inaugurando nuevos murales; este es el de Parque Almagro de la Línea 3, que a mí me encanta también, porque todos los personajes que hay en este mural, el organillero, por ejemplo, a la izquierda arriba a don Clotario Blest, los libros, y cada objeto que está en este mural es representativo del sector, donde se encuentra ubicada la Estación Parque Almagro. Por lo tanto, tiene una connotación bien especial ese mural, que también es uno de mis favoritos (Figura 8).

Además, avanzamos con el Plan de Inclusión; la ley de Inclusión nos plantea el desafío de tener el 100% de las estaciones con ascensores. Y no solo de ascensores, sino que



Figura 8

también permitir el ingreso de una persona con movilidad reducida al tren desde fuera de la Estación hasta el tren; el desafío era que fuera de manera autónoma. Entonces eso conllevaba no solo que todas las estaciones debiesen tener ascensores, sino que también que el diseño de la estación tenía que ser modificado para permitir al usuario con movilidad reducida subirse al tren. Por ejemplo, en San Joaquín, se tuvo que rediseñar completamente la estación en su acceso y ahí logramos inaugurarlo en el mes de agosto del año pasado.

Pero tampoco parábamos de avanzar con las extensiones. La de la Línea 2 fue el evento en la Comuna de El Bosque. Uno ve autoridades de todos los sectores políticos, está el alcalde Sadi, Melo, la ex alcaldesa Nora Cuevas de San Bernardo. El Presidente Sr. Sebastián Piñera, la ex Intendenta Karla Rubilar, la Ministra Gloria Hutt, los trabajadores de Metro; hay diputados de todos los sectores. Estos proyectos generan esta conjunción de protagonistas relevantes detrás de un objetivo central, que es mejorar la calidad de vida de millones de familias.

Avanzamos también con “Línea Cero”. Partió un poco lento, cierto, era un proyecto que venía de la anterior administración, pero que nosotros tomamos y lo fortalecimos; ahora lo hemos transformado en un proyecto gratuito, estamos creciendo. Muchas personas no lo saben, pero las Estaciones del Metro de Santiago tienen en total más de 1900 estacionamientos para bicicletas, y de esos cerca de la mitad son de Metro y los ha gestionado en diferentes diseños, y ahora lo estamos coordinando todo para tener un diseño más uniforme y vamos a seguir en esto. Consideramos que esta combinación, que la gente llegue a una Estación de Metro en bicicleta y después continúe su viaje en Metro, tiene un potencial importante, no solo de facilitar el desplazamiento, sino también generar una alternativa sustentable con el tiempo, así que estamos avanzando y creciendo fuertemente en ello (Figura 9).



Figura 9

Y además tenemos el desafío de armar trenes en Chile; los NS16, son los trenes armados en Chile. Llegan productos de todo el mundo. Es decir, de todo el mundo llegan los proveedores que nos proporcionan piezas y partes, y acá los armamos, y ese aprendizaje queda acá. Incluso, últimamente lo mismo ocurre con el interior de los trenes NS16 que están operando hoy en la Línea 2 y que, prontamente, vamos a empezar a colocarlos en la Línea 5; el interior de estos trenes también es desarrollado en parte en Chile. Entonces, la verdad que este es un proyecto que genera conocimiento y ese conocimiento queda en Chile y por ello, es una oportunidad interesante de explorar más profundamente a futuro.

Y acá uno se ve esta foto de las cocheras, una foto preciosa que a mí me encanta y ha sido usado por muchos pasajeros y en la Línea 2 los ve habitualmente. Y como les dije, prontamente van a empezar a aparecer en la Línea 5 y estamos colocando cerca de un tren al mes (Figura 10).

Armamos un tren al mes en promedio, y lo inyectamos apenas podemos. Además, les estamos poniendo cámaras al interior de los coches: son 2 cámaras por coche. Vienen con aire acondicionado, son trenes muy superiores a los que actualmente están circulando en estas Líneas que son las más postergadas.

Bueno, y nos encontrábamos en todo esto, cuando llegó el 18 de octubre de 2019.



Figura 10

Esto hay que contextualizarlo un poco. Se produjo un alza de tarifa de \$30. Es importante subrayar que el Metro no fija las tarifas al público, y muchas personas no lo saben. Nosotros nos dimos cuenta, tanto antes como después en varios diálogos que hemos tenido, que el usuario en general, cree que la tarifa que cobra el Metro va para la empresa, pero no es así; de hecho, durante el año 2019, de los \$800 que Metro cobraba por el pasaje adulto en período punta, Metro se quedaba solo con \$495. Por las economías de escala que tiene, con la eficiencia que tiene su funcionamiento, Metro es el operador más barato del sistema (Figura 11).



Figura 11

Esa información es importante, porque los pasajeros, o algunas comunidades con las que nosotros conversamos después de toda esta situación, pensaban incluso que Metro era una empresa privada, que lucraba y que este aumento era para aumentar el lucro; y la verdad es que no es así, y por eso nos parece importante subrayar el concepto de

que los \$800 no son para Metro. A Metro le queda una fracción mucho menor, que le permite aportar a otros modos de transporte.

Continuando con el contexto, ya a partir del lunes 14 de octubre de 2019 empezaron los conflictos, las complejidades más importantes de la Red, las evasiones masivas de estudiantes, el forcejeo de los portones. Esto generó una tensión muy, muy preocupante, no solo a nivel de empresa, sino especial o particularmente a nivel de los trabajadores en las Estaciones, porque eran los que enfrentaban la complejidad. Y no solo eso, sino que también empezábamos a ver interrupciones al interior de las Líneas, jóvenes que se sentaban en los andenes, con los pies colgando hacia los rieles, poniendo en riesgo sus vidas. Recordemos que las vías abajo están electrificadas, que si llegase a caer una de estas personas puede morir. Incluso, aunque cortemos la electricidad, esto genera un impacto muy fuerte en miles de otros usuarios (Figura 12).



Figura 12

Cuando un tramo para, se detiene la Línea completa y tiene repercusiones a los pocos minutos sobre las otras Líneas. Esta es una situación realmente compleja, y todo esto lo empezamos a vivir a partir de esa semana. Los forcejeos continuaban en las Estaciones, las evasiones.

La Estación San Joaquín fue como el primer caso de destrucción de una Estación. Fue el día previo, el jueves 17 por la tarde, y la tuvimos que cerrar. Y ha sido bien emblemático por todo lo que ha conllevado. Al día siguiente, el viernes 18 de octubre, ya a las 6 de la mañana estábamos todos instalados en las oficinas de Metro. Se formó el “comité de crisis” con los principales ejecutivos de la empresa; estábamos viendo de qué forma íbamos ir

enfrentando la eventual complejidad que ese viernes 18 de octubre sin duda tendría.

Esta foto es del Centro de Operaciones, donde ya desde las Líneas convencionales es donde se detectan los problemas operacionales, las complejidades, se dan las instrucciones; desde las 6 de la mañana de ese día nos juntamos, y la verdad es que no paramos más en 40 días. Trabajamos todos los días desde las 6 de la mañana a las 11, 12 de la noche, 1 de la madrugada, la verdad es que fue una situación bien excepcional, durísima para todos los equipos (Figura 13).



Figura 13

La situación durante el día siguió siendo compleja, seguían las interrupciones en distintas Estaciones que obligaban a detener todo el servicio en toda la Línea.

Ese video, imagino que todos ustedes lo conocían de antes, cuando lanzan en la Estación La Moneda ese televisor dentro de las vías, que tuvo ese corto circuito que interrumpe el funcionamiento del tramo más importante de la Línea 1 (Figura 14).

Estaba todo realmente muy complejo y agravándose con el pasar de las horas. Nos vimos obligados, por primera vez en la historia, a cerrar las Líneas 1 y 2 porque la situación de riesgo de pasajeros, empleados y equipos de las Estaciones era complicada. Estábamos exponiendo la integridad física de las personas, y eso no lo podíamos permitir. Nos vimos obligados a cerrar las Líneas 1 y 2 cerca de las 3 de la tarde.

En estos videos se observa lo que estaba ocurriendo ese día, y estaba en riesgo la vida de las personas. Ese fue el contexto en que los equipos técnicos de Metro tomaron la decisión finalmente de cerrar la Red. Estábamos frente al riesgo de perder vidas. Eso fue lo que nos motivó a



Figura 14

priorizar la seguridad, la vida de las personas por sobre la continuidad del servicio, que por lo demás tampoco era factible seguir con él.

De las 136 Estaciones de la red, 118 fueron destruidas, vandalizadas en distinto grado. Es decir, el 87% de las Estaciones tuvieron daño. De estas, 25 fueron incendiadas, 18 en forma parcial y 7 de manera total.

Esta es la Estación San Pablo en la Línea 1 que incluso fue incendiada con un tren adentro (Figura 15).

O la Estación Elisa Correa con un tren de la línea 4 esos trenes más grandes, también incendiada con un tren adentro (Figura 16).

Esas cosas debemos tenerlas en consideración para entender todo el contexto de ese día, y cómo se continuó después. Estación Macul Línea 4 estas son parecidas, terminadas, Línea 4 también es quizás la Línea que más daño sufrió. Factor común de las Estaciones incendiadas: todas en viaducto, todas en superficie. No solo las Estaciones, 10



Figura 15



Figura 16



Figura 17

trenes fueron dañados, de los cuales 7 fueron quemados y 3 completamente vandalizados.

Esta foto, a mí la verdad que me genera conmoción, o sea, icómo es posible que haya ocurrido esto! Un servicio, que mejora la calidad de vida y trata de generar accesibilidad, conectividad y más oportunidades a los vecinos y normalmente a aquellos sectores más postergados. ¿Cómo entendemos que haya ocurrido esto? (Figura 17).

Fueron los días más duros en la historia de nuestra empresa y debatíamos cómo volvernos a ponernos de pie, cómo levantarnos.

Y ocurrió algo que yo creo que marcó el comienzo de este viaje, el comienzo del viaje de la reconstrucción.

Esto fue en la Estación San Pablo el domingo 20 de octubre (Figura 18). Vecinos de la Comuna de Lo Prado, vecinos de la Estación San Pablo, de manera espontánea, generosa y valiente, llegaron ese domingo 20, y con sus propias manos, con palas, con escobas, y ellos mismos empezaron a limpiar la Estación. Retiraron escombros todo el día, con un gran esfuerzo. Este yo creo que fue el momento, el inicio de la reconstrucción, esto nos cargó de energía, fue un choque anímico tremendo para todos los equipos de Metro.



Figura 18

Y acá empezó el viaje de la reconstrucción. Al lunes 21 siguiente, 2 días después nada más, ya teníamos parte de la Línea 1 funcionando, 20 Estaciones de la Línea 1, contra todos los pronósticos. Mucha gente decía no que era posible, incluso ex trabajadores de Metro decían no era posible que el lunes estuviera funcionando un tramo... y bueno, logramos abrir 20 Estaciones de la Línea 1, las del tramo principal. Esto fue un trabajo de 2 días seguidos, 24 horas con los distintos equipos de Metro (Figura 19).

Después no paramos más: miércoles 23 apertura parcial de Líneas 3 y 6, las Líneas automáticas. Viernes 25, apertura parcial de Líneas 2 y 5. Y seguimos sin parar, trabajando 24/7. Reapertura del tramo de la Línea 4 entre Tobaraba y Quilín. Lunes 4 de noviembre reapertura de 5 Estaciones



Figura 19. Lunes, 21 de octubre de 2019.

más de la Línea 3 y adelantamos un poco el servicio de las 7 a las 6:30 am. Pocos días después, miércoles 6 de noviembre, adelantamos a las 6 un servicio tan importante y necesario; lo es para mucha gente que tiene que levantarse muy temprano para llegar a su destino, lejos de su hogar. Para esas personas abrir a las 6 es muy importante. Lunes 11 de noviembre, 4 Estaciones más en Línea 2. Lunes 18, 7 Estaciones más, y Línea 4 hasta Puente Alto. Puente Alto es una tremenda comuna que quedó desconectada de la ciudad a causa de estos ataques, una comuna de 500 mil habitantes. El lunes 18 de noviembre, justo un mes después de los ataques recibidos, logramos abrir Plaza Puente Alto.

Un mes después teníamos casi el 70% de la Red funcionando, 94 de 136 Estaciones, y seguíamos sin parar, sabíamos lo importante que era en un contexto que era difícil, porque seguían las manifestaciones y el vandalismo en torno a ciertos lugares asociados a Metro, ya sea de la reconstrucción o los nuevos proyectos o las Estaciones operativas (Figura 20).

Jueves 21 de noviembre, 4 Estaciones más de la Línea 5, a Pudahuel; lunes 25 abrimos la Línea 4A por Vespucio Sur, uno de los sectores más pobres de la ciudad, más postergados, abrimos 3 Estaciones ahí, entre las Línea 2 y la Línea 5 que las conecta. Lunes 2 de diciembre, 3 Estaciones más: Las Torres, Los Héroes y República. Luego Estación Pedro Aguirre Cerda Línea 6, y aquí hay



Figura 20. Lunes, 18 de noviembre de 2019.



Figura 21. Martes, 31 de diciembre de 2019.

que hacer un reconocimiento expreso a los alcaldes. Los alcaldes han sido un gran apoyo en todo este proceso. El alcalde de Pedro Aguirre Cerda Juan Rozas, el alcalde de Lo Prado Maximiliano Ríos, todos ellos han mostrado su apoyo a todo este proceso.

Lunes 9 de diciembre abrimos Rojas Magallanes y Departamental, en la Línea 2, y así seguíamos, Parque Almagro en Línea 3, el lunes 16 de diciembre. La reapertura de Santa Lucía y extensión del horario hasta las 11 de la noche se sumaron. Santa Lucía fue una de las Estaciones que más daño recibía en forma permanente, estaba en el epicentro del conflicto. Era tremendamente difícil trabajar en estas condiciones, pero lo logramos.

Estuvieron todos los equipos de Metro, todos, desplegados. Acá no era un nombre que estaba desplegado, eran todos los equipos, los distintos ejecutivos, los trabajadores, los Jefes de Estación. Estaban todos trabajando, desde las 6 de la mañana hasta las 11, 12 de la noche para lograr recuperar lo antes posible este servicio que es tan fundamental para la ciudad.

La apertura de la Estación Biobío en Línea 6 también se sumaba, y ese día 23 de diciembre logramos el record de pasajeros post 18 de octubre, con 2,2 millones de pasajeros. Finalmente, terminamos el año abriendo la Estación San Pablo Línea 5.

Este hito era importante, porque logramos terminar el año 2019 con un 81% de las Estaciones, son 111 de las 136; fue un avance relevante (Figura 21).

Y acá está el resumen de este proceso, porque uno puede apreciar como fuimos incorporando las diferentes estaciones en las diferentes semanas a lo largo de ese año 2019 (Figura 22).

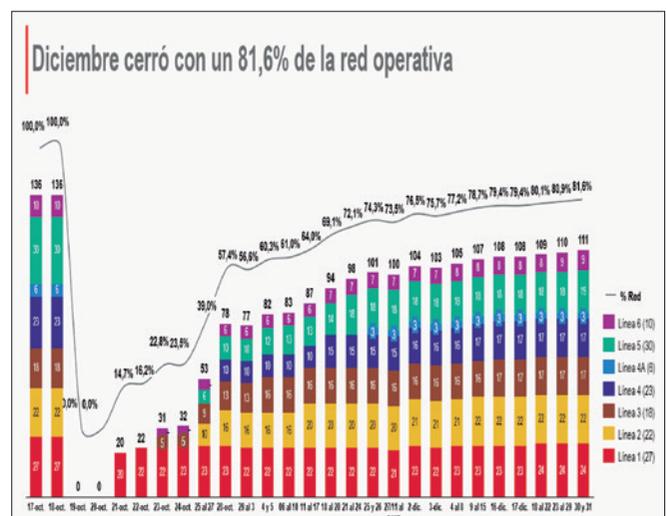


Figura 22

La mejora en la calidad de vida y los agradecimientos recibidos representan el mayor reconocimiento que podemos tener de los mismos usuarios, pasajeros y vecinos, que tienen esa opinión del servicio que nosotros entregamos.

Concluimos ese año 2019 como el más duro de la historia de nuestra empresa, y preparábamos el 2020 un poco en ese contexto. En el contexto de las reaperturas de las Estaciones, fue con conflictos en algunas de ellas; la reconstrucción, los nuevos proyectos que seguían haciéndose y ahí reforzamos los portones. Durante todo este periodo también tuvimos el respaldo permanente del Presidente de la República, que llamaba para informarse de la situación, y nos prestó todo el apoyo y lo manifestó a través del Ministerio de Hacienda, que nos dio todas las facilidades y nos proporcionó los recursos para hacernos cargo del proceso de reconstrucción, que en esa época estimábamos que costaba sobre los 300 millones de dólares.

Junto con la reconstrucción de Estaciones, iniciamos refuerzos en los accesos, incorporamos nuevos sistemas de cámaras de televisión, y la remodelación en el interior de las Estaciones para reforzar y evitar que sean frágiles.

El 2 de marzo llegó el súper lunes, y todos nosotros enfocados en la operación y en la construcción, estábamos contra el tiempo. El súper lunes coincidió con la apertura de la Estación Ñuble, que es la combinación de la Línea 5 y 6. Y seguíamos enfocados en la reconstrucción, en los potenciales conflictos, las evasiones masivas. Estábamos bajo tensión permanentemente, y ocurrió algo que todos sabemos que nos generó, no sé si una interrupción del viaje, pero algo que nadie en Chile y en el mundo se esperaba con la fuerza que vino, el COVID-19.

Además de todos los desafíos, los conflictos, las complejidades que estábamos enfrentando como empresa, con la operación, la reconstrucción, los proyectos de expansión y de mantener la excelencia operacional, nos aparece el COVID-19, que nos obliga a rediseñar muchos aspectos, como la sanitización de los trenes, la información a los pasajeros. Es decir, teníamos que empezar a implementar una serie de protocolos nuevos por una pandemia que, la verdad, era inédita a nivel mundial. Y había mucho que aprender todavía.

Y partimos con la sanitización de los trenes al interior con amonio cuaternario, que fue la tecnología inicial que partimos usando. Más de 200 trenes en total. Todos los

días sanitizando para darles certezas, garantías a nuestros usuarios que iban a estar protegidos en ese aspecto, pese a que lo más relevante sigue siendo el uso de la mascarilla y otros aspectos de cuidado personal. Incorporamos procesos de sanitización en forma diaria, cada 24 horas en todos los trenes, también al interior de las Estaciones. Ustedes pueden venir a cualquiera de ellas, cualquier día y van a ver equipos sanitizando las Estaciones.

También empezamos una campaña informativa para los pasajeros, porque sigue siendo una conclusión de todos los estudios a nivel mundial, que el autocuidado es fundamental: la mascarilla, lavado de manos y otros aspectos que siguen siendo lo más relevante para evitar el contagio (Figura 23).



Figura 23

Las autoridades sanitarias impusieron el uso obligatorio de las mascarillas al interior del transporte público, y se ve a nuestro Gerente General Rubén Alvarado dando el ejemplo. Mi experiencia, como usuario casi diario de Metro, es que el 100% de los pasajeros que me ha tocado ver, tanto dentro de los trenes como en las Estaciones, está con mascarilla. Eso al menos habla bien de que nuestros pasajeros están entendiendo la complejidad del problema.

Posteriormente incorporamos una tecnología de sanitización más innovadora, basada en Biotecnología que nos permite esparcir una especie de spray en la superficie de los trenes que mata al bicho, por decirlo de alguna forma, durante 90 días. Esto también lo reforzamos y complementamos con el mecanismo tradicional de sanitización.

En abril abrimos Baquedano, pero solo como trasbordo. Y era importante abrirla, porque muchísima gente realizaba este trasbordo, era fundamental. A las pocas semanas teníamos el desafío de abrir a la superficie esta

Estación, pero estaban todos los accesos sellados, porque Baquedano fue el epicentro del conflicto. Se hizo el trabajo en coordinación con diferentes actores y logramos abrirlo a la superficie pocas semanas después, en mayo, con los accesos de Parque Bustamante y los 2 accesos chicos del teatro de la Universidad de Chile. La plaza redonda que lleva a otro acceso sigue cerrada por el momento.

Pero no podemos desconocer lo que significa Baquedano y lo que generó, con esa acusación de tortura que fue finalmente descartada y el caso sobreesido por la justicia. Todas las denuncias que hubo, al final no tenían sustento. Pero el daño fue muy grande, porque nos costó mucho avanzar en esta Estación por la significancia que tenía. Además, recibimos una Carta de Carabineros de Chile que nos explicaba, que tenían que dejar la Estación, que no seguían con el comodato que tenían. El espacio grande que ahí teníamos disponible, lo transformamos rápidamente en una oficina de atención al cliente que mejora las prestaciones que damos (Figura 24).



Figura 24

Pero la Pandemia también nos pegó muy fuerte en otros aspectos, uno de ellos es que los pasajeros nos han bajado hasta en un 90%. Ustedes saben que los ingresos de Metro dependen fuertemente de los pasajeros, a diferencia de los buses que reciben pago también por kilómetro; nosotros recibimos 100% por pasajero. Que nos baje un 90% la cantidad de pasajeros pega muy, muy fuerte en los ingresos (Figura 25).

Tuvimos que tomar una serie de medidas adicionales para enfrentar esta situación financiera y de crisis económica. Hicimos muchos ajustes de costos, eficientamos ciertos procesos, muchos ejecutivos nos bajamos los sueldos, entre ellos, directorio, gerente general y otros gerentes nos bajamos un 20% las remuneraciones. Muchos trabajadores renunciaron a beneficios, y todos en el fondo apretándose



Figura 25

el cinturón para lograr enfrentar esta crisis. Un punto alto acá fue la exitosa colocación de un bono de 1.500 millones de dólares, 500 millones a 10 años y 1.000 millones a 30 años con unas tasas record. Esto refleja la confianza que se tiene, no solo en el país, sino también el mundo, respecto de nuestra empresa, lo que nos ha ayudado a reducir la carga financiera y tener más recursos para administrar lo que es la operación durante este año.

Pero también tenemos a nuestros socios al interior de Metro; tenemos muchos locales comerciales. Las personas no lo saben, pero la cantidad de metros cuadrados que tiene Metro en su interior en comercio, es más grande que el Parque Arauco. Muchas son PYME, y producto del estallido y rematado por la Pandemia, la verdad es que les pegó muy fuerte. Estamos en conversaciones permanentes con ellos porque sabemos que estamos juntos en el tema, nosotros sabemos que nuestros locatarios y Metro somos socios, y tenemos que trabajar de manera coordinada.

Para ir terminando, pese a la Pandemia, pese a todas las dificultades, hemos seguido avanzando, con ciertas demoras a veces porque alguna faena entra en cuarentena. Es así como el sábado 25 de julio logramos devolverles a los vecinos de San Pablo, esos mismos vecinos que les mostré en el video cantando el himno nacional, que llegaron a limpiar y recuperar la Estación, y fue un hito muy lindo, su Estación.

Junto con San Pablo devolvimos Neptuno. Y el martes siguiente, Plaza Maipú en Línea 5. Maipú es otra comuna gigante, como Puente Alto, La Florida, comunas de más de 400 mil habitantes que estaban desconectadas. Sin Metro se desconectan completamente; cuando abrimos tuve la oportunidad de estar ahí ese día y una señora nos comentaba que ese día había podido dormir una horita más. Es algo mínimo para algunos, pero al final ese es el impacto directo a la vena que tienen estos servicios y que los hace ser tan importante.

Esta es la Red en la situación actual, tenemos 124 de las 136 estaciones, más de un 90% de la Red operativa, todavía falta un poquito ahí les voy a contar cuales son las que nos faltan. Pero hemos avanzado bien y tenemos desafíos importantes por delante (Figura 26).



Figura 26. Viernes, 31 de julio de 2020.

Acá les muestro la historia, el cuadro actualizado que les mostré antes, el avance por Línea a lo largo de las semanas (Figura 27).

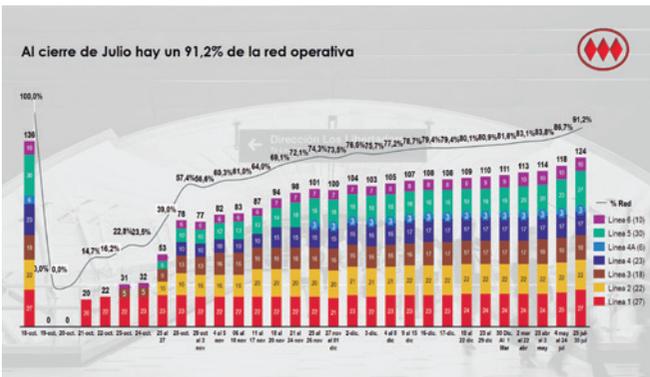


Figura 27

¿Qué es lo que nos queda del viaje todavía? Nos quedan 12 Estaciones, en que las 4 que aparecen todavía en fase 2, son de la Línea 4 (Macul) y la 4A: San Ramón, Santa Julia y La Granja. Esperamos abrirlas en las próximas semanas. Y las últimas 8 que son las que están abajo, que fueron las más destruidas, prácticamente pérdida total por los incendios; esas esperamos abrirlas en el último trimestre de este año. Ahí en el gráfico se ven las Estaciones en amarillo; esas 4 que están en la Línea 4A junto con Macul, las abrimos las próximas semanas, y las verdes son las que abrimos el último trimestre de este año, pero siempre manteniendo la promesa que le hicimos a la ciudad de que íbamos a tener un 100% de las Estaciones operativas dentro de este año 2020 (Figura 28).

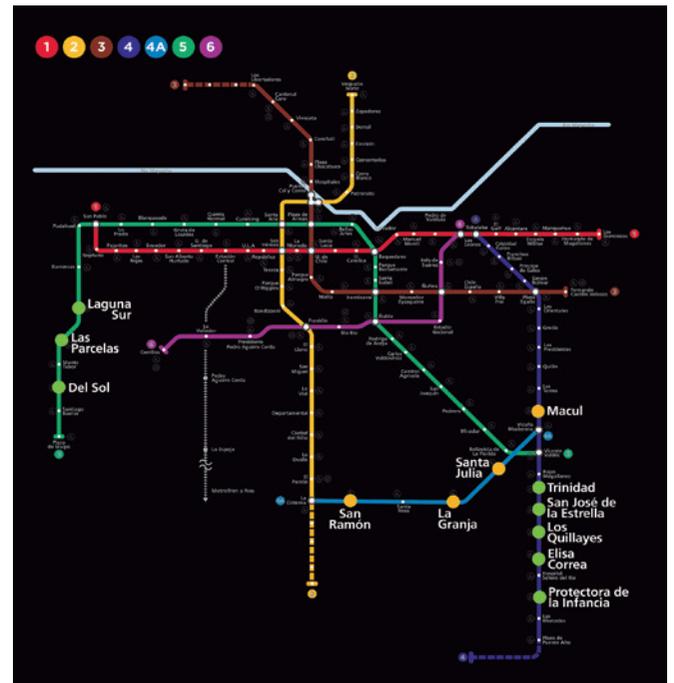


Figura 28

Pese a todos estos inconvenientes que hemos enfrentado en este duro camino, seguimos trabajando día a día con el compromiso y convicción en la reconstrucción de las Estaciones que fueron dañadas en octubre pasado. Gracias al profundo espíritu de servicio que mueve a todos los trabajadores de Metro, para devolver a nuestros pasajeros las Estaciones que perdieron el 18 de octubre y que les permitirán mejorar su calidad de vida y acceder a nuevas oportunidades en la ciudad. Ese es el principal objetivo que tiene el Metro de Santiago.

Y para terminar quiero agradecer a las comunidades, a los vecinos que desde el primer día de la destrucción de Metro fueron a ayudarnos siempre de manera generosa, en ambientes complejos. Ellos siempre se mostraron muy dispuestos, muy generosos a ayudarnos. Recibimos muestras de ayuda de muchos vecinos, muchas comunidades. También agradecemos a los equipos del Centro de Operaciones de Metro; ahí está parte del equipo del Centro de Operaciones de las Líneas Convencionales, las Líneas más antiguas por decirlo de alguna forma, que no han parado, para ellos no existe la cuarentena, ellos tienen que estar 24/7 los equipos ahí haciéndose cargo de que funcione el Metro para que ayude a superar la crisis. El Metro es un actor relevante para ayudar a supera la crisis sanitaria.

También los equipos de Estaciones, son fundamentales, ellos llegan a las 6 de la mañana a las Estaciones, se tienen que levantar a las 4 y media, 5 de la mañana para poder llegar a las Estaciones y ayudar a las comunidades a cumplir con su trayecto. Y, por supuesto, a los equipos de la reconstrucción, a todos ellos un tremendo agradecimiento.

Muchas gracias.

Al término de la conferencia, el Sr. Ricardo Nicolau del Roure, Presidente del Instituto agradece al Sr. Louis de Grange en los siguientes términos.

Sr. Nicolau del Roure.

—Muchas gracias por esta detallada exposición del largo viaje de la reconstrucción. La verdad que, viendo las cifras, conociendo los detalles, la reacción de Metro para volver a estar operativo fue notable. Yo creo que la coordinación y la cantidad de trabajo que hay detrás es muy grande, porque muchas veces construir es difícil, pero reconstruir lo es mucho más, felicitaciones por un éxito notable.

Y lo otro que uno rescata de esta presentación, es que sin duda se refuerza el hecho que el Metro de Santiago, es la columna vertebral del transporte público de la ciudad y por lo tanto tiene que continuar creciendo y estas Líneas que vienen la 7, la 8 y la 9 son muy necesarias, sin duda, y esperamos que existan suficientes recursos después de la Pandemia, y continuar con el programa original que tenían para poner en marcha estas Líneas antes del año 2027.

Interesante lo que mencionaste de que se están armando trenes en Chile, los NS16, me parece un avance importante. Ahora, no todos saben la calidad de la mantención que hace Metro de Santiago es la mejor del mundo, eso está reconocido a nivel internacional, lo sé de primera fuente, así que felicitaciones otra vez. Y el desafío es cómo volver, es como combinar, coexistir con el COVID 19, en los meses que vienen, ya que va a estar con nosotros por mucho tiempo y no sabemos exactamente cómo se va a comportar.

Muchas gracias.

A continuación, don Juan Carlos Barros toma la palabra para trasmitir las preguntas recibidas por los asistentes.

Sr. Barros.

—*Muchas gracias, efectivamente hemos recibido muchas preguntas.*

Yo he identificado y tratado de agrupar varias preguntas. Hay una que tiene que ver con lo que ocurrió con el vandalismo y qué ha pasado con los procesos judiciales, ¿por qué no ha sido posible identificar aún más a aquellos que causaron estos daños a las Estaciones y qué se está haciendo para prevenir que esto vuelva a ocurrir?

Sr. de Grange.

—Los procesos siguen su curso –hay varias personas formalizadas–, hay algunos que están bien avanzados, los fiscales han solicitado penas, y personalmente confío en la justicia chilena. Yo creo que vamos a terminar condenando a las personas que destruyeron el Metro de Santiago. Es un proceso que toma su tiempo, nosotros hemos proporcionado todos los antecedentes que la justicia ha requerido. Son decenas de miles de horas de grabación y las hemos proporcionado todas, confío en la justicia chilena.

¿Qué estamos haciendo para prevenir esto? Bueno, parte de la reconstrucción considera el reforzamiento de los accesos, los portones, en eso hemos avanzado muy bien. Ya tenemos más de 60 Estaciones con esos portones antivandálicos que han sido muy efectivos. También hemos reforzado con cámaras de televisión los entornos de las Estaciones que nos permiten adelantar ciertas complejidades. El diseño al interior de las Estaciones lo hemos

modificado también, hemos tenido que cambiar el vidrio por fierro. Eso yo encuentro que es lamentable, ya que el vidrio le daba transparencia, luminosidad a las estaciones. Los dispositivos al interior de las Estaciones los hemos cambiado y también los protocolos frente a las contingencias y de comunicación con Carabineros; nos hemos adaptado, hemos tomado varias medidas que consideramos que han funcionado bien hasta el momento.

Sr. Barros.

—*Considerando que el servicio de transporte de Metro es complementado con el transporte de superficie, ¿no parece natural aprovechar la experiencia y la capacidad de gestión del Metro y pasar a la integración con el Metro de Santiago?*

Sr. de Grange.

—Ya están integrados los sistemas, quizá la pregunta está enfocada en que Metro opere buses, pero son industrias completamente distintas. Pero la integración está funcionando, de hecho, Metro opera 7 Estaciones intermodales. Metro es operador de casi todas. La única que no opera es La Cisterna, pero le presta servicios de apoyo. Por ejemplo, Los Libertadores y Pajaritos, las Estaciones en las que hay trasbordo Bus-Metro, ya son operadas por Metro. Metro hoy en día es el principal actor en Chile de la integración Modal. También estamos sumando las bicicletas como les mencioné, con 1900 estacionamientos y va a seguir creciendo, Yo digo que Metro el día de hoy ya cumple un rol bien activo en eso, y esperamos seguir siendo protagonistas de este sistema.

Sr. Barros.

—*Gracias, y la última pregunta, la hicieron varias personas: ¿Cuál es el efecto que ha tenido tanto la crisis sanitaria como el estallido social en lo que son los proyectos que estaban en carpeta?*

Sr. de Grange.

—Algunos se retrasaron. Las extensiones, que son de la Línea 2 y Línea 3, ya estamos trabajando en los túneles. Esas han seguido bien. La extensión de la Línea 2 al Hospital El Pino de San Bernardo y la Línea 3 a la Plaza de Quilicura siguen.

La Línea 7, que ya tenía presupuesto aprobado, también ha seguido; estamos haciendo llamados a licitación, estamos haciendo *road show* internacionales para el proceso de construcción en el tramo poniente y vamos a innovar con una tuneleadora. Por lo tanto, la Línea 7 también sigue avanzando de acuerdo con lo previsto. Hemos tenido atrasos de otra índole, pero sigue avanzando la Línea 7.

Las Líneas 8 y 9 están a nivel de ingeniería conceptual y esperamos a la brevedad posible retomar las licitaciones para los estudios de ingeniería básica. Lo mismo con la extensión de la Línea 4 a Bajos de Mena.

Fin de la conferencia.

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 a los Ingenieros Ricardo Baeza Yates y Víctor Pérez Vera. Estas entrevistas, como las que se hagan en el futuro, serán objeto de una publicación especial.

RICARDO BAEZA YATES

“Un explorador inventando el futuro”

Al momento de elegir qué carrera seguir, tenía varios gustos en competencia: la geografía, la astronomía, las matemáticas y la física. Finalmente le pareció una buena opción el Plan Común de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile para encontrar su vocación. Luego decidió seguir ingeniería eléctrica como un desafío ante las dificultades que ella presentaba. En el camino encontró lo que realmente le gustaba, la computación. Pero como no existía aún ingeniería civil en ese tema, terminó la ingeniería eléctrica en paralelo con el Bachiller y el Magíster en Ciencias de la Computación, llegando a aprobar en un solo semestre 13 materias. Esto decidió que su doctorado en la Universidad de Waterloo, Canadá, fuera en esta última área.

Recuerda a profesores como Patricio Poblete y Alfredo Piquer como influencias en su entusiasmo por la computación. También recuerda a Mario Ahués, Moisés Mellado, Igor Saavedra, René Nóbile y Sergio Vásquez y posteriormente en su doctorado, a Gastón Gonnet, Paul Larson y Derick Wood. En su época de investigador señala a Jorge Olivos y Francisco Brieva, y en sus años de Yahoo, a Prabhakar Raghavan y Ron Brachman.

Comenzó ejerciendo como ingeniero en computación en su postgrado y después en su investigación. Ha diseñado sistemas computacionales complejos y ha escrito varias decenas de miles de líneas de código.

En su vida profesional, él destaca las siguientes actividades: La creación del laboratorio de investigación de Yahoo! para Europa en Barcelona, con un satélite en Santiago. Este laboratorio duró 10 años y formó a cientos de investigadores aplicados, ganando numerosos premios. También destaca el libro *Modern Information Retrieval* escrito en conjunto con Berthier Ribeiro Neto y publicado en 1999, con una segunda edición en 2011. Este libro ha sido traducido al chino, coreano y portugués, además de tener ediciones especiales para India. El libro ganó el premio Manuel Montt en Chile y el Premio al Mejor Libro del Año en 2012 otorgado por la American Society of Information Systems & Technology. Otra actividad fue la creación del Centro de Investigación de la Web, el primer núcleo Milenio en computación, donde reunió a investigadores de las universidades de Chile, Técnica



Federico Santa María, Concepción y Magallanes. También señala a La Ventana Digital, un proyecto del año 2003 para acercar la tecnología de video conferencias al público. Consistía en una proyección de video con múltiples canales de audio que comunicaba el Patio de Los Naranjos en el Palacio de la Moneda y la Plaza de Armas de Arica, a dos mil kilómetros de distancia. Esta experiencia fue inaugurada por el presidente Ricardo Lagos y tuvo una alta repercusión mediática al permitir a muchas personas conversar gratuitamente con parientes o amigos que no habían visto en años, sin necesidad de tener ni entender Internet, durante 10 días.

Sus aportes más importantes en la ingeniería en computación son: la creación de una nueva clase de algoritmos de búsqueda de palabras o secuencias de caracteres llamada de paralelismo de bits. La creación de uno de los primeros algoritmos online, es decir que reciben información y resuelven el problema a medida que van avanzando, para búsqueda en un plano, muy utilizado en robots. También señala como aporte, muchas ideas novedosas en el campo de la búsqueda Web, incluyendo arquitecturas distribuidas de búsqueda, minería de consultas, detección de spam Web, arquitecturas de memoria cache para resultados e índices y jerarquización de respuestas, entre otras.

Como parte de sus anécdotas divertidas, recuerda que en uno de sus primeros artículos del doctorado surgió en la clase de Derick Wood. Su trabajo consistió en mejorar una idea discutida en clases y como no podían poner a todo el curso como coautor, el profesor decidió inventar a otro autor: Paul S. Amerins, ya que el curso se llamaba Problem Solving Seminar (amerins es un anagrama de seminar). De ese modo tiene un artículo escrito con alguien que nunca existió.

Entre los principales desafíos que ha tenido que enfrentar en su vida personal señala el haber sido padre muy joven, a los 21 años, lo que le significó estudiar y mantener una familia al mismo tiempo; y como experiencia memorable, cuenta que a sus 17 años participó en un programa televisivo llamado Un Millón para el Mejor con el tema de geografía política donde alcanzó el tercer lugar compitiendo con adultos.

Entre sus aportes más allá de la ingeniería, menciona su trabajo de investigación como contribución a la ciencia de la computación, a la ingeniería en computación y también a la ciencia de datos. Su interés en la bioinformática permitió crear el primer laboratorio de bioinformática en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile en conjunto con Ariel Orellana a comienzos de los 2000. En el ámbito de la ciencia de datos, durante 2020 ha sido uno de los referentes en el análisis de datos del Covid-19, estimando el número real de contagios, el exceso de personas fallecidas y revelando el punto álgido de la pandemia en junio.

La enseñanza también ha ocupado un lugar importante en su desarrollo, siendo uno de los primeros que enseñó en Chile materias como la computación gráfica, programación orientada a objetos, visualización de datos o bioinformática. También ha propuesto enseñar algoritmos con juegos y otros problemas lúdicos.

En una palabra, se define como un explorador, que según señala, tiene muy buena memoria y hasta hace algún tiempo nunca necesitó una agenda. Y como siempre le gustó la geografía, ha explorado el mundo, viajando hasta ahora por 85 países de todos los continentes, siendo 100 su objetivo vital. No le gusta hacer planes, pues asegura que ellos limitan, es mejor siempre hacer lo mejor posible y aprovechar las oportunidades. Tampoco le gusta tener

grandes expectativas, pues ellas impiden ver el conjunto y aconseja aprender siempre y no arrepentirse de los errores.

Muy importante para él es ser mentor de estudiantes, principalmente de doctorado e investigadores jóvenes, enfatizando la ética profesional. En particular, de los 31 doctores que ha graduado, casi la mitad son mujeres, algo inusual en el área de computación.

Otro tema importante para él es la discriminación de cualquier tipo, que combate con ahínco y que es el foco de su investigación reciente, en particular el impacto de los sesgos en las aplicaciones de la inteligencia artificial (IA). Por este trabajo es miembro del consejo de IA del gobierno de España y de otros consejos similares en ACM y el BID.

Le gustaría ser recordado por su trabajo científico, gracias al cual ha conseguido la distinción de Fellow en las dos asociaciones profesionales más importantes del mundo, ACM e IEEE, además del premio nacional de informática Ángela Ruiz Robles en España y premios del Colegio y el Instituto de Ingenieros de Chile, siendo uno de los 5 científicos chilenos y uno de los 3 científicos españoles en computación más citados en Google Scholar.

En su mirada al futuro, le ha correspondido apreciar un enorme cambio en la ingeniería en computación, desde la programación estructurada al aprendizaje automático. Hoy, muchas tareas que se pueden realizar con modelos que aprenden de los datos sin necesidad de programas ad-hoc. En el futuro ve a los computadores generando programas basados en especificaciones de alto nivel, donde los seres humanos harán el diseño, pero los computadores harán la implementación usando inteligencia artificial.

A las nuevas generaciones les aconseja aprender los conceptos. Los conceptos permanecen, las tecnologías son siempre cambiantes. Hay que aprender a aprender, ser curiosos y apreciar la incertidumbre. Hay que innovar a casa paso, nos dice, y finaliza citando la frase de Alan Kay, conocido por sus trabajos pioneros en la programación orientada a objetos y el diseño de sistemas de interfaz gráfica de usuario: “la mejor manera de predecir el futuro es inventarlo”.



VÍCTOR PÉREZ VERA

“Ingeniero por tincada”

Estudió en el Liceo Manuel Barros Borgoño, un liceo donde él siente que se vivía la esencia de la educación pública, la diversidad, el respeto al otro, y la calidad y exigencia en el estudio. Sus referentes familiares eran todos profesores primarios, así que al momento de decidir qué estudiar, sin orientación vocacional alguna, optó por ingeniería en la Universidad de Chile, y lo hizo, según cuenta: “por tincada”.

Lo mismo ocurrió cuando después del Plan Común tuvo que elegir especialidad, y le “tincó” escoger Industrial.

Entre quienes influyeron en su formación académica y profesional, recuerda a Jorge Mardones, director del Departamento de Industrias; a Isaac Yudilevich, director del Centro de Administración Industrial; y a Sergio Bitar, director del Centro de Planeamiento y profesor guía para su memoria de título. En la Universidad de Michigan, EEUU, recuerda a Edgard Sibley y Daniel Teichrew, quienes fueron pioneros a nivel mundial en el desarrollo de los Sistemas de Información Administrativos.

Los cursos los recuerda principalmente por sus profesores, como Domingo Almendras, en Cálculo; Augusto León, en Álgebra Lineal; Joaquín Undurraga, en Economía; Efraín Friedmann, en Mecánica Racional y Enrique Silva, en Industrias, curso en el cual se visitaban semanalmente distintas empresas, para conocer sus estructuras y estrategias.

Años después, le correspondió recibir el Premio “Profesor Enrique Silva a la Trayectoria Docente”, versión 1994, otorgado por el Departamento de Ingeniería Industrial.

Sus primeros pasos en el mundo del trabajo relacionado con la ingeniería, los dio siendo estudiante de tercer año, cuando empezó a hacer clases vespertinas a estudiantes del Instituto Politécnico de Santiago, para dar formación técnica a trabajadores y obreros. Posteriormente al egresar de la Escuela, ingresó al hoy Departamento de Ingeniería Industrial. Obtuvo una beca para estudiar un Master en Ingeniería Industrial en la Universidad de Michigan, en EEUU y a su regreso al Departamento, inició su trabajo en ingeniería, participando en el desarrollo del área de Sistemas de Información Administrativos, SIA, que es la aplicación de la computación e informática a la gestión



de empresas e instituciones, llegando a ser decano de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, y luego rector de la Universidad de Chile.

Durante la década de los 70 y 80 realizó consultoría profesional part-time, desarrollando sistemas de información administrativos en diversas empresas mineras y organismos públicos; lo que le permitió validar y perfeccionar las metodologías que iba desarrollando y enseñando en la universidad.

Desarrolló metodologías para los sistemas de información administrativos que fueron pioneros en el país, y que tuvieron amplia aplicación en el mejoramiento de la gestión y operación de muchísimas empresas e instituciones nacionales. Junto a otros colegas formó en esas materias a cientos de ingenieros y profesionales de las más diversas disciplinas a lo largo del país, quienes las utilizaron en proyectos aplicados en todas las áreas productivas y de servicios, desde empresas mineras hasta instituciones de salud, incluyendo organismos públicos y financieros. De ese trabajo, publicó artículos internacionales en revistas de corriente principal, y la Editorial Universitaria publicó siete libros de su autoría y co-autoría sobre la materia, con ocho ediciones, los que fueron utilizados como textos

de estudios en el resto de las escuelas de ingeniería y de economía de las demás universidades nacionales que introdujeron esta disciplina.

Fue Director del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Chile, entre 1980-1984 y 1988-1990, Vicedecano de la Facultad en 1984-1985 y Prorrector de la Universidad de Chile, en 1993 y 1994, donde condujo el proyecto que instaló la primera red de banda ancha para la transmisión de datos, voz e imagen, integrando “virtualmente” a los campus de la universidad, iniciativa pionera en la región; y también el proyecto de bibliotecas integradas de la Universidad, SISIB.

En los dos periodos como decano, entre 1994 y 2002, condujo un proceso de cambios institucionales permitieron a la Facultad sentar las bases y orientaciones para su desarrollo académico y su sustentabilidad económica y capacidad de inversión. Se terminó la remodelación y reconstrucción del edificio de Beauchef 850, inutilizado por el terremoto de 1985, y se construyó el edificio de los departamentos de Ingeniería Civil y de Geofísica; se mejoraron las remuneraciones académicas; se robusteció el cuerpo académico y se incorporaron académico(a)s jóvenes; se fortalecieron académicamente los laboratorios docentes, IDIEM, y el departamento de Ingeniería de Minas, en el que se constituyeron siete Cátedras auspiciadas por la industria minera por setecientos mil dólares anuales, durante cinco años; se mejoró la calidad de la docencia y los procesos de ingreso y titulación; y mejoraron fuertemente los puntajes de ingreso a primer año.

Como Rector de la Universidad de Chile, también por dos periodos, 2006 a 2014, condujo un programa de rectoría centrado en el desarrollo académico de la Universidad, y en la defensa de la educación pública y de la Universidad de Chile. Como logros de estos proyectos menciona: a) La propuesta para establecer un Nuevo Trato entre el Estado y sus universidades, que contribuyó a socializar la necesidad que el Estado debía reasumir su responsabilidad en el desarrollo de sus universidades, con la dictación de la Ley de Universidades Estatales, b) Se revitalizaron las Humanidades, las Artes y las Ciencias Sociales y de la Comunicación. c) Se terminó, en 2013, con la deuda de arrastre del Fondo General de la Universidad, que era cercana a los \$31.000 millones, moneda 2006; d) Se estableció, en 2013, el Fondo de Inversión para el Desarrollo Académico y el Fondo de Inversión en Infraestructura y Equipamiento e) A fines de sus períodos, los órganos

Superiores de la Universidad aprobaron el proyecto para iniciar la construcción de Vicuña Mackenna 20 (VM20), con el Hall de Conciertos para la Orquesta Sinfónica Nacional de Chile, Sala para el Ballet Nacional Chileno, y demás espacios para el Centro de Extensión de la Universidad; así como el edificio para el Instituto de Asuntos Públicos, y otro para Congresos, Educación Continua y Postgrado; f) Se mejoró la infraestructura en el período 2006-2013: cercano a los 180.000 m², con una inversión del orden de los 4,5 millones de UF; g) Se aumentó en 43% real las remuneraciones del cuerpo académico de media jornada y superior, durante el período; h) Se creó el SIPPE, Sistema de Ingreso Prioritario de Equidad Educativa, en 2011, para mejorar la equidad en el ingreso a la Universidad, y admitir con requisitos especiales a estudiantes talentoso(a)s de colegios municipales vulnerables; i) Se estableció la Oficina de Igualdad de Oportunidades de Género, en 2012, para avanzar en mayor equidad de género.

Desde los años 90 hasta el 2014, ha aportado a la práctica de la Ingeniería Civil Industrial en el liderazgo de proyectos para mejorar la gestión de instituciones universitarias complejas como la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad de Chile.

Estos aportes llevaron a que el Instituto de Ingenieros de Chile lo distinguiera con el Premio “Al Ingeniero por Acciones Distinguidas”, en 2003; y a que la Especialidad Civil Industrial del Colegio de Ingenieros de Chile A.G. lo distinguiera con el Premio al “Ingeniero Civil Industrial del Año”, en 1994.

Entre los principales desafíos que ha tenido que enfrentar en su vida profesional, señala entre otros, la resistencia al cambio que ha debido enfrentar cuando sus proyectos han involucrado cambios culturales y organizacionales. En lo personal, señala como desafío el haber tenido que lidiar con su inicial tendencia a que las soluciones a los problemas en ingeniería se resuelven técnicamente. Con el tiempo, fue comprendiendo que también las soluciones ingenieriles deben incorporar los aspectos humanos, culturales y sociales. En ese sentido siente que las Humanidades, la Educación y el Arte, son disciplinas que lo han influido, dándole un equilibrio disciplinario y emocional, que han sido fundamentales para su vida profesional. Por ello, declara que le gusta la música y desde niño estudió piano, el que sigue practicando hasta ahora. Cuando puede, “se escapa” junto a su señora a disfrutar de buenos conciertos, señalando como un momento inolvidable cuando asistió

al Festival de Bayreuth a presenciar óperas de Wagner o cuando vio óperas rusas en el Teatro Mariinski, de San Petersburgo. También se declara amante y coleccionista de artes visuales, donde ha establecido amistad con numerosos artistas chilenos. Desde fines de 2018, cerca de 150 obras de su colección son exhibidas en NUGA, la Nueva Galería de Arte de la Universidad de Talca, en la Plaza de Talca, bajo un Comodato que contempla que las obras sean exhibidas permanentemente, junto a actividades como visitas guiadas y la preparación de material educativo para los niños y niñas de los colegios de la Región del Maule.

Como profesor, cree haber aportado a la docencia de la ingeniería civil industrial al introducir, junto a otros, los cursos de pre y postgrado en sistemas de información administrativos, los que luego fueron replicados por las demás escuelas de ingeniería y de economía del país. En 2001, el Instituto de Ingenieros de Chile lo distinguió con el Premio “Raúl Devés Jullían” por sus aportes a la enseñanza de la ingeniería en el país. Al momento de elegir una palabra que lo defina, él dice: profesor. Se demuestra finalmente, que sus referentes familiares, todos profesores primarios, le habían señalado un camino desde el comienzo, que él en su momento llamó “tincada”.

En su forma de ver la vida, cree en la necesidad de volver a la austeridad, la solidaridad, la conmiseración por las carencias de los menos afortunados, y relevar la vivencia de los valores esenciales del humanismo.

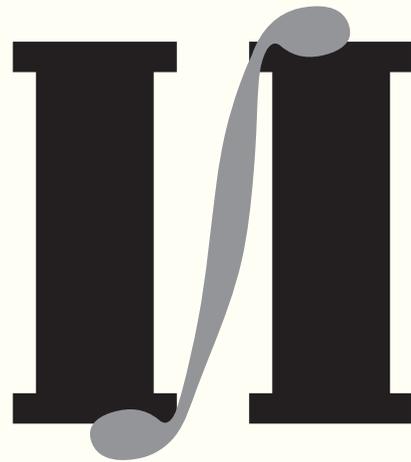
Se siente agradecido de la vida y de su familia, que lo han rodeado de cariño, comprensión y de libertad para tener a la Universidad de Chile como opción de vida.

Cuando observa la ingeniería en el tiempo, hace un rápido recorrido desde la regla de cálculo y la regla T, pasando por las calculadoras que sumaban y restaban, hasta los súper computadores, la inteligencia artificial y la nanotecnología, sin dejar de mencionar los programas en Fortran en el IBM 360 donde había que esperar una semana para ver si la compilación había salido bien, de lo contrario había que volver a perforar las tarjetas y esperar otra semana. Para él, la ingeniería de hoy es más interdisciplinaria, como única forma de participar en la solución a los grandes problemas que aquejan a la humanidad: el cambio climático, las energías renovables, las nuevas demandas sociales, el recurso agua, las migraciones, el hambre y la pobreza, los pueblos originarios, el respeto y dignidad a los derechos humanos y a la diversidad en todo ámbito de la vida humana.

A las nuevas generaciones, les deja su consejo: “que sean personas de su tiempo. Que aprovechen con responsabilidad las oportunidades que les brinda la vida, gracias a sus talentos y esfuerzos personales y familiares y también a la sociedad, y que la vivan de modo que cada día sientan que vale la pena y tiene sentido vivirla”.



ISSN 0716 - 2340



**ANALES
DEL INSTITUTO
DE INGENIEROS DE CHILE**

Vol. 132, N° 2 - AGOSTO 2020

“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. 132, N° 2, agosto de 2020.

Contenido

AVANCES TECNOLÓGICOS EN PROYECTOS DE INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN. UN ENFOQUE INTEGRADO VDC, BIM, IPD Y LEAN.	Pág. 43
Alejandro Polanco Carrasco.	
ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTION CHARACTERIZATION OF OPEN-PIT MINING AND MINERAL PROCESSING OPERATIONS TOWARDS THE USE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES.	Pág. 59
Daniel Sbarbaro, Luis Morán y José Espinoza.	
ESTUDIO SOBRE EL MOVIMIENTO DE CARGA EN UN CHANCADOR PRIMARIO GIRATORIO CONSIDERANDO FRACTURA DE MATERIAL.	Pág. 67
Jonathan Cuba y Alejandro Gutiérrez.	
VALORACIÓN DE INTANGIBLES CON MÉTODOS DE ELECCIONES DECLARADAS.	Pág. 77
Juan de Dios Ortúzar Salas.	

Editor

Raúl Uribe Sawada, Instituto de Ingenieros de Chile.

Comité Editorial

Rodolfo Saragoni H., Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ACHISINA)

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

José Vargas B., Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID)

Gonzalo Montalva A., Sociedad Chilena de Geotecnia (SOCHIGE)

Carolina Palma A., Sociedad Chilena de Ingeniería de Transporte (SOCHITRAN)

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

Mario Letelier S., 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.

AVANCES TECNOLÓGICOS EN PROYECTOS DE INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN. UN ENFOQUE INTEGRADO VDC, BIM, IPD Y LEAN

Alejandro Polanco Carrasco ¹

RESUMEN

El contexto y entorno para el desarrollo de los proyectos de ingeniería y construcción está cambiando aceleradamente. Las demandas y requisitos son cada vez mayores, nuevas prioridades, y plazos y presupuestos más acotados. Por otra parte, los indicadores de productividad del sector construcción son muy bajos y con muy poca mejoría en las últimas décadas y al parecer se han naturalizado los sobrecostos y atrasos en los proyectos, como algo propio o característico del sector.

El sector constructivo aporta del orden del 7% PIB y, por tanto, su crecimiento y productividad son un tema obligado de la agenda nacional y de las principales asociaciones gremiales y profesionales. Esto ha dado origen a nivel nacional hace algunos años a programas especiales como Construye 2025, Plan BIM, DOM en línea y al Consejo de Construcción Industrializada entre otros.

La era de la Transformación Digital en que estamos y que da origen a la Construcción 4.0, utiliza con el apoyo de los avances tecnológicos, nuevos enfoques y metodologías, entre las cuales se destacan VDC, BIM, IPD y Lean entre otras, que pese a su gran impacto y contribución a la ejecución exitosa de proyectos, aún no son ampliamente conocidas masivamente por los ingenieros y las empresas consultoras.

En este trabajo se presenta el contexto, marco conceptual y los elementos principales de VDC, BIM, IPD y Lean de una manera simple y didáctica, como un aporte al conocimiento básico necesario para un ingeniero, que permita aclarar algunos mitos y falsas expectativas al respecto. Finalmente se hace énfasis en la imperiosa necesidad de actualizarse e integrarse a los, no tan nuevos, enfoques, metodologías y tecnologías disponibles para la ejecución de los proyectos en este nuevo escenario 4.0.

¹ Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Certificación PMP® (PMI) y SCPM® (Stanford). Académico Profesor Adjunto área Construcción Departamento Ingeniería Civil, Facultad Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, profesor de pregrado y postítulos en Dirección de Proyectos, BIM y Gestión de la Calidad.

1.- INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO.

1.1 Evolución de la Industria

En el ámbito del desarrollo industrial a nivel mundial, se pueden identificar diferentes etapas o hitos de cambios y avances significativos, que en la literatura técnica se describen como las 4 “Revoluciones” industriales siguientes:

- Industrial 1.0 asociada principalmente a fábricas, motor a vapor, siglo XVIII.
- Tecnológica 2.0 asociada principalmente a producción en masa, electricidad, petróleo, ferrocarril, inicios siglo XX.
- Digital 3.0 asociada a Electrónica, Internet, Automatización, Robótica. Se conoce como la “Era de la Información” o la era Análoga a Digital, años 70s.
- Industria 4.0 Transformación Digital (TD) asociada a múltiples avances tecnológicos, desde el 2010/2011. Maquinas que interactúan entre sí, la Cyber Industria, Producción flexible, Foco al Cliente individual. Se habla también de Digital World v/s Physical World (Mundo Digital vs Mundo Real (físico) e incluso se ha empezado a usar el término “fisital” para referirse a la combinación del mundo físico con el digital.

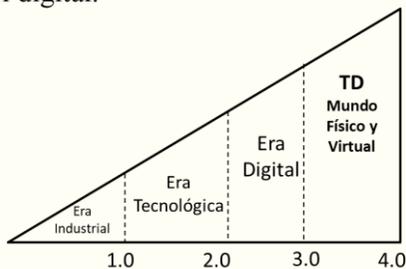


Figura 1: Revoluciones Industriales

La Industria 4.0 también es conocida y se asocia a la llamada Transformación Digital (TD), que de manera simple, es un nuevo enfoque de negocio apoyado fuertemente en los actuales avances tecnológicos, que permiten una orientación personalizada a las necesidades del cliente –usuario. Un error común es asociar la TD a la era digital o a la digitalización de los negocios, pues eso corresponde a la revolución 3.0, a diferencia de la TD, que realmente significa nuevos paradigmas para el desarrollo industrial y de los negocios.

Si bien hay diversos planteamientos para una Transformación Digital exitosa, de una manera simple, esta se puede asociar a 3 dimensiones clave y que se potencian con los avances de las tecnologías TIC:

- Cambio Cultural (personas)
- Cambio Modelos Negocios (procesos)
- Cambio en Experiencia del Cliente

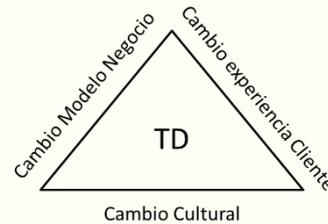


Figura 2: Dimensiones Clave TD

A veces se confunde la TD con solo mejorar los actuales modelos de negocio con las TIC y digitalizar los procesos de la empresa para obtener beneficios de corto plazo. Los expertos coinciden en que la TD requiere cambiar los procesos y modelos con el apoyo de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) y otras tecnologías avanzadas, para con ello crear o aprovechar nuevas oportunidades de negocio. Esto necesariamente requiere un cambio cultural y también la colaboración e integración con los proveedores. Las nuevas tecnologías disponibles y más conocidas son, entre otras:

- Automation (Automatización)
- Robotics (Robótica)
- Big Data
- Advanced Analytics
- Machine Learning Techniques
- Cloud Computing (Nube)
- 3D Printing (Impresora 3D)
- Augmented Reality (Realidad Aumentada)
- Virtual Reality (Realidad Virtual)
- Mixed Reality (Realidad Mixta)

La Inteligencia Artificial (IA) merece una mención aparte pues avanza aceleradamente y con aplicación en todas las áreas de negocio y también en la Construcción, por ejemplo, con algoritmos para la toma de decisiones y optimización de diseños entre otros (para más información se recomienda ver el sitio web <https://www.alicetechnologies.com>).

El ámbito de la TD es tan amplio y especializado que también se ha desarrollado un lenguaje propio, en particular se pueden mencionar los siguientes términos:

- Entorno Digital
- Nativo Digital
- Estrategia Digital
- Madurez Digital
- Brecha Digital
- Ecosistema Digital
- Conectividad Digital
- Competencias Digitales
- Economía Digital
- Sociedad Digital
- Inteligencia Digital
- Smart Factory (SF)
- Machine to Machine (M2M)
- Cyber-physical systems (CPS),
- Digital Twin (gemelo digital)
- Internet of Things (IoT)
- Internet of People (IoP)
- Internet of Services (IoS)

En la TD es muy importante el concepto de “conexión inteligente”, es decir la Interoperabilidad entre objetos, máquinas y personas.

La Transformación Digital no es una metodología, es un nuevo contexto y cultura que requiere nuevos y otros procesos, con una visión diferente del negocio.

A nivel nacional (con el apoyo de CORFO) en septiembre 2017 se creó el Comité de Transformación Digital y en noviembre 2015 el programa Agenda Digital 2020, que define una hoja de ruta para avanzar hacia el desarrollo digital del país, de manera inclusiva y sostenible a través de las TIC. En este contexto, se dio otro paso importante en noviembre 2019, con la Ley N° 21180, Transformación Digital del Estado.

Una de las metas de la agenda digital es lograr que un 80% de los trámites sea digital al 2021 y algunas de las iniciativas en desarrollo para ello y, que se apoyan en la nueva plataforma DocDigital (lanzada en mayo 2019) son:

- ✓ Digitalización de Trámites
- ✓ Transferencia interna de la documentación generada por el Estado
- ✓ Trámites en papel como excepción (cero papel)

Por otra parte, la reciente encuesta realizada por CLA Consulting, Icare y Cadem el 2019, reveló bajos porcentajes en la existencia de una estrategia digital (34%) y de nuevos modelos de negocio en la industria nacional (46%).

El índice de Madurez Digital Virtus 2020 (IMDV®) elaborado por Virtus Partners, que mide el nivel de Transformación Digital de organizaciones en una escala de 5 niveles (Análogo, Inicial, Medio, Avanzado, Digital) indica un nivel de 51,4%, lo que corresponde a un nivel Inicial en el camino hacia la madurez digital. Un 59% de las organizaciones se encuentran en un nivel Análogo o Inicial, mientras que un 33% poseen un nivel Medio y solo un 8% un nivel Avanzado o Digital.

Si bien hay mucha información y literatura relacionada con la TD es importante tener presente que su objetivo último debiera ser aumentar:

- Valor al Cliente
- Rentabilidad,
- Productividad



Figura 3: Principales Objetivo TD

Para la implantación de la TD se debe considerar en primer lugar la mejora o cambio de la relación y experiencia con el cliente y posteriormente la incorporación de la tecnología necesaria para ello. Esto requiere un esfuerzo y apoyo especializado, por ejemplo, con el uso de una TMO (Transformation Management Office).

1.2 Construcción 4.0

En el contexto de la Industria 4.0 el sufijo 4.0 se aplica también en diferentes áreas de la economía y se habla entonces de Construcción 4.0 para visibilizar los múltiples desafíos que tenemos como comunidad profesional para aplicar los avances tecnológicos a la industria de la construcción (Revista BIT 122, 2018). Esto es muy relevante pues la industria de la construcción a nivel mundial tiene

uno de los niveles más bajos de digitalización de acuerdo al MGI industry digitization index (McKinsey Global Institute, october 2016).

La Construcción 4.0, en la práctica se traduce en la aplicación de las nuevas tecnologías como; Automatización, Robótica, Big data, Advanced Analytics, 3D Printing, Cloud Computing, AR-VR-MR, IoT, IoP, IoS, Toma de Decisiones des centralizada, Información en Tiempo real, Blockchain y también en el uso de la metodología VDC/BIM, los diseños modulares y el uso extensivo de prefabricados.

De acuerdo a estudios realizados por el McKinsey Global Institute, (February, 2017) se podría aumentar la productividad del sector construcción entre 5 a 10 veces con la aplicación de los avances tecnológicos y un enfoque industrializado en el sector.

Como referencia temporal, la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT-CChC) realizó en noviembre 2018 el primer Seminario Internacional: Innovando la Construcción, en el cual se abordaron diferentes temáticas esenciales para impulsar el desarrollo de la industria de la construcción, entre las cuales se incluyeron BIM, la Construcción 4.0 y la Construcción Industrializada.

1.3 Construcción Industrializada (CI)

Como parte de la Construcción 4.0 y gracias a los avances tecnológicos y nuevas metodologías, la construcción industrializada, en palabras simples, significa que la mayoría de las actividades de construcción se realizan en las fábricas y no en el sitio de la obra de manera artesanal como ha sido tradicional. Algunos estudios señalan que hasta un 80% de la construcción se hace en el sitio de la obra y de manera artesanal.

La Construcción industrializada en Chile no supera el 1% del total del sector según datos entregados en seminario organizado por Construye 2025 en octubre 2018.

La industrialización de la construcción se logra con el uso de las nuevas tecnologías para la producción en masa y automatizada en diferentes niveles, como indica la Figura 4.

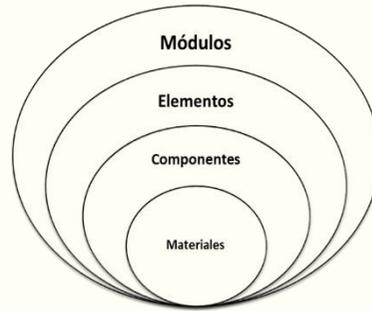


Figura 4: Niveles de industrialización, adaptado de: “Handbook for the design of modular structures”, Monash University, 2017.

El diseño modular y el uso de prefabricados como una práctica habitual en los proyectos (y no como excepción) permite lograr un aumento importante en la productividad, esto al reducir y minimizar:

- los residuos, escombros, despunttes, mermas
- transportes
- fletes
- re-trabajo por errores constructivos
- errores por descoordinaciones especialidades
- ineficiencias en los procesos constructivos
- mano de obra
- accidentabilidad
- uso de energía
- uso de agua
- duraciones de actividades de montaje
- duraciones de actividades de terminaciones
- sobrecostos
- trabajos adicionales
- atrasos
- aumentos de plazo
- otros

A nivel del país y bajo el Programa Construye 2025 (impulsado por CORFO desde el 2016) se crea el 2017 el Consejo de Construcción Industrializada (CII), para promover la industrialización y prefabricación de las obras y con ello mejorar la productividad del sector.

Otro aspecto importante para la industrialización es la aplicación de soluciones robóticas en la construcción, tanto en las fábricas como en obra. Para más información consultar el documento: CTeC, 2020 “Boletín de Robotización en la Construcción” desarrollado junto a Eurecat (disponible en www.ctecinnovacion.cl).

La Construcción Industrializada también permite reducir los riesgos y los impactos ambientales asociados a los procesos constructivos, sin embargo, los cambios de última hora o descoordinaciones entre diferentes proveedores y contratistas aún pueden estar presentes. Para evitar estos problemas y aumentar aún más la productividad la tecnología permite realizar una “construcción digital o virtual” antes de la construcción física, esto se conoce como VDC.

2.-VIRTUAL DESIGN AND CONSTRUCTION (VDC).

2.1 Concepto y Definiciones

La sigla VDC (Virtual Design and Construction) tiene sus orígenes en el CIFE (Center for Integrated Facility Engineering at Stanford University of California) el 2001 por el profesor Martin Fischer, director del CIFE.

VDC se puede entender (adaptado de &Fischer& Kunz ,2004) como el desarrollo y gestión de modelos digitales multidisciplinarios e integrados de las instalaciones (BIM), la gestión de los procesos de producción/construcción, operación y mantenimiento con las variables de plazos y costos (PPM) y con el desarrollo colaborativo de ingeniería concurrente (ICE) para cumplir con los objetivos del proyecto y de negocio del cliente.

Los 3 elementos clave del VDC son entonces de acuerdo al CIFE (Stanford University)

- ICE (Integrated Concurrent Engineering)
- PPM (Product Production Management)
- BIM (Building Information Modeling)

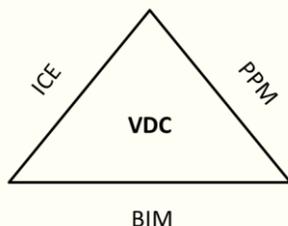


Figura 5: Elementos Clave VDC (Stanford)

La ICE o Ingeniería Concurrente a diferencia de la Ingeniería “tradicional” es un enfoque que se originó en la década de los 80s y significa de manera simplificada que en lugar de la secuencia jerárquica diseño-fabricación-operación, se realiza el diseño con la colaboración y participación temprana de todos los actores de manera de consensuar y

optimizar la solución, esto considera el ciclo de vida del proyecto y también en el periodo de la vida útil de la obra /instalación.

El uso de la ICE permite desde el inicio incluir todos los aspectos de compras, fabricación, construcción, pruebas, operación y mantenimiento en el diseño, con esto se logra un diseño óptimo de menor plazo y costo que el que se obtendría con una ingeniería tradicional.

Se realizan reuniones especiales de coordinación e integración con las personas clave de cada área, llamadas también “sesiones ICE”, en las cuales se revisan y compatibilizan todos los puntos de vista.

PPM (Product Production Management) se refiere a considerar la gestión de los procesos, mapeo, flujos de trabajo, recursos (product production).

BIM se refiere a Building Information Modeling, metodología que se detalla en el acápite 3 de este artículo.

Para una mayor efectividad del VDC se deben utilizar métricas e indicadores para todos los procesos ICE, PPM, BIM al menos con frecuencia semanal y que permitan corregir o mejorar la efectividad del VDC.

2.2 Diseño y Construcción Virtual

El diseño y construcción virtual con la colaboración de todos los actores relevantes, es decir ingeniería, compras, construcción, pruebas y también los stakeholders principales (dueño, mandante, usuario final, comunidades, autoridades) permite la validación y optimización de los procesos constructivos y de operación y mantenimiento del proyecto/obra antes de la construcción física. Esto es sin duda el principal beneficio y objetivo de usar VDC.

Desde el 2001, inicio de la metodología o enfoque VDC, el avance tecnológico y madurez de desarrollo de la metodología BIM ha sido tan importante que incluso a veces se confunden o usan indistintamente los términos VDC y BIM. Desde un punto de vista práctico se podría decir que VDC incluye BIM con las variables de Tiempo y Costo para la optimización de los procesos constructivos y costos, así como también incluye aspectos de sustentabilidad y economía circular.

El objetivo principal del uso de VDC en los proyectos de ingeniería y construcción es obtener previamente a la construcción física (se habla a veces de pre construcción o que se construye dos veces):

- ✓ Un diseño final Compatible
- ✓ Un diseño final “Fabricable”
- ✓ Un diseño final Construible

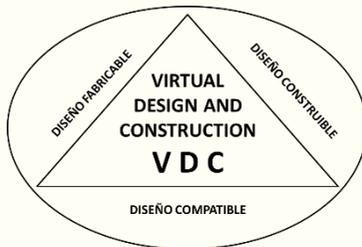


Figura 6: Objetivos de Diseño VDC.

3.-BUILDING INFORMATION MODELING (BIM).

3.1 Conceptos, evolución y contexto normativo

BIM es una sigla (en inglés) que identifica una metodología colaborativa que con el uso de poderosas tecnologías TIC, permite crear un modelo virtual gráfico y con datos integrados de la obra antes de su construcción y que apoya las decisiones de diseño, construcción durante el ciclo de vida completo del proyecto y también ciclo de vida de la obra (vida útil) esto último, en la operación y mantenimiento.

B = Building, identifica a todo tipo de instalación, planta industrial, obras de infraestructura de todo tipo, edificaciones.

I = Information, identifica la información gráfica en 3 dimensiones (3D) y no gráfica que se puede asociar al proyecto y a la obra en sí.

M = Modeling, se refiere al proceso de modelamiento digital de toda la información.

Es difícil situar los orígenes de la metodología BIM en una fecha específica pues hubo un desarrollo paulatino y progresivo con diferentes autores e hitos, en particular se pueden destacar los siguientes:

- Arquitecto Phil Bernstein (años 70)
- Charles M. Eastman , 1975, Building Description System, Building Product Modeling → BIM
- Jerry Laiserin es conocido como “Father of BIM “y se le atribuye la difusión del acrónimo BIM desde el 2002, como un término común para la representación digital de procesos de construcción, formato digital.

- Primera implementación formal realizada por Graphisoft el año 1987 como Virtual Building

Por otra parte, algunos de los autores más relevantes y conocidos en la metodología BIM son:

- Eastman Charles M.
- Succar, Bilal

Actualmente se hace énfasis en una perspectiva más amplia que se conoce como **BIM3**.

I en tamaño más grande hace énfasis en que el valor de BIM está en la información del proyecto y de la obra que se modela.

M3 es una manera de hacer énfasis en los 3 significados que podemos asociar a la M:

- Modeling (proceso de crear el modelo)
- Model (entregable, modelo realizado)
- Management (gestión de la información)

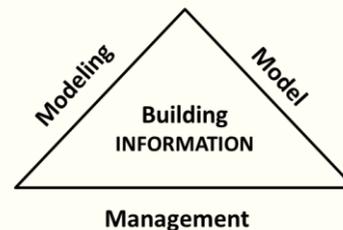


Figura 7: BIM3

Otra manera usual de enfatizar la importancia de la información en BIM es interpretar la sigla como **Better Information Management**.

A nivel normativo, se disponen desde el 2018 los estándares internacionales ISO 19650-1:2018 y ISO 19650-2:2018, que se basan y recogen las lecciones aprendidas de la aplicación de las normas británicas BS1192; PAS1192-2 y PAS1192-3.

En diciembre 2019 ambas ISO normas fueron homologadas y aprobadas por el INN:

- NCh-ISO 19650/1 Organización y digitalización de la información en obras de edificación e ingeniería civil, incluyendo modelamiento de la información de edificios (BIM) - Gestión de la información utilizando modelamiento de la información de edificios - Parte 1: Conceptos y principios.
- NCh-ISO 19650/2 Organización y digitalización de la información en obras de edificación e ingeniería civil, incluyendo modelamiento de la información de edificios (BIM) - Gestión de la información utilizando modelamiento de la información de edificios - Parte 2: Fase de desarrollo de los activos.

Es importante señalar que a contar del 2019 está disponible la opción de certificación del sistema BIM implantado bajo la norma ISO19650 con el CTeC-BRE (Centro Tecnológico para la Innovación en la Construcción asociado con BRGlobal (Building Research Establishment)).

3.2 Modelamiento BIM

El modelo BIM del proyecto es en realidad la consolidación de los diferentes modelos de especialidades; modelos que son paramétricos y que incluyen además de la gráfica, datos de materialidad, coordenadas, códigos de áreas, especificaciones, fabricante, contrato, orden de compra entre otros.

En la planificación del desarrollo de un proyecto con BIM se debe dividir previamente la obra en áreas físicas y luego cada una de ellas en especialidades de diseño, por ejemplo:

- Civil, caminos, urbanización
- Movimientos de Tierra
- Hormigones
- Estructuras metálicas
- Mecánica, HVAC
- Piping (cañerías)
- Alcantarillado, Agua Potable
- Electricidad, iluminación
- Instrumentación, control
- Arquitectura (edificios)
- Layout (disposición)
- otras

En cada una de las especialidades es necesario realizar uno más modelos para una mejor gestión de los archivos BIM que, en promedio, pueden ser de 80-100Mb cada uno y se deben seguir procedimientos y estándares estrictos para los nombres de archivos y carpetas.

Los modelos se desarrollan de manera individual por cada especialidad, para luego crear un modelo “federado” con la información de archivos separados y finalmente el modelo “integrado”, que es la superposición o integración de los modelos de cada especialidad y una base de datos única.

La “estructura de modelos” también debe tomar en cuenta la estrategia de adquisiciones, compras y contratos de construcción.

Las principales razones u objetivos de utilizar la metodología BIM se enfocan a aumentar la

productividad de los procesos constructivos mediante:

- ✓ Reducción de errores
- ✓ Reducción de plazos
- ✓ Reducción de costos

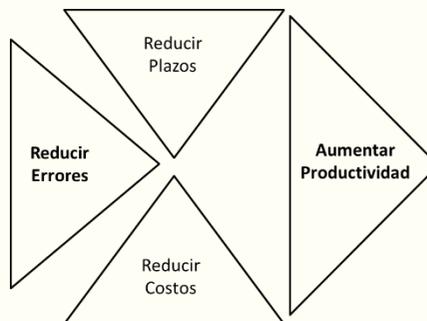


Figura 8: Objetivos principales de usar BIM

De acuerdo a un estudio de McKinsey Global Institute (october 2017) se podrían generar ahorros de hasta un 10 % en los costos del desarrollo del proyecto mediante la detección de interferencias y reducir la duración y los costos de materiales hasta un 20%.

Algunos de los conceptos técnicos que también son importantes de conocer de la metodología BIM son:

- LOD (Level of Development)
- CDE (Common Data Environment)

El LOD se refiere al nivel de detalle gráfico más el nivel de detalle de información que se incluye en un objeto o elemento modelado. Se manejan diferentes niveles de LOD que están estandarizados (BIM Forum Chile, 2017).

Para ejemplificar este concepto consideremos un perno de anclaje, se puede modelar el perno solo como una barra de acero y como dato solo indicamos su diámetro y calidad de acero, esto sería un LOD 200. Si modelamos el perno con todos sus detalles de barra, cabeza hilo, tuerca, golilla y como datos incluimos calidad de acero, orden de compra, especificación, código identificador, el equipo o estructura asociado, esto sería un LOD 350 o 400, que es un LOD adecuado para construcción.

CDE, Common Data Environment es uno de los conceptos más importantes de entender y clave en el uso de BIM y se refiere a construir un ambiente o repositorio común de datos del proyecto que incluye los datos gráficos y no gráficos de los modelos y también datos externos (PAS1192-2:2013). En el

CDE se manejan 4 estados de la información (en trabajo, compartido, publicado, archivado) y se recomienda materializar el CDE del proyecto en la nube o en una extranet.

El tipo de datos y nivel LOD que consideremos en los modelos está asociado a los usos que daremos a estos y se habla de “Usos BIM”. Esto en general está estandarizado en la industria, por ejemplo, a 25 usos (PennState, 2019), entre los cuales y a manera de ejemplo se pueden mencionar:

- Uso n° 6: Revisión de diseño
- Uso n° 15: Coordinación 3D
- Uso n° 17: Diseño sistemas constructivos
- Uso n° 18: Fabricación digital

La práctica de realizar un proyecto de la manera tradicional (2D) y luego hacer un modelo 3D solo para la asegurar la compatibilidad (coordinación) de especialidades está muy lejos de los verdaderos objetivos y potencialidades de BIM.

La realización de un proyecto con la metodología BIM también requiere de nuevos roles y que pueden ser desempeñados por una o más personas (BIM Forum Chile, 2017).

- Dirección BIM
- Gestión BIM
- Revisión BIM
- Coordinación BIM
- Modelamiento BIM (modelador)

Independientemente de los roles anteriores, algunas empresas han establecido cargos o funciones gerenciales especiales para BIM, por ejemplo, los siguientes:

- Project Information Manager
- BIM Manager
- Project Delivery Manager

El desarrollo de un Proyecto con BIM requiere una planificación previa muy cuidadosa, desde la definición de objetivos, usos BIM, los niveles LOD y por ello la recomendación estándar es la preparación de un Plan de Ejecución BIM (PEB), también llamado Bim Execution Plan (BEP). Este documento se recomienda preparar en la oferta técnica y posteriormente validar en la etapa de ejecución del proyecto, es decir se tiene un PEB pre contrato y un PEB post contrato.

3.3 Plataformas Informáticas - Softwares para BIM

Tal como se indicara anteriormente, el concepto o idea de desarrollar un modelo virtual de las instalaciones data de más de 50 años y que gracias al desarrollo de poderosas plataformas y softwares especializados se ha hecho realidad.

Algunos de los principales proveedores de plataformas BIM son (de manera referencial):

- AUTODESK
- TRIMBLE
- BENTLEY
- GRAPHISOFT (Nemetschek Group)
- ALLPLAN (Nemetschek Group)
- Otros

En un catastro de la oferta de softwares disponibles para BIM se pueden encontrar más de 50 y estos se pueden clasificar según sus funcionalidades:

- a) Diseño especialidades
- b) Integración, colaboración, coordinación
- c) Visualización
- d) Revisión
- e) Complementarios (add-in)

Por otra parte, de acuerdo a los resultados de la Encuesta Nacional BIM 2019 que realiza la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile, los softwares más conocidos y usados son (en orden de mayor a menor uso):

- Autodesk Revit
- Autodesk Navisworks
- Graphisoft ArchiCAD
- Autodesk BIM 360
- Graphisoft BIMcollab
- Trimble Tekla Structures

Un aspecto clave en el uso de la metodología BIM es la interoperabilidad entre los diferentes softwares y el intercambio de datos. Esto condiciona la adquisición o arriendos de éstos para un proyecto y también la compatibilidad con las propias plataformas que utilice el cliente.

Este tema por su relevancia ha dado lugar a la iniciativa OpenBim impulsada por buildingSMART International que, con la participación de los proveedores de softwares, tiene por objetivos principales lograr una visión universal y colaborativa abierta, flujos de trabajo compatibles, compatibilidad e intercambio de datos y evitar la conversión. Esto permite la compatibilidad con nuevas versiones de

los softwares y la posibilidad de elegir los softwares a utilizar según la necesidad de cada proyecto.

Desde el 1995 está disponible el formato IFC (Industry Foundation Classes) como estándar para el desarrollo de modelos BIM y su principal ventaja es ser de especificación abierta y no pertenecer a ningún fabricante de software en particular. La norma ISO 16739-1:2018 se refiere ampliamente a este tema.

3.4 BIM en Proyectos

La metodología BIM se puede aplicar en todo tipo de proyectos tanto en el ámbito privado como en el público y hay muchos casos exitosos de su aplicación en Infraestructura y Minería, en particular a nivel nacional se tienen aplicaciones en:

- ✓ Inmobiliaria (edificios, condominios)
- ✓ Metro (túneles, estaciones)
- ✓ Puentes
- ✓ Autopistas
- ✓ Hospitales
- ✓ Aeropuertos
- ✓ Plantas Mineras
- ✓ Otros

En Infraestructura pública se destaca el actual desarrollo con BIM de los proyectos de Ampliación del Aeropuerto AMB (Santiago) y el Puente sobre el canal de Chacao (Chiloé).

Por otra parte, desde más de una década la mayoría de los grandes proyectos mineros se han desarrollado con la metodología BIM sin hablar explícitamente de BIM.

En los proyectos públicos se comenzó a utilizar la metodología BIM (en diseño) a contar del 2011/2012 en las licitaciones de Hospitales y del Complejo Fronterizo los Libertadores. A contar del 2015, con el apoyo de CORFO y bajo el programa Construye 2025 se lanza el programa Planbim, como una de las 15 iniciativas para mejorar la productividad y sustentabilidad en la construcción. La meta del programa Planbim es lograr el uso de BIM en todos los proyectos públicos a partir del 2020.

En el marco de las actividades y logros de Planbim, en noviembre 2019, se realizó el lanzamiento del documento “Estándar BIM para Proyectos Públicos”, el cual permite la estandarización en los procesos de licitación y desarrollo de todos proyectos públicos con la metodología BIM.

A nivel nacional, el uso de la metodología BIM se refleja en los resultados de la Encuesta Nacional BIM 2019, en la cual se obtuvo que el 34% es usuario regular y el 29% ocasional y que el mayor uso regular es en la disciplina de Arquitectura (41%), luego Ingeniería (25%) y Construcción solo un 17%. Una de las conclusiones de esta encuesta es que, si bien ha aumentado levemente el nivel de uso regular, solo ha sido en las aplicaciones básicas de la metodología como visualización, documentación, coordinación y lejos aún de altos niveles de colaboración y estandarización.

A nivel de los costos de utilizar la metodología BIM, se puede señalar de manera aproximada y solo como referencia un valor de 1-2% del costo de obra (para un LOD400).

Con relación al Project Management, Trejo (2018) analiza el impacto del uso de BIM en los procesos de planificación y control de proyecto y concluye que en ningún caso es un reemplazo o alternativa de los procesos de project management, sino más bien un complemento necesario y muy positivo para mejorar los procesos, en particular las comunicaciones y el trabajo colaborativo.

4.- BIM 4D

Se denomina BIM 4 D cuando se incluye, en el modelo 3D, información relacionada con secuencia constructiva y temporalidad, esto permite la visualización, análisis y optimización de los avances planificados de construcción en diferentes periodos de tiempo La primera aplicación formal de BIM 4D se puede atribuir a Mortenson (CIFE), 1998.

Es importante tener la claridad que para el desarrollo-cronograma se mantiene el uso de la metodología del Camino Crítico (CPM) con el apoyo los softwares especializados como Microsoft Project, Primavera P6 entre otros. BIM aporta con las cantidades de obra generadas automáticamente por el modelo y también si se incluye información de rendimientos, se pueden calcular automáticamente las duraciones.

El modelo BIM4D se debe hacer con la estructura constructiva y lógica tal como se ejecutaría en la realidad, pues ello permite visualizar los avances constructivos para:

- ✓ Validar secuencias naturales de construcción
- ✓ Revisar la logística, transportes internos
- ✓ Revisar cantidad de personal simultáneo en obra
- ✓ Revisar los avances planificados por periodo
- ✓ Simular diferentes estrategias constructivas, uso de grúas, equipos
- ✓ Validar o revisar la logística, bodega, despachos

Para usar BIM 4D se deben usar softwares complementarios a los softwares BIM, por ejemplo y solo como referencia, los siguientes:

- Navisworks- timeliner, (compatible con Revit)
- Vico Office, (permite líneas de balance, muy útil para autopistas)
- Synchro 4D, (muy flexible y lee datos de pdf y otros, mejor edición de videos informativos)
- Assemble Systems

5.- BIM 5D

Se denomina BIM 5 D cuando se incluye en el Modelo 3D información relacionada con los costos de cada elemento. El modelo debe incluir códigos asociados a los costos unitarios que están en el software de presupuesto y por ello se hace énfasis en la importancia de la descripción correcta de los elementos.

Se deben incluir en el modelo BIM5D todos los elementos, por ejemplo, puertas, ventanas, pavimentos, alfombra, cerámica, tabiques, papel mural. No es necesario modelar todo en detalle, se recomienda parametrizar y usar superficies netas, por ejemplo, si una ventana incluye la quincallería, no sería necesario modelarlas si el costo unitario ya las incluye.

Se debe tener presente que el modelo provee las cantidades solo de los elementos modelados y que el costo unitario no se obtiene del modelo.

Para usar BIM 5D se debe usar softwares de complementarios, por ejemplo y solo como referencia, los siguientes:

- Presto – cost it conecta con Revit
- TCQ (ITeC)
- Cype Arquimedes, conecta con Revit
- iTWO costX (RIB software international)
- ITWO / MTWO
- Destini PROFILER, (Bech Technology)

6.- INTEGRATED PROJECT DELIVERY (IPD)

6.1 Estrategias de Ejecución (Contratos)

Se refiere a la estrategia del Dueño para desarrollar el diseño de detalle y la construcción de su proyecto (se conoce como Project Delivery) y se identifican los 3 actores principales siguientes:

- a) Dueño
- b) Diseñador (Ingeniería de detalle)
- c) Constructor

El Dueño para materializar su proyecto, en general busca siempre los siguientes objetivos genéricos

- ✓ Menor costo de Capital
- ✓ Menor Plazo
- ✓ Mayor Calidad

Estos objetivos a veces son contrapuestos y depende de la visión global del Dueño, por ejemplo, su interés en el desempeño de las instalaciones en operaciones. En este contexto la estrategia seleccionada debe lograr principalmente:

- ✓ Minimizar número de contratistas:
- ✓ Reducir plazo total
- ✓ Reducir costos de capital
- ✓ Innovación y Valor
- ✓ Reducir Costos de los cambios
- ✓ Reducir probabilidad de atrasos
- ✓ Minimizar reclamos

Las estrategias más conocidas y utilizadas internacionalmente y de manera resumida, son las 3 siguientes (PMI, 1997).

- [1] Design Build (DB), es un solo contrato que incluye el diseño (ingeniería de detalle, D) y la construcción (B).
- [2] Design Bid Build (DBB) esta estrategia consiste en 2 contratos, uno de diseño (ingeniería de detalle, D) y luego una licitación (B) para un contrato para la construcción(B).
- [3] Construction Management (CM), en esta estrategia el dueño contrata la ingeniería de detalle y luego solo contrata la administración de la construcción, esto puede ser en 2 modalidades, CM as Agency, se actúa como agente del dueño y CM at Riks (incluye la construcción además de la administración).

Estas 3 estrategias si bien han sido exitosas en el pasado y se siguen utilizando, así como también las estrategias especiales EPC y EPCM muy usadas en la gran minería, son en ciertos modos incompatibles con los nuevos enfoques colaborativos y tecnologías disponibles de la Construcción 4.0.

6.2 Estrategia IPD

La estrategia IPD fue introducida el 2007 por el American Institute of Architects y se define como una estrategia de ejecución de proyectos que integra equipos, sistemas, estructura de negocios y diferentes prácticas en un proceso en el cual mediante la colaboración y confianza se aprovecha cada una de las competencias específicas de los participantes de tal forma de optimizar los resultados, aumentar el valor para el dueño de proyecto, reducir perdidas, y maximizar la eficiencia a través de fases de diseño, fabricación y construcción (AIA,2007).

La estrategia IPD requiere que todos los participantes clave, arquitectos, ingenieros, consultores, proveedores de equipos, materiales, constructores, cliente, usuario final trabajen de manera conjunta e integrada desde etapas tempranas del proyecto (pre-inversión) con un objetivo común, el éxito del proyecto en lugar del éxito individual de cada participante.

El principal desafío de implementar una estrategia IPD es la contratación de cada uno de los participantes en la fase temprana de factibilidad o ingeniería básica, en una modalidad de pago que incentive el trabajo en equipo e integración. El rol de dueño como ente integrador es clave e imprescindible y por ello es necesaria una política de comunicaciones transparente y oportuna.

El IPD descansa en 9 principios de gestión que permiten alinear a todos los participantes clave.



Figura 9: Principios de gestión IPD (adaptado de AIA. 2007).

La aplicación de estos principios requiere adicionalmente que se conforme el llamado IPD Team, es decir un equipo de trabajo que incluye al menos a la empresa de Arquitectura e Ingeniería, empresa constructora y los representantes del dueño. También es deseable incluir a los especialistas de diseño, a los proveedores de materiales, de equipos operacionales, subcontratistas, de manera de incluir así todos los puntos de vista desde la fase pre-inversión y con un enfoque integrado.

La materialización de los contratos IPD requiere un cambio cultural importante y por ello su aplicación real en proyectos parece difícil a nivel nacional en el corto plazo (Vio, 2017).

En general, la mayoría de las empresas participantes están acostumbradas al enfoque tradicional de la ejecución de contratos individuales ganar-perder, perder-ganar; por lo tanto, el desafío es implantar una cultura contractual ganar-ganar.

Uno de los mayores desafíos en la estrategia IPD, es establecer una modalidad de pago adecuada a cada empresa participante y que promueva el aporte y la búsqueda del óptimo global del proyecto.

La adopción de la estrategia IPD requiere necesariamente una modificación y actualización de los marcos contractuales comúnmente utilizados en el país.

6.3 IPD y BIM

La estrategia IPD se materializa con el trabajo colaborativo de los actores principales de los diferentes procesos de ingeniería y construcción y en ese sentido el uso de la metodología BIM resulta muy adecuado y positivo. Con BIM se dispone del CDE y el modelo virtual integrado de la obra, que permite la integración de la visión y trabajo de cada empresa participante, esto con 4D y 5D. IPD provee un marco contractual para que todos los participantes clave se integren y compartan las metas y maximicen el valor al negocio del dueño (Wright, J.A. 2012). Sin embargo, se debe ser muy cuidadoso en seleccionar las empresas participantes desde la perspectiva que deben ser adecuadas para trabajar en equipo y aportar a través del desarrollo de los modelos BIM.

Se afirma que IPD sin BIM es muy difícil de llevar a la práctica y se requiere un nuevo enfoque a nivel de la industria, entender la construcción como una cadena productiva integrada.

7.- LEAN CONSTRUCTION (LC)

Los orígenes de Lean Construction vienen de Lean Production (80s), metodología también conocida como Lean Manufacturing (90s) y que se originó principalmente en Toyota y está asociada a la producción sin “perdidas” o también “sin grasa”, es decir sin actividades innecesarias.

Las actividades “innecesarias” se pueden clasificar en 3 tipos,

- a) de planificación,
- b) asociadas a los niveles de producción
- c) complementarias a la producción

Como ejemplos de actividades innecesarias tenemos los siguientes:

- planificación excesiva
- exceso de administración
- exceso de supervisión, control
- exceso de reuniones
- exceso de detalle en documentos
- exceso de protocolos de aprobación
- tiempos de espera entre procesos
- transporte y desplazamientos
- corrección de defectos
- duplicación de trabajos
- re trabajo
- sobre procesamiento
- búsqueda de información
- inventario
- conflictos
- disputas y controversias
- otras

El concepto de Lean Construction (LC) fue introducido en 1992 por el profesor Lauri Koskela y posteriormente respaldado con la creación del Lean Construction Institute en 1997. Lean Construction se puede definir como una filosofía que se enfoca hacia la administración de la producción en construcción, donde se reduce o elimina las actividades que no van a generar valor al producto y optimizar las que sí lo hacen.

La filosofía Lean Construction (LC) se enfoca a dos objetivos fundamentales (Koskela,1992):

- ✓ Maximizar el valor al cliente/usuario
- ✓ Eliminar los “desechos”, ineficiencias, trabajos y entregables sin utilidad

Lean busca que el trabajo se realice de manera simple, fácil de entender y supervisar, sin actividades adicionales que no aportan, para así mejorar la calidad y reducir los costos y plazos.

La filosofía Lean o también entendida como un sistema de gestión se basa en los 11 principios Lean establecidos por Koskela, (2002).

- P1. Reducir participación de actividades que no agregan valor (muda).
- P2. Incrementar el valor del producto.
- P3. Reducir la variabilidad.
- P4. Reducir los tiempos de ciclo.
- P5. Simplificar procesos.
- P6. Incrementar la flexibilidad de la producción.
- P7. Incrementar transparencia de los procesos.
- P8. Enfocar el control al proceso completo.
- P9. Introducir la mejora continua de los procesos.
- P10. Mejorar continuamente el flujo.
- P11. Referencias de los procesos con los de organizaciones líderes (benchmarking).

Estos principios se aplican a los flujos de procesos y cada uno de sus subprocesos y así identifican problemas con el flujo de valor.

La aplicación práctica de la filosofía Lean se materializa a través de numerosas herramientas y técnicas desarrolladas para ello, en particular se destacan las siguientes:

- Just in Time
- Jidoka
- Kaizen
- Heijunka
- Visual Management (VM)
- Value Stream Mapping (VSM)
- Formato A3
- 5S
- Estandarización
- Gemba
- Líneas de Balance (LOB)
- Andon (VM)
- Kanban (VM)
- Poka Yoke
- Last Planner System (LPS)
- Obeya Room
- Target Value Design (TVS)
- otras

Respecto de la aplicación de Lean en el sector construcción, Lyon (2018) concluye que es aún baja y que las empresas no tienen el conocimiento suficiente para su correcta implementación en los proyectos, sin lograr incorporar elementos de la filosofía o la cultura.

Una de las herramientas Lean más conocida y difundida es Last Planner System (LPS) y su gran fortaleza y aporte es el reconocimiento de las 3 categorías de actividades planificadas para un periodo: qué se debe hacer, qué se puede hacer y finalmente qué se hará (compromiso).

Lyon concluye también que en los proyectos de construcción, las actividades más comunes que no agregan valor, son la falta de comunicación y los tiempos de espera en los distintos procesos.

Lean se ha desplegado y desarrollado en múltiples variaciones, entre las más conocidas:

- Lean Thinking
- Lean Manufacturing/Production
- Lean Construction
- Lean Project Management
- Lean Design

De manera global se puede hablar de Lean Management y los últimos desarrollos en el área proponen los enfoques Lean Office y Lean IT (Lean Information Technology).

8.- INTEGRACIÓN BIM-LEAN

La metodología BIM permite de manera natural cumplir con los objetivos Lean pues a través del modelo de la obra/instalación se verifica y optimiza el cumplimiento con las necesidades y requisitos del cliente, con la opción de cambios y mejoras de manera virtual antes de la construcción física.

También con el uso de BIM se logra una optimización en los flujos y secuencias de los procesos constructivos (BIM 4D) y una mayor exactitud en la ubicación de las cantidades de obra (BIM 5D), optimización en el uso de los materiales, la logística y almacenamiento entre otras.

La filosofía Lean debe aplicarse desde la concepción del proyecto y por ello se habla de Lean Design y esto se puede abordar y realizar de mejor manera a través

de BIM. Se debe tener claridad que BIM y Lean son independientes, sin embargo, la gran sinergia entre ambas permite potenciarse y aumentar sustantivamente sus beneficios (Coates, P., Arayici, Y., and Koskela, L., 2010).

La utilización de BIM también puede generar actividades innecesarias y pérdidas, por ejemplo, alguna de las siguientes (Mandujano, 2016):

- Objetivos usos BIM mal definidos
- Problemas de interoperabilidad entre softwares
- Distintas bases de datos en lugar de una común.
- Duplicación de datos en distintos softwares
- Tiempos de espera en decisiones y aprobaciones
- Excesos de cambios como parte normal de usar BIM

Si bien hay mucha literatura respecto a la interacción BIM Lean, en la tabla siguiente se ilustra de manera conceptual el aporte de BIM asociado a cada principio Lean.

Tabla 1: Principios Lean y aporte BIM

PRINCIPIO LEAN	APORTE DE BIM
Reducir participación de actividades que no agregan valor	Mejor coordinación
Incrementar el valor del producto.	Mejor comunicación con el cliente
Reducir la variabilidad.	Prevenir y detectar interferencias
Reducir los tiempos de ciclo	Reducción de actividades innecesarias
Simplificar procesos.	Mejora procesos adquisiciones, construcción
Incrementar la flexibilidad de la producción	Mejor comunicación con el cliente
Incrementar transparencia de los procesos	Modelo compartido, federado, CDE
Enfocar el control al proceso completo	Revisiones del modelo y procesos constructivos
Introducir la mejora continua de los procesos	Revisiones del modelo y procesos constructivos
Mejorar continuamente el flujo	Mejor coordinación de la información
Referencias de los procesos con los de organizaciones líderes (<i>benchmarking</i>).	Integración y comunicaciones

En base a lo señalado por Sacks, R., Koskela, L., Dave, B.A., & Owen, R. (2010) un resumen de los principales beneficios de usar BIM –Lean sería el siguiente:

- ✓ Disminución de re-trabajos
- ✓ Única fuente de información de proyecto
- ✓ Mayor integración del proyecto
- ✓ Mejora de la productividad
- ✓ Aumento de la colaboración
- ✓ Eliminación de trabajos duplicados
- ✓ Mayor flexibilidad para optimizar diseño
- ✓ Disminución duración total del proyecto
- ✓ Reducción de tiempo producción documentos
- ✓ Aumento del valor generado/entregado
- ✓ Disminución de conflictos
- ✓ Reducción de tiempos de ciclo entre procesos
- ✓ Eliminación de pérdidas (obra)

Se puede concluir que usar la metodología BIM sin la filosofía Lean es minimizar la potencialidad y beneficios de BIM y por otra parte aplicar Lean con BIM resulta de alguna manera natural. Se habla de LeanBim.

Para un modelo de aplicación conjunta de VDC-Lean o BIM-Lean se recomienda ver el trabajo de Latorre (2019).

9.- INTEGRACIÓN VDC-BIM-IPD

De acuerdo a los antecedentes presentados en los capítulos anteriores se puede entender que VDC-BIM solo puede lograr su máximo potencial con la colaboración temprana de los actores relevantes en la fase inversión, es decir con los proveedores y contratistas de construcción ya adjudicados.

Si bien VDC –BIM permite realizar el diseño y construcción virtual, sin la participación de los proveedores y contratistas reales las soluciones adoptadas podrían no ser las óptimas una vez iniciada la construcción con los verdaderos protagonistas.

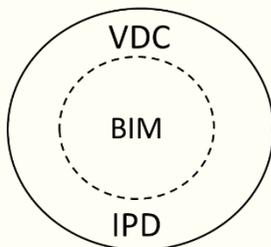


Figura 10: VDC-BIM-IPD

Otra conclusión relevante es que el VDC sin una estrategia de ejecución IPD puede perder toda su efectividad.

10.-CONCLUSIONES

En el contexto de la Industria 4.0 y Transformación Digital en que estamos como sociedad, el sector de la ingeniería y construcción tiene una oportunidad única (y exigencia a la vez), de modernizarse a una Construcción 4.0, Industrializada y Sostenible. Esto permitirá lograr una mejora sustantiva de los indicadores de productividad y calidad del sector.

En este camino de mejora de la gestión y ejecución de proyectos aparecen nuevos enfoques, metodologías y herramientas de softwares, que por su exceso y variedad muchas veces confunden en su real aplicabilidad, efecto y también su complementariedad.

Una manera de entender la relación y alcances de VDC-BIM-IPD y LC se ilustra en la Figura 11. Es posible que otros autores discrepen en el orden o jerarquías indicadas, en particular con Lean, ya que su alcance abarca todas las actividades de gestión empresarial. El uso del prefijo Lean es cada vez más común (LeanBim, LeanIPD, LeanPM entre otros).

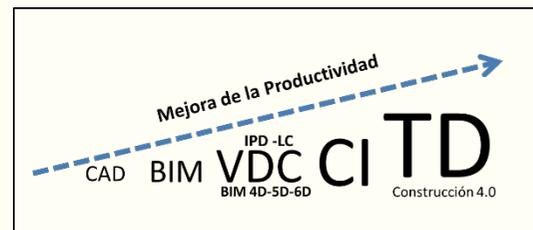


Figura 11: Un camino de mejora de la productividad en el sector construcción

La metodología clásica de desarrollo de proyectos con una secuencia jerárquica de participación de los diferentes actores de ingeniería y construcción se hace cada vez más ineficiente y poco eficaz con las actuales condiciones de la industria. La clave para el éxito presente y futuro es el trabajo colaborativo, integrado con las tecnologías digitales y con la meta de maximizar el valor entregado al cliente y minimizando los residuos físicos y de gestión. En este contexto también es importante conocer el enfoque Agile (ágil) y su aplicación en la gestión de proyectos de construcción.

Los sistemas de gestión, enfoques y metodologías VDC, BIM, IPD y LC, si bien existen hace varios años, aún son de bajo conocimiento e implantación en el sector de ingeniería y construcción, a pesar de los esfuerzos de diferentes instituciones públicas y privadas para ello, como el programa Construye 2025, el Consejo de Construcción Industrializada y el Programa Planbim.

El avance acelerado de la tecnología podría indicar que BIM es el pasado y presente, no así el futuro.

Otra iniciativa en desarrollo y parte del programa Construye 2025 se refiere a las modificaciones y mejoras al marco contractual para los proyectos, sin esto, los enfoques colaborativos e integrado no son factibles de utilizar.

Finalmente es importar reflexionar respecto a la formación de los ingenieros y si, desde la academia, estamos desarrollando las competencias y dando los énfasis necesarios en los programas de estudio, acordes con los avances tecnológicos y nuevos paradigmas de la construcción 4.0.

11.- REFERENCIAS

- AIA (2007). Integrated project delivery: A guide. American Institute of Architects National & American Institute of Architects California Council.
- BIM Forum Chile, (2017). Guía inicial para la implementar BIM en las organizaciones
- Center for Integrated Facilities Engineering (CIFE) (<https://cife.stanford.edu/>).
- Coates, P., Arayici, Y., and Koskela, L. (2010). Using the Knowledge Transfer Partnership model as a method of transferring BIM and Lean process related knowledge between academia and industry: A Case Study Approach
- Eastman, C. (1975). The Use of Computers Instead of Drawings in Building Design. *AIA Journal*, 63(3), 46-50.
- Fischer, M., and Kunz, J. (2004). The scope and role of information technology in construction (Publication no. 10.2208/jscej.2004.763_1). (0289-7806). Retrieved January 5, 2015, from Center for Integrated Facility Engineering, Stanford University <http://cife.stanford.edu/sites/default/files/TR156.pdf>
- Koskela, L. (1992). Application of the new production philosophy to construction. Stanford, CA: Stanford university Stanford, CA.
- Koskela, L., Howell, G., Ballard, G., and Tommelein, I. (2002). The foundations of Lean construction. *Design and Construction: Building in Value*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Mandujano, M. (2016). A Method to Identify Virtual Design and Construction Implementation Strategies from A Lean Construction Perspective. (Doctor in Engineering Science Doctoral), Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- McKinsey Global Institute, The digital future of construction Voices, October 2016
- McKinsey Global Institute, Reinventing construction. (February 2017) A Route to higher productivity.
- McKinsey Global Institute (October 2017) Navigating the digital future the disruption of capital-projects.
- Monash University (2017). Handbook for the design of modular structures.
- Latorre Uriz, A.; Sanz, C.; Sánchez, B. (2019). Aplicación de un modelo Lean-BIM para la mejora de la productividad en redacción de proyectos de edificación. *Informes de la Construcción*, 71(556): e313. <https://doi.org/10.3989/ic.67222>.
- Lyon Vial, A. (2018). Aplicación del enfoque LEAN a la dirección de proyectos en la industria de la construcción. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168691>
- PAS 1192-2: 2013. Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling.

- Pennsylvania State University. (2019) BIM Project Execution Planning Guide. Version 2.2.
- Planbim (2019) Estándar BIM para proyectos públicos.
- Project Management Institute. (1997). Design-Procurement-Construction Specific Interest Group, The ABCs of DPC: A Primer on Design Procurement Construction for the Project Manager.
- Sacks, R., Koskela, L., Dave, B.A., & Owen, R. (2010). Interaction of lean and building information modeling in construction. *Journal of construction engineering and management*, 136(9): 968-980. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000203](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000203).
- Trejo Carvajal, N. (2018). Estudio de impacto del uso de la metodología BIM en la planificación y control de proyectos de ingeniería y construcción. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168599>
- Vio Carrasco, J. (2017). La estrategia de ejecución de proyectos IPD (Integrated Project Delivery) situación actual y tendencias. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/145241>
- Wright, J.A. (2012): The Integration of Building Information Modeling and Integrated Project Delivery into the Construction Management Curriculum. *American Society for Engineering Education*.
-

ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTION CHARACTERIZATION OF OPEN-PIT MINING AND MINERAL PROCESSING OPERATIONS TOWARDS THE USE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

Daniel Sbarbaro ¹, Luis Morán ² y José Espinoza ³

Abstract

The mining sector is increasing its electrical energy consumption to face falling ore grade and more complex ore deposits. This scenario has meant a higher carbon footprint and high energy cost. Mining and mineral processing operations are energy intensive, and therefore, the identification of opportunities for reducing the cost associated with energy is of paramount importance. In this context, the characterization of electrical energy consumptions of the different processes in mining and mineral processing operations is a crucial task towards the development of strategies for increasing energy efficiency and the evaluation of renewable energy sources. This work, based on real data obtained from different Chilean open-pit mining sites, presents the characterization of key electrical energy consumptions for major mining and mineral processing operations. Several initiatives for energy management and the use of renewable energy are identified and analyzed by using this information.

¹ Electrical Engineer from the University of Concepción and PhD in Electrical Engineering from Glasgow University. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción, Edmundo Larenas 219, Concepción, Chile. dsbarbar@udec.cl

² Electrical Engineer from the University of Concepción and PhD in Electrical Engineering from Concordia University. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción, Edmundo Larenas 219, Concepción, Chile. lmoran@udec.cl

³ Electrical Engineer from the University of Concepción and PhD in Electrical Engineering from Concordia University. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción, Edmundo Larenas 219, Concepción, Chile. jose.espinoza@udec.cl

1.- INTRODUCTION

The energy consumption of the copper mining industry will continue to grow. It is expected that the use will grow at an annual rate of 4% from 22,2 TWh to 34,1 TWh representing an increase of 53,3% in the period 2015-2026 [1]. This increase in energy consumption is associated with increased demand and with internal factors such as the decrease of ore grade, more complex ore matrix and deeper mining. The industry has promoted energy efficiency initiatives and the use of renewable energy sources such as wind and PV to face this growing demand [2][3]. This increased demand will also have an impact on greenhouse emissions [4] unless renewable energy is considered in current and future mining industry.

An overview of mine operating costs and the potential effects of energy costs are described in [5]. Among the most intensive energy consumption processes are the ones associated with size reduction. In [6] have surveyed the energy consumption in comminution processes and assessing their environmental impacts by performing an SLCA, Streamlined Life Cycle Analysis. To have a better understanding of how to increase energy efficiency, and to evaluate energy consumption in mining from a Life Cycle perspective, it is necessary to study how energy is consumed in the different mining processes.

This work deals with electrical energy consumption in mining operations treating sulphides ores. Sulphide ores account for 80% of the world's primary copper production, and sulphide ore deposits are the biggest ones in Chile. The energy demand of the most essential unit operations required for copper concentrates production is surveyed.

It also addresses the characterization of electrical energy consumptions of the different processes to mine and process sulphides ores. These first, and prospective, steps towards the characterization of the energy consumption are essential to design strategies for energy efficiency and management [7][8].

The document is organized as follows: Section 2 gives an overview of the leading mining and mineral processing stages. Section 3 summarizes the information concerning energy consumption for the main processes. Section 4 provides some ideas about potential energy management strategies and the use of renewable energy. Finally, important remarks and conclusions are presented in section 5.

2.- OPEN-PIT MINING AND MINERAL PROCESSING PROCESSES

Mining and processing copper ores depend on the ore characteristics. Oxide and sulphide copper ores require different processing stages. In this work, the processing of sulphide copper ores will be considered. The mining and processing of sulphide copper ores from open-pit mines, as it is depicted in Figure 1, consider the following main processing stages: mining, size reduction, concentration, concentrate transportation, dewatering and shipping.

Also, water supply is a crucial ancillary process playing a key role in this processing chain since size reduction, concentration and concentrate transportation require water for their operations.

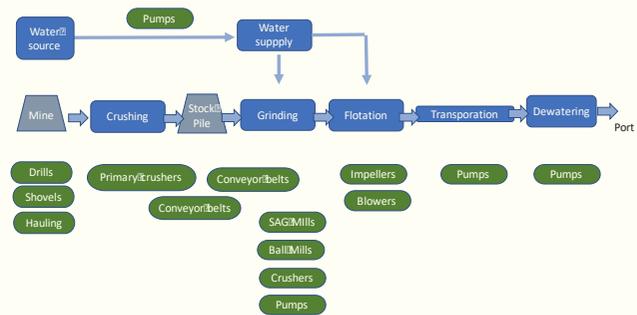


Figure 1. Mineral Processing chain and main equipment.

To mine the copper ore, the following operations are required: drilling, blasting and hauling by using shovels and trucks. Drillings and shovel machines consume electrical energy; while trucks consume petrol. Trucks discharge the blasted ore in a primary crusher for an initial size reduction stage. The crushed material is then stored in stockpiles for feeding the grinding circuits. Conventional grinding circuits consider a combination of SAG and ball mills to reduce the size of the rocks and produce the mineral liberation. Grinding circuits consume a large amount of energy, water and grinding media (steel balls) to reach the required size reduction. About the 33–40% of the total energy required to produce refined copper is consumed by these size reduction stages (Gibbons et al. 1988). A set of flotation stages is required to increase the concentration of the valuable minerals. In this process, the pulp (mixture of grinded mineral and water) are transported through a set of flotation cells; where a stream of bubbles is used to collect the copper mineral particles on their surfaces. The froth is then recollected to have a pulp rich in copper particles (30% copper). Thickeners are used to recover water from the tailings before disposing them

into the tailing dam. The concentrated pulp is transported through a pipeline to the port; where it is dewatered and dried. Mining operations require large volumes of water for their processes. In recent years, the new operations implemented in Chile have had to incorporate desalination plants and pumping stations to the processes. This has meant the increase in electricity demand in several MW. The power of these facilities is variable since it depends on the flow rate, the distance and the difference in geographic height.

3.- CHARACTERIZATION OF ENERGY CONSUMPTION

The energy consumption per area was surveyed by local data acquisition systems, SCADA system and Chilean national grid. The information collected from different sites is summarized in Table 1 to characterize the energy consumption of the main areas.

Table 1.- Summary of records

Area	Process	Length	Sampling frequency
General		year	monthly
Extraction	Driller	1 day	1 minute
	Cable Shovel	1 day	1 minute
	Hydraulic Shovel	1 day	1 minute
	Mobile S/E	3 weeks	
Crushing and transport	Primary Crusher and conveyor belts	1 month	2 minutes
	SAG mills	1 month	1 minute
Grinding	Ball mills	1 month	1 minute
	Power sub-stations	1 month	1 minute
	Flotation	Flotation cells	1 month
Water transport	Pumping stations	1 month	1 minute

To have a global idea concerning the energy consumption by area, Figure 2 depicts the consumption for each area in a Chilean mining operation during six months. It can be seen that the most important processes in terms of energy consumption are the ones associated with size reduction. A similar pattern can be found in the mining side, as seen in Figure 3. It is important to note that the energy consumptions associated with non-critical loads of the process are usually grouped into "service area", which represents a demand of less than 5% of the total. In the service area, consumption is included in maintenance workshops, casinos, offices, camps and productive areas such as gas treatment, and minor pumping circuits.

3.1.- Mining Operations

Power distribution systems used to energize open pit mine facilities are composed by medium voltage overhead lines (66, 33 or 23 kV), step down transformers (in general with 7.2 kV secondary voltage), and long three-phase cables (in many cases over one kilometer).

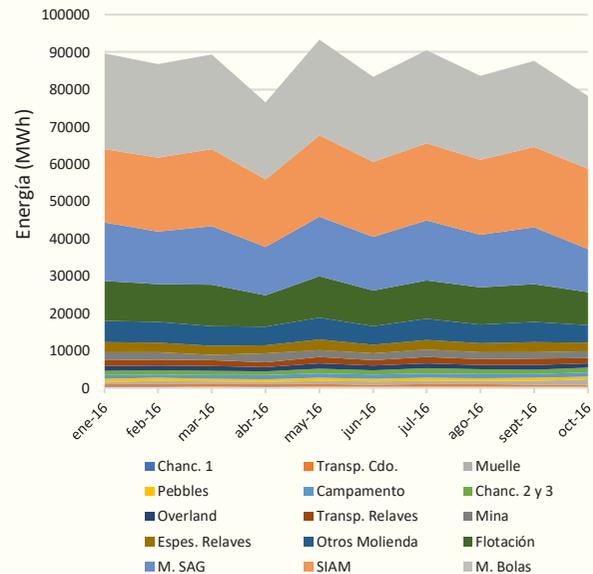


Figure 2. Overall energy demand

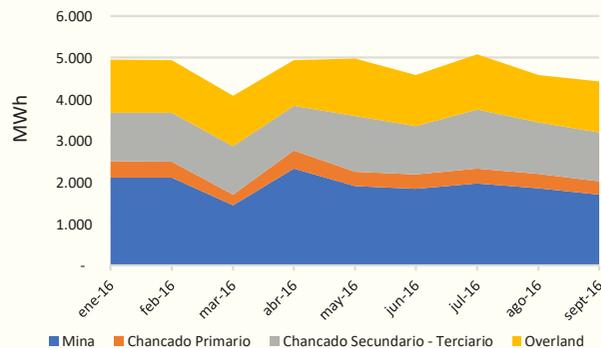


Figure 3. Mine energy demand

A typical mine facility energizes excavation machines like shovels, draglines, drillers, to remove overburden and ores during the mining process. The number of shovels and drillers operating in the mine is variable, but in certain specific applications can exceed 20 units. These machines are characterized by cyclic nonlinear loads consisting of high peak power demands as well as regeneration. The peak power demand is often as high as 1.6 times the average demand. Open-pit mines power distribution systems are composed of medium voltage

distribution lines (normally 23 kV or 13.2 kV), several step-down transformers (power between 5 to 10 MVA, 7.2 or 6.9 kV secondary voltage), and long three-phase cables. Depending on the rated power and size, drillers are implemented with induction motors connected directly to the distribution system. Rated voltage of the motor can be 690 V or 7.2 kV. The duty cycle is quite stable, and lasts several minutes, as shown in Figure 5.

The shovel active power consumption as a function of time is shown in Figure 4. This figure represents the shovel duty cycle during one truck loading and indicates that the peak power required by the shovel can reach over 3 MW, although the average active power value is significantly lower. Also, Figure 5 shows intervals with negative active power values, meaning regeneration. The duty cycle is close to 30 seconds. The shovel movement associated with each portion of the duty cycle (active power consumption) is identified in Table 2.

Table 2.- Different movements associated with the loading cycle of a truck

Loading action	Movement
①	The dipper is fully loaded with rocks
②	The revolving frame rotates towards the truck
③	Braking of the revolving frame (regeneration)
④	Mineral discharge and dipper lift
⑤	The revolving frame rotates towards the mineral side
⑥	Braking of the revolving frame (regeneration)
⑦	Dipper lowered down (regeneration)

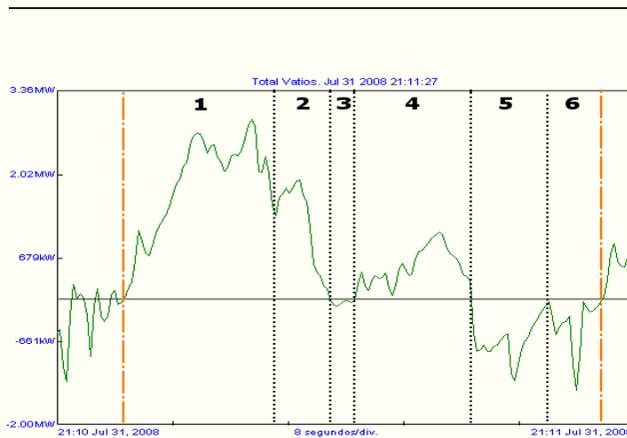


Figure 4. Shovel active power consumption during a truck loading cycle.

The power demand by drillers is shown in Figure 5. This figure shows that power demand is quite stable, once reaches a steady state, with a duty cycle near 4 minutes. In general, drillers are driven by an induction motor connected directly to the power system. THE Peak value in power demand (active and reactive

power) is associated the with the induction motor starting cycle.

Shovels are the most important and critical load connected to the mining power distribution system. Active and reactive power demand absorbed by a shovel driven by ac motors energized from power converters are shown in Figure 6. This figure shows the drive regeneration capability. Maximum power generate by the shovel reaches 2 MW. Regeneration is achieved by using active front-end rectifiers.

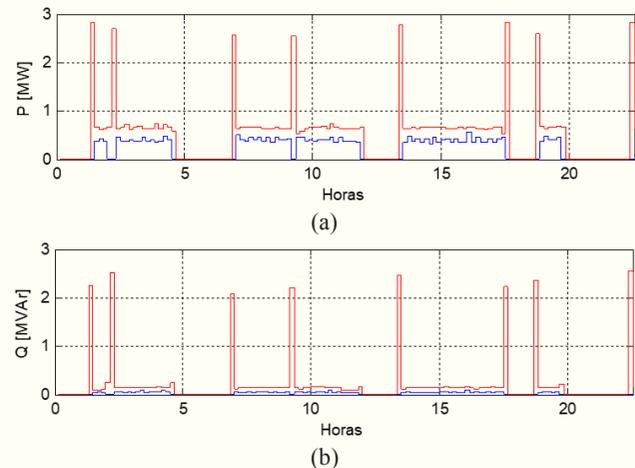


Figure 5. Active and reactive power absorbed by a driller during normal operating conditions. (a) Active power measured values. (b) Reactive power measured values.

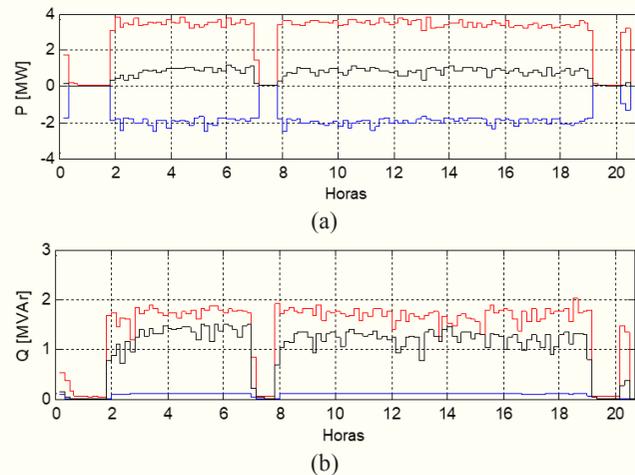


Figure 6. Active and reactive power absorbed by an electric shovel during normal operating conditions. (a) Active power measured values (maximum, average and minimum rms values). (b) Reactive power measured values (maximum, average, and minimum rms values).

Hydraulic systems is another technology used to drive of a shovel in mining facilities. This shovel is nergized by induction motors, connected directly to the power

system. Active and reactive power absorbed by this type of shovel are shown in Figure 7.

The operation of the primary crusher is mainly determined by the material supplied by the trucks, i.e. if the mine is not providing material (for example during blasting), or if the material does not have the necessary characteristics (grade) for its treatment, the primary crusher will not operate. Additional stops in the operation of crushers and belts may be due, among other factors, to material clogging in the crusher chamber (large rocks), detection of unwanted materials in belts, full stockpile or scheduled maintenance. As seen in Figure 8, these events can be very frequent and have a long duration.

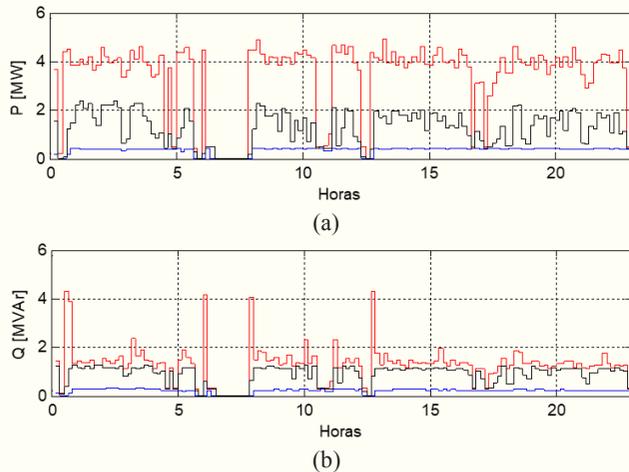


Figure 7. Active and reactive power absorbed by a hydraulic shovel during normal operating conditions. (a) Active power measured values (maximum, average and minimum rms values). (b) Reactive power measured values (maximum, average, and minimum rms values).

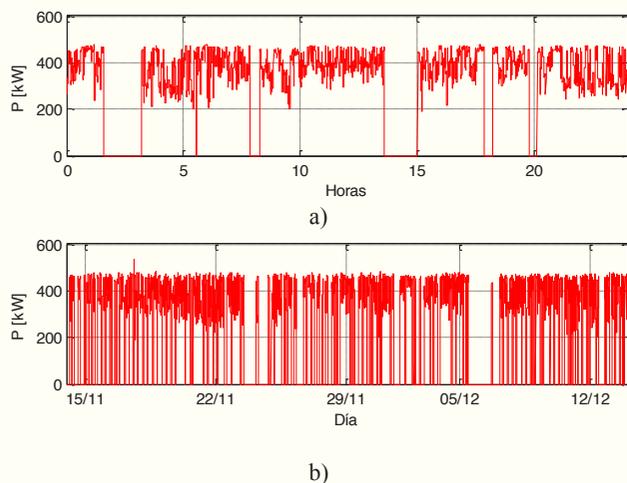


Figure 8. Primary crusher Active power a) Daily record (sampling rate 1 minute), b) Monthly record (sampling rate 10 minutes).

In some mining facilities, the conveyor belts are used to transport ore from the mine to concentrator plant. Since in most of these applications the conveyor belts go down the hill, regeneration is used for breaking the conveyor belt. Figure 9 shows active power active power demand measured at the drive system terminals. Negative active power values indicate the regeneration.

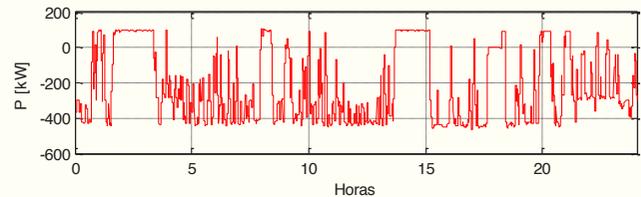


Figure 9. Active power absorbed by a belt conveyor belt drive system.

3.2.- Grinding

The grinding mills reduce the size of the rocks that come from the crusher to a granulometry of less than 1 cm.

In this stage, SAG mills (power between 10 and 30 MW) and ball mills (power between 5 and 20 MW) are used. The process diagram in the grinding stage considers SAG mills as the primary grinding mill. They can process large volumes of material per hour. These mills are driven by synchronous motors connected to cycloconverters, due to the requirements of high power and low speed of rotation (between 5 to 10 RPM).

Grinding circuits are usually composed of a SAG mill that feeds the smaller capacity ball mills, for instance, a SAG mill of 22.37 MW (30000 HP) feeding two 18.6 MW (25000 HP) Ball mills. The mills (SAG and Ball mil) operate continuously 24 hours a day. Their stops are due to scheduled maintenance or exceptional cases (production problems in the mine area). A common feature in this equipment is that they are driven by cycloconverters, due to the requirements of high power and low speed of rotation. This type of drives provides greater efficiency (greater than 80%) compared to drives with gearboxes (efficiencies under 50%).

Some characteristics of the cycloconverters are the sensitivity to disturbances in the network voltage and frequency, and the direct dependence between the load factor and the power factor. The record of active power for the SAG mill for one month is shown in Figure 10. It can be seen that there is no significant variation in consumption, except at certain times, which may be associated with operational problems.

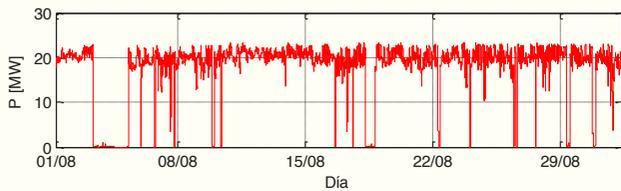


Figure 10. SAG Active Power

3.3.- Flotation

Flotation cells require motors to drive blowers and impellers, with powers close to 50 HP. A typical flotation plant considers many flotation cells operating in series and having a total consumption between 15 MW up to 25 MW of active power. Since the electrical energy is used to drive impellers and blowers, the consumption is steady with small variations changes as can be seen in Figure 11. This Figure also shows that abnormal variations due to operational problems can also be found.

3.4. Desalination and water transport

The type of water pumping system depends on the topological characteristics of the terrain, the distance, the flow and the difference in height. There are mining sites that have desalination plants on the coast, with an industrial water supply system (not potable). Other sites drive sea water, untreated, and others use a treated water system without complete desalination. The storage water method can be in ponds, or in an artificial lagoon. The drive system is composed of pumps driven by induction motors, in most cases connected directly to the network. Figure 12 shows the active power and power factor of a sub-station feeding a water pumping system. The variations in power consumption can be significant. Also under abnormal operations the power factor will also have substantial variations.

4.- POTENTIAL ENERGY MANAGEMENT STRATEGIES AND USE OF RENEWABLE ENERGY

Alternatives are proposed to make the demand for electric power more flexible based on the storage capacity of water resources or material that the miners possess, which basically correspond to the stockpile and water reserves.

The stockpile decouples the processes of the mine area (extraction, crushing and conveyor belts) with those of

grinding or leaching, depending on the production process. Currently, its function is limited to prevent the stoppage of processes downstream when the operation of the mine area is interrupted (bad weather conditions, power cuts, etc.). Considering the properties of the stockpile, and through an adequate programming of the operations of the mine and crushing area, it is possible to have control of the electrical energy demand of the site, for a defined time, which would be limited by the stored capacity of the material. In summary, the stockpile would allow to disconnecting for a period of time (determined by the time of autonomy of the stockpile) the mine area without affecting the processes downstream (concentrator). The detention drills would change the projected production, by delaying the opening of fronts for the extraction of material.

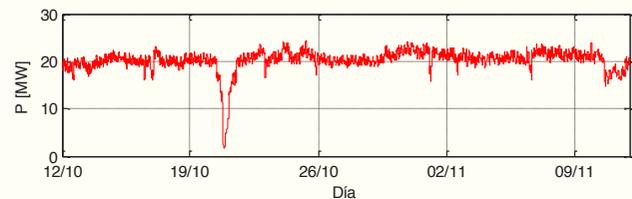
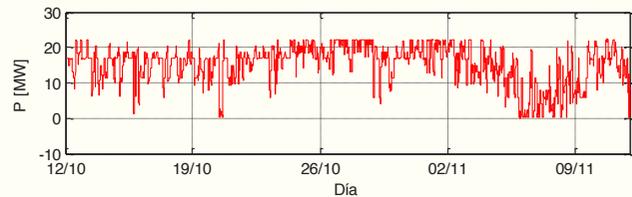
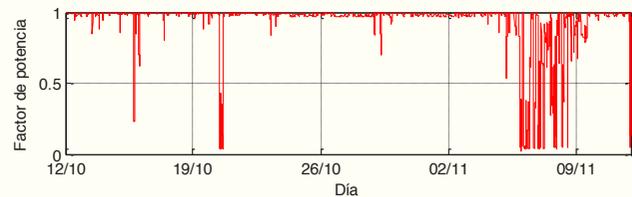


Figure 11. Flotation circuit active power demand



a)



b)

Figure 12. a) Active power b) Power factor

Sulphide processing requires large volumes of water. This fact has to lead to several mining sites, in addition to the implementation of new desalination projects and water supply, to opt for the construction of ponds or artificial lagoons for storage. This storage capacity provides some autonomy when water pumping is not possible. An adequate programming in the operation of the processes of pumping and desalination of water, could modulate the demand of electrical energy (when diminishing the flow of pumping or stopping the stations in cases that is possible), which would only be limited by the autonomy provided by the water storage

capacity. Considering the long distances of the pipelines, differences in height, and the high power consumption in pumping stations and desalination plants, there is a potentially substantial margin for the modulation of electrical demand [9].

The use of Battery Energy Storage Systems (BESS) and renewable energy sources provide further opportunities. For instance, for the size reduction stages, the combined use of solar photovoltaic energy system (PV), BESS and energy from the grid can lead to important reduction on the contracted power, without incurring into overconsumption penalties [10].

5.- CONCLUSIONS AND FINAL REMARKS

The most considerable variation in electric power consumption occurs in the extraction area, due to the intermittent operation of electric drills and shovels. The use of local energy storage systems and flexible energy managing systems can diminish the peak power consumption from the grid.

The greatest energy demands are recorded in the grinding stages, with the drive of large synchronous motors (10 MW to 30 MW per mill) in SAG and Ball mills; in the processes of electro-obtaining and electro-refining, with the operation of high power rectifiers in multipulse configurations (2.5 MW to 5 MW per rectifier). In addition, seawater impulsion and desalination plants can also achieve considerable consumption (over 15 MW) due to the long distances between sea water catchment, and the difference in height and required flows (about 600 liters per second).

The differences between daily and scheduled operations in the different areas, especially in detentions and abrupt decreases in the consumption of the equipment, mostly respond to external factors. The blasting process provides an approximate window of 1 hour of detention in the mine area but has a variable frequency that depends on the size of the deposit and the production capacity. The existing information indicates that the blasting can be weekly, daily, or every two weeks.

Taking as reference the energy consumption records in all studied plants, there is no variability in consumption associated with seasonal considerations (winter or summer). However, "Open Pit" mining operations at high altitudes (over 4000 mts) can present variations

due to climatic effects such as the high plateau winter.

In general, for the cases analyzed, which represent the main of the operations of the mining plants in service in Chile, it is observed that the demand for electric power is constant throughout the year. Given the high volumes of material that it is necessary to process to obtain a kilo of copper of high purity, the existing technology points to the use of very high power equipment, leaving little margin to control the demand.

The continuity in the production levels of the various areas that constitute a mining operation, together with its operation around a unit load factor, make it difficult to modify the operating regimes of the various areas. Except for the stockpile, there are no stages that can act as storage units, which allow modifying the operation regime of an area without affecting the rest.

The stockpile allows - "uncoupling" the production levels of the mine area with the downstream productive stages, such as grinding and flotation. Due to this, the size of the stockpile and the amount of material accumulated are those that define the time in which the mine area can operate at low load without affecting the subsequent processes.

However, it is possible to incorporate storage sources that allow the production of certain areas to be decoupled. For example, the stockpile can be used as a buffer to separate the operation of the mine with the concentrator plant. At present the dimensioning of stockpiles is done to guarantee a reserve of at least 8 hours.

Another source of high energy consumption are desalination plants and water boosters. By increasing the storage capacity of water in the plant, the delivery system can be stopped without affecting the supply required by the process. This configuration would allow a control time that can fluctuate between 12 hours to several days. It is also possible to modify the energy consumption in the grinding and electrochemical processes, but this has an important effect on the production. Modifying the technology used in these last 2 areas could achieve greater flexibility in the control of demand.

Finally, the storage of energy and the use of renewable energies sources open the additional possibility to add flexibility to the energy system and provide margins for developing demand side management strategies.

ACKNOWLEDGEMENTS

We acknowledge the support of FONDAP project 15110019.

REFERENCES

- [1] Cochilco, "Updated information about the energy consumption associated to the copper mining industry," Cochilco, Tech. Rep., 2013.
- [2] B. McLellan, G. Corder, D. Giurco, K. Ishihara. Renewable energy in the minerals industry: a review of global potential. *J. Clean. Prod.* 32(2012), 32-44.
- [3] S. Moreno-Leiva, G. Díaz-Ferran, J. Haas, Th. Telsnig, Felipe A. Díaz-Alvarado, R. Palma-Behnke, Willy Kracht, R. Roman, D. Chudinzow, L. Eltrop. Towards solar power supply for copper production in Chile: Assessment of global warming potential using a life-cycle approach, *Journal of Cleaner Production* 164 (2017) 242-49
- [4] T. Norgate, N. Haque. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *J. Clean. Prod.* 18 (3) (2010), 266-274.
- [5] J. A. Curry and M. J.L. Ismay and G. J. Jameson. Mine operating costs and the potential impacts of energy and grinding, *Minerals Engineering* 56 (2014) 70–80
- [6] J. Jeswiet, A. Szekeres, Energy Consumption in Mining Comminution, 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering, *Procedia CIRP* 48 (2016) 140 – 145
- [7] Commonwealth of Australia, Energy Efficiency Opportunities Assessment Handbook, Department of Resources, Energy and Tourism, 2011. ISBN 978-1-921812-58-3
- [8] K. Awuah-Offei (Ed). Energy Efficiency in the Minerals Industry: Best Practices and Research Directions, Springer (2018).
- [9] D. Sbarbaro, R. Pena, L. Moran. Energy optimization of mineral processing operations through optimal energy and inventory management, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 51, Issue 21, 2018, Pages 175-178, ISSN 2405-8963.
- [10] G. Pamparana, W. Kracht, J. Haas, G. Díaz-Ferran, R. Palma-Behnke, R. Roman. Integrating photovoltaic solar energy and a battery energy storage system to operate a semi-autogenous grinding mill, *Journal of Cleaner Production*, 165 (2017) 273-280.

ESTUDIO SOBRE EL MOVIMIENTO DE CARGA EN UN CHANCADOR PRIMARIO GIRATORIO CONSIDERANDO FRACTURA DE MATERIAL

Jonathan Cuba¹ y Alejandro Gutiérrez²

RESUMEN

Este trabajo abarca la conminución, proceso de reducción de tamaño y movimiento de carga en un chancador primario con diferentes condiciones de operación mediante simulaciones DEM (Método de Elementos Discretos). La curva de alimentación está constituida por metapartículas de diferentes tamaños y formas irregulares (no esféricas). Estas metapartículas fueron generadas mediante el método de expansión de radio propuesto por Potyondy y Cundall, en el que donde las partículas se unen entre sí, en sus puntos de contacto, por medio de elementos viga. El daño se representa explícitamente como enlaces rotos que se rompen y forman fracturas macroscópicas cuando alcanza una restricción de carga; de esta forma se logra simular la fragmentación del material. Este trabajo logró determinar que al aumentar la tensión de ruptura de las metapartículas se genera un incremento en el tamaño acumulado del producto de trituración. Por otro lado, los revestimientos propuestos en la Pera (cuerpo cónico rotatorio) afectan al tiempo de residencia de las partículas en el equipo, pero no la reducción de tamaño de material.

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Santiago de Chile, Alameda Bernardo O'Higgins 3363, Santiago, Chile.

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Santiago de Chile, Alameda Bernardo O'Higgins 3363, Santiago, Chile.

1. Introducción

El área de chancado primario en la gran minería del cobre se encarga de reducir el tamaño del mineral proveniente de la mina a un tamaño que pueda ser fácilmente transportado por las correas de transferencia hacia la siguiente etapa mediante líneas de procesamiento. El mineral proveniente de la mina es transportado por camiones de alta capacidad que llegan a las plataformas de descarga hacia los circuitos de chancado primario y es descargado en las tolvas permitiendo que la chancadora triture el mineral de forma continua. Adicionalmente el chancador, cuenta con dos equipos auxiliares: el rompe rocas instalado comúnmente en la parte superior para fragmentar las rocas de gran tamaño y una grúa de brazo para realizar trabajos de mantenimiento montada sobre un soporte de concreto en la esquina de la tolva.

Este equipo es empleado para la reducción del mineral, gracias al movimiento excéntrico de un cuerpo cónico rotatorio (Pera). Dentro de la cámara de chancado, el mineral triturado cae por la abertura de descarga hacia la tolva de compensación, donde debajo de estas, se encuentran instalados los Apron Feeders, conocidos como alimentadores de bandeja. Estos son los encargados de extraer el mineral chancado de tal manera que se mantenga un flujo continuo de mineral. El chancador primario giratorio es instalado dentro de una estructura de tres o más pisos, además de una obra civil que permite recibir la descarga directa de los camiones hacia la plataforma de descarga.

El proceso de reducción de tamaño (conminución) es uno de los procesos con mayor incidencia en los costos energéticos en la gran minería, situación que se acrecentará al procesar más mineral y de mayor dureza. Esto se debe al hecho que, como consecuencia de la antigüedad de los yacimientos en operación, la minería se desarrolle a mayores profundidades, se esperan efectos nocivos sobre el rendimiento de los equipos y su disponibilidad. Desde ese punto de vista, la roca va a volverse cada vez más dura y difícil de conminuir [1].

La construcción y pruebas de este equipo para evaluar optimizaciones es costosa, requiriendo una gran inversión inicial y tiempo en fabricación para identificar las mejoras que se esperan obtener. Por

dicha razón, la oportunidad de innovación se restringió por muchos años a las grandes fabricantes de equipos mineros, hasta el advenimiento de las simulaciones computacionales [2]. El método de los elementos discretos (DEM) propuesto por Cundall y Strack (1979), proporciona un modelo numérico potencial para investigar el comportamiento dinámico de las partículas; proponer nuevos diseños conceptuales de equipos, revestimientos y mejoras desde una computadora, sin incluir costos de desarrollo y construcción de prototipos.

El enfoque para cuantificar la fractura de material es el modelo BPM (A Bonded Particle Model), capaz de describir la rotura de materiales cuasi frágiles, es decir que presentan grietas subcríticas antes de sufrir una falla catastrófica. Presenta muchas características de las rocas como acumulación de daños, anisotropía y fractura de material. El modelo BPM es el único que tiene parámetros que están asociados directamente a las propiedades mecánicas reconocibles del material, como esfuerzos críticos de compresión y de corte. El esfuerzo requerido en la etapa de modelado de rocas y calibración de fractura es alto, presentando varios parámetros de ajuste, P. Cleary [3] lo define como un modelo que requiere de un investigador experimentado para obtener una distribución de rotura que coincida con los datos encontrados en experimentos. Existen diferentes enfoques para cuantificar la rotura de material granular tanto en escala micro, como macro: El método de reemplazo de partículas (PRM) y el modelo de partículas ligadas para rocas (BPM). El enfoque de PRM reemplaza la partícula principal fallada predicha por un número de fragmentos nuevos y más pequeños [4], perdiendo así la dinámica real de las partículas. Mientras que el enfoque de partículas ligadas para rocas (BPM) representa partículas individuales como un conjunto de esferas unidas, con rotura simulada por el fallo de algunos de los enlaces [5].

Este trabajo tiene como objetivo analizar de forma cuantitativa y cualitativa el movimiento de carga de un chancador primario giratorio a escala real y en diferentes condiciones de operación incluyendo la fragmentación de mineral mediante el método de los elementos discretos (DEM). Se busca obtener y analizar la curva granulométrica del chancador primario giratorio tamaño 60"x110". También,

determinar los efectos en el movimiento de carga al modificar geoméricamente la Pera.

1. DEM

1.1. Modelo de contacto

Cuando las partículas entran en contacto, se calculan las fuerzas repulsivas entre pares. Se asume que las partículas son cuerpos rígidos con deformaciones despreciables con geometría regular esférica. Se utiliza el modelo de Hertz en LIGGGHTS (véase Figura 1) para calcular las fuerzas de contacto F_{ij} entre partícula-partícula y partícula-superficie. Al momento del contacto entre cuerpos con velocidad relativa tangencial ($v_{t,i,j}$) y normal ($v_{n,i,j}$), se producen fuerzas de fricción compuesta por una parte elástica y otra viscosa, dada en la ecuación (E.1) cuando hay una superposición entre los cuerpos en la dirección normal ($\delta_{n,i,j}$) y tangencial ($\delta_{t,i,j}$). El fenómeno de contacto entre partículas ocurre cuando la distancia entre centroides es menor a la suma de sus radios.

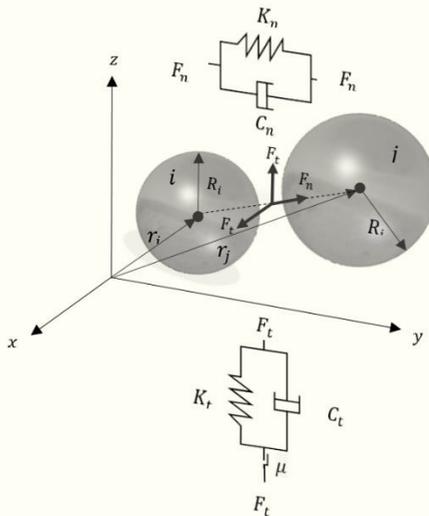


Figura 1: Modelo de contacto de Hertz.

En la Figura 1 se puede visualizar un esquema del modelo del contacto usado, presentando dos partículas i y j de radio R_i , R_j respectivamente. La amortiguación C representa la viscosidad del medio la y rigidez K describe el comportamiento elástico del medio, específicamente en la zona de contacto entre cada partícula en sus componentes normal y tangencial propias del modelo.

$$F_{ij} = \begin{cases} K_n \vec{\delta}_{n,i,j} - C_n \dot{\vec{\delta}}_{n,i,j} + K_t \vec{\delta}_{t,i,j} - C_t \dot{\vec{\delta}}_{t,i,j} & (E.1) \\ 0 & \end{cases}$$

cuando, $\begin{cases} \|\vec{\delta}_{i,j}\| > 0 \\ \|\vec{\delta}_{i,j}\| \leq 0 \end{cases}$

Los coeficientes de amortiguación y rigidez se calculan en base a propiedades físicas de las partículas como el coeficiente de restitución e , módulo de Young E y coeficiente de Poisson ν presentes en la documentación de LIGGGHTS [6].

Una vez determinadas las fuerzas, es posible determinar la posición y velocidad de cada partícula en el dominio de simulación. Para ello, se integran numéricamente las ecuaciones de Newton, considerando un paso de tiempo lo suficientemente pequeño para establecer una aceleración constante. Para definir el paso de tiempo, se utiliza el criterio de Rayleigh (véase ecuación E.2), el cual corresponde al tiempo que demora en propagarse una onda de superficie de Rayleigh [7].

$$dt_r = \frac{\pi r \sqrt{\rho_p / G}}{(0.1631 + 0.8766)} \quad (E.2)$$

El paso de tiempo establecido Δt debe ser lo más grande posible para reducir el tiempo de simulación (cálculos) y lo suficientemente pequeño para lograr resultados precisos con estabilidad numérica. El criterio en esta investigación es considerar que el paso de tiempo menor sea menor que 30% del tiempo de Rayleigh.

1.2. Modelo de fractura BPM

El modelo de enlaces paralelo, conocido por sus siglas en inglés BPM (A Bonded Particle Model) simula comportamiento mecánico de una colección de granos (partículas esféricas) unidas entre sí. Las partículas se enlazan en sus puntos de contacto por elementos viga. Las propiedades de estos enlaces son llamadas *micropropiedades* que consisten es parámetros de rigidez y resistencia en las partículas y enlaces formados. Este modelo reproduce muchas características de las rocas, incluida la elasticidad, fractura, anisotropía de daños, histéresis y dilatación [5].

2.2.1. Enlace Paralelo

El enlace paralelo (PB en sus siglas en inglés de Parallel-Bond) se representa como una unión, tal como lo señala la Figura 2, en donde se establece la interacción elástica entre los granos que les permite deslizarse entre ellas (5).

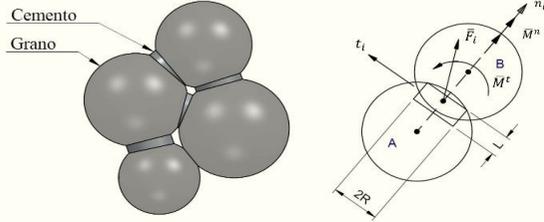


Figura 2: Fuerza desplazamiento en el comportamiento del PB.

Cada enlace i tiene asociada una fuerza y un momento en sus componentes normales y tangenciales, expuestos respectivamente en las ecuaciones E.3 y E.4.

$$\bar{F}_i = \bar{F}_i^n + \bar{F}_i^t \quad (E.3)$$

$$\bar{M}_i = \bar{M}_i^n + \bar{M}_i^t \quad (E.4)$$

El comportamiento del cemento (enlace paralelo) se puede modelar a través de un conjunto de resortes distribuidos a lo largo de una sección transversal, idealizando un enlace semejante a una viga que representa el contacto entre las partículas. Estas vigas poseen una rigidez normal (\bar{k}^n) y tangencial (\bar{k}^t) respecto al plano de contacto entre las partículas. Las vigas son del tipo $k = AE$, por su comportamiento a base de grano se definen en función del Módulo de Young de la partícula (\bar{E}_C), relación de rigideces (\bar{k}^n/\bar{k}^t) y los radios de las partículas ligadas ($R^{(A)}, R^{(B)}$) como lo señalan las ecuaciones E5 y E6.

$$\bar{k}^n = \frac{\bar{E}_C}{R^{(A)} + R^{(B)}} \quad (E.5)$$

$$\bar{k}^t = \frac{\bar{k}^n}{\bar{k}^n/\bar{k}^s} \quad (E.6)$$

2.2.2. Contacto

La interacción de partículas está representada por el modelo de contacto (CB por sus siglas en inglés de Contact Bond). Este modelo representa el contacto entre las partículas enlazadas mediante una fuerza, por lo tanto, las partículas pueden rotar sin problemas debido a que no existe un momento que restrinja dicho movimiento, es decir las

partículas solo interactúan en dicho contacto (véase Figura 3)

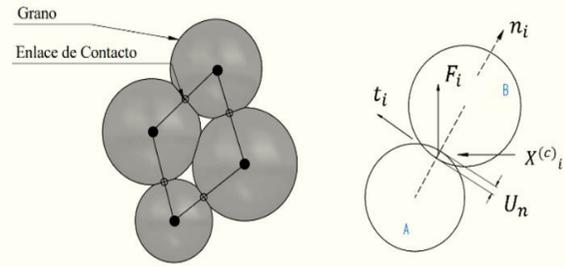


Figura 3: Fuerza-desplazamiento entre partículas.

Las partículas están en contacto si existe un pequeño solapamiento (U^n) entre ellas, generando una fuerza de contacto resultante F_i como lo indica la Figura 3. Esta fuerza resultante es la suma de una fuerza normal y tangencial. Si $U^n \leq 0$, entonces las fuerzas de contacto normal y cortante son nulas, de lo contrario la partícula resbala y se acomoda calculando el coeficiente de fricción de contacto.

2.2.3. Criterio de falla

La tensión de ruptura a tracción ($\bar{\sigma}_c$) y cortante ($\bar{\tau}_c$) se establece por el programador directamente en el script de LIGGGHTS. Ocurre la falla de los enlaces paralelos si el esfuerzo máximo resultante es igual o mayor a la resistencia a la tracción ($\bar{\sigma}^{m\acute{a}x} \geq \bar{\sigma}_c$) o respecto a la resistencia cortante ($\bar{\tau}^{m\acute{a}x} \geq \bar{\tau}_c$) como lo señala la ecuación E.7 y E.8. Se tiene que los esfuerzos máximos están en función del área de la sección de la viga del enlace A , el momento de inercia I , el momento polar de inercia J y el factor de contribución de momento $\bar{\beta}$, se considera igual a uno en las simulaciones.

$$\bar{\sigma}^{m\acute{a}x} = -\frac{\bar{F}_i^n}{A} + \frac{\bar{\beta}|\bar{M}_i^s|}{I} \bar{R} \quad (E.7)$$

$$\bar{\tau}^{m\acute{a}x} = -\frac{\bar{F}_i^s}{A} + \frac{\bar{\beta}|\bar{M}_i^s|}{J} \bar{R} \quad (E.8)$$

3. Escenario de simulación

La primera etapa de simulación consiste en el proceso de carguío de partículas sobre la tolva de un camión Caterpillar modelo 793F por efecto de gravedad. Se establece un lapso de espera para que las partículas logren su posición de reposo. En dicha posición se genera un archivo de reinicio que

guarda los atributos asociados con el estilo de átomo híbrido, específicamente en el último paso de tiempo. Este archivo permite iniciar una nueva simulación desde dicho punto y permite mantener la cantidad y posición exacta de partículas al inicio de todas las simulaciones. Luego, descarga el mineral en 15 segundos a una velocidad angular de 0.5 [RPM] sobre la tolva de recepción del chancador primario. El material cae a la cámara de chancado por efecto de gravedad, donde la Pera se acerca y aleja alternadamente de la superficie cóncava, de esta manera el material se fractura y cae por la apertura de descarga. En la parte inferior del chancador se instala un chute para direccionar el mineral a los harneros vibratorios. En particular, las geometrías que se mantienen estáticas durante toda la simulación son el chute, el soporte y el cono del chancador. En esta investigación el tamaño real del producto de trituración se obtiene mediante el proceso de cribado. Jiménez y otros (2018) determinaron la cantidad de partículas tras fractura mediante la transformación de distribución de fragmentos que tienen las partículas primarias y enlaces supervivientes en una distribución de tamaños del producto [3]. Este procedimiento no ha sido justificado, puesto que la rotura de enlaces no necesariamente representa la fractura de material, sino también una acumulación de daños. Para evitar confusión se implementan harneros vibratorios con slots de perfil cuadrado que aseguran una estratificación exacta de tamaños en flujos de materiales secos [8].

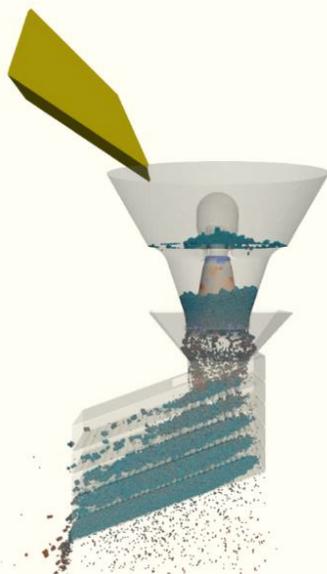


Figura 4: Visualización del completa de una simulación.

3.1. Modelo geométrico del chancador primario

Los equipos son modelados por medio de geometrías de superficies a escala real. Estas son diseñadas con un software CAD y exportadas a archivos ASCII STL. Las superficies escogidas son aquellas que tengan contacto directo con el mineral. En el caso del chancador son: cámara de recepción de mineral (1), araña tipo cúpula (2), cono (3) y pera (4) tal como lo indica la Figura 5. Estas geometrías se basan en el equipo Gyrotory Crushers MK- modelo 600x110 fabricado por Metso Minerals. Las condiciones de operación como la velocidad de giro, close size setting y open size setting son constantes en todas las simulaciones.

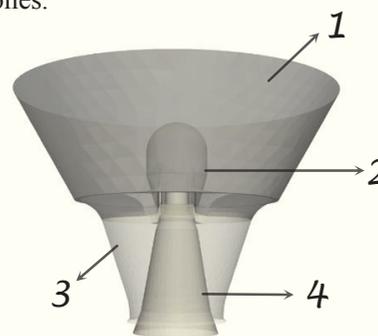


Figura 5: Modelo geométrico del chancador.

La Figura 6 muestra el revestimiento Pera normal (RPN) y sus cuatro modificaciones geométricas que son evaluadas en esta investigación considerando fractura de material. Estas fueron propuestas y detalladas dimensionalmente por Cáceres y Gamboa [9] para determinar que diseño entrega el mejor rendimiento en función del desgaste, flujo de mineral y potencia consumida sin considerar fractura de material. El primer revestimiento es la Pera aletas (RPA), está constituido por 4 aletas verticales en su superficie. El segundo revestimiento es Pera hexagonal (RPH) que consta de refuerzos hexagonales simétricos dispuestos a 60° entre ellos en la zona inferior de la pera. El tercer modelo de revestimiento es la Pera espiral simple (RPES) que propone la incorporación de un espiral de descendente en sentido de descarga. El último revestimiento es la

Pera espiral doble (RPHD), similar a la anterior, pero incorpora dos espirales.

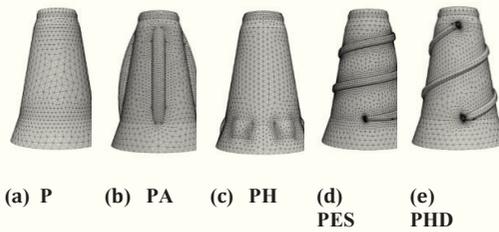


Figura 6: Modelos CAD de peras.

3.1. Modelo geométrico de rocas

Se generan 10 clases de rocas distintas como material de alimentación. Los tamaños de rocas fueron escogidos para estar en un rango de 200 a 650[mm] que representa la fracción de tamaños más comunes de alimentación de un chancador. El número de esferas de cada aglomerado varía de 4 a 222 partículas y el número total de partículas que forman las 2174 rocas es de 110,014. Se ha puesto especial atención en la modelación de distintos tipos de rocas. Se puede apreciar en la Figura 7 las diferentes formas logradas mediante la unión de partículas aglomeradas. Las partículas son enlazadas a una misma distancia de celosía, con la capacidad de unirse en 5 puntos para representar las macrogrietas y planos mineralógicos débiles.

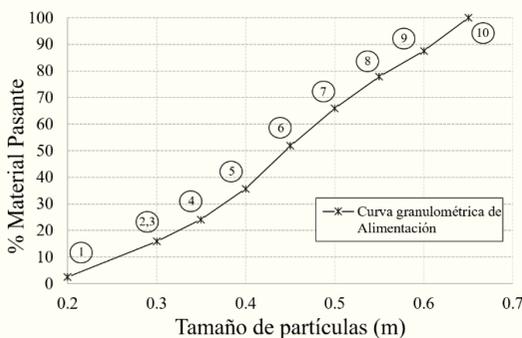
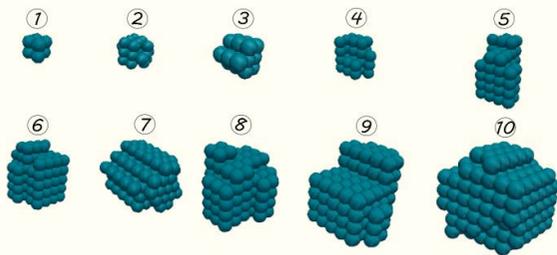


Figura 7: Forma, tamaño y distribución granulométrica.

Las propiedades fractomecánicas de las rocas como la tensión de ruptura normal y número de enlaces son determinadas por medio de simulaciones computacionales contrastada con resultados experimentales de Huiqi y otros (2014) en su estudio de una trituradora de cono mediante el DEM [10], en que analizó la distribución másica de una roca parental al ser triturada mediante ensayos de compresión diametral que simula el principio de compresión lenta del chancador de cono. Para efectos de simulación, se ingresa una roca en la cámara de chancado con el fin de contar la cantidad de partículas en cada fragmento que sale por la abertura de descarga. La Tabla 1 presenta los resultados de las simulaciones computacionales con respecto a los resultados experimentales de Huiqi y otros (2014). Se consideran cinco enlaces por partícula y una tensión de ruptura normal de 2.8[MPa] en la roca de mayor tamaño. En todas las simulaciones la roca se fractura en dos bloques y una colección de partículas finas. El porcentaje másico promedio en cada fragmento se acerca a la distribución másica propuesta por Huiqi y otros. El error relativo para el fragmento primario es menor al 15%.

	Porcentaje másico experimental (%)	Porcentaje másico promedio (Simulaciones) (%)
Fragmento Primario	60	51.9
Fragmento Secundario	30	33.4
Finos	10	14.7

Tabla 1: Verificación DEM fractura de material en el chancador.

La Figura 8 se muestra la secuencia de fractura de una roca generada por el movimiento excéntrico de la Pera al considerar cinco enlaces por partícula y una tensión de ruptura normal de 2.8[MPa] con una estructura cristalina cúbica simple. Estas micropropiedades son establecidas para todo el mineral de alimentación como condición estándar de operación. Para efectos de esta investigación, se establece que la tensión de rotura normal es el doble que la tensión de rotura por corte, asumido también por Quist y Magnus [11] en su estudio de fractura de material en un chancador de cono.



Figura 8: Verificación de fractura mediante el DEM.

Cabe señalar que la fractura de la metapartícula concuerda con los estudios DEM y experimentales sobre el inicio y propagación de grietas de Cil y Alshibli (2012), en que la compresión diamétrica de las partículas conduce a una concentración de tensiones en su punto de contacto, generando una rotura iniciada a lo largo del plano que conecta con dichos puntos [12]. La Figura 9 muestra la metapartícula con sus propiedades fractomecánicas calibradas en el momento preciso al ser fracturada en la cámara de chancado.

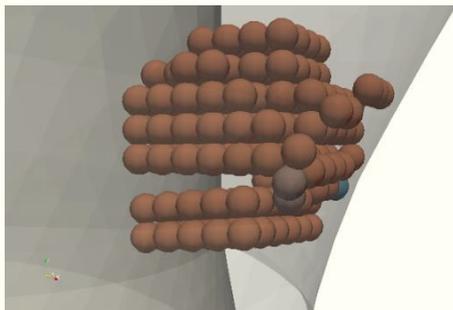


Figura 9: Fractura del aglomerado en un chancador primario giratorio.

3.2. Variables de simulación

Para sensibilizar la curva granulométrica se toman como variables la geometría del revestimiento de la Pera y las tensiones de ruptura del mineral. Se propone realizar dos barridos de simulaciones considerando la misma alimentación y condiciones de operación de los equipos.

3.2.1. Primer Barrido simulaciones DEM

Se realizarán cinco simulaciones con diferentes revestimientos de la Pera, considerando la misma alimentación y condiciones de operación de los equipos. La tensión de ruptura normal y de corte permanece constante en 2.8 y 1.4 [MPa], respectivamente. El primer barrido de simulaciones se presenta en la Tabla 2.

Simulación	Geometría
1	RPN
2	RPH
3	RPA
4	RPES
5	RPED

Tabla 2: Variables del primer barrido de simulaciones DEM.

3.2.2. Segundo Barrido simulaciones DEM

El segundo barrido considera un total de cinco simulaciones. La variable de estudio son las tensiones de rupturas del mineral, tal como lo indica la Tabla 3. En este caso, se mantiene constante el revestimiento de Pera normal (RPN), alimentación y condiciones de operación de los equipos.

Simulación	σ_r (MPa)	τ_r (MPa)
1	1.5	0.75
2	2.2	1.1
3	2.8	1.4
4	3.4	1.7
5	4.0	20

Tabla 3: Variables del segundo barrido de simulaciones DEM.

4. Resultados y discusiones

A continuación, se presenta la Tabla 4 que detalla el tamaño del producto acumulado de chancado al implementar diferentes revestimientos de las peras.

Dimensiones (mm)	Material Pasante Acumulado (%)				
	RPN	RPA	RPH	RPE	RPED
<120	42.7	42.0	43.6	42.7	42.4
<180	81.1	80.5	81.2	80.0	80.2
<240	94.3	94.6	95.0	94.3	93.7
<300	98.0	98.5	98.3	98.0	97.8
<360	99.3	99.5	99.4	99.6	99.2

Tabla 4: Material pasante acumulado según geometrías de revestimiento.

Los resultados obtenidos, señalan técnicamente que al implementar el RPN se tiene un P42,7 de 120 mm, es decir el 42,7% del producto acumulado tiene un tamaño menor a 120 mm. La modificación geométrica que produce mayor cantidad de material menor a 120 mm (*finos*) es el RPH. Al analizar la Tabla 4, se determina que los cuatro revestimientos propuestos producen un cambio insignificante en la curva granulométrica de descarga respecto al RPN que no supera el 2% de variación de material pasante acumulado. La Figura 10 presenta las curvas granulométricas de alimentación y descargas obtenidas en el primer barrido de simulaciones.

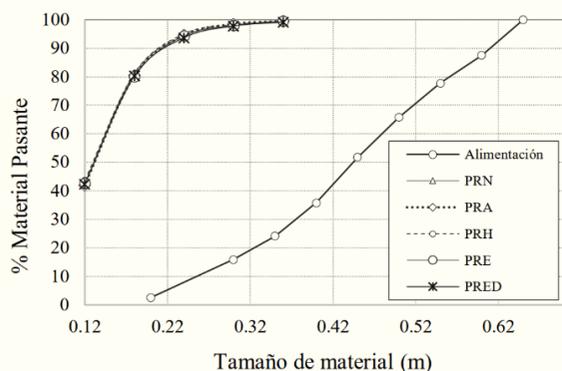


Figura 10: Curvas granulométricas del chancador al implementar diferentes revestimientos.

La Figura 11 muestra el tiempo de residencia de las partículas en el primer barrido de simulación que establece un periodo de tiempo que va desde el estado de *choke fed* hasta que todas las partículas abandonen la cámara de chancado. El término *choke fed* hace referencia al momento que las partículas logran una velocidad mínima estable, tal como lo señala la Figura 13 en el segundo 15 de simulación. Los resultados indican que los RPN,

RPE y RPED producen un tiempo de residencia cercano a 39 segundos. En cambio, al implementar los RPA y PRH produce un tiempo de residencia de 46 y 45 segundos respectivamente. Entonces, a modo de síntesis, se tiene que la implementación de los RPE y RPED producen el mismo tiempo de descarga respecto al chancador al RPN, mientras que los RPA y RPH generan un aumento en el tiempo de residencia de las partículas en 7 y 6 segundos respectivamente. Cabe decir, que el RPA favorece el movimiento de carga en la cámara de chancado, pero este no produce una reducción en el tiempo de residencia de las partículas.

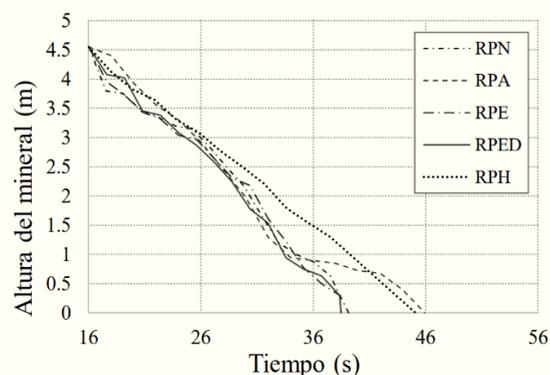


Figura 11: Tiempo de residencia de las partículas en el chancador.

Por otro lado, se presentan los resultados del segundo barrido de simulaciones en la Tabla 5. El material con una tensión de ruptura de 1,5 MPa generó la mayor cantidad de finos en el producto acumulado de chancado con un P67,70 de 120 mm. Mientras, que con una tensión de ruptura de 4 MPa se generó un P35,3 de 120 mm, siendo el caso con la menor cantidad de finos en el producto de trituración. Entonces, a medida que aumentan las tensiones de ruptura en las rocas disminuye la cantidad acumulada de material fino en el producto de chancado.

La Figura 12 presenta las curvas granulométricas de alimentación y descargas obtenidas en el segundo barrido de simulaciones. A diferencia de los cambios geométricos en el revestimiento de la pera, las propiedades fractomecánicas del mineral son una variable que afecta la conminución, ya que existe una variación superior al 50% de material pasante acumulado con tamaño menor a 120 mm al modificar la tensión de ruptura de 1,5 MPa a 4 MPa.

Material Pasante Acumulado (%)					
Dimensiones (mm)	1.5 MPa	2.2 MPa	2.8 MPa	3.4 MPa	4 MPa
<120	67.70	53.5	42.7	37.8	35.3
<180	92.84	87.9	81.1	75.3	71.9
<240	98.04	97.3	94.3	90.2	87.1
<300	99.16	99.1	98.0	96.6	94.4
<360	99.65	99.7	99.3	98.9	97.7

Tabla 5: Material pasante acumulado según tensiones normales de ruptura del mineral.

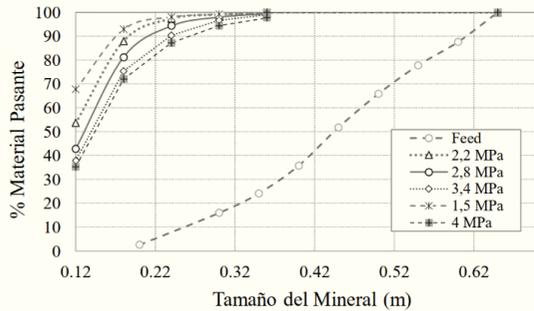


Figura 12: Curvas granulométricas del chancador al variar las tensiones de ruptura del mineral.

Entonces, con los resultados de estas simulaciones, se infiere que a medida que los yacimientos de cobre envejecen, aumente la dureza y tensiones de ruptura con la profundidad de extracción, se espera que el tamaño del producto acumulado de chancado aumente, provocando así efectos aguas abajo en el proceso de reducción de material, como por ejemplo una disminución en la densidad aparente en la alimentación de un molino SAG. La carga de estos molinos ocupa hasta el 30% de su volumen total (incluyendo las bolas), por lo tanto, al disminuir la densidad aparente se procesará menor masa de mineral por unidad de tiempo. Además, la granulometría de alimentación del molino SAG es una variable fundamental, puesto que velocidad de rotación del molino está en función de ésta.

5. Conclusiones

El movimiento de carga de un chancador primario giratorio ha sido simulado bajo distintas condiciones de operación desde un punto de vista dinámico y de fragmentación de material mediante el DEM.

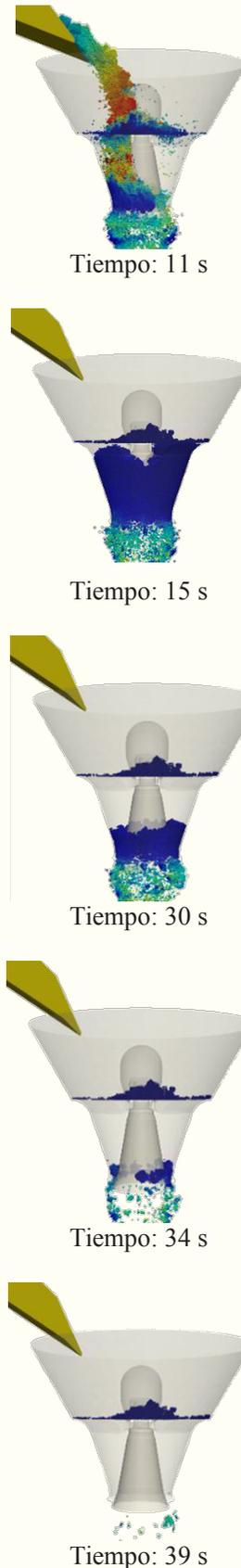


Figura 13: Secuencia de descarga en el chancador primario con RPN.

Cuatro modificaciones geométricas de la pera fueron evaluadas mediante variables que lograron medir el desempeño de cada una de ellas. Los resultados demostraron que los RPA, PRH, RPE y RPED mantuvieron o aumentaron el tiempo de residencia de las partículas en la cámara de chancado sin influir significativamente en la conminución de material. Mientras que, al modificar las tensiones de ruptura del mineral, se obtuvieron cambios significativos en la curva granulométrica de descarga. En cuanto al mineral de alimentación, se logró calibrar sus propiedades fractomecánicas mediante estudios experimentales de Huiqi y otros [10] y controlar la configuración de enlaces con la estructura cristalina cúbica simple. Cabe mencionar, que la razón de reducción del mineral (R_r) calibrado es 3,13 típica de un chancador primario giratorio.

Se puede concluir que es posible simular el movimiento de carga de un dispositivo de conminución complejo considerando fractura de material sin requerir de software comerciales y costos asociados a prototipos y desarrollo de un equipo. Además, se concluye que el modelo de fractura BPM permite capturar la falla y propagación de las grietas inducidas por compresión. Finalmente, se lograron los objetivos propuestos de modelar rocas de geometría irregular y sensibilizar la curva granulométrica en diferentes condiciones de operación mediante el método de los elementos discretos.

6. Referencias

- [1] Minería Chilena, 6 octubre 2011. [En línea]. Available: Disponible en: www.mch.cl/informes-tecnicos/molienda-y-chancado-apostando-por-la-eficiencia-energetica/. [Último acceso: 3 abril 2019].
- [2] P. W. Cleary, G. W. Delaney, M. D. Sinnott y R. D. Morrison, «Inclusion of incremental damage breakage of particles and slurry rheology into a particle scale multiphase model of a SAG mill,» *Minerals Engineering*, vol. 128, n° <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.026>, pp. 92-105, 2018.
- [3] N. Jiménez Herrera, G. K. P. Barrios y L. M. Tavares, «Comparison of breakage models in DEM in simulating impact on particle beds» *Advanced Powder Technology*, pp. 692-706, 2018.
- [4] J. Herbst, Size reduction and liberation Principles of Mineral Processing, Littleton: MC Fuerstenau and KN Han, Society of Mining, Metallurgy and Exploration, 2003.
- [5] Potyondy, David; Cundall, P.A, A bonded-particle model for rock, Toronto: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004.
- [6] LIGGGHTS, «LIGGGHTS(R)-PUBLIC Documentation, Version 3.X,» [En línea]. Available: Disponible en: <https://www.cfdem.com/media/DEM/docu/Manual.html>. [Último acceso: 1 mayo 2019].
- [7] E. M. y. e. a. Melbourne, Methodology for CFD-DEM modelling of particulate suspension rheology, Ninth International Conference on CFD in the Minerals and, 2012.
- [8] M. Fuerstenau y K. Han, Principles of Mineral Processing, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), 2003.
- [9] J. Cáceres y A. Gamboa, Estudio del movimiento de carga en un chancador de la gran minería, Santiago: Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad de Santiago, Facultad Ingeniería, Departamento Ingeniería Mecánica, 2014.
- [10] H. Li, G. McDowell y I. Lowndes, Discrete element modelling of a rock cone crusher, Nottingham: Powder Technology, 2014.
- [11] J. Quist y M. Evertsson, Cone crusher modelling and simulation using DEM, Göteborg: Chalmers University of Technology, 2016.
- [12] M. Cil y K. Alshibli, 3D assessment of fracture of sand particles using discrete element, *Geotechnique Letters* 2, 161–166, 2012.

VALORACIÓN DE INTANGIBLES CON MÉTODOS DE ELECCIONES DECLARADAS

Juan de Dios Ortúzar Salas ¹

Resumen

La valoración de intangibles, como externalidades en el caso de planificación de transporte, es un tema serio y complicado. Hoy existe un cuasi consenso entre especialistas acerca de la superioridad de los métodos de elecciones declaradas para esta tarea. Hemos sido pioneros en su aplicación para el caso de accidentes fatales y no fatales, ruido, contaminación ambiental, percepción de seguridad al caminar y, más recientemente, incluso valoración del patrimonio tangible e intangible en ciudades. Este trabajo se refiere a este tipo de aplicaciones y discute, a través de tres estudios de caso, algunos elementos clave en el diseño y aplicación de esta metodología.

En particular, discutiremos el diseño experimental (contexto, selección de atributos, definición del mecanismo de pago y enfoque de diseño) y la modelación, que requiere métodos sofisticados dado el tipo de información que se recolecta. En este sentido, nos referiremos al tratamiento de heterogeneidad, mediante variaciones sistemáticas de gustos, y a la estimación de modelos híbridos que permiten incorporar constructos latentes que puedan afectar la elección.

¹ Ing. Civil (UC), M.Sc., Ph.D. (Leeds University). Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. jos@ing.puc.cl

Introducción

Ante la ausencia de mercados reales para medir los efectos concomitantes o intangibles, los analistas deben recurrir a técnicas que permitan inferir sus precios. Si bien, en teoría, es sencillo desarrollar tales técnicas, aplicarlas en la práctica para obtener resultados significativos puede ser bastante complejo. Algunos métodos se basan en el uso de datos de preferencias reveladas (PR), que son recopilados al observar el comportamiento individual en mercados reales; tienen el inconveniente de requerir suposiciones bastante fuertes. Por ejemplo, que las personas son plenamente conscientes de los bienes intangibles que se están modelando y que los consideran de la misma manera que lo hace el analista. Además, los datos de PR sufren limitaciones: (i) no permiten estudiar situaciones más allá de la existencia de los mercados reales (es decir, cómo se comportarían las personas en nuevos contextos de elección); (ii) muchas veces los datos mismos están sujetos a problemas de colinealidad y/o variabilidad insuficiente, que impiden estimar el efecto de atributos potencialmente relevantes, y (iii) los datos de PR pueden ser bastante caros de recopilar.

Un enfoque alternativo es utilizar datos de elecciones declaradas (ED). En este caso, se crea un pseudo mercado, más parecido a un experimento de laboratorio, donde las personas deben estar conscientes de los intangibles que el analista está tratando de valorar. Por lo tanto, se diseña un conjunto de situaciones hipotéticas de elección y se solicita a los encuestados que indiquen qué opción elegirían en cada caso. El analista tiene control total de las variables explicativas, que representan atributos de cada alternativa, evitando problemas de colinealidad y variabilidad insuficiente. Los datos de ED también tienen la ventaja de ser relativamente baratos de recopilar, ya que se obtienen varias observaciones de cada encuestado. Un elemento clave es el diseño experimental, un área donde se han realizado importantes avances en los últimos años (Bliemer y Rose, 2009).

La desventaja de usar datos de ED está enraizada en la naturaleza hipotética de los experimentos: las personas, ¿realmente se comportan como dicen que lo hacen? Afortunadamente, se ha demostrado que esto solo es un problema cuando se trata de hacer predicciones a futuro, pero usar datos de ED es apropiado para estimar valoraciones subjetivas como la disposición a pagar (Hensher et al, 2005).

En este trabajo discutimos, a través de ejemplos, algunos temas importantes relacionados con la estimación de modelos de elección discreta basados en datos de ED para valorar bienes intangibles; este enfoque también se conoce como Análisis Conjunto, pero básicamente sólo en la literatura de marketing (Louviere et al, 2000). Haremos referencia a dos aplicaciones de ED realizadas en Chile, para obtener la disposición al pago (DAP) por mejorar la seguridad vial urbana y la percepción de inseguridad de peatones al caminar por el vecindario.

Modelos de Elección Discreta y Datos de Elecciones Declaradas

Supongamos que un individuo (q), perteneciente a una población o segmento de mercado Q , debe elegir entre un conjunto de alternativas ($i \in M$) que se pueden representar por un paquete de atributos (x_i), por ejemplo, precio, calidad y tamaño. También supongamos que el individuo es capaz de considerar todos los atributos de cada alternativa en su conjunto de elección. En ese caso, es razonable suponer que para compensar atributos buenos con malos, definirá - para cada alternativa - una función de utilidad U_{iq} , en que el valor de cada atributo se pondera por su utilidad marginal; de esta forma, la alternativa con mayor utilidad será la elegida.

Aunque el modelador, que es un observador del sistema, no conoce todos los atributos que considera el individuo, ni - menos - el valor de sus utilidades marginales, puede intentar estimarlas. Para esto considera una utilidad observable (i.e., que depende de los atributos que él puede conocer), V_{iq} , igual a la suma de los valores de cada atributo ponderados por parámetros a estimar. Pero, consciente que esto no considera los atributos desconocidos, errores de medición, etc., asume que U_{iq} debe ser igual a la suma de V_{iq} y un término de error, ϵ_{iq} , que tiene una cierta distribución de probabilidad, de modo que:

$$U_{iq} = V_{iq} + \epsilon_{iq} = \sum_k \theta_k \cdot x_{k iq} + \epsilon_{iq} \quad (1)$$

Si los errores distribuyen idéntica e independientemente (iid) Valor Extremo tipo I entre las alternativas, se obtiene el popular modelo Logit Multinomial (MNL, ver Ortúzar y Willumsen, 2011, Capítulo 7), donde la probabilidad de elegir la alternativa i del conjunto M viene dada por

$$\text{Prob}(i) = \text{Prob}(U_{iq} \geq U_{jq}, i \neq j, \forall j \in M) = \frac{\exp(\lambda \cdot V_{iq})}{\sum_{j \in M} \exp(\lambda \cdot V_{jq})} \quad (2)$$

en que λ es un factor de escala (inversamente relacionado con la desviación estándar desconocida de los errores ε), que debe normalizarse (es decir, tomarse como uno) en aplicaciones típicas, ya que no es identificable.

Si relajamos los supuestos de parámetros fijos para la población y/o que los errores distribuyen iid Valor Extremo tipo 1, el modelo MNL deja de ser válido. Relajar estos supuestos da lugar a modelos más flexibles, como el Logit Mixto (ML, Train, 2009), que permiten tratar problemas como heterogeneidad y correlación entre alternativas y observaciones, características son muy relevantes en el contexto de este documento. En particular, para abordar el problema de que cada encuestado proporciona varias observaciones en un experimento ED, el modelo debe permitir tratar esta naturaleza de pseudo panel de los datos, por ejemplo, mediante la adición de un componente de error μ_{iq} que permite modelar esta correlación; en ese caso, (1) cambia a:

$$U_{iq} = \sum_k \theta_k \cdot x_{kqiq} + \varepsilon_{iq} + \mu_{iq} \quad (3)$$

y, típicamente, se asume que el componente de error distribuye Normal. En este caso, la expresión del modelo toma la forma de una integral multivariante bastante más compleja que (2) (Ortúzar y Willumsen, 2011, Capítulo 7).

Un refinamiento interesante es la consideración de Modelos de Elección Híbridos (HDC, Ben-Akiva et al., 2002), donde el analista intenta incluir constructos abstractos, conocidos como variables latentes, en la utilidad observada. Se supone que estas variables representan actitudes y/o percepciones de los individuos y, como no pueden observarse directamente, deben construirse en función de variables observadas empíricamente (Bahamonde-Birke et al., 2017). El enfoque de modelación habitual se basa en una estructura MIMIC (Bollen, 1989), donde las variables latentes se explican por un conjunto de características de los individuos y las alternativas (s_{iqr}), a través de las llamadas ecuaciones estructurales, mientras que explican, al mismo tiempo, un conjunto de indicadores de actitudes y/o percepciones (y_{ziq}), previamente recogidos de los individuos, a través de las llamadas ecuaciones de medición. Este marco se puede representar a través de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \eta_{liq} &= \sum_r \alpha_{lri} \cdot s_{riq} + v_{liq} \\ y_{ziq} &= \sum_l \gamma_{lzi} \cdot \eta_{liq} + \zeta_{ziq} \end{aligned} \quad (4)$$

donde los índices r , l y z se refieren a variables exógenas, variables latentes e indicadores, respectivamente. Los términos de error v_{liq} y ζ_{ziq} pueden seguir cualquier distribución, pero típicamente se asume que distribuyen Normal con media cero y una cierta matriz de covarianza. Finalmente, α_{lri} y γ_{lzi} son parámetros a estimar en forma conjunta con los parámetros de (3) para evitar sesgos. Hoy, esto se puede hacer con bastante facilidad utilizando paquetes de software sofisticados ampliamente disponibles, como Apollo (Hess y Palma, 2019) u Ox Matrix (Doornik, 2007).

Si las funciones de utilidad, lineales en los parámetros, anteriores contienen un atributo correspondiente al precio o costo, los modeladores interesados en valorar el atributo k ésimo pueden estimar su disposición a pagar (DAP), simplemente tomando la razón de su parámetro (θ_k) y el del costo (Gaudry et al., 1989). La estimación de la DAP con modelos Logit Mixto es más compleja, pero Sillano y Ortúzar (2005) y, más recientemente Daly et al. (2020), discuten en profundidad los diversos problemas asociados.

En los estudios considerados a continuación, calcularemos esta medida de bienestar para dos tipos de bienes intangibles, seguridad vial y percepción de seguridad al caminar en un vecindario. No obstante, hemos aplicado con éxito el enfoque de ED a una variedad de otros casos: valoración de atributos de la vivienda social (Greene y Ortúzar, 2002), contaminación ambiental (Ortúzar y Rodríguez, 2002) y ruido (Galilea y Ortúzar, 2005) en un contexto de localización residencial, valoración de atributos de vivienda y barrio (Torres et al., 2013; Balbontín et al., 2015), separación comunitaria (Grisolía et al., 2015), riesgo de avalanchas (Flügel et al., 2015), hacinamiento en transporte público (Batarce et al., 2016), aceptabilidad del uso de aguas grises (Amaris et al., 2020) y valoración de atributos intangibles en barrios patrimoniales (Bonet et al., 2020).

Primer Caso de Estudio: Accidentes de Tráfico en Zonas Urbanas

Para estimar el valor de la vida, se debe comenzar observando las reducciones en la probabilidad de una muerte (Schelling, 1993). Este concepto dio lugar al valor de las reducciones de riesgo (VRR), también conocido como valor de una vida estadística. Dado que la seguridad pública es un bien público, el VRR es igual a la suma de la tasa marginal de sustitución entre ingresos y accidentes fatales en toda la población afectada por un problema de seguridad (Jones Lee y Loomes, 2002; Ortúzar y Rizzi, 2006). Es interesante mencionar que se han realizado una serie de estudios basados en el trabajo seminal de Rizzi y Ortúzar (2003), para caminos interurbanos, en Australia (Hensher et al., 2009; 2011), Noruega (Flügel et al., 2015; Veinstein et al., 2013) y España (González et al., 2018).

Iragüen y Ortúzar (2004) trataron el caso urbano que era algo más complejo. Para esto, diseñaron una encuesta de ED de elección de ruta, para viajes en automóvil, que utilizaban diferentes tipos de calle en Santiago. El instrumento de medición primero solicitaba a las personas mencionar un viaje habitual y sus características; esta información se usaba para personalizar la segunda parte, donde se presentaba a los encuestados el contexto de elección y el ejercicio ED (una serie de opciones binarias de ruta). Finalmente, también se preguntaba a los encuestados algunos datos socioeconómicos. Este tipo de encuesta, vía página web, se repitió exitosamente en estudios posteriores (Hojman et al., 2005).

En la Figura 1 se muestra un ejemplo del contexto, diseñado en base a la información proporcionada inicialmente por el encuestado. Estos datos permitían generar algunos elementos a los cuales los encuestados debían prestar especial atención (en cursiva en la Figura 1): propósito del viaje, tipo de día, hora de llegada y calle utilizada principalmente durante el viaje; aquellos elementos que podían variar, lo hacían en rangos realistas.

Se utilizaron tres variables: tiempo de viaje, costo de viaje y una indicación del nivel de riesgo. Se realizaron grupos focales con residentes de Santiago, de diferentes edad y género, donde examinamos varias formas de presentar la variable riesgo de accidentes.

Suponga que debe viajar al trabajo, desde su casa hasta su destino en Santiago. Ud. realiza este viaje regularmente y el mismo tiene las siguientes características:

- »Se lleva a cabo en un día laboral normal
- »Debe llegar a su destino aproximadamente a las 7:45 a.m.
- »Usted conduce su automóvil y paga todos los costos de viaje involucrados.

También debe considerar lo siguiente: Un viaje que demora entre 30 y 35 min al momento de partir, tiene un costo promedio de viaje de US\$ 1 (considerando combustible y mantenimiento). Finalmente, suponga que durante el viaje, Ud. deberá elegir entre dos rutas por calles similares a las de la figura:



Le pedimos que considere las siguientes tres características al elegir su ruta:

- Tiempo de viaje
- Costo de viaje
- Número de accidentes fatales en auto por año.

A continuación, se le presentarán nueve (9) situaciones de viaje. Le solicitamos que, en cada una, seleccione una de las dos rutas descritas; sin embargo, si ninguna de las dos le agrada, pase a la siguiente situación de elección. Considere que las situaciones de elección no tienen relación entre ellas.

Figura 1: Contexto de elección presentado en el ejercicio de ED.

Llegamos a la conclusión que la definición propuesta por Rizzi y Ortúzar (2003), Número de accidentes automovilísticos con víctimas fatales por año, debería mantenerse, ya que se había probado exhaustivamente en su experimento de elección de ruta interurbana; no obstante, en este caso la variable costo de viaje también requirió cierta reflexión. Si se postulaba un peaje (que había sido aceptable en el caso interurbano), se corría el riesgo de sesgo de política (ya que no se cobraba peaje en Santiago en ese momento), introduciendo ruido en el experimento al desviar la atención de los encuestados hacia la variable costo.

Finalmente, decidimos utilizar los costos operativos del automóvil, definidos como el costo del combustible más el mantenimiento del automóvil, como instrumento de pago.

La encuesta se administró a través de una página web. Las ventajas de una encuesta por Internet son: (i) la eliminación de las etapas de codificación y digitalización de respuestas; (ii) la capacidad de personalizar la encuesta para cada encuestado; (iii) la reducción de costos, ya que no es necesario pagar a los entrevistadores por cada formulario completado. Su principal desventaja es la posibilidad de obtener una muestra sesgada, ya que el acceso a Internet no es universal y la mayoría de los usuarios tienden a distribuirse en ciertas edades; por lo tanto, las personas mayores de 60 años pueden haber quedado subrepresentadas.

Se estimó modelos Logit Mixto (ML) con funciones de utilidad lineal, y en base a los parámetros estimados fue posible determinar el valor subjetivo del tiempo de viaje y el valor subjetivo de la reducción de accidentes (SVAR). Para determinar el VRR, fue necesario sumar el SVAR para la población afectada.

En esta aplicación, el VRR puede interpretarse como el valor económico, para la sociedad, de evitar una muerte en calles urbanas. Por lo tanto, si el costo de un esquema de seguridad vial estuviera por debajo de la VRR, el esquema generaría un beneficio económico positivo para la sociedad y debiera ser elegible para su implementación. Si el costo del esquema supera el VRR, el retorno económico neto a la sociedad sería negativo y el proyecto no debiera calificarse para financiamiento público.

Este enfoque es bastante diferente a una evaluación financiera privada. Como no existe un mercado para comprar seguridad vial, un inversor privado no recibiría ningún beneficio y, por lo tanto, no debería interesarse en absoluto en el esquema. Finalmente, es interesante mencionar que las estimaciones chilenas para la VRR difieren notablemente de los valores ajustados, por ingreso (PGB), correspondientes a un metaestudio realizado por Miller (2000); esto sugiere que este tipo de valoraciones no son fácilmente transferibles entre diferentes entornos culturales.

¹ En el primer estudio se analizó si la opacidad de las rejas (i.e. concreto, cubierta de arbustos, o completamente transparente) afectaba la percepción de seguridad; se encontró que era difícil aislar este efecto de otros como que una reja cubierta de arbustos

Segundo Caso de Estudio: Percepción de Inseguridad en Vecindarios Residenciales

La seguridad urbana se ha convertido en un tema clave para la vida en las ciudades. Una estrategia que puede afectar positivamente la calidad de vida en términos de percepción de seguridad, es el diseño de espacios públicos; sin embargo, los esfuerzos en esta dirección no se han basado en datos duros, lo que dificulta una evaluación seria de soluciones alternativas. Este caso de estudio resume los resultados de un proyecto destinado a cuantificar el efecto de variables espaciales en la sensación de (in)seguridad en espacios públicos, con el objetivo de diseñar políticas de mejora basadas en datos duros en lugar de especulaciones. Para esto, diseñamos e implementamos dos encuestas de ED, basadas en trabajo derivado de los marcos de Space Syntax (Hillier, 2004) y CPTED (Jeffery, 1971; Nasar y Upton, 1997).

Una serie de grupos focales nos permitió comprender mejor qué variables físicas eran importantes en la percepción de inseguridad peatonal en un vecindario relativamente hostil: alumbrado público, presencia de otras personas, caminar en espacios abiertos en lugar de espacios constreñidos, presencia de árboles y opacidad de rejas o cercas. La teoría menciona dos variables compuestas: vigilancia natural y control visual, y en un estudio inicial (Sillano et al, 2006) se encontró que tenían una asociación clara con algunas de las variables físicas recién mencionadas. Como el alumbrado público resultó ser demasiado importante, decidimos trabajar sobre la base de peatones que se movían durante el día. Las opciones de ED se presentaron como una serie de pares de imágenes, donde algunos atributos físicos cambiaban, y los encuestados debían seleccionar la imagen donde se sintieran más seguros en cada caso.

En relación con la vigilancia natural, consideramos edificios con y sin ventanas, la presencia de otros peatones y un quiosco (en una esquina), y el paso de un vehículo de transporte público. En relación con el control visual, consideramos dos variables: tipo de calle (larga y recta, versus una que conducía, a poco andar, a un cruce en forma de T), y la presencia (o ausencia) de rejas¹. También se incluyó una variable llamada mantenimiento, asociada con la apariencia general de la calle y las aceras, basada en los

se veía más bonita y mejor cuidada, y, por ende, menos amenazante.

diferentes tipos de situaciones encontradas en la práctica. La Figura 2 muestra ejemplos de estas variaciones en las variables de las dos situaciones de elección. Finalmente, y como mecanismo de pago, se incluyó la variable dividendo adicional, definida como la diferencia en el pago mensual por la vivienda social del encuestado, que garantizara que su ubicación fuera tal, que al caminar diariamente hacia y desde ella, el encuestado se sintiera más seguro.

El uso de imágenes jugó un papel clave en nuestro experimento de ED, ya que toda la información relativa a los atributos experimentales debía ser representada visualmente. Decidimos usar imágenes creadas digitalmente, basadas en fotografías de calles reales en los vecindarios considerados, para asegurarnos de que no estuvieran contaminadas por variables externas que pueden aparecer en fotografías reales (Figura 3), por ejemplo, un día de sol versus uno nublado. Esto funcionó muy bien, ya que logramos imágenes extremadamente simples que permitieron percibir claramente los atributos.

El uso de imágenes tiene la ventaja que los encuestados se enfrentan a una representación gráfica que parece familiar y se asemeja a su entorno diario, reduciendo los problemas de comprensión asociados con una descripción verbal de los atributos. Esto fue crucial en nuestro caso, ya que estábamos tratando con encuestados que tenían un nivel de educación relativamente bajo.

Para representar la vigilancia natural, utilizamos tres variables de trasfondo de la siguiente manera:

ΔNV_1 : representando la diferencia entre: (i) una calle vacía rodeada por la parte posterior de los edificios (es decir, sin ventanas o acceso), como se encuentra en muchos sectores de los vecindarios examinados, y (ii) una calle vacía frente a las entradas de los edificios, como en las calles principales y pasajes.

ΔNV_2 : asociado con una vigilancia efectiva, contrastando una calle con y sin peatones (de varias edades y géneros).

ΔNV_3 : asociado con una vigilancia estable, contrastando una calle con y sin un quiosco y un taxi colectivo, similar a lo que se podía observar en los vecindarios.

En el caso de mantenimiento, nuestras observaciones in situ nos llevaron a determinar que el rango de variación de esta variable debía estar representado por tres niveles (bueno, medio y malo), generando las siguientes diferencias:

ΔM_1 : contrastando los niveles de mantenimiento malo y medio; Una imagen presentaba una calle con una superficie dañada y la vereda sucia, y la otra tenía una calle en buen estado y limpia.

ΔM_2 : contrastando los niveles de mantenimiento malo y bueno; en este caso, bueno agregaba la presencia jardines bien cuidados rodeando la calle.

Las variables físicas asociadas al control visual (es decir, tipo de calle y presencia de rejas) se crearon con dos niveles, permitiendo una única diferencia en cada caso:

ΔS : contrasta un pasaje corto, que termina en un cruce en T, con una avenida larga. En nuestro primer estudio también consideramos una calle que se curvaba, pero el efecto del cruce en T (es decir, falta de control debido a una posible sorpresa en la esquina), resultó más fuerte (Sillano et al, 2006).

ΔF : contraste entre calles con y sin casas enrejadas. En nuestro primer estudio, encontramos que el efecto de la opacidad de rejas era confuso, ya que la opacidad máxima (muros de concreto) daba la idea de caminar en pasajes, y rejas semi opacas (con arbustos) sugería áreas bien cuidadas y, por lo tanto, más seguras; Por estas razones, en nuestro segundo estudio (Iglesias et al., 2013) solo presentamos el tipo de reja más frecuente en los vecindarios (ver imágenes del lado izquierdo en la Figura 2).

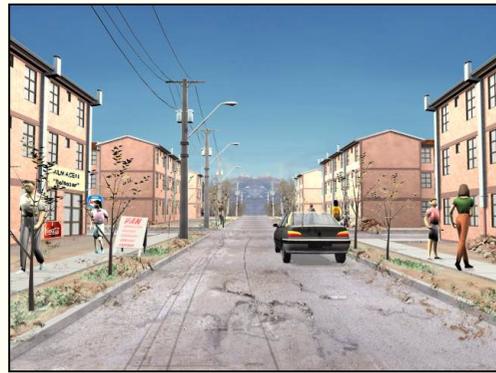


Figura 2: Ejemplo de imágenes y situaciones de elección



*Elementos independientes
combinados en capas*



Figura 3: Ejemplo de imagen de construcción

La combinación de todas estas variables condujo a 128 (8x4x4) pares de alternativas que se presentaron, como ocho bloques de 16 tratamientos cada uno, a ocho submuestras de encuestados. Este diseño se perfeccionó/optimizó aún más, utilizando al dividendo adicional como una variable de control (Kanninen, 2002). Además de ser un atributo clave (porque permite estimar el DAP asociado con las variables físicas restantes), fue la única variable continua y, por lo tanto, la más fácil de manejar.

Para optimizar el diseño, postulamos un modelo MNL con utilidades lineales que incluía todas las variables físicas y la diferencia de dividendo adicional que variaba continuamente entre \$2.000 y \$6.000. Luego, usando los parámetros estimados en nuestro primer estudio, más otros obtenidos en las etapas piloto y de pre-testeo, estimamos las probabilidades de elección para cada par de opciones y asignamos valores de dividendo adicional que llevaran estas probabilidades a ser lo más cercanas a 0,5 posible (cambiando el dividendo adicional en unidades de \$500 para hacerlo más realista). Esto nos permitió reducir sustancialmente el error D asociado a este eficiente diseño experimental (Rose y Bliemer, 2009)

Nuestra encuesta tenía dos partes: la primera solicitaba datos personales (género, edad, cantidad y edad de los niños, nivel educativo, ingreso familiar y cierta información sobre la percepción de seguridad al caminar por el vecindario); la segunda contenía el juego de elección y, una vez completado, otras seis preguntas con el propósito de verificar la consistencia de las respuestas. El juego de elección fue precedido por una descripción del contexto hipotético; luego, para cada situación, se pidió al encuestado hacer dos elecciones: (i) qué imagen le parecía más segura y (ii) cuál imagen era la preferida, si la elegida previamente se asociaba al pago del dividendo adicional.

Estimamos varias especificaciones del modelo, incluido un modelo de Logit Mixto que permitió considerar variaciones sistemáticas de gustos (esto es, interactuar los atributos físicos con datos socioeconómicos, ver Ortúzar y Willumsen, 2011, pág. 279). Esto permitió comprender mejor las razones por las cuales ciertos atributos fueron valorados de manera diferente por vecindario, grupo de edad, género y edad de los hijos de los encuestados (Iglesias et al., 2013).

Algunos parámetros de la variable control visual (tipo de calle y ausencia de rejas) recibieron un signo que no era consistente con nuestras expectativas teóricas. En el caso de las rejas, creemos que esto fue causado porque no notamos que, en la mayoría de las situaciones de elección, las imágenes con reja correspondían a un área mejor conservada. Por lo tanto, en lugar de transmitir la sensación de que la reja hacía que fuera más difícil ayudar a un peatón si era asaltado, transmitió la sensación que el área era más segura, en el sentido de tener residentes que la cuidaban mejor. En el caso del cruce en T, sospechamos que la razón fue, una vez más, una interpretación defectuosa por parte de los encuestados (debido a una falta de cuidado de nuestro diseño), ya que las imágenes del cruce en T también se asociaban con un área mejor conservada en todos los casos.

El resto de los parámetros tuvo los signos esperados y encontramos una amplia variación en los gustos entre individuos. No tenemos espacio para ahondar en estos temas, pero el lector interesado puede consultar Iglesias et al. (2013), donde hacemos un análisis bastante completo y también informamos sobre nuestras estimaciones de la DAP y su interpretación.

Conclusiones

Esperamos que esta breve discusión sobre el uso de modelos de elección discreta para valorar atributos intangibles, haya servido para motivar la práctica de valorar bienes no comercializables mediante encuestas de elecciones declaradas. Como en la mayoría de las aplicaciones, se requiere una sólida teoría microeconómica si los modeladores buscan que su investigación sea un insumo adecuado para el análisis costo-beneficio.

En este trabajo discutimos brevemente dos casos de estudio. Sus objetivos eran deducir el valor que los individuos asignan a: (i) a una externalidad local (accidentes urbanos) y (ii) mejorar algunos atributos físicos asociados con la percepción de inseguridad al caminar en áreas de bajo ingreso. Aunque no existen mercados adecuados para estos bienes intangibles, las preferencias se consideran bien definidas. Ambos estudios muestran que las encuestas de elecciones declaradas pueden ser una vía para obtener valores monetarios útiles. Sin embargo, todavía queda mucho camino por recorrer para obtener valores que puedan usarse de manera consistente a nivel gubernamental en un análisis formal de costo-beneficio. En particular, se necesita más evidencia

empírica y un mayor esfuerzo de validación externa de los valores encontrados.

La conclusión más importante con respecto a nuestros casos de estudio, es el realismo que requiere la técnica de elecciones declaradas para que el experimento produzca resultados satisfactorios y veraces. Los mercados simulados deben imitar a los mercados de la vida real a fin de proporcionar un insumo útil para el análisis costo-beneficio. Por otro lado, estos experimentos también deberían ayudar a comprender cómo las personas podrían ajustar su comportamiento en presencia de externalidades, de modo que se pueda hacer un pronóstico apropiado si cambia el nivel de una externalidad.

Los casos de estudio discutidos demuestran que el enfoque de elecciones declarada puede implementarse en países en desarrollo y, en particular en el último caso, incluso cuando se requiera entrevistar a personas relativamente menos alfabetizadas. Finalmente, es importante destacar que la transferencia de valores subjetivos, como la disposición al pago, desde países desarrollados al mundo en desarrollo, no está justificada y se deben tener muchas consideraciones. Por lo tanto, es evidente que existe la necesidad de realizar este tipo de estudios en países con diversos niveles de desarrollo o cuando esperamos diferencias culturales importantes (en nuestro caso, por ejemplo, relacionadas con la aversión al riesgo).

Agradecimientos

Deseo agradecer Luis I. Rizzi por el conocimiento compartido durante largos años. También valoro enormemente las conversaciones intermitentes con David Hensher, Sergio Jara y Huw Williams sobre estos temas y, en particular, el trabajo de mis ex alumnas Paula Iglesias y Paula Iragüen. Finalmente, deseo agradecer el apoyo del Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ANID PIA / BASAL AFB180003), por financiar constantemente mi investigación.

Referencias

Amaris, G., Dawson, R., Gironás, J., Hess, S. y Ortúzar, J. de D. (2020) Understanding the preferences for different types of urban greywater uses and the impact of qualitative attributes. *Water Research* (en imprenta).

Bahamonde-Birke, F.J., Kunert, U., Link, H. y Ortúzar, J. de D. (2017) About attitudes and perceptions – finding the proper way to consider

latent variables in discrete choice models. *Transportation* **44**, 475-493.

Balbontín, C., Ortúzar, J. de D. y Swait, J.D. (2015) A joint best-worst scaling and stated choice model considering observed and unobserved heterogeneity: an application to residential location choice. *Journal of Choice Modelling* **16**, 1-14.

Batarce, M., Muñoz, J.C y Ortúzar, J. de D. (2016) Valuing crowding in public transport: implications for cost-benefit analysis. *Transportation Research* **91A**, 358-378.

Ben-Akiva, M.E., Walker, J.L., Bernardino, A.T., Gopinath, D.A., Morikawa, T. y Polydoropoulou, A. (2002). *Integration of choice and latent variable models*. En H.S. Mahmassani (ed.), *In Perpetual Motion: Travel Behaviour Research Opportunities and Challenges*. Pergamon, Amsterdam.

Bollen, K.A. (1989) *Structural Equations with Latent Variables*. John Wiley & Sons, Chichester.

Bonet, L., Greene, M. y Ortúzar, J. de D. (2020) Subjective valuation of tangible and intangible heritage neighbourhood attributes. *Habitat International* (en imprenta).

Daly, A., Hess, S. y Ortúzar, J. de D. (2020) Estimating willingness-to-pay from discrete choice models: setting the record straight. *Journal of Environmental Economics and Management* (en revision).

Doornik, J.A. (2007). *Object-oriented matrix programming using Ox*. Timberlake Consultants Press and Oxford: www.doornik.com, Londres.

Flügel, S., Elvik R., Veisten, K., Rizzi L.I, Meyer S.F., Ramjerdi, F. y Ortúzar, J. de D. (2015) Asymmetric preferences for road safety: evidence from a stated choice experiment among car drivers. *Transportation Research* **31F**, 112-123.

Flügel, S., Rizzi, L.I., Veisten, K., Elvik, R. y Ortúzar, J. de D. (2015) Car drivers' valuation of landslide risk reductions. *Safety Science* **77**, 1-9.

Galilea, P. y Ortuzar, J. de D. (2005) Valuing noise level reductions in a residential location context. *Transportation Research* **10D**, 305-322.

Gaudry, M.J.I., Jara-Díaz, S.R. y Ortúzar, J. de D. (1989) Value of time sensitivity to model specification. *Transportation Research* **23B**, 151-158.

González, R.M., Román, C., Amador, F.J., Rizzi, L.I., Ortúzar, J. de D., Espino, R., Martín, J.C. y Cherchi, E. (2018) Estimating the value of risk reductions for car drivers when pedestrians are involved: a case study in Spain. *Transportation* **45**, 499-521.

- Greene, M. y Ortúzar, J. de D. (2002) *Willingness-to-pay for social housing attributes: a case study from Chile*. *International Planning Studies* 7, 55-87.
- Grisolía, J.M., López, F. y Ortúzar, J. de D. (2015) *Burying the highway: the social valuation of community severance and amenity*. *International Journal of Sustainable Transportation* 9, 298-309.
- Hensher, D.A., Rose, J.M. y Greene, W.H. (2005) *Applied Choice Analysis: A Primer*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hensher, D.A., Rose, J.M., Ortúzar, J. de D. y Rizzi, L.I. (2009) *Estimating the willingness-to-pay and value of risk reduction for car occupants in the road environment*. *Transportation Research* 43A, 692-707.
- Hensher, D.A., Rose, J.M., Ortúzar, J. de D. y Rizzi, L.I. (2011) *Estimating the value of risk reduction for pedestrians in the road environment: an exploratory analysis*. *Journal of Choice Modelling* 4, 70-94.
- Hess, S. y Palma, D. (2019) *Apollo: a flexible, powerful and customisable freeware package for choice model estimation and application*. *Journal of Choice Modelling* 32, 100170.
- Hillier, B. (2004) *Can streets be made safe? Urban Design International* 9, 31-45.
- Hojman, P., Ortúzar, J. de D. y Rizzi, L.I. (2005) *On the joint valuation of averting fatal and severe injuries in highway accidents*. *Journal of Safety Research* 36, 377-386.
- Iglesias, P., Greene, M. y Ortúzar, J. de D. (2013) *On the perception of safety in low income neighbourhoods: using digital images in a stated choice experiment*. En S. Hess y A.J. Daly (eds.), *Choice Modelling: The State of the Art and the State of Practice*. 193-210, Edward Elgar Publishing Ltd., Cheltenham.
- Iragüen, P. y Ortúzar, J. de D. (2004) *Willingness-to-pay for reducing fatal accident risk in urban areas: an Internet-based Web page stated preference survey*. *Journal of Accident Analysis and Prevention* 36, 513-524.
- Jeffery, C.R. (1971) *Crime Prevention Through Environmental Design*. Sage Publications, Beverly Hills, CA.
- Jones Lee, M. y Loomes, G. (2002) *Valuation of safety*. In D.A. Hensher and K.J. Button (eds.), *Handbook of Transport and the Environment*, Pergamon, Amsterdam.
- Kanninen, B.J. (2002) *Optimal design for multinomial choice experiments*. *Journal of Marketing Research* 39, 214-217.
- Louviere, J.J., Hensher, D.A. y Swait, J.D. (2000) *Stated Choice Methods: Analysis and Application*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Miller, T. (2000) *Variations between countries in values of statistical life*. *Journal of Transport Economics and Policy* 34, 169-188.
- Nasar, J.L. y Upton, K. (1997) *Landscapes of fear and stress*. *Environment and Behaviour* 29, 291-323.
- Ortúzar, J. de D. y Rizzi, L.I. (2006) *Valuation of transport externalities by stated choice methods*. En P. Coto-Millán (ed.), *Essays in Transport Economics*, Springer-Verlag, Berlín.
- Ortúzar, J. de D. y Rodríguez, G. (2002) *Valuing reductions in environmental pollution in a residential location context*. *Transportation Research* 7D, 407-427.
- Ortúzar, J. de D. y Willumsen, L.G. (2011) *Modelling Transport*. 4ª Edición, John Wiley & Sons, Chichester.
- Rizzi, L.I. y Ortúzar, J. de D. (2003) *Stated preference in the valuation of interurban road safety*. *Accident Analysis and Prevention* 35, 9-22.
- Rose, J.M. y Bliemer, M.C.J. (2009). *Constructing efficient stated choice experimental designs*. *Transport Reviews* 29, 587-617.
- Schelling, T. (1993) *The life you save may be your own*. En R. Dorfman y N. Dorfman, (eds.), *Economics of the Environment: Selected Readings*. W.W. Norton and Co., Nueva York.
- Sillano, M., Greene, M. y Ortúzar, J. de D. (2006) *Cuantificando la percepción de inseguridad ciudadana en barrios de escasos recursos*. *Eure* 32, 17-35.
- Sillano, M. y Ortúzar, J. de D. (2005) *Willingness-to-pay estimation with mixed logit models: some new evidence*. *Environment and Planning* 37A, 525-550.
- Torres, I., Greene, M. y Ortúzar, J. de D. (2013) *Valuation of housing and neighbourhood attributes for city centre location: a case study in Santiago*. *Habitat International* 39, 62-74.
- Train, K.E. (2009) *Discrete Choice Methods with Simulation*. 2ª Edición, Cambridge University Press, Cambridge.
- Veisten, K., Flügel, S., Rizzi, L.I., Ortúzar, J. de D. y Elvik, R. (2013) *Valuing casualty risk reductions from estimated baseline risk*. *Research in Transportation Economics* 43, 50-61.

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Empresas Socias

AGUAS ANDINAS S.A.

AGUAS NUEVAS S.A.

ALSTOM CHILE S.A.

ANGLO AMERICAN CHILE LTDA.

ANTOFAGASTA MINERALS S.A.

ARCADIS CHILE 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.

MINERA ESCONDIDA LTDA.

SOCIEDAD QUÍMICA Y MINERA DE CHILE S.A.

SUEZ MEDIOAMBIENTE CHILE S.A.

EMPRESAS DE INGENIERÍA COLABORADORAS

ACTIC CONSULTORES LTDA.

IEC INGENIERÍA S.A.

JRI INGENIERÍA S.A.

LEN Y ASOCIADOS INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

SYNEX INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

ZAÑARTU INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

Estar en movimiento

nos transforma y nos hace diferentes.

Sigamos avanzando y reinventándonos con lo que más te gusta.

Ahora más que nunca, seamos diferentes.



 | Conoce más en [Bci.cl](https://www.bci.cl)

