



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

UN MODELO PROBABILISTA DE PROPAGACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR
TERREMOTO A TRAVÉS DE LA ECONOMÍA

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

PRESENTA

JOSÉ ANTONO LEÓN TORRES

TUTOR

DR. MARIO GUSTAVO ORDAZ SCHROEDER

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., MARZO 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Luis Esteva Maraboto
Secretario: Dr. Eduardo Reinoso Angulo
1er Vocal: Dr. Mario Ordaz Schroeder
2do Vocal: Dr. Jaime García Pérez
3er Vocal: Dr. Servio Tulio Guillén



Esta tesis se elaboró en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM. Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, México DF.

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio, sin autorización escrita del autor.

Copyright © 2021 por: José Antonio León Torres

TUTOR DE TESIS:

DR. MARIO ORDAZ SCHROEDER

Firma

*Hay que demostrar nuestras equivocaciones
lo más pronto posible, es la única manera de avanzar.*

*Es mucho más
interesante vivir con la duda que tener
respuestas que pueden estar equivocadas.*

*La religión es una cultura de fe,
La ciencia es una cultura de duda.*

Richard Feynman

A mi familia, mi mayor fuente de inspiración.

Agradecimientos

A mi esposa Ana Laura, a mis padres Fernando y Martha, a mis hermanos Juan Fernando, Pedro, Marcela y Katy, a mis sobrinos Amelia, Lian, Victoria y Joshia, y finalmente a mi nueva abuela Mireya. Gracias por su apoyo y cariño incondicional.

Estoy profundamente agradecido con mi maestro el Profesor Mario Ordaz, con quién he tenido la suerte de colaborar durante 7 años, no solo por la supervisión crítica de esta investigación, sino por todo lo que he podido aprender de él tanto en las aulas como en el día a día.

Un agradecimiento muy especial al Profesor Eduardo Haddad de la Universidad de Sao Paulo por su invaluable orientación y apoyo brindado a lo largo de mi investigación y por transmitirme un poco de lo mucho que conoce sobre la modelación económica. Muchas gracias también al Dr. Inácio Araújo por toda su colaboración.

Agradezco a los doctores Luis Esteva, Eduardo Reinoso, Jaime García Pérez y Sergio Tulio Guillén por la revisión del manuscrito y por sus sugerencias constructivas.

Un agradecimiento a los integrantes del equipo D-RAS del Banco Mundial y de manera especial al Dr. Rashmin Gunasekera por el apoyo brindado para desarrollar proyectos de aplicación práctica a lo largo de mis estudios doctorales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado para realizar mis estudios.

Al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por el soporte y apoyo a lo largo de mi formación académica.

Finalmente a todos los buenos amigos y nueva familia que tuve el gusto de conocer a lo largo de mi estancia en México.

Un Modelo Probabilista de Propagación de las Pérdidas por Terremoto a través de la Economía

José Antonio León Torres

Resumen

Se presenta un enfoque probabilista innovador para estimar las pérdidas económicas indirectas ocasionadas por terremotos. Este trabajo constituye el primer esfuerzo para unir, de una manera probabilista y sistemática, el modelo de riesgo sísmico y la modelación de equilibrio general computable (CGE), ambos modelos robustos, conocidos y muy utilizados alrededor del mundo en sus respectivos campos. Empleando el nuevo enfoque, se calcula por primera vez un conjunto de indicadores probabilistas de riesgo, la pérdida anual esperada (AAL) y la curva de excedencia de pérdidas (LEC) con respecto a la producción, empleo, PIB, producto regional bruto, volumen de exportación, inflación, ingresos arancelarios, entre otros, debido a terremotos. Todos los indicadores se calculan a nivel regional y nacional para lo cual se utiliza una extensa colección de eventos que colectivamente describen la amenaza sísmica de todo un país. El enfoque captura no solo las consecuencias negativas de los terremotos, sino también algunos efectos económicos positivos para los cuales se propone ciertos indicadores probabilistas de ganancias. Se considera que tanto el nuevo modelo como las nuevas métricas de riesgo son útiles y complementan bien los modelos e indicadores tradicionales de riesgo de daño físico, y pueden contribuir a una mejor gestión integral del riesgo, así como en el diseño de instrumentos financieros de cobertura para gobiernos y la industria aseguradora. El nuevo modelo se aterriza en la práctica con un ejemplo desarrollado para Chile.

A Probabilistic Model of the Propagation of Earthquake Losses through the Economy

José Antonio León Torres

Abstract

An innovative probabilistic approach is presented to estimate the indirect economic consequences of the occurrence of earthquakes. This work is the first effort to join, in a systematic probabilistic way, the seismic risk and the Computable General Equilibrium (CGE) modeling frameworks, both robust and well-known models used worldwide in their respective fields. Using the new model, a set of probabilistic risk indicators are computed for the first time: the average annual loss (AAL) and the loss exceedance curve (LEC) regarding to production, employment, GDP, gross regional product, export volume, inflation, and tariff revenue, among others, due to earthquakes. All indicators are computed by considering a vast collection of events that collectively describe the entire seismic hazard of a country. The model captures not only the negative consequence of earthquakes but also some positive effects on the economy proposing new probabilistic measures of these gains. I believe that both the new model and the new risk measures are useful and complement well the traditional models and risk indicators of physical damage, and can contribute for a better integral disaster risk management as well as in designing financial hedging instruments for governments and the insurance industry. The novel approach is illustrated with an example developed for Chile.

Contenido

1.	Introducción.....	12
2.	Modelo de Riesgo Sísmico	15
3.	Modelo Económico	17
4.	Medidas del Riesgo.....	20
4.1	Medidas Usuales del Riesgo.....	20
4.2	Nuevos Indicadores de Riesgo	21
4.3	Efectos Económicos Positivos.....	21
4.4	Análisis por Escenario.....	21
4.5	Agregación de Pérdidas.....	22
4.6	Distribución de Probabilidad de las Variables Económicas	22
4.7	Paradoja de Lionel.....	23
4.8	Programa DIRAS2020	24
5.	Especificación de los Modelos CGE Interregionales Espaciales	26
6.	Análisis Teórico del Enfoque Propuesto.....	42
6.1	Simulaciones de Pérdidas de Producción	44
6.2	Cálculo de las Métricas de Riesgo por Pérdidas de Producción	46
6.3	Pérdidas de Producción Contemporáneas	46
6.4	Análisis Paramétrico y de Sensibilidad	48
6.5	Distribución de Probabilidad de las Pérdidas de Producción y Simulación de Escenarios..	51
7.	Caso Práctico de Aplicación	54
7.1	Resultados Generales	54
7.2	Nuevos Indicadores de Riesgo	63
7.3	Efectos económicos positivos	66
7.4	Resultados por escenario.....	67
8.	Conclusiones	70
9.	Referencias.....	72
10.	Anexo A. Componentes de un Modelo de Riesgo Sísmico	80
10.1	Amenaza Sísmica	80
10.2	Vulnerabilidad.....	82
10.3	Base de Datos de Exposición	85
10.4	Pérdidas Directas Individuales	85
11.	Anexo B. Modelado de Equilibrio General Computable	87

11.1	Modelación CGE Estilo MONASH	89
11.1.1	Modelos CGE Estilo Johansen	93
11.2	Principales Estructuras y Formas Funcionales Utilizadas en la Modelación CGE	95
12.	Anexo C. Modelos de Riesgo Sísmico y CGE utilizados en la investigación	101
12.1	Modelo de Equilibrio General Computable - M1.....	101
12.2	Modelo de Riesgo Sísmico – Ejercicio Teórico	109
12.3	Modelo de Riesgo Sísmico – Chile	111
13.	Anexo D. Artículo Científico	118

Lista de Figuras

Figura 4.1	Interface del programa DIRAS2020.....	25
Figura 5.1	Estructura anidada de la tecnología de producción regional.....	28
Figura 5.2	Estructura anidada de producción de unidades de stock de capital	30
Figura 5.3	Estructura anidada de la demanda regional del hogar.....	31
Figura 5.4	Relaciones de causalidad entre agentes económicos en el cerrado del modelo	39
Figura 6.1	Esquema del experimento o modelo teórico E1.....	44
Figura 6.2	Pérdidas de producción en la industria 2.	45
Figura 6.3	Resultados de riesgo – experimento teórico E1.....	46
Figura 6.4	Esquema del experimento teórico E2.	47
Figura 6.5	Resultados de riesgo – experimento teórico E2.....	48
Figura 6.6	Análisis de sensibilidad de los resultados de riesgo, caso industria afectada indirectamente por sismos.....	50
Figura 6.7	Análisis de sensibilidad de los resultados de riesgo, caso industrias directamente afectadas por sismos.....	50
Figura 6.8	Análisis de sensibilidad de los resultados de riesgo a las incertidumbres del modelo de riesgo sísmico.....	51
Figura 6.9	Distribución de probabilidad de la pérdida de producción.	52
Figura 7.1	Curva de excedencia de pérdida directas y de producción.	55
Figura 7.2	Pérdida anual esperada para Chile por sector económico.....	57
Figura 7.3	Distribución de la AAL de pérdidas de producción y pérdidas directas en Chile.	58
Figura 7.4	Pérdida anual esperada en Chile por región.....	59
Figura 7.5	Curvas de excedencia de pérdidas de producción agrupadas por sector y región.	60
Figura 7.6	Pérdida anual esperada de producción en Chile por sector económico a nivel regional. 61	
Figura 7.7	Curvas de excedencia de pérdidas de producción por sector económico para cada región de Chile.....	62
Figura 7.8	Nuevos indicadores de riesgo para Chile debido a la amenaza sísmica	64
Figura 7.9	Curvas de tasas de excedencia pérdidas para Chile referidas a los nuevos indicadores de riesgo.....	65
Figura 7.10	Cambio del índice de precio al consumidor (IPC) y pérdidas de ingresos arancelarios.....	66
Figura 7.11	Efectos económicos positivos en Chile.....	67
Figura 7.12	Curvas de excedencia de efectos positivos en Chile.....	67
Figura 7.13	Pérdidas económicas causadas en las diferentes regiones de Chile por un terremoto simulado Mw8.8, con similares características al terremoto de Maule 2010.....	68
Figura 7.14	Pérdidas económicas por sector económico y por región causadas en Chile por un terremoto simulado Mw8.8.....	69
Figura 11.1	Estructura de un modelo CGE	89
Figura 11.2	Flujo de los materiales en un modelo de equilibrio general estilizado	90
Figura 11.3	Base de datos Input-Output típica para un modelo estilo MONASH.....	92
Figura 11.4	Modelo de demanda de exportación extranjera.	100
Figura 12.1	Esquema de la estructura del modelo de equilibrio general M1.....	101
Figura 12.2	Estructuras anidadas de producción y demanda utilizadas en el modelo M1.....	102
Figura 12.3	Modelo de amenaza sísmica del experimento E1.....	109
Figura 12.4	Tasa de excedencia de aceleraciones – Modelo de Amenaza sísmica AS1.....	110

Figura 12.5 Función de vulnerabilidad estructural para las industrias 1 y 2.....	110
Figura 12.6 Modelo de exposición de edificaciones no residenciales de Chile por región.....	113
Figura 12.7 Funciones de vulnerabilidad utilizadas para Chile.	115

Lista de Tablas

Tabla 3.1 Lista de regiones y sectores económicos utilizados para Chile.....	18
Tabla 5.1 Flujos agregados en la Matriz de Absorción: Chile, 2014	41
Tabla 5.2 Parámetros de comportamiento utilizados en el modelo BMCH	41
Tabla 7.1 Valores generales de la economía chilena (2014) y principales resultados agregados.	54
Tabla 12.1 Metros cuadrados construidos por sector/región de Chile (millones de m ²)	112
Tabla 12.2 Parámetros de capacidad y daño que caracterizan cada tipo de edificio	116
Tabla 12.3 Parámetros de capacidad y daño que caracterizan cada tipo de edificio-continuación.	116

1. Introducción

Hay evidencia de que las pérdidas económicas en la producción causadas por desastres, algunas veces llamadas pérdidas indirectas, pueden ser mucho más grandes que aquellas producidas por el daño físico (GFDRR, 2012), (UN Voluntarios, 2012). Recientemente hemos atestiguado eventos catastróficos que han puesto en evidencia las implicaciones económicas y nuevas características que trae la ocurrencia de desastres. Por ejemplo, el terremoto y tsunami en el Océano Índico en 2014 ocasionó un desastre multinacional; el huracán Katrina en 2005 enfatizó los temas de gobernanza del riego de desastres y estrategias de reconstrucción y mitigación; el Terremoto en Haití en 2010 demostró claramente la vulnerabilidad económica de los países en vías de desarrollo; y el terremoto y tsunami del Este del Japón en 2011 ilustró cómo los desastres pueden propagarse en cascada. La importancia de tomar en cuenta las pérdidas indirectas en el riesgo es crucial y se hace cada vez más importante a medida que aumenta la complejidad de las cadenas de suministro en la era de la globalización. (Tierney, 1997), (Okuyama & Chang, 2004), (Rose & Huyck, 2016), (Okuyama, 2007). Sin embargo, no es fácil dar cuenta de las pérdidas económicas ocasionadas por terremotos basados únicamente en información histórica, dado que estos eventos catastróficos no son frecuentes, la información relevante es escasa y no es siempre fácil distinguir entre pérdidas directas e indirectas.

Los modelos catastróficos empelados para estudiar y cuantificar los daños físicos causados por terremotos son actualmente técnicas bastante conocidas y desarrolladas, al punto que es posible estimar, de una manera probabilista, el riesgo sísmico tanto de activos particulares (infraestructura, edificios, contenidos, maquinaria, equipo, entre otros) así como de colecciones de activos que forman parte de una ciudad, región, país, etc., (Koks, et al., 2019), (Marulanda, Carreño, Cardona, Ordaz, & Barbat, 2013), (Cardona, y otros, 2014), (Salgado-Gálvez, Zuloaga, Bernal, Mora, & Cardona, 2013). En comparación, el modelado de pérdidas indirectas ocasionadas por desastres está bastante rezagado, principalmente por la dificultad para traducir empíricamente el daño a la propiedad en pérdidas económicas indirectas, y por la falta de modelos adecuados que relacionen estas dos clases de pérdidas. Usualmente, las pérdidas indirectas son gruesamente estimadas como un porcentaje de las pérdidas indirectas, estableciendo este porcentaje con base en información empírica obtenida de una muy limitada base de datos histórica de eventos ocurridos alrededor del mundo; claramente, este proceso de estimación es insatisfactorio.

La construcción de modelos para estimar las pérdidas indirectas es considerablemente más complicado dado que, además de evaluar el daño físico, varios otros agentes entran al juego, como la interacción de empresas e industrias en la producción, decisiones públicas y privadas durante la reconstrucción y la restauración de producción, capacidad de sustitución de insumos, uso eficiente de los recursos disponibles para mantener la producción, etc.

Sim embargo, existe una literatura bien desarrollada para la estimación de los impactos económicos causados por desastres naturales y por aquellos causados por el hombre, cuyos avances más recientes han sido compilados por Okuyama y Rose (2019). Por un lado, los esfuerzos han estado enfocados en mejorar y extender los modelos cuantitativos utilizados en el análisis del impacto por desastres. El modelo básico insumo-producto (I-O, por sus siglas en inglés) se ha extendido para cubrir múltiples regiones así como la dimensión temporal del impacto. Además, mediante la integración de modelos multi regionales y programación no lineal, los investigadores han extendido el uso de modelos I-O permitiendo estudiar los efectos de los choques a la oferta y el efecto de la sustitución espacial de suministros. (Koks, Pant, Husby, Tobben, & Oosterhaven, 2019), lo que ha permitido capturar no solo impactos negativos en la economía sino también algunos impactos positivos en ciertas regiones.

En el caso de los modelos de equilibrio general computable (CGE, por sus siglas en inglés), se han incorporado los efectos de resiliencia en los procesos de producción, siendo éstos analizados desde varias perspectivas, tales como una crisis financiera, o bajo la teoría del portafolio. Se han desarrollado también modelos CGE multi regionales que son utilizados para examinar varios desastres, por ejemplo, el gran terremoto y tsunami del Este del Japón en 2011 (Kajitani & Tatano, 2019). Otros esfuerzos se han enfocado en mejorar y expandir los modelos CGE and I-O al análisis de las consecuencias económicas de ataques cibernéticos, eventos extremos del clima, terremotos, inundaciones, cambio climático, ataques terroristas, entre otros (Avelino & Hewings, 2019), (Kajitani & Tatano, 2019), (Koks, Bockarjova, de Moel, & Aerts, 2015), (Koks & Thissen, 2016), (Rose, Oladosu, & Liao, 2007). Por otro lado, algunos investigadores han desarrollado herramientas para la estimación directa de los daños y/o pérdidas económicas en base a ciertos datos físicos de las amenazas naturales (Heatowole & Rose, 2013), (Kajitani & Tatano, 2014), o para la evaluación, por ejemplo, de los cambios en la actividad económica utilizando un conjunto de información satelital del cambio anual en la intensidad de las luces nocturnas. (Raschky, 2013). Adicionalmente se han propuesto nuevos esquemas para la evaluación de desastres desde el lado de las pérdidas en el consumo o para la integración de modelos de transporte, cadenas de suministro críticas y la demanda comunitaria (Chang & Dowlatabadi, 2019).

A pesar de la existencia de esta extensa y detallada literatura sobre el estudio de los impactos por desastres, incluyendo los terremotos, los esfuerzos han estado concentrados casi exclusivamente al análisis de eventos individuales (Tirasirichai & Enke, 2007), (Rose, Oladosu, & Salvino, 2005), (Tokunga & Resosudarmo, 2017), (Kajitani & Tatano, 2018), (Rose A. , 2005), sin una apropiada consideración de su frecuencia de ocurrencia. Pero la frecuencia de ocurrencia importa. Claramente, las decisiones y políticas a tomar serían muy diferentes si se supiera que los impactos económicos de un cierto tamaño serán esperados, en promedio una vez cada 100 años o una vez cada 1000 años.

En vista de esto, en este trabajo se desarrolla un modelo probabilista de riesgo para la estimación de las consecuencias económicas indirectas causadas por terremotos que toma en cuenta que: 1) los eventos naturales, en este caso terremotos, se originan como un proceso estocástico en el tiempo; 2) la frecuencia de ocurrencia de los eventos importa en la cuantificación del riesgo; y 3) existe un vínculo entre el daño físico de los componentes de la economía y la reducción del stock de capital. La propuesta inicia con un modelo de equilibrio general computable (CGE) de la economía, especificado como un sistema interregional completamente integrado. Este modelo describe las interacciones económicas entre regiones y sectores industriales, y está en equilibrio bajo ciertos niveles de inputs, outputs y precios. Entonces, ocurre un terremoto, y produce daños físicos (pérdidas directas) en los componentes económicos asociados con el stock de capital disponible (p. ej., edificios, fábricas, infraestructura) de la parte afectada de la región; estas pérdidas son estimadas con técnicas convencionales del riesgo sísmico. (Cardona, Ordaz, Reinoso, & Yamin, 2012), (ERN-AL, 2010). Las pérdidas directas, por su parte, producen reducciones parciales en algunos de los inputs del modelo CGE, llamados stocks de capital regional-sectorial, los cuales logran un nuevo equilibrio después de ajustes adecuados, alcanzando así nuevos niveles de outputs y precios. El resultado es tal que la ocurrencia de un terremoto produce pérdidas directas más otro tipo de pérdidas indirectas que resultan de la propagación de las reducciones de los factores primarios de producción disponibles a través de la economía descrita por el modelo CGE. Así como en el caso de riesgo sísmico convencional, el análisis se repite para un extenso conjunto de temblores con frecuencia de ocurrencia conocida, el cual colectivamente describe la amenaza sísmica de la región bajo estudio. El resultado obtenido para cada uno de los terremotos permite calcular varias métricas probabilísticas, pero con la ventaja de que ahora se incluyen también los efectos de las pérdidas indirectas.

Este trabajo constituye el primer esfuerzo para unir, de una manera sistemática y probabilista, el modelo de riesgo sísmico y la modelación económica CGE, siendo ambos modelos robustos, conocidos y mundialmente utilizados en sus respectivos campos. Los modelos CGE se utilizan en casi todo el mundo para estudiar y simular efectos económicos dentro la economía, dada la ocurrencia de diferentes tipos de impactos o shocks como por ejemplo políticas económicas, impuestos, crisis financieras, mercado laboral, demografía, migración, ataques terroristas, desastres naturales, etc. En esta investigación se hace uso de un tipo especial de modelos CGE conocidos como modelos CGE espaciales, los cuales tienen la habilidad de tomar en cuenta la localización geográfica de los agentes económicos y las dotaciones.

El enfoque de modelado es totalmente probabilístico del lado de la ocurrencia de temblores, pero por ahora, es determinista del lado de la modelación económica CGE. Se asume que el daño físico produce una reducción proporcional en el valor del stock de capital de los componentes que han sido golpeados por el temblor. Esto inicialmente causa una reducción directa en la producción, la misma que posteriormente se propaga dentro de la economía de siguiente las relaciones de interconexión dictadas por el modelo CGE.

Además de abordar la estimación de las pérdidas monetarias en la producción (indirectas), la propuesta planteada en esta investigación nos brinda un mejor y más claro panorama de las posibles consecuencias de la ocurrencia de terremotos en un contexto económico completo. Como se podrá ver a lo largo de este trabajo, la riqueza del modelado CGE permite llevar a cabo estimación de riesgo respecto a múltiples variables económicas, tales como empleo, PIB, producto regional bruto (PRB), salarios, ingresos arancelarios, inflación, volúmenes de exportación, entre otros. Por otro lado, y dada la versatilidad del modelo CGE, fue posible observar y capturar ciertos efectos económicos positivos dada la ocurrencia de temblores en algunos sectores y regiones.

La nueva metodología desarrollada se aplica al estudio de Chile, un país que es frecuentemente afectado por grandes terremotos. Desde el punto de vista económico, la economía de Chile es considerada como una de las más dinámicas de Latinoamérica, mostrando notables índices de competitividad, libertad económica y desarrollo financiero. Chile además es un país con notables disparidades regionales. Estas características hacen de Chile un lugar ideal para ejemplificar el enfoque desarrollado.

En esta investigación se ha desarrollado un modelo probabilista de riesgo útil para la estimación de las consecuencias indirectas económicas causada por terremotos, El modelo une exitosamente la modelación probabilista de riesgo sísmico y la modelación CGE, permitiendo así una mirada probabilista, robusta y sistemática de las pérdidas económicas a través del cálculo de novedosas métricas estándar de riesgo para múltiples componentes de la economía. Se piensa que los nuevos indicadores de riesgo presentados por primera vez en esta investigación son muy útiles y complementarios dentro del campo de la modelación catastrófica y para una más completa administración y gestión del riesgo de desastres.

2. Modelo de Riesgo Sísmico

En primer lugar, el modelo de riesgo sísmico contiene una *base de datos de exposición* (ERN-AL, 2010), (León , 2015), (Gunasekera, y otros, 2015), (León Torres, 2019) que incluye todos los activos en riesgo que son relevantes para el análisis. En este caso, los activos relevantes son edificios, fábricas, infraestructura y, en general, todos los activos que proveen inputs de alguna clase al modelo económico. En otras palabras, todos los activos cuyos daños podrían proporcionar un impacto potencial en el flujo económico. Cada uno de los activos debe ser identificado por su localización geográfica, características de vulnerabilidad sísmica y, particularmente relevante para el propósito de esta investigación, el sector económico al cual pertenece.

En un instante aleatorio, con todos los activos intactos, y siguiendo un proceso de Poisson, el equilibrio económico se ve perturbado por la ocurrencia de un terremoto del cual conocemos sus características focales (magnitud, localización hipocentral, orientación del plano de ruptura, etc.), que a su vez genera un campo espacial aleatorio de intensidades (aceleración máxima del terreno, valores espectrales, etc.). En los modelos contemporáneos de riesgo, esta información es dada por su *componente de amenaza* (Esteva 1967, Cornell 1968, Ordaz et., al 2014). Este componente provee un extenso conjunto de eventos, cada uno asociado a una frecuencia anual de ocurrencia y a uno o más campos de intensidades aleatorias. De esta forma, el componente de amenaza proporciona información de qué tan frecuentemente tienen lugar diferentes clases de terremotos y también brinda indicadores probabilísticas de las intensidades que éstos producen. En principio, el componente de amenaza debería contener información acerca de las frecuencias de ocurrencia y la distribución de intensidades de todos los terremotos que podrían ocurrir en el futuro. En otras palabras, el conjunto de eventos debe ser colectivamente exhaustivo.

Una vez que un terremoto hipotético ha ocurrido, y su campo de intensidades es conocido, o más precisamente, las distribuciones de probabilidad de sus intensidades son conocidas, el modelo de riesgo sísmico (Ordaz M. , 2000), (Marulanda, Carreño, Cardona, Ordaz, & Barbat, 2013) proporciona herramientas para evaluar en términos probabilistas el nivel de las pérdidas directas (daños físicos) experimentados por cada uno de los activos que forman parte de la base de datos de exposición; esta parte de modelo de riesgo se conoce usualmente como *componente de pérdidas*. El nivel de daño sufrido por un activo depende de su localización, del tamaño de la intensidad en su localización y de sus características de vulnerabilidad. La vulnerabilidad de cada componente es cuantificada en el *componente de vulnerabilidad*. Así, una vez que un terremoto ha tenido lugar, tenemos medios para determinar la distribución de probabilidad de las pérdidas experimentadas por cada uno de los activos en riesgo.

En general, y en vista de la baja resolución geográfica de los modelos CGE comparada con la de los modelos de riesgo sísmico, se requiere agregar pérdidas que corresponden al mismo sector económico y a la misma región económica. En vista de que las pérdidas en los activos no son tratadas como números sino como variables aleatorias correlacionadas, el proceso de agregación no es trivial, dada la correlación entre las pérdidas para un mismo evento. En la sección 4.5 se muestra con más detalle cómo se maneja este proceso de agregación.

Por lo tanto, como se puede notar, en esta propuesta el modelo de riesgo sísmico se utiliza para determinar dos piezas importantes de información para cada uno de los miembros del conjunto de eventos: 1) la distribución de probabilidad de las pérdidas incurridas por los activos pertenecientes a todos los sectores económicos y regiones geográficas, esto es, la severidad de las pérdidas directas; y

2) la frecuencia anual con la cual ocurre cada escenario particular de pérdida. En el Anexo 10 se presenta con mayor detalle cada componente del modelo de riesgo sísmico y en el capítulo 4 veremos cómo se utiliza esta información para llevar a cabo los cálculos generales de riesgo.

Hasta aquí, el uso del modelo de riesgo sísmico difiere del tradicional en la inclusión de los sectores económicos que conforman los activos de la economía y en el proceso de agregación de pérdidas. En el siguiente capítulo veremos cómo los resultados del modelo clásico de riesgo pueden ser utilizados como inputs de la modelación económica.

3. Modelo Económico

Desde el punto de vista económico, nuestras condiciones iniciales están dados por el equilibrio de las variables económicas correspondientes al modelo de equilibrio general computable CGE. En particular, en nuestra propuesta haremos uso de un modelo CGE espacial, un tipo de modelo que tiene la habilidad de tomar en cuenta la localización geográfica de los componentes del modelo económico.

Se presenta el modelo BMCH, un modelo CGE inter-regional totalmente funcional construido para Chile, cuyas características y estructura, ejemplifican perfectamente el tipo de modelación CGE que debe ser utilizado en nuestro enfoque probabilista de estimación de las consecuencias económicas causadas por terremotos. El modelo usa un enfoque similar a los modelos MMRF (Peter M. , Horridge, Meagher, Naqvi, & Parmenter, 1996) y B-MARIA Haddad (1999), Haddad (2005), para incorporar la estructura económica interregional. La incorporación de la estructura interregional es crucial en nuestra investigación, ya que al hacerlo, indirectamente también se incorpora la estructura espacial requerida para nuestra modelación, dado que las industrias y sectores económicos son descompuestos a nivel regional. Se utiliza una matriz de absorción (Haddad, y otros, 2019) como base para calibrar el modelo CGE, conjuntamente con un conjunto de elasticidades tomadas de la literatura econométrica aplicada para Chile. Esta base de datos permite capturar los efectos de toda la economía a través de una trama intrincada de relaciones input-output tanto a nivel regional como nacional,

La versión actual del modelo BMCH reconoce la estructura económica de 15 regiones de Chile. Los resultados se basan en un enfoque de abajo hacia arriba (bottom-up), es decir, los resultados nacionales se obtienen de la agregación de los resultados regionales. El modelo identifica 12 sectores de producción/inversión en cada región, que producen 12 productos, un hogar representativo por región, gobiernos regionales y un gobierno central, y una sola área extranjera que comercia con cada región nacional. Se utilizan dos factores primarios locales en el proceso de producción, de acuerdo con las dotaciones regionales, capital y mano de obra (capital and labor). Grupos especiales de ecuaciones definen las finanzas del gobierno, las relaciones de acumulación y el mercado laboral regional. El modelo BMCH califica como un modelo tipo Johansen en el cual las soluciones se obtienen resolviendo el sistema de ecuaciones linealizadas del modelo, siguiendo la tradición australiana. Los resultados típicos muestran el porcentaje de cambio en el conjunto de variables endógenas luego que se lleva a cabo una política, comparados con sus valores en ausencia de dicha política, en un ambiente dado. En nuestro caso, los resultados mostrarán el porcentaje de cambio de las variables después de la ocurrencia de un temblor, comparadas con su valor antes del sismo. Los vínculos interregionales juegan un rol importante en el mecanismo de funcionamiento del modelo. Estos vínculos son impulsados por las relaciones comerciales (flujo de mercancías) y la movilidad de factores (migración de capital y mano de obra). En el primero caso, se incorporan los flujos comerciales interregionales; se requiere relaciones interregionales input-output para calibrar el modelo, y las elasticidades comerciales interregionales desempeñan un rol importante. (Haddad E. A., 2005). La Tabla 3.1 muestra las regiones y sectores económicos que constituyen el modelo chileno. La descripción a detalle de la estructura analítica, funcional y numérica del modelo BMCH se la presenta en el capítulo 5.

Tabla 3.1 Lista de regiones y sectores económicos utilizados para Chile

Código	Nombre de la región	Código	Nombre del sector económico
R1	Región de Arica and Parinacota	S1	Agrario - silvícola y pesca.
R2	Región de Tarapacá	S2	Minería
R3	Región de Antofagasta	S3	Industria manufacturera
R4	Región de Atacama	S4	Electricidad, gas y gestión de residuos
R5	Región de Coquimbo	S5	Construcción
R6	Región de Valparaíso	S6	Comercio, hoteles y restaurantes
R7	Región Metropolitana de Santiago	S7	Transporte, comunicaciones y servicios de información
R8	Región del Libertador General Bernardo O'Higgins	S8	Intermediación financiera
R9	Región de Maule	S9	Bienes raíces y servicios inmobiliarios
R10	Región de Biobío	S10	Servicios de negocios
R11	Región de La Araucanía	S11	Servicios personales
R12	Región de Los Ríos	S12	Administración pública
R13	Región de Los Lagos		
R14	Región de Aysén Del General Carlos Ibáñez del Campo		
R15	Región de Magallanes and Antártica Chilena		

Como se mencionó anteriormente, en nuestro enfoque la economía inicialmente se encuentra en un equilibrio dictado por el modelo CGE. Entonces, un terremoto ocurre y produce pérdidas directas cuyas distribuciones de probabilidad se determinan con el modelo de riesgo sísmico descrito en el capítulo anterior. Las pérdidas relevantes en este punto son las agregadas por sector y región (sección 4.5). Claramente, un terremoto particular es capaz de infligir daños en diferentes regiones y sectores económicos. Las regiones más cercanas al terremoto serían muy probablemente más afectadas.

Una vez agregadas, las pérdidas por sector y por región se ingresan al modelo CGE por medio de “shocks” al componente del stock de capital de las combinaciones sector/región respectivas. Estos “shocks” no son más que reducciones del stock de capital, que se calculan usualmente como el cociente entre la pérdida física y el costo total del stock de capital. Una vez que se ha ingresado el conjunto de shocks al modelo CGE, las condiciones de equilibrio del modelo se pierden, de modo que necesitamos correr el modelo CGE para conseguir un nuevo equilibrio que refleje cómo la economía se ajusta al shock recibido. La condición del nuevo equilibrio se alcanza con un nuevo conjunto de valores de las variables endógenas, que de hecho son el resultado del modelo.

Un modelo CGE puede estar constituido de cientos, miles o incluso cientos de miles de variables (exógenas y endógenas), donde cada una provee diferentes tipos de resultados, ya sea económicos o de interés social. La riqueza de los modelo CGE en términos de la cantidad de resultados es extraordinaria, lo que nos da la posibilidad de desarrollar una amplia gama de análisis. Inicialmente, nos enfocaremos en las variables que cuantifican la producción total de las industrias; después, sin embargo, utilizaremos otras variables para cuantificar pérdidas no económicas.

Definamos la pérdida de producción del sector económico i in la región espacial j , Lp_{ij} , como la diferencia de producción antes y después del sismo, para el mismo sector/región. En otras palabras, como consecuencia de la reducción del stock de capital en ciertos sectores y regiones golpeados por el sismo, la economía alcanza un nuevo equilibrio en el cual la producción de ciertos sectores o regiones es menor (o mayor...) después del terremoto que antes. Esta diferencia la consideramos como una pérdida de producción y será nuestra medida inicial de pérdida indirecta; sin embargo posteriormente exploraremos el uso de resultados relacionados a otras variables del modelo CGE.

En esta investigación, por el momento, los parámetros de comportamiento y coeficientes estructurales del modelo CGE, es decir, los parámetros y coeficientes requeridos para establecer las relaciones entre las variables económicas exógenas y endógenas, se consideran deterministas. A pesar de esto, los resultados del modelo (las pérdidas indirectas) no son números, sino variables aleatorias dado que, como vimos en el capítulo anterior, algunos de los inputs fueron variables aleatorias. Así, a pesar de ser computacionalmente desafiante, obtener las distribuciones de probabilidad de todos los outputs relevantes del modelo CGE es posible, ya sea a nivel sector/región o para cualquier tipo de agregación requerida. Para el lector interesado, la sección de 4.6 se proporciona detalles del proceso.

Llegado este punto, somos capaces de calcular las pérdidas probabilísticas directas e indirectas causadas por cualquier evento de nuestro conjunto de eventos. A continuación, en la siguiente sección, se presenta la forma en la cual vamos a calcular las nuevas métricas de riesgo haciendo uso de los resultados obtenidos hasta ahora.

4. Medidas del Riesgo

4.1 Medidas Usuales del Riesgo

Las métricas más comunes de riesgo tanto en el campo de la gestión de desastres como el ámbito del sector asegurador son: 1) la pérdida anual esperada; y 2) la curva de excedencia de pérdidas, la misma que indica la frecuencia promedio con la cual se excederían valores de pérdida dados. Por el momento, nos concentramos en las pérdidas directas y de producción. Las pérdidas totales son, lógicamente, la suma de las pérdidas experimentadas en todos los activos, esto para el caso de pérdidas directas, y de todos los sectores y regiones, para el caso de pérdidas de producción.

Suponiendo que el k -ésimo evento de nuestro conjunto de eventos produce pérdidas probabilistas directas e indirectas Ld_k y Lp_k . Entonces, las pérdidas anuales esperadas correspondientes AAL_d y AAL_p estarían dadas por:

$$AAL_d = \sum_{k=1}^{Events} E(Ld_k) F_k \quad (4.1)$$

$$AAL_p = \sum_{k=1}^{Events} E(Lp_k) F_k \quad (4.2)$$

Donde $E(.)$ denota el valor esperado y F_k la frecuencia anual de ocurrencia del evento k . La AAL_d es una cantidad rutinariamente calculada en un análisis de riesgo convencional; la AAL_p se introduce en esta investigación.

Por su parte, las curvas de excedencia, $v_d(.)$ y $v_p(.)$, de pérdidas directas y de producción, se calculan con las siguientes expresiones:

$$v_d(l) = \sum_{k=1}^{Events} \Pr(Ld_k > l) F_k \quad (4.3)$$

$$v_p(l) = \sum_{k=1}^{Events} \Pr(Lp_k > l) F_k \quad (4.4)$$

donde $\Pr(Ld_k > l)$ y $\Pr(Lp_k > l)$ son las probabilidades de las pérdidas directa y de producción de exceder un valor de pérdida dado, l . En este caso, la curva de excedencia de pérdidas de producción, $v_p(.)$, se introduce por primera vez en este trabajo.

Para llevar a cabo todos los cálculos de riesgo así como la fusión del modelo convencional de riesgo sísmico con el modelo espacial CGE, se desarrolló el programa DIRAS-2020, software especializado

en el cálculo probabilista de pérdidas indirectas desarrollado íntegramente en el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

4.2 Nuevos Indicadores de Riesgo

La riqueza del modelo CGE respecto a la cantidad de variables output de interés, cada una de las cuales refleja un aspecto diferente de la economía, nos permite calcular varios nuevos indicadores de riesgo. Para esto, además de calcular las métricas de riesgo en términos de las pérdidas de producción, nos es posible calcular medidas de riesgo respecto a la pérdida de empleo, PIB, producto regional bruto (PRB), inflación, volúmenes de exportación, ingresos arancelarios, entre otros. Estos novedosos indicadores pueden ser útiles para el manejo y gestión del riesgo sísmico, dado que nos proveen de un camino para medir las pérdidas en varios aspectos de una economía que se enfrenta la amenaza sísmica.

El procedimiento para el cálculo de las métricas probabilistas de riesgo, la AAL y la LEC, respecto a cualquier otra variable económica del modelo CGE, es exactamente el mismo que el utilizado para las pérdidas de producción, pero esta vez referido a la variable económica de interés.

4.3 Efectos Económicos Positivos

Usualmente la ocurrencia de terremotos provoca pérdidas económicas; sin embargo, sorprendentemente, pero no completamente inesperado, en ciertas regiones, uno o varios sectores económicos pueden presentar efectos positivos, como por ejemplo el incremento de la producción en una región dado el decrecimiento de la misma en otra. Este comportamiento se debe al efecto de sustitución de insumos que nuestro modelo CGE, BMCH, es capaz de modelar y que de hecho, también sucede en la realidad.

En nuestro enfoque, nos es posible medir, utilizando similares indicadores probabilistas, los efectos positivos en cada uno de los componentes de la economía que conforman nuestro modelo; en este caso las denominaremos ganancia anual esperada (AAG, por sus siglas en inglés) y curva de excedencia de ganancias (GEC, por sus siglas en inglés). Estas métricas probabilistas se calculan con las mismas expresiones dadas para las pérdidas, con la salvedad de que esta vez contabilizaremos los efectos positivos en las variables económicas en lugar de los negativos.

4.4 Análisis por Escenario

Como se ha mencionado anteriormente, el cálculo de las pérdidas de orden superior (indirectas) se lleva a cabo para un conjunto de eventos con frecuencias de ocurrencia conocidas y que colectivamente describen la amenaza sísmica de la región bajo estudio. Cada evento individual produce un escenario de daños físicos (pérdidas directas), que a su vez desencadena un escenario de pérdidas indirectas. Un escenario de pérdidas indirectas contiene las pérdidas experimentadas en cada una de las variables económicas que forman parte de nuestro modelo CGE, expresadas mediante variables aleatorias. Si consideramos como unitaria a las frecuencias de ocurrencias de cada evento de nuestro conjunto de eventos, al aplicar la ecuaciones (4.2) y (4.4), por ejemplo, para el caso de la

variable producción, obtenemos la pérdida esperada y la probabilidad de excedencia de pérdidas de producción (ya no frecuencias anuales de excedencia) para cada escenario en cuestión.

La capacidad de analizar eventos y escenarios estocásticos de pérdidas indirectas, especialmente aquellos más críticos, puede resultar de gran utilidad para la administración y gestión del riesgo, dado que sus resultados, por ejemplo, en términos del valor esperado de la pérdida, podrían tener aplicaciones importantes en el diseño y planeación de las estrategias económicas pos y pre desastre, mitigación de pérdidas, ampliación y/o diseño de nuevos instrumentos financieros de cobertura económica, como seguros tradiciones y paramétricos, bonos catastróficos, etc., pero referidos a las pérdidas indirectas.

4.5 Agregación de Pérdidas

Generalmente, y en vista de la baja resolución espacial de los modelos CGE en comparación con los modelos de riesgo sísmico, se hace necesario realizar una agregación de las pérdidas con el objetivo de sumar todas las pérdidas correspondientes al mismo sector económico y a la misma región geográfica. Este proceso hace posible estimar las pérdidas que el stock de capital de cada sector/región experimentará por la ocurrencia de un temblor. Dado que en nuestro enfoque las pérdidas en los diferentes activos no son números sino variables aleatorias, el proceso de agregación no es trivial, debido a la correlación entre las pérdidas para un mismo evento. Así, la pérdida agregada L_A es una nueva variable aleatoria asumida con distribución Beta, cuyo valor esperado $E(L_A)$ y desviación estándar $VA(L_A)$ están dadas por:

$$E(L_A) = \sum_j E(L_j) \quad (4.5)$$

$$VAR(L_A) = \sum_j VAR(L_j) + \sum_j \sum_k \rho \sqrt{VAR(L_j)VAR(L_k)} \quad j \neq k \quad (4.6)$$

donde $E(L_j)$ y $VAR(L_j)$ son el valor esperado y la desviación estándar de la pérdida experimentada por el activo j perteneciente al mismo sector económico y a la misma región geográfica y ρ es el coeficiente de correlación entre pares de pérdidas. En este punto, nuestro enfoque asume que la nueva pérdida agregada es una medida razonable de la pérdida total (o daño) sufrido por el stock de capital de un sector económico perteneciente a una región geográfica específica. Para el lector interesado, las expresiones para el cálculo de $E(L_j)$ y $VAR(L_j)$ se exponen en la sección de anexos 10.4.

4.6 Distribución de Probabilidad de las Variables Económicas.

Para obtener las distribuciones de probabilidad de todas las variables económicas relevantes del modelo CGE, ya sea a nivel sectorial/regional o para cualquier grado de agregación requerido, dada

la ocurrencia de un temblor en particular, sugerimos tres estrategias de simulación que nos permiten propagar las incertidumbres de las pérdidas directas a través de la economía (modelo CGE) y posteriormente calcular las distribuciones de probabilidad de las variables económicas deseadas. Las presentamos en orden de mayor a menor requerimiento computacional. La primera opción de simulación es llevar a cabo un número suficiente de simulaciones de Monte Carlo para obtener las distribuciones de probabilidad de todos los variables output relevantes del modelo CGE. Esta opción no requiere de suposiciones adicionales y es la más precisa. Sin embargo, el requerimiento computacional es extremadamente alto, en nuestro ejemplo de Chile, tenemos 160 variables aleatorias de pérdidas directas que necesitamos propagar a través del modelo CGE. La segunda opción propone realizar un número suficiente de simulaciones de Monte Carlo hasta ser capaces de determinar los dos primeros momentos estadísticos de las variables output con un nivel de precisión aceptable. A pesar de un menor esfuerzo computacional, esta opción requiere asumir el tipo de distribución de probabilidad de las variables económicas de salida (sugerimos asumir las tipo Beta). En la sección 6.5 se muestra teóricamente que la distribución de probabilidad de las pérdidas económicas obtenidas luego de propagar las incertidumbres provenientes del modelo de riesgo sísmico a través del modelo CGE se acerca bastante a una distribución Beta. La última estrategia es la que menos poder de cómputo requiere, aunque implica dos suposiciones relevantes: 1) el tipo de distribución de probabilidad y 2) la existencia de determinado grado de correlación entre las pérdidas directas ante la ocurrencia de un mismo evento. La estrategia consiste en concentrar cada distribución de probabilidad de las pérdidas directas en una función de probabilidad de dos puntos, mediante el uso de las expresiones dadas por Rosenblueth (1981), lo cual convierte el tema en un problema de combinatoria. Asumiendo una alta correlación entre las pérdidas directas, es razonable y conservador utilizar solo dos combinaciones de pérdidas directas, una con todas las concentraciones w_1 y otra con todas las concentraciones w_2 . En otras palabras, para cada temblor, solo necesitamos correr dos simulaciones. Las expresiones de Rosenblueth finalmente permiten determinar los dos primeros momentos estadísticos de las pérdidas de las variables output del modelo CGE. De esta manera, las distribuciones de probabilidad de los outputs del modelo CGE quedan completamente definidas.

En el enfoque propuesto, el procedimiento para obtener las distribuciones de probabilidad de las variables económicas se debe repetir para cada uno de los eventos estocásticos que conforman el componente de amenaza sísmica. En nuestro caso práctico de estudio, hemos calculado las distribuciones de probabilidad de las variables económicas para los 44,350 eventos estocásticos que conforman el modelo de amenaza sísmica de Chile. Se decidió aplicar la última estrategia de simulación aceptando como razonables y conservadoras, para los fines de evaluación del riesgo, las suposiciones realizadas.

4.7 Paradoja de Lionel

En la teoría del riesgo, se va a definir como la paradoja de Lionel al efecto que el rango de la distribución beta, o de cualquier distribución de probabilidad finita, utilizada para modelar la distribución de probabilidad de las pérdidas, tiene en el cálculo de la curva de excedencia de pérdidas. Una distribución beta queda completamente definida si se conocen tres parámetros, el valor esperado, la desviación estándar y su rango. Con el modelo convencional de riesgo sísmico se puede calcular el valor esperado y la desviación estándar de la pérdida individual y/o agregada de los activos, mientras que su rango está dado por el máximo valor posible de pérdida que un activo o colección de

activos pueden experimentar. Así, la elección del valor máximo de pérdida tiene influencia en la distribución de probabilidad de las pérdidas y con ello en la curva de excedencia de pérdidas.

Desde el punto de vista absoluto, la cantidad total posible de pérdida, ante la ocurrencia de cualquier evento sísmico, es una cantidad única e invariante (por ejemplo, el daño de todos los edificios de la región); sin embargo, si se analiza la pérdida desde un punto de vista relativo al evento que la desencadena, el daño total posible se restringirá a contabilizar aquellos activos que tienen alguna posibilidad de ser dañados.

Supongamos un área geográfica en la que existen solo 2 elementos o activos susceptibles de sufrir daños por la ocurrencia de terremotos, uno ubicado junto al borde norte y el otro junto al borde sur, separados por 10,000 Km. La cantidad total de daño que podría ocurrir en esta región sería la destrucción total de los dos activos. Sin embargo, ante la ocurrencia de terremotos diferentes, por ejemplo, uno con epicentro al norte del área geográfica y otro con epicentro al sur, el daño máximo posible, para cada evento en particular, será la destrucción total de uno solo de los activos, dado que los dos no se pueden afectar juntos (están separados 10,000 Km). Los resultados de la curva de excedencia de pérdidas de la región serán en principio distintos si decimos que la pérdida máxima posible considera el daño total de los dos activos o el de uno solo de ellos. Este efecto es precisamente un ejemplo de la paradoja de Lionel. La paradoja de Lionel también se podría dar al evaluar diferentes tipos de amenazas naturales, dado que la pérdida máxima que un activo puede experimentar es también relativa al tipo de evento que la desencadena, por ejemplo, para sismo podría tener un valor y para huracán, otro.

En el caso de las pérdidas económicas indirectas, la paradoja de Lionel también se presenta, aunque su efecto es menos importante que para el caso de pérdidas directas (pérdidas por daños físicos de activos), dada la interconexión que existe entre los agentes económicos. Esta interconexión hace que cualquier disturbio en alguno de los agentes, sin importar su ubicación geográfica, tenga repercusiones en la mayor parte de la economía. Si bien es cierto que ante la ocurrencia de un evento podrían existir agentes económicos con un muy pequeño o casi nulo disturbio, la consideración de un valor máximo de pérdida absoluto y no relativo al evento parece no causar grandes cambios en las distribuciones de probabilidad beta de las pérdidas y subsecuentemente, en las curvas de excedencia de pérdidas. En el caso que quisieran estrictamente considerar el efecto de la paradoja de Lionel en las pérdidas indirectas, el parámetro discriminante para el cálculo de las pérdidas máximas posibles relativas (al evento) no sería su ubicación geográfica (como en el caso de las pérdidas directas), sino un valor umbral mínimo de daño. Este valor umbral identificaría a aquellos agentes que sí tienen la posibilidad de ser dañados ante la ocurrencia del evento.

4.8 Programa DIRAS2020

El programa DIRAS2020 es una herramienta de computación especializada en el cálculo probabilista del riesgo y las consecuencias económicas indirectas causadas por la ocurrencia de desastres naturales. El programa está construido en el entorno de Visual.net y ha sido desarrollado en su totalidad en el Instituto de Ingeniería de la UNAM como parte de este trabajo doctoral. La Figura 4.1 presenta la interface del programa.

DIRAS2020 es compatible con los archivos de resultado proporcionados por el programa CAPRA-GIS (<https://ecapra.org/es>), software especializado en la evaluación probabilista de las pérdidas directas causadas por desastres naturales y también interactúa con el software GEMPACK

(<https://www.copsmodels.com/gempack.htm>), una de las herramientas de modelación económica más conocidas y difundidas a nivel mundial para el manejo de modelos de equilibrio general CGE. De hecho, DIRAS2020 es capaz de configurar y operar algunos de los procesos del software GEMAPCK desde su interface.

El programa calcula la pérdida anual esperada (AAL) y curvas de excedencia de pérdidas (LEC) para una gran cantidad de variables económicas como la producción, PIB, empleo, importaciones, exportaciones, impuestos, aranceles, etc., causado por una amenaza natural, por ejemplo la amenaza sísmica. El cálculo probabilista de las métricas de riesgo se lo puede realizar con diferentes niveles de agregación geográfica y/o sectorial, por ejemplo podemos la curva LEC para el sector comercial de la Región Metropolitana de Santiago. DIRAS2020 además genera escenarios de pérdidas indirectas para cualquier variable económica, almacenando esta información en unos archivos especiales denominados archivos PER.

Para una más completa descripción de los impactos económicos indirectos causados por los desastres naturales, DIRAS2020 no solo cálculos impactos económicos negativos sino también calcula métricas probabilistas ligadas a impactos económicos positivos como se describió en la sección 4.3.

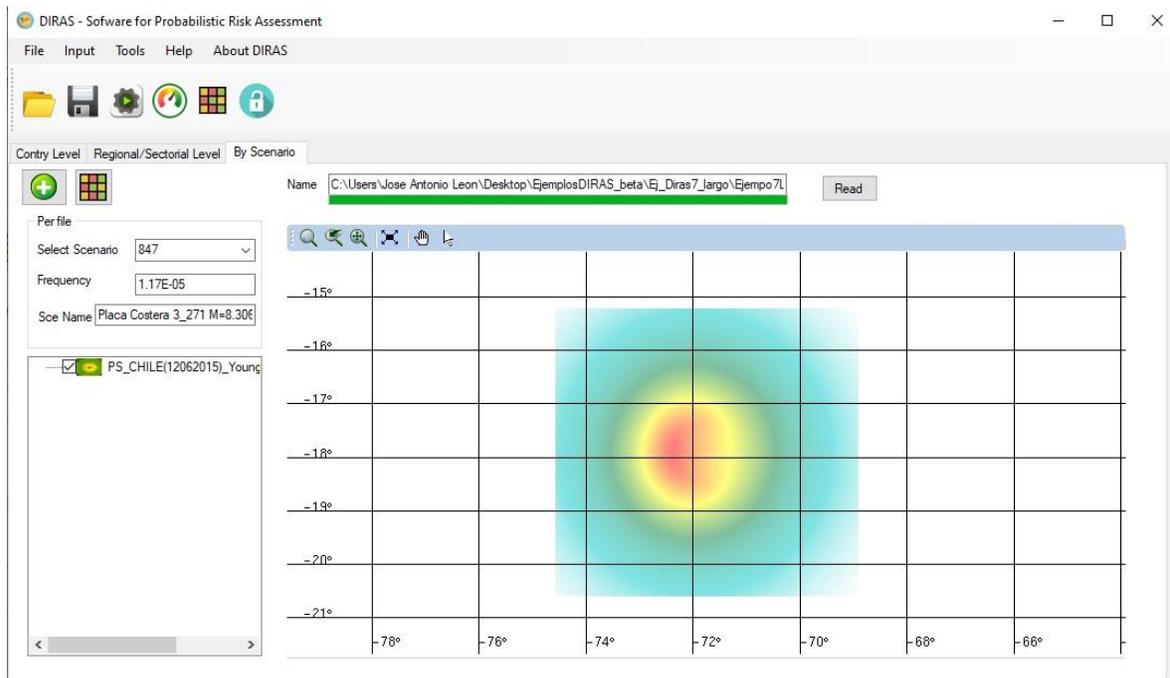


Figura 4.1 Interface del programa DIRAS2020.

Herramienta computación especializada en el cálculo probabilista del riesgo y las pérdidas indirectas causadas por la ocurrencia de desastres naturales.

Una versión del programa DIRAS2020 útil para la reproducción de los resultados presentados en esta investigación se la puede descargar de <https://github.com/JALeonTorres/RAPELE->

5. Especificación de los Modelos CGE Interregionales Espaciales

En este capítulo se presenta la estructura y características principales de los modelos CGE interregionales (espaciales) que pensamos son los más adecuados para fines de estimar el riesgo y las pérdidas indirectas ocasionadas por terremotos. Las presentamos a través de un ejemplo práctico de aplicación desarrollado para Chile, cuyo modelo se denomina BMCH. Esta forma de modelado CGE ha sido diseñada por el Núcleo de Economía Regional y Urbana (NEREUS) de la Universidad de Sao Paulo siguiendo el estilo de modelación CGE - MONASH. Para el lector interesado, en la sección de anexos 11 se presenta un resumen de la modelación CGE y CGE estilo MONASH, sus principales características y desarrollos.

El modelo BMCH (Haddad, y otros, 2019) es un modelo multiregional y multisectorial estilo Johansen con un enfoque de simulación comparativo estático, en el cual cada región espacial (regional) es modelada como una economía por su derecho propio; existen precios específicos regionales y las industrias son específicas de cada región así como también los consumidores. Por su parte, el comportamiento a nivel nacional es la suma de resultados regionales. La base de datos I-O interregional utilizada por BMCH (Haddad, y otros, Interregional Input-Output System for Chile, 2014, 2018) toma en cuenta el comercio interregional, intrarregional e internacional lo que nos permite una representación, entre otras, de las cuentas financieras del gobierno central y gobiernos regionales. Los bloques de construcción de los cuales se hace uso en un modelo BMCH son: la demanda de insumos por parte de los productores, demanda de inversores, demanda de hogares, demanda de exportaciones, demandas de los gobiernos (central y regionales), condición de beneficios cero, impuestos indirectos, compensación del mercado, variables macroeconómicas regionales y nacionales e índice de precios, acumulación de capital e inversión y población regional y mercado laboral. Cada bloque se presenta en detalle a lo largo de esta subsección. Las formas funcionales y estructuras teóricas empleadas para derivar las funciones de demanda óptimas utilizadas en las diferentes etapas de agregación de las funciones anidadas de producción y consumo del modelo BMCH se exponen en el anexo 11.2.

A continuación, se presenta la estructura analítica, funcional y numérica del modelo interregional de equilibrio general para Chile, el modelo BMCH. La especificación de la forma linealizada del modelo se proporciona en base a diferentes grupos de ecuaciones. La notación convencional utiliza letras mayúsculas para representar los niveles de las variables y las minúsculas para su representación en porcentaje de cambio. Los superíndices (u), $u = 0, 1j, 2j, 3, 4, 5, 6$ se refieren, respectivamente, al output (0) y a los 6 diferentes usuarios específicos regionales de los productos identificados en el modelo: los productores en el sector j ($1j$), inversores en el sector j ($2j$), hogares (3), compradores de exportaciones (4), gobiernos regionales (5) y gobierno central (6). Adicionalmente se especifica un séptimo usuario residual (7), para hacer frente a las discrepancias en el balance de la matriz de absorción del modelo en base al sistema interregional input-output (IIO) Chileno. El segundo superíndice (r) identifica la región doméstica donde se localiza el usuario. Los inputs se identifican mediante dos subíndices: el primero (i) toma los valores $1, 2, \dots, g$, para las commodities, y $g + 1$, para los factores primarios; el segundo subíndice identifica la fuente del input, pudiendo ser de la región doméstica b ($1b$) o importado (2), o procedente de la mano de obra (1) o del capital (2), los dos factores primarios del modelo. El símbolo (\bullet) se emplea para indicar la suma sobre un índice.

Definimos los siguientes conjuntos: $G = \{1, \dots, g\}$ donde g es el número de bienes compuestos; $G^* = \{1, \dots, g, g + 1\}$, donde $g + 1$ es el número de bienes compuestos y factores primarios, con $G^* \supset G$; $H = \{1, \dots, h\}$, donde h es el número de industrias; $U = \{(3), (4b), (5), (6), (kj)\}$ para $k = (1), (2)$

y $j \in H$, es el set de todos los usuarios del modelo; $U^* = \{(3), (5), (6), (kj)\}$ para $k = (1), (2)$ y $j \in H$ con $U \supset U^*$ es el subconjunto de usuarios domésticos; $S = \{1, \dots, r, r+1\}$, donde $r+1$ es el número de todas las regiones (incluyendo la foránea); $S^* = \{1, \dots, r\}$ con $S \supset S^*$, es el subconjunto con las r regiones domésticas; y $F = \{1, \dots, f\}$ es el conjunto de factores primarios. En el modelo BMCH, $g = h = 12$, $r = 15$, y $f = 2$.

La Figura 5.1 ilustra la estructura básica de tecnología de producción adoptada por el modelo BMCH. El abastecimiento de bienes compuestos se modela en base a una estructura multinivel, la cual permite un gran número de posibilidades de sustitución. Se hace uso de funciones de abastecimiento anidadas para la creación de los bienes compuestos, los cuales están disponibles para consumo en las regiones del modelo. Asumimos que los usuarios de los bienes domésticos, i.e. empresas, inversores, hogares, y gobierno, utilizan combinaciones de bienes compuestos especificados dentro de dos niveles de nidos CES. En el nivel inferior, los paquetes de bienes domésticamente producidos se forman como una combinación de los bienes provenientes de diferentes fuentes regionales. En el nivel superior, la sustitución es posible entre los bienes de producidos nacional y los bienes importados. Las Ecuaciones (A1) y (A2) describen, respectivamente, el abastecimiento regional de los bienes domésticos, y la sustitución entre los productos domésticos e importados.

$$x_{(i(1b))}^{(u)r} = x_{(i(1\bullet))}^{(u)r} - \sigma 1_{(i)}^{(u)r} \left(p_{(i(1b))}^{(u)r} - \sum_{l \in S^*} \left(\frac{V(i, 1l, (u), r)}{V(i, 1\bullet, (u), r)} \right) \left(p_{(i(1l))}^{(u)r} \right) \right)$$

$$i \in G; b \in S^*; (u) \in U^*; r \in S^* \quad (A1)$$

Donde $x_{(i(1b))}^{(u)r}$ es la demanda del usuario (u) en la región r del bien i proveniente de la región doméstica ($1b$); $p_{(i(1b))}^{(u)r}$ es el precio pagado por el usuario (u) en la región r por el bien i de la región doméstica ($1b$); $\sigma 1_{(i)}^{(u)r}$ es un parámetro que mide la elasticidad de sustitución específica del usuario entre las fuentes domésticas alternativas de la commodity i , conocida como la elasticidad Armington de comercio regional; y $V(i, 1l, (u), r)$ es un coeficiente de flujo input-output que mide el valor de los compradores del bien i proveniente de la fuente doméstica l utilizada por el usuario (u) en la región r .

$$x_{(is)}^{(u)r} = x_{(i\bullet)}^{(u)r} - \sigma 2_{(i)}^{(u)r} \left(p_{(is)}^{(u)r} - \sum_{l=1\bullet, 2} \left(\frac{V(i, l, (u), r)}{V(i, \bullet, (u), r)} \right) \left(p_{(il)}^{(u)r} \right) \right)$$

$$i \in G; s = 1\bullet, 2; (u) \in U^*; r \in S^* \quad (A2)$$

Donde $x_{(is)}^{(u)r}$ es la demanda del usuario (u) en la región r ya sea del bien doméstico compuesto o foráneo i ; $p_{(is)}^{(u)r}$ es el precio pagado por el usuario (u) en la región r ya sea del bien doméstico compuesto o del foráneo i ; $\sigma 2_{(i)}^{(u)r}$ es un parámetro que mide la elasticidad de sustitución específica del usuario entre el paquete doméstico e importaciones del bien i , conocido como elasticidad de Armington de comercio internacional; y $V(i, l, (u), r)$ es un coeficiente de flujo input-output que mide el valor de los compradores del bien i proveniente ya sea de una fuente doméstica agregada o de una fuente foránea l utilizada por el usuario (u) en la región r .

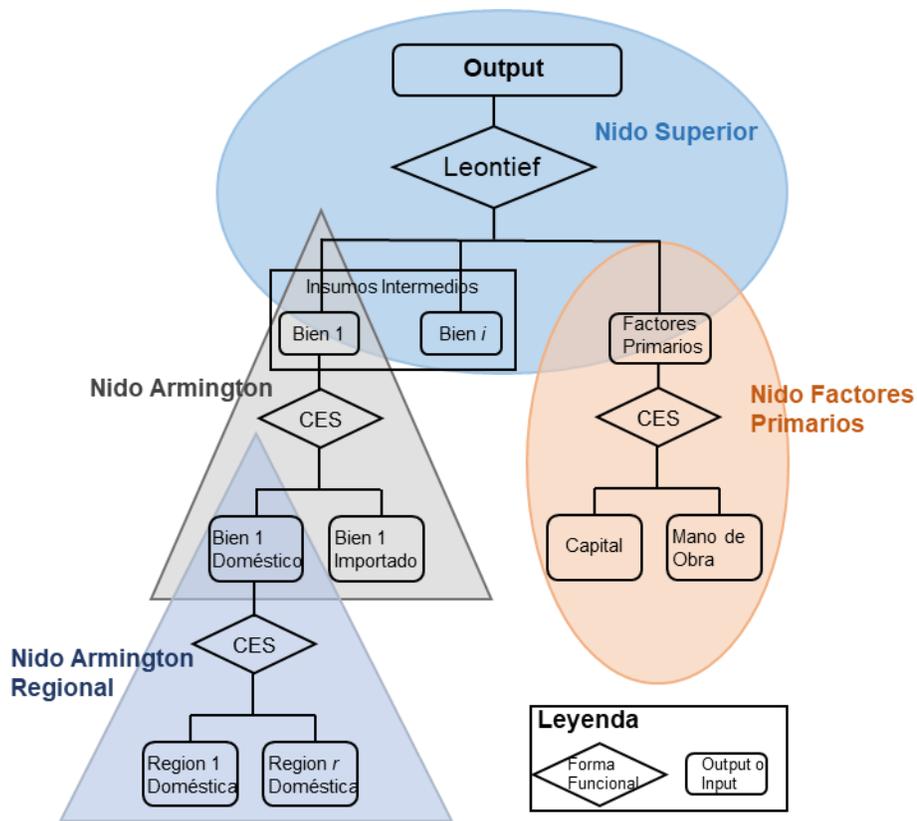


Figura 5.1 Estructura anidada de la tecnología de producción regional

Se muestra cada una de las etapas de agregación utilizadas por una industria, en su respectiva región, para la producción de su respectivo output.

Además de los bienes utilizados como insumos intermedios, las empresas en el modelo también demandan factores primarios de producción. Las ecuaciones que describen las demandas de insumos de la industria j se derivan bajo el supuesto de tecnología de Leontief con nidos Armington (sustitución imperfecta entre insumos del mismo tipo provenientes de fuentes diferentes). En nuestra especificación de funciones anidadas de producción, asumimos que las empresas utilizan combinaciones de bienes intermedios compuestos, formados de acuerdo a las ecuaciones (A1) y (A2), y factores primarios compuestos. En el caso del paquete de factores primarios, la sustitución es posible entre los diferentes tipos de factores primarios. La ecuación (A3) especifica la sustitución el mano de obra y el capital que utiliza el modelo, y se deriva bajo la suposición de que las industrias eligen sus insumos de factores primarios para minimizar los costos, sujetas a la condición de que obtengan los suficientes insumos de factores primarios para satisfacer sus requerimientos tecnológicos (especificación anidada de Leontief/CES). Hemos incluido variables de cambio técnico para permitir shocks de productividad a factores específicos. Se ha modelado la combinación de insumos intermedios y valor agregado (factores primarios) agregados en proporciones fijas, en la parte superior de la estructura anidada de producción, asumiendo que no hay sustitución entre factores primarios y otros inputs. La especificación de Leontief se presenta en la ecuación (A4) y corresponde al nudo superior de la Figura 5.1. Las formas funcionales más flexibles rara vez se introducen en los modelos multi-regionales, principalmente debido a las limitaciones de disponibilidad de datos.

Además de un coeficiente técnico en la relación entre la demanda sectorial del compuesto de factores primarios y la producción total, también hemos incluido un parámetro escalar. Este procedimiento de modelado se base en estudios previos realizados por Haddad and Hewings (2005) el cual permite la introducción de economías de aglomeración (externas) marshallianas, mediante la exploración de propiedades locales de la función CES.

$$x_{(g+1,s)}^{(1j)r} - a_{(g+1,s)}^{(1j)r} = a_{(g+1,\bullet)}^{(1j)r} x_{(g+1,\bullet)}^{(1j)r} - \sigma 3_{(g+1)}^{(1j)r} \left(p_{(g+1,s)}^{(1j)r} + a_{(g+1,s)}^{(1j)r} - \sum_{l \in F} \left(\frac{V(g+1,l,(1j),r)}{V(g+1,\bullet,(1j),r)} \right) \left(p_{(g+1,l)}^{(1j)r} + a_{(g+1,l)}^{(1j)r} \right) \right)$$

$$j \in H; s \in F; r \in S^* \quad (A3)$$

donde $x_{(g+1,s)}^{(1j)r}$ es la demanda del sector j en la región r para cada factor primario; $a_{(g+1,s)}^{(1j)r}$ es la variable (ahorro) exógena de cambio técnico para el factor primario s en la región r , del sector específico; $p_{(g+1,s)}^{(1j)r}$ es el precio pagado por el sector j en la región r por el factor primario s ; $\sigma 3_{(g+1)}^{(1j)r}$ es un parámetro de cada sector específico que mide la elasticidad de sustitución entre los diferentes factores primarios; y $V(g+1,l,(1j),r)$ es un coeficiente de flujo input-output que mide el valor de los compradores del factor l utilizado por el sector j en la región r .

$$x_{(i,\bullet)}^{(1j)r} = \mu_{(g+1,\bullet)}^{(1j)r} z^{(1j)r} + a_{(i)}^{(1j)r}$$

$$j \in H; i \in G^*; r \in S^* \quad (A4)$$

donde $x_{(i,\bullet)}^{(1j)r}$ es la demanda del sector j en la región r para los paquetes de insumos intermedios compuestos y factores primarios i ; $z^{(1j)r}$ es la producción total del sector j en la región r , $a_{(i)}^{(1j)r}$ es la variable exógena del cambio técnico para insumos intermedios compuestos y factores primarios en la región r , del sector específico; y $\mu_{(i,\bullet)}^{(1j)r}$ es un parámetro de escala que mide los retornos específicos del sector a la composición de los factores primarios de cada región.

En el caso de las unidades de stock de capital, la Figura 5.2 ilustra la estructura tecnológica de creación de unidades de stock de capital, done cada industria j lo crea a un mínimo costo. Las commodities se combinan vía una función de Leontief, como lo especifica la ecuación (A5). Como lo describe las ecuaciones (A1) y (A2), tanto las commodities regionales, como domésticas e importadas se combinan, respectivamente, vía una especificación CGE (suposición Armington). Los factores primarios no se utilizan en la creación de capital. El uso de estos insumos se reconoce en el modelo a través de los sectores productores de bienes de capital, principalmente industrias de maquinaria y equipo, construcción, y servicios de asistencia. La determinación del número de unidad de capital que se formara en cada industria regional (cantidad total invertida) depende de la naturaleza del experimento en curso. En nuestro caso, para simulaciones estáticas comparativas a corto plazo (uno o dos años después del shock económico), las inversiones en los stocks de capitales regionales y el nacional agregado son exógenamente determinadas como se puede en la Figura 5.4. La inversión agregada se distribuye entre las industrias regionales en base a las tasas relativas de rendimientos.

$$x_{(i\bullet)}^{(2j)r} = z^{(2j)r} + a_{(i)}^{(2j)r}$$

$$j \in H; i \in G; r \in S^*$$
(A5)

donde $x_{(i\bullet)}^{(2j)r}$ es la demanda del sector j en la región r para los paquetes de bienes compuestos de capital i ; $z^{(2j)r}$ es la inversión total del sector j en la región r ; $a_{(i)}^{(2j)r}$ es la variable exógena específica del sector de cambio técnico para cambiar la composición de las unidades de capital sectorial en la región r .

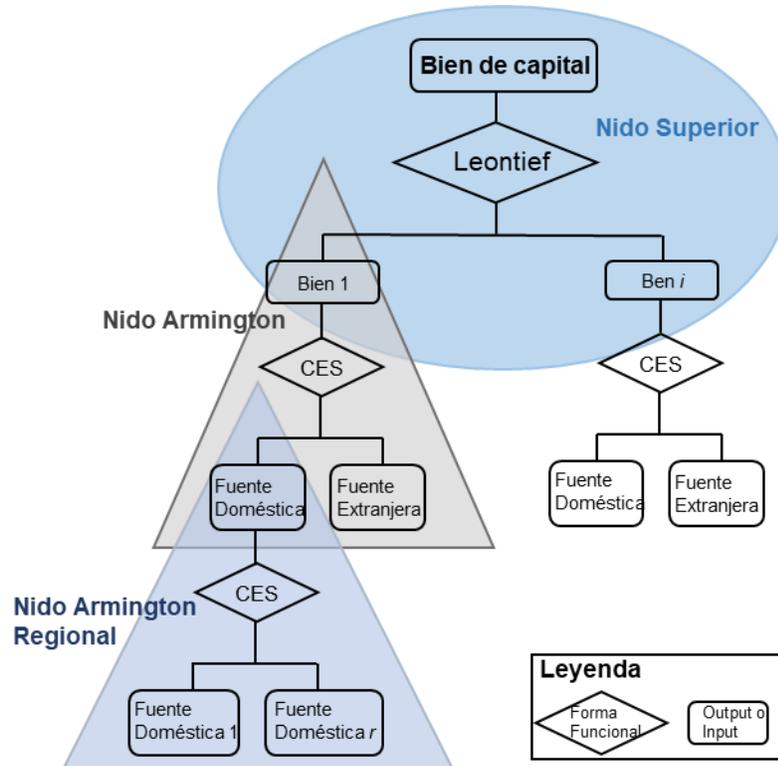


Figura 5.2 Estructura anidada de producción de unidades de stock de capital

Se muestra cada una de las etapas de agregación utilizadas por las industrias, en su respectiva región, para general unidades nuevas de stock de capital.

La Figura 5.3 presenta la estructura anidada de la demanda regional del hogar utilizado en el modelo BMCH. Al derivar las demandas de commodities compuestos por parte del hogar, asumimos que los hogares en cada región se comportan como una entidad singular que maximiza su utilidad sujeta a una restricción de presupuesto. La función de utilidad es de la forma Stone-Geary o Klein-Rubin (ver sección 11.2). La ecuación (6) determina la composición óptima de la demanda del hogar en cada región. Las demandas de paquetes de commodities en la estructura anidada de la demanda del hogar permite el patrón CES establecido en la ecuación (A1) y (A2), en el cual una variable de actividad y un término de sustitución de precios juegan el rol más importante. En la ecuación (6), el consumo de cada commodity i depende de dos componentes: el primero, el componente de subsistencia, el cual se define como el requisito de gasto mínimo de cada commodity, los cambios en la demanda se

generan por cambios en el número de hogares y gustos.; el segundo, por el lujo o por la parte supernumeraria de los gastos en cada bien, la demanda se mueve con cambios en gastos supernumerarios regionales, cambios en los gustos, y cambios en el precio de la commodity compuesta. Los dos componentes de los gastos del hogar en las commodities compuestas son ponderados por su respectiva participación en el consumo total de la commodity compuesta. Así, una función de consumo Keynesiana determina el gasto familiar regional en función de la renta disponible del hogar.

$$\begin{aligned}
 V(i, \bullet, (3), r) & \left(p_{(i\bullet)}^{(3)r} + x_{(i\bullet)}^{(3)r} - a_{(i\bullet)}^{(3)r} \right) \\
 & = \gamma_{(i)}^r P_{(i\bullet)}^{(3)r} Q^r \left(p_{(i\bullet)}^{(3)r} + x_{(i\bullet)}^{(3)r} - a_{(i\bullet)}^{(3)r} \right) \\
 & + \beta_{(i)}^r \left(C^r - \sum_{j \in G} \gamma_{(j)}^r P_{(j\bullet)}^{(3)r} Q^r \left(p_{(j\bullet)}^{(3)r} + x_{(j\bullet)}^{(3)r} - a_{(j\bullet)}^{(3)r} \right) \right)
 \end{aligned}$$

$i \in G; r \in S^*$ (A6)

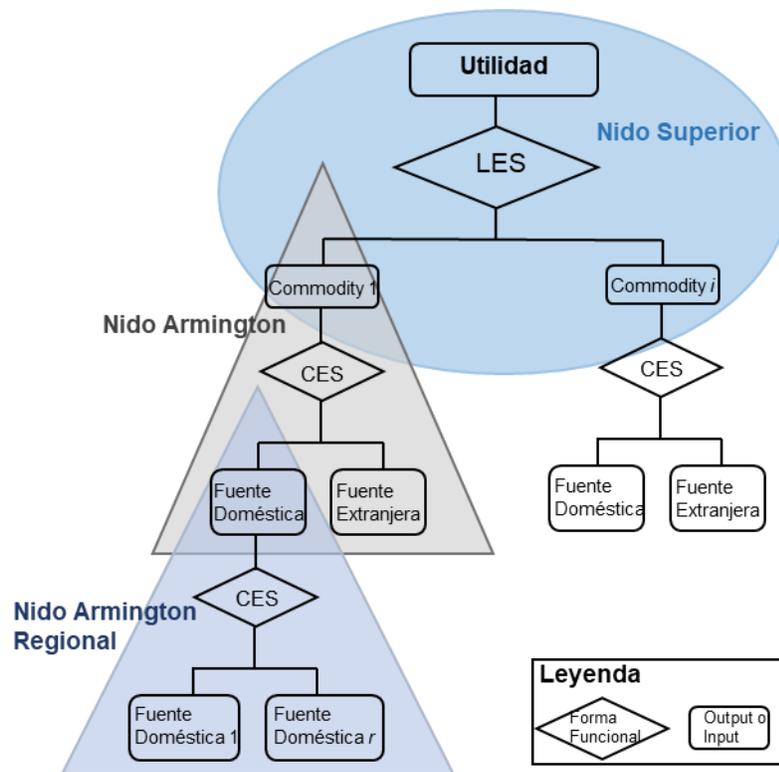


Figura 5.3 Estructura anidada de la demanda regional del hogar

Se muestra cada una de las etapas de agregación utilizadas por el hogar, en su respectiva región, para la selección de las commodities que consume.

Donde $p_{(i\bullet)}^{(3)r}$ es el precio pagado por el hogar en la region r por el bien compuesto i ; $x_{(i\bullet)}^{(3)r}$ es la demanda del hogar en la region r del bien compuesto i ; $a_{(i\bullet)}^{(3)r}$ variable específica de la commodity del cambio en el gusto regional; Q^r es el número de hogares en la región r ; C^r es el gasto total por hogar en la región r , el cual es proporcional al ingreso laboral (por mano de obra) regional; $\gamma_{(i)}^r$ es el parámetro de subsistencia en el sistema de gasto lineal para la commodity i en la región r ; $\beta_{(i)}^r$ es el parámetro definido para la commodity i en la región r que mide las participaciones marginales en el presupuesto en el sistema de gasto lineal; y $V(i, \bullet, (3), r)$ es un coeficiente de flujo input-output que mide el valor de los compradores del bien i consumido por los hogares en la región r .

Como lo señala Peter et al., (1996), una característica de la función de utilidad Stone-Geary es que solo el componente por encima de la subsistencia (o lujo) del consumo real del hogar, $utility^{(r)}$, afecta la utilidad por hogar, como lo describe la ecuación (7).

$$utility^{(r)} = \left(C^r - \sum_{j \in G} \gamma_{(j)}^r P_{(j\bullet)}^{(3)r} Q^r \left(p_{(j\bullet)}^{(3)r} + x_{(j\bullet)}^{(3)r} - a_{(j\bullet)}^{(3)r} \right) \right) - q^r - \sum_{i \in G} \beta_{(i)}^r p_{(i\bullet)}^{(3)r}$$

$r \in S^*$ (A7)

Donde q^r es el porcentaje de cambio en el número de hogares en cada región.

En el caso de las exportaciones, estas se modelan mediante funciones individuales de demanda extranjera con pendiente negativa (ver anexos, sección 11.2) y además se considera que existe distinción de la región del país desde la cual proviene la exportación. En la ecuación (A8), la demanda foránea (exportaciones) del bien domestico i depende del porcentaje de cambio en el precio, y de tres variables de turno las cuales permites movimientos verticales y horizontales en las curvas de demanda. La variable de precio que influencia las demandas de exportación es el precio del comprador en países extranjeros, el cual incluye los impuestos y márgenes relevantes. El parámetro $\eta_{(is)}^r$ controla la sensibilidad de la demanda de exportación al cambio de precios.

$$\left(x_{(is)}^{(4)r} - fq_{(is)}^{(4)r} \right) = \eta_{(is)}^r \left(p_{(is)}^{(4)r} - phi - fp_{(is)}^{(4)r} \right)$$

$i \in G; r, s \in S^*$ (A8)

Donde $x_{(is)}^{(4)r}$ es la demanda extranjera del bien doméstico i producido en la región s y vendido en la región r (en el modelo no hay re-exportación, por lo que $r = s$); $p_{(is)}^{(4)r}$ es el precio del comprador en moneda nacional del bien exportado i demandado en la región r ; phi es la tasa de intercambio nominal; y $fq_{(is)}^{(4)r}$ y $fp_{(is)}^{(4)r}$ son, respectivamente, las variables de cambio de precio y cantidad en las curvas de demanda extranjera de las exportaciones regionales.

Los gobiernos consumen principalmente bienes públicos proporcionados por los sectores de administración pública. Las ecuaciones (A9) y (A10) muestran el movimiento del consumo del gobierno en relación a los movimientos de los ingresos fiscales reales, de gobiernos regionales y para el gobierno central, respectivamente.

$$x_{(is)}^{(5)r} = taxrev^r + f_{(is)}^{(5)r} + f^{(5)r} + f^{(5)} \\ i \in G; s = 1b, 2; r, b \in S^* \quad (A9)$$

$$x_{(is)}^{(6)r} = ntaxrev + f_{(is)}^{(6)r} + f^{(6)r} + f^{(6)} \\ i \in G; s = 1b, 2; r, b \in S^* \quad (A10)$$

Donde $x_{(is)}^{(5)r}$ y $x_{(is)}^{(6)r}$ son las demandas de los gobiernos regionales (5) y gobierno central (6) en la región r del bien i proveniente de la región s ; $f_{(is)}^{(5)r}$, $f^{(5)r}$ y $f^{(5)}$ son respectivamente, el término específico de cambio de la fuente y la commodity para los gastos de gobiernos regionales en la región r , el término de cambio para los gastos de gobiernos regionales en la región r , y el término de cambio total para los gastos de los gobiernos regionales. Términos similares de cambio $f_{(is)}^{(6)r}$, $f^{(6)r}$ y $f^{(6)}$, aparecen en la ecuación (10) respecto a los gastos del gobierno central. Finalmente, $taxrev^r$ es el porcentaje de cambio en el ingreso real por impuestos indirectos en la región r , y $ntaxrev$ se refiere al porcentaje de cambio en el ingreso real agregado por ingresos indirectos de modo que la demanda del gobierno se mueve con cambios endógenos en las bases impositivas regionales y nacionales.

La ecuación (A11) especifica las tasas de impuestos sobre las ventas para diferentes usuarios. Estas permiten variaciones en las tasas impositivas entre commodities, y sus fuentes y destinos. Los cambios impositivos se expresan como cambios puntuales porcentuales en las tasas impositivas *ad valorem*.

$$t_{(is)}^{(u)r} = f_i + f_i^{(u)} + f_i^{(u)r} \\ i \in G; s = 1b, 2; b, r \in S^*; u \in U \quad (A11)$$

Donde $t_{(is)}^{(u)r}$ es el poder del impuesto sobre las ventas de la commodity (is) al usuario (u) en la región r ; y $f_i, f_i^{(u)}$, y $f_i^{(u)r}$ son términos de cambio diferentes que permiten cambios porcentuales en el poder del impuesto.

Las ecuaciones (A12) y (A13) imponen las condiciones de equilibrio en el mercado doméstico y las commodities importadas. Notemos que no hay commodity de margen en el modelo. Además, no hay producción secundaria en el modelo. En la ecuación (A12), la demanda es igual a la oferta de commodities domesticas regionales.

$$\sum_{j \in H} Y(l, j, r) x_{(l1)}^{(0j)r} = \sum_{(u) \in U} B(l, 1b, (u), r) x_{(l1)}^{(u)r} \\ l \in G, b, r \in S^* \quad (A12)$$

Donde $x_{(l1)}^{(0j)r}$ es la producción del bien doméstico l de la industria j en la región r , $x_{(l1)}^{(u)r}$ es la demanda del bien doméstico l por parte del usuario (u) en la región r ; $Y(l, j, r)$ es el flujo input-output que mide el volumen básico de la producción del bien doméstico l de la industria j en la región r ; y $B(l, 1, (u), r)$ es el flujo input-output que mide el valor básico del bien doméstico l utilizado por (u) en la región r .

La ecuación (A13) impone la condición de beneficio cero en las importaciones. Donde $p_{(i(2))}^{(0)}$ es el precio básico en moneda nacional del bien i proveniente de la fuente foránea; $p_{(i(2))}^{(w)}$ es el precio mundial C.I.F (Costo, seguro y flete) de la commodity importada i ; phi es la tasa de intercambio nominal; y $t_{(i(2))}^{(0)}$ es el poder del arancel, esto es, uno más la tasa arancelaria, en las importaciones de i . La ecuación (A13) define así, el precio base de una unidad de la commodity importada i – el ingreso ganado por unidad por el importador - así como también el precio internacional C.I.F convertido a moneda nacional, incluyendo aranceles de importación.

$$p_{(i(2))}^{(0)} = p_{(i(2))}^{(w)} - phi + t_{(i(2))}^{(0)}$$

$$i \in G \tag{A13}$$

Conjuntamente con la ecuación (A13), las ecuaciones (A14) y (A15) constituyen el modelo del sistema de precios, El precio recibido por cualquier actividad es igual al consto por unidad de output (producción). Como puede observarse, la suposición de rendimientos de escala constantes que se adoptó aquí excluye que cualquier variable de actividad influya en los precios básicos, es decir, los costos unitarios son independientes de la escala en la que se realizan las actividades. Así, la ecuación (14) define que el porcentaje de cambio en el precio recibido por los productores en la industria regional j por unidad de output es igual al cambio porcentual en los costos j 's, los cuales están afectados por cambios en la tecnología y cambios en los precios de los insumos.

$$\sum_{l \in G} Y(l, j, r) \left(p_{(l1)}^{(0)r} + a_{(l1)}^{(0)r} \right) = \sum_{l \in G^*, F} \sum_{s \in S} V(l, s, (1j), r) p_{(ls)}^{(1j)r}$$

$$j \in H; r \in S^* \tag{A14}$$

Donde $p_{(l1)}^{(0)r}$ es el precio básico del bien doméstico i en la región r ; $a_{(l1)}^{(0)r}$ se refiere a los cambios tecnológicos, medidos como un promedio pesado de los diferentes tipos de cambios tecnológicos con influencia en los costos unitarios j 's; $p_{(ls)}^{(1j)r}$ es el costo unitario del sector j en la región r ; $Y(l, j, r)$ es el flujo input-output que mide el valor básico de producción del bien doméstico l de la industria j en la región; y $V(l, s, (1j), r)$ son los flujos input-output que miden el valor de los compradores del bien o factor l proveniente de la fuente s utilizado por el sector j en la región r .

La ecuación (A15) impone la condición de beneficio cero en la distribución de commodities a los diferentes usuarios. Los precios pagados por la commodity i , proveniente de la región s en la industria j en la región r de cada usuario, es igual a la suma de su valor básico y los costos de los impuestos relevantes.

$$V(i, s, (u), r) p_{(is)}^{(u)r} = (B(i, s, (u), r) + T(i, s, (u), r)) \left(p_{(is)}^{(0)} + t_{(is)}^{(u)r} \right)$$

$$i \in G; s = 1b, 2; b, r \in S^*; u \in U \tag{A15}$$

Donde $p_{(is)}^{(u)r}$ es el precio pagado por el Usuario (u) en la región r por el bien (is); $p_{(is)}^{(0)}$ es el precio básico del bien doméstico (is); $t_{(is)}^{(u)r}$ es el poder del impuesto en las ventas de la commodity (is) al usuario (u) en la región r ; $V(i, s, (u), r)$ es el flujo input-output que mide el valor de los compradores del bien i proveniente de la fuente s utilizado por el usuario (u) en la región r ; $B(i, s, (u), r)$ es el flujo input-output que mide el valor básico del bien (is) utilizado por (u) en la región r ; y $T(i, s, (u), r)$ es el flujo input-output asociado con el ingreso arancelarios de las ventas de (is) hacia (u) en la región r .

La teoría de asignación de las inversiones entre las industrias está dado por las ecuaciones (A16) a la (A19). La naturaleza comparativa estática del modelo restringe su uso a análisis de políticas y shocks a corto y largo plazo. Cuando el modelo se corre en modo estático comparativo, no hay relaciones fijas entre capital e inversión. El usuario decide la relación requerida en base a los requerimientos de la simulación específica. La Ecuación (A16) define el porcentaje de cambio en la tasa actual de retorno del capital fijo en los sectores regionales. Bajo las expectativas estáticas, las tasas de rendimiento se definen como el radio entre los valores de alquiler y el costo de una unidad de capital en cada industria - definido en la ecuación (A17) - , menos la tasa de depreciación.

$$r_{(j)}^r = \psi_{(j)}^r \left(p_{(g+1,2)}^{(1j)r} - p_{(k)}^{(1j)r} \right) \\ j \in H; r \in S^* \quad (A16)$$

Donde $r_{(j)}^r$ es la tasa de rendimiento (retorno) específica de una la industria regional; $p_{(g+1,2)}^{(1j)r}$ el el valor de renta del capital en el sector j en la region r ; $p_{(k)}^{(1j)r}$ es el costo de construir una unidad de capital para industrias regionales; y $\psi_{(j)}^r$ es un parámetro específico de una industria regional que se refiere al cociente de la tasa de retorno bruta entre la tasa de retorno neta.

La ecuación (A16) define $p_{(k)}^{(1j)r}$ como:

$$V(\bullet, \bullet, (2j), r) \left(p_{(k)}^{(1j)r} - a_{(k)}^{(1j)r} \right) = \sum_{i \in G} \sum_{s \in S} V(i, s, (2j), r) \left(p_{(is)}^{(2j)r} - a_{(is)}^{(2j)r} \right) \\ j \in H; r \in S^* \quad (A17)$$

Donde $p_{(is)}^{(2j)r}$ es el precio pagado por el usuario ($2j$) en la región r por el bien (is); $a_{(k)}^{(1j)r}$ y $a_{(is)}^{(2j)r}$ son términos técnicos de cambio exógeno; y $V(i, s, (2j), r)$ representan flujos input-output que miden el valor de los compradores del bien i proveniente de la fuente s utilizado por el usuario ($2j$) en la región r .

La ecuación (A18) dice que si el porcentaje de cambio de la tasa de retorno en una industria regional crece más rápido que el promedio nacional, el stock de capital en esa industria se incrementará en una tasa más alta que el promedio del stock nacional. Para industrias con incrementos de la tasa de rendimiento del capital fijo inferiores al promedio, los stocks de capitales crecerán a una tasa inferior al promedio, lo que quiere decir que el capital será atraído hacia las industrias con mayores rendimientos. La variable de cambio, $f_{(k)}^{(1j)r}$, que es exógena en simulaciones a largo plazo, permite cambios en las tasas de rendimiento de las industrias.

$$\begin{aligned} r_{(j)}^r - \omega &= \varepsilon_{(j)}^r \left(x_{(g+1,2)}^{(1j)r} - x_{(g+1,2)}^{(\bullet)r} \right) + f_{(k)}^{(1j)r} \\ j \in H; r \in S^* \end{aligned} \quad (A18)$$

Donde $r_{(j)}^r$ es la tasa de rendimiento específico de la industria regional; ω es la tasa general (global) de retorno del capital; $x_{(g+1,2)}^{(1j)r}$ es el stock de capital en la industria j en la región r ; $f_{(k)}^{(1j)r}$ es la termino de cambio del capital en el sector j en la región r ; y $\varepsilon_{(j)}^r$ mide la sensibilidad del crecimiento del capital a las tasas de retorno de la industria j en la región r .

La ecuación (A19) implica que el porcentaje de cambio en el stock de capital de una industria, $x_{(g+1,2)}^{(1j)r}$, es igual al porcentaje de cambio en las inversiones de la industria en el período, $z^{(2j)r}$.

$$\begin{aligned} z^{(2j)r} &= x_{(g+1,2)}^{(1j)r} + f_{(k)}^{(2j)r} \\ j \in H; r \in S^* \end{aligned} \quad (A19)$$

Donde $f_{(k)}^{(2j)r}$ permite cambios exógenos en las inversiones sectoriales en la región r .

En la especificación del mercado laboral, la ecuación (A20) define la agregación regional de los precios de mano de obra (salarios) a lo largo de las industrias. La ecuación (A21) muestra los movimientos en las diferencias salariales regionales, $wage_diff^{(r)}$, la cual se definida como la diferencia entre el movimiento del salario real región agregado recibido por los trabajadores y el salario real nacional.

$$\begin{aligned} V(g+1,1,\bullet,r) \left(p_{(g+1,1)}^{(\bullet)r} - a_{(g+1,1)}^{(\bullet)r} \right) &= \sum_{j \in H} V(g+1,1,(1j),r) \left(p_{(g+1,1)}^{(1j)r} - a_{(g+1,1)}^{(1j)r} \right) \\ r \in S^* \end{aligned} \quad (A20)$$

Donde $p_{(g+1,1)}^{(1j)r}$ es el salario en el sector j en la región r ; $a_{(g+1,1)}^{(1j)r}$ es un término técnico, y $V(g+1,1,(1j),r)$ representa los flujos input-output que miden los pagos sectoriales a la mano de obra de la región r .

$$wage_diff^{(r)} = p_{(g+1,1)}^{(\bullet)r} - cpi - natrealwage$$

$$r \in S^* \quad (A21)$$

Donde cpi es el índice nacional del precio al consumidor, calculado como un promedio pesado de $p_{(is)}^{(3)r}$ a lo largo de las regiones r y de los bienes de consumo (is); y $natrealwage$ es el salario real del consumidor nacional.

La población regional se define a través de la interacción de las variables demográficas, incluyendo la migración inter-regional. Se proporcionan links entre la población regional y la oferta regional de mano de obra. Las variables demográficas son usualmente definidas exógenamente, y junto con la especificación de algunas condiciones del mercado laboral, la labora (mano de obra) se puede determinar junto con, ya sea salarios diferenciales salariales regionales o tasas de desempleo regionales. En resumen, ya sea la oferta laboral y las diferencias salariales determinan las tasas de desempleo, o la oferta laboral y las tasas de desempleo determinan las diferencias salariales.

La ecuación (A22) define el cambio puntual porcentual en las tasas de desempleo regional en términos de los cambios porcentuales de la oferta laboral y los trabajadores con empleo.

$$LABSUP(r)del_unr^{(r)} = EMPLOY(r) \left(labsup^{(r)} - x_{(g+1,1)}^{(\bullet)r} \right)$$

$$r \in S^* \quad (A22)$$

Donde $del_unr^{(r)}$ mide los cambios puntuales porcentuales en la tasa de desempleo; $labsup^{(r)}$ es la variable regional para la oferta regional laboral; y los coeficientes $LABSUP(r)$ y $EMPLOY(r)$ son los valores referenciales de oferta laboral regional y de empleo regional, respectivamente. La variable $labsup^{(r)}$ se mueve con la tasa de participación de la mano de obra regional, proporcional a la población regional, y población en edad de trabajar. La ecuación (A23) define los cambios en la población regional en el modelo como cambios ordinarios en los flujos de la migración regional neta, ($d_rm^{(r)}$), migración extranjera neta ($d_fm^{(r)}$), y crecimiento natural de la población ($d_g^{(r)}$).

$$POP(r)pop^{(r)} = d_rm^{(r)} + d_fm^{(r)} + d_g^{(r)}$$

$$r \in S^* \quad (A23)$$

Donde $POP(r)$ es un coeficiente que mide la población regional en el año base.

La ecuación (A24) muestra los movimientos en las diferencias de la utilidad por hogar, $util_diff^{(r)}$, definida como la diferencia entre el movimiento de la utilidad regional, y la utilidad nacional global (agg_util), incluyendo una variable de cambio, $futil^{(r)}$.

$$util_diff^{(r)} = utility^{(r)} - agg_util + futil^{(r)}$$

$$r \in S^* \quad (A24)$$

Finalmente, podemos definir cambios en la producción regional como promedios pesados de los cambios en los agregados regionales, de acuerdo con la ecuación (A25):

$$\begin{aligned}
 GRP^r \text{ } grp^r &= C^r x_{(\bullet\bullet)}^{(3)r} + INV^r z^{(2)\bullet r} + GOV^{(5)r} x_{(\bullet\bullet)}^{(5)r} + GOV^{(6)r} x_{(\bullet\bullet)}^{(6)r} + \left(FEXP^r x_{(\bullet\bullet)}^{(4)r} - \right. \\
 FIMP^r x_{(\bullet 2)}^{(\bullet)r} &+ \left. \left(DEXP^r x_{(\bullet(1r))}^{(\bullet)s} - DIMP^r x_{(\bullet(1s))}^{(\bullet)r} \right) \right) \\
 r \in S^*; s \in S^* \text{ for } s \neq r &
 \end{aligned}
 \tag{A25}$$

Donde grp^r es el porcentaje de cambio en el Producto Regional Bruto en la región r , y los coeficientes GRP^r , INV^r , $GOV^{(5)r}$, $GOV^{(6)r}$, $FEXP^r$, $FIMP^r$, $DEXP^r$, y $DIMP^r$ representan respectivamente, los siguientes agregados regionales: inversiones, gasto de los gobiernos regionales, gasto del gobierno central, exportaciones extranjeras, importaciones extranjeras, exportaciones domésticas e importaciones domésticas, El producto nacional, GDP , es así, la suma de los GRP^r a lo largo de todas las regiones r . Nótese que las balanzas comerciales domésticas regionales se cancelan.

Para el cerrado del modelo, nosotros establecemos exógenamente las siguientes variables, las cuales son usualmente exógenas tanto para corto como para largo plazo: $a_{(g+1,s)}^{(1j)r}$, $a_{(i)}^{(1j)r}$, $a_{(i)}^{(2j)r}$, $a_{(i\bullet)}^{(3)r}$, $f q_{(is)}^{(4)r}$, $f p_{(is)}^{(4)r}$, $f_{(is)}^{(5)r}$, $f^{(5)r}$, $f^{(5)}$, $f_{(is)}^{(6)r}$, $f^{(6)r}$, $f^{(6)}$, f_i , $f_i^{(u)}$, $f_i^{(u)r}$, $p_{(i(2))}^{(w)}$, $t_{(i(2))}^{(0)}$, $a_{(11)}^{(0)r}$, $a_{(k)}^{(1j)r}$, $a_{(is)}^{(2j)r}$, $a_{(g+1,1)}^{(\bullet)r}$, ω , $f_{(k)}^{(2j)r}$, $d_{fm}^{(r)}$, $d_g^{(r)}$, and $futil^{(r)}$. Para completar el ambiente a corto plazo, se establece también que **los stocks de capitales actuales** ($x_{(g+1,2)}^{(1j)r}$) **no cambian**, así como tampoco el salario nacional real ($natrealwage$), las diferencias salariales regionales ($wage_diff^{(r)}$), y la población regional, para lo cual, mantenemos la migración regional ($d_{rm}^{(r)}$) sin cambio. En el caso del cerrado del modelo para largo plazo, los supuestos sobre la movilidad interregional del capital y mano de obra se relajan intercambiando variables, $x_{(g+1,2)}^{(1j)r}$, $natrealwage$, $wage_diff^{(r)}$ y $d_{rm}^{(r)}$ por $f_{(k)}^{(1j)r}$, $del_unr^{(r)}$ y $util_diff^{(r)}$. La Figura 5.4, panel a muestra el cerrado del modelo a corto plazo adoptado para nuestra modelación. También, en el panel b, se incluye la causalidad de los agentes económicos en el caso del cerrado del modelo a largo plazo para visualizar las diferencias conceptuales existentes.

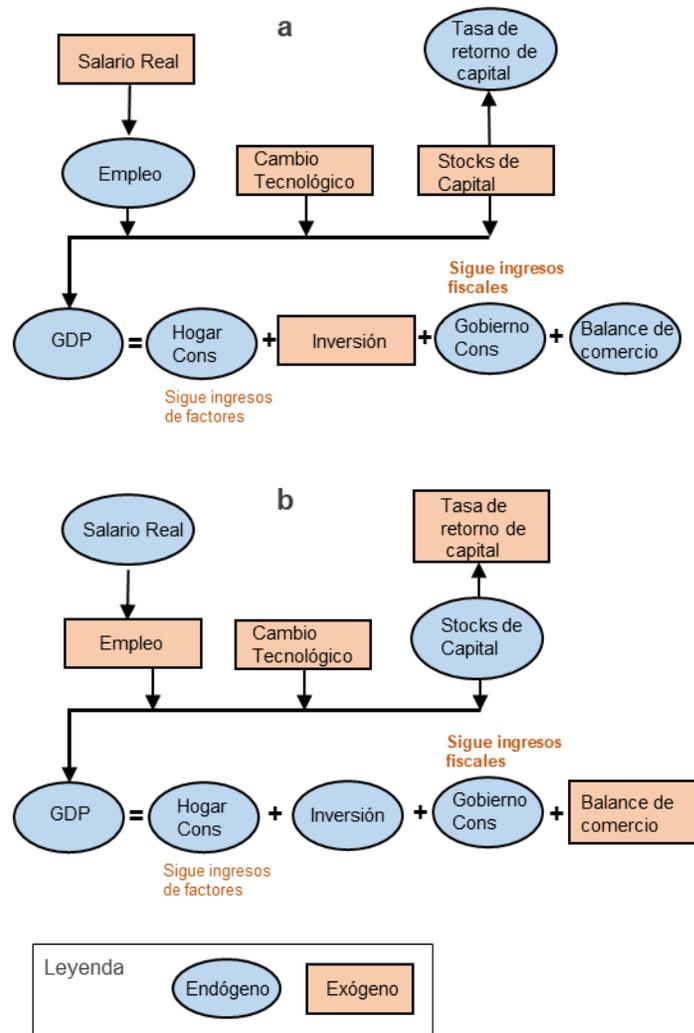


Figura 5.4 Relaciones de causalidad entre agentes económicos en el cerrado del modelo

El panel **a** muestra las relaciones de causalidad en el cerrado del modelo a corto plazo. El panel **b** muestra las relaciones de causalidad en el cerrado del modelo a largo plazo.

En el modelo hay otras definiciones de variables calculadas mediante el de los resultados de simulaciones basadas en el sistema de ecuaciones (A1)-(A25). Las definiciones del PIB nacional y regional y sus componentes se hacen de especial interés para nuestra discusión dada su importancia en la cuantificación de las pérdidas.

Calibración del modelo

La calibración del modelo requiere dos subconjuntos de datos que definen su estructura numérica de tal modo de ser capaces de implementar el modelo empíricamente. En primer lugar, necesitamos información proveniente de la matriz de absorción (Haddad, y otros, 2018) derivada de las fuentes input-output interregionales (Tabla 5.1) para calcular los coeficientes del modelo en base a los siguientes flujos input-output:

- $B(i, 1b, (u), r)$, con $i \in G^*, (u) \in U, b, r \in S^*$
- $M(i, s, (u), r)$, con $i \in G^*, s \in S, (u) \in U, r \in S^*$
- $T(i, s, (u), r)$, con $i \in G^*, s \in S, (u) \in U, r \in S^*$
- $V(i, s, (u), r)$, con $i \in G^*, s \in S, F, (u) \in U, r \in S^*$
- $Y(i, j, r)$, con $i \in G^*, j \in H, r \in S^*$

Esta información se complementa como datos demográficos suplementarios provenientes generalmente de los institutos nacionales de estadísticas, en nuestro caso del *Instituto Nacional de Estadísticas* (INE) – Chile, que la utilizamos para calibrar los coeficientes $LABSUP(r)$, $EMPLOY(r)$ y $POP(r)$ con $r \in S^*$. Por la razón de que nuestras estimaciones están basadas en observaciones hechas para un año particular, mismas que revelan la estructura económica del sistema económico, estos subconjuntos de datos se los denota como “coeficientes estructurales” (Haddad, Domingues, & Perobelli, 2002). Además, en la presentación del modelo, hemos incluido los márgenes de commodities, $M(i, s, (u), r)$, en $B(i, 1b, (u), r)$.

La segunda pieza de información, necesaria para calibrar el modelo, se presenta mediante un conjunto de datos que definen varios parámetros, principalmente elasticidades, y que se los denomina “parámetros de comportamiento”. Las estimaciones empíricas de algunos de estos parámetros no están disponibles en la literatura, de modo que se tiene que recurrir a las “mejores estimaciones” en base a valores usuales empleados en otros modelos. La versión utilizada de nuestro modelo se ejecuta bajo rendimientos a escala constantes, de modo que establecemos en 1.0 los valores de $\mu_{(g+1, \bullet)}^{(1j)r}$ en la ecuación (A4). Las participaciones presupuestales marginales en el consumo del hogar, $\beta_{(i)}^r$, en la ecuación (A6), se calibran en base a los datos input-output, asumiendo que la participación presupuestaria promedio es igual a la participación presupuestaria marginal, y el parámetro de subsistencia $\gamma_{(i)}^r$, también de la ecuación (A6), se asocia con un parámetro Frisch igual a -1.824. La relación entre la tasa de rendimiento bruto y neto, $\psi_{(j)}^r$, en la ecuación (A16) se establece en 1.20. Finalmente, asignamos el valor de 3.02 el parámetro de la sensibilidad del crecimiento del capital respecto a la tasas de rendimiento, $\varepsilon_{(j)}^r$, en la ecuación (A18). Algunos otros parámetros de comportamiento del modelo fueron tomados de la literatura y se presentan en Tabla 5.2.

Además de la calibración del modelo desde el punto de vista de funcionamiento económico, también se puede realizar una calibración del modelo desde punto de vista de los resultados de pérdidas obtenidos, modificando algunos de los parámetros y coeficientes mencionados anteriormente. El procedimiento para ello es correr escenarios individuales simulados de pérdidas económicas con nuestro modelo y compararlos con la información empírica de pérdidas disponible. En el caso práctico de nuestra investigación, nuestro modelo fue calibrado en base a las pérdidas ocasionadas por el gran terremoto Mw8.8 de Maule de 2010.

Tabla 5.1 Flujos agregados en la Matriz de Absorción: Chile, 2014

LABELS	User (1j) ^r	User (2j) ^r	User (3j) ^r	User (4)	User (5) ^r	User (6) ^r	User (7)	TOTAL
$i \in G, s \in S^*$	$B(i,1b,(1j),r)$	$B(i,1b,(2j),r)$	$B(i,1b,(3),r)$	$B(i,1b,(4))$	$B(i,1b,(5),r)$	$B(i,1b,(6),r)$	$B(i,1b,(7))$	$B(i,1b,(*),*)$
$i \in G, s \in S-S^*$	$B(i,2,(1j),r)$	$B(i,2,(2j),r)$	$B(i,2,(3),r)$	$B(i,2,(4))$	$B(i,2,(5),r)$	$B(i,2,(6),r)$	$B(i,2,(7))$	$B(i,2,(*),*)$
$i \in G, s \in S$	$T(i,a,(1j),r)$	$T(i,a,(2j),r)$	$T(i,a,(3),r)$	$T(i,a,(4))$	$T(i,a,(5),r)$	$T(i,a,(6),r)$	-	$T(i,a,(*),*)$
$s \in F$	$V(g^+1,a,(1j),r)$	-	-	-	-	-	-	$V(g^+1,a,(*),*)$
TOTAL	$Y(*,*)$	$V(*,*(2j),r)$	$V(*,*(3),r)$	$V(*,*(4))$	$V(*,*(5),r)$	$V(*,*(6),r)$	$V(*,*(7))$	$V(*,*(*),*)$

2014	User (1j) ^r	User (2j) ^r	User (3j) ^r	User (4)	User (5) ^r	User (6) ^r	User (7)	TOTAL
$i \in G, s \in S^*$	103,251	28,961	68,876	47,982	2,803	16,050	-28	267,897
$i \in G, s \in S-S^*$	27,263	5,376	14,590	0	19	113	0	47,360
$i \in G, s \in S$	3,109	1,108	10,269	2,294	14	81	-	16,875
$s \in F$	134,273	-	-	-	-	-	-	134,273
TOTAL	267,897	35,445	93,735	50,277	2,836	16,244	-28	466,406

Fuente:

Tabla 5.2 Parámetros de comportamiento utilizados en el modelo BMCH

Sector	Regional trade elasticities (Equation A1)	International trade elasticities (Equation A2)	Elasticity of substitution between primary factors (Equation A3)	Export demand elasticities (Equation A8)
S1	1.866	1.866	1.20	-3.560
S2	0.955	0.955	0.80	-0.160
S3	2.939	2.939	0.80	-2.213
S4	2.800	2.800	0.60	0.000
S5	1.900	1.900	0.60	0.000
S6	1.900	1.900	0.60	-1.770
S7	1.900	1.900	0.60	-1.770
S8	1.900	1.900	0.60	-1.770
S9	1.900	1.900	0.60	-1.770
S10	1.900	1.900	0.60	-1.770
S11	1.900	1.900	0.60	-1.770
S12	1.900	1.900	0.60	0.000

Finalmente, para el manejo de los modelos CGE, se han desarrollado programas computacionales especializados en solucionar grandes sistemas de ecuaciones no lineales y enfocados exclusivamente a la modelación de equilibrio general. Existen dos particularmente relevantes, el software GAMS desarrollado para la solución de los modelos CGE estilo americano, y el programa GEMPACK, desarrollado para la solución de los modelos CGE de la escuela de linealización australiana. En nuestra investigación hacemos uso de GEMPACK. (Horridge, Meeraus, Pearson, & Rutherford, 2013). La existencia del software GEMPACK explica gran parte de la popularidad de los modelos CGE estilo MONASH a lo largo del mundo, como es el caso, por ejemplo, de nuestro modelo BMCH.

6. Análisis Teórico del Enfoque Propuesto.

En secciones anteriores, se describió a detalle los conceptos, formulación e ideas principales del modelo propuesto para la estimación de las pérdidas indirectas causadas por la ocurrencia de temblores. En el presente capítulo, y haciendo uso del modelo experimento teórico E1 (Figura 6.1), revisaremos, fundamentaremos y analizaremos los conceptos teóricos, procedimientos de cálculo e implicaciones más importantes, del nuevo enfoque planteado.

Empecemos revisando los fundamentos teóricos. Vamos a referirnos exclusivamente a las pérdidas de producción, sin embargo, como hemos visto, la metodología es aplicable para cualquier otra variable económica de interés como por ejemplo empleo, PIB, exportaciones, etc. El nuevo enfoque parte de asumir que el nivel de producción P de cualquier industria o empresa se la puede modelar como una función de algunos componentes y factores clave, siendo los más habituales el stock de capital (K), la mano de obra (L), y los insumos intermedios II . Podemos escribir esta relación como:

$$P = f(K, L, II) \quad (6.1)$$

Donde el componente de stock de capital agrupa todos los activos que forman parte de una industria o empresa y que intervienen en el proceso productivo tales como fábricas, edificaciones, maquinaria, equipo, herramientas, etc. Los insumos intermedios hacen referencia a todos aquellos insumos provenientes de otras industrias mientras que la mano de obra toma en cuenta toda la fuerza de trabajo empleada. Este tipo de ecuaciones se conoce, dentro del argot económico, como una función de producción.

En nuestro enfoque, vamos a asumir que el stock de capital disponible K de cualquier industria depende del nivel de pérdidas que sus activos pueden experimentar como consecuencia de la ocurrencia de un temblor, así:

$$K = g(L_p) \quad (6.2)$$

Donde L_p es la pérdida física total en los activos que conforman el stock de capitales de una industria y $g(.)$ una función que relación el nivel del stock de capital disponible con la pérdida física.

De las dos relaciones planteadas anteriormente podemos derivar nuestro análisis a desarrollar. La ecuación (6.1) nos muestra que la producción de una industria depende por una parte de los insumos intermedios II provenientes de otras industrias. Claramente existe una relación de interdependencia entre las industrias. De este modo, podemos ver que si la producción de alguna de las empresas se reduce, por ejemplo, a consecuencia de la ocurrencia de un sismo, el nivel de producción de las demás industrias podría también verse afectado dada la interconexión en la producción, a pesar que éstas no hayan sido afectadas directamente por el temblor. El proceso que estamos presenciando es la propagación de la pérdida de producción a través de la economía. Usualmente, al efecto por el cual una industria reduce su producción como consecuencia de pérdidas de producción en otras industrias se le conoce como efecto económico de orden superior. En nuestro enfoque, los modelos de equilibrio general son utilizados para modelar las interconexiones entre industrias y propagar las pérdidas a

través de la economía. Sin embargo, Necesitamos modelos CGE con la particularidad que tomen en cuenta la localización geográfica de los componentes que conforman sus respectivos stocks de capitales. La resolución geográfica en la localización de los activos del modelo CGE debe ser suficiente para distinguir el campo de intensidades sísmicas de temblores diferentes. La ecuación (6.1) también nos muestra que el nivel de producción de una industria depende de su stock de capital; si el stock de capital se reduce, la producción también lo hará.

Por otro lado, con respecto a la ecuación (6.2), vamos a asumir inicialmente que la función $g(.)$ que relaciona el stock de capital disponible con el daño físicos de los activos, dada la ocurrencia de un temblor, es una función inversamente proporcional, esto es, a mayor daño físico, menor será el stock de capital disponible. Así, conceptualmente, (6.2) también representa el medio por el cual podemos introducir a nuestro modelo económico CGE, las pérdidas ocasionados por los terremotos.

Dado el estilo probabilista de nuestro enfoque, la pérdida física L_p es modelada como una variable aleatoria de la cual conocemos su distribución de probabilidad, y la cual está asociada a una frecuencia de ocurrencia específica, valores que los obtenemos de los modelos ingenieriles de riesgo sísmico.

Para el estudio teórico del nuevo enfoque propuesto, vamos a reducir nuestro estudio al análisis de unos casos muy sencillos, pero que sin embargo, reúnen la esencia y los conceptos más importantes de los aspectos a tratar en la nueva metodología.

La configuración de nuestro experimento se esquematiza en la Figura 6.1 y tiene las siguientes características. Tenemos una economía en equilibrio que está conformada por dos industrias y un agente consumidor (hogar), cuyo comportamiento está gobernado por el modelo de equilibrio general CGE-M1, construido con el estilo norteamericano de modelación CGE (sección 11) y descrito a detalle en la sección complementaria 12.1. Cada industria se encuentra localizada en una región geográfica distinta y produce un solo bien, X_1 y X_2 respectivamente, los cuales son consumidos por el hogar ubicado en una tercera región geográfica. Para su producción, cada industria necesita de dos componentes: factores primarios e insumos intermedios. En esta pequeña economía, la industria 2 tiene la particularidad de que su único insumo intermedio es proveído por la industria 1. En otras palabras, la producción de la industria 2 depende de la producción de la industria 1. En nuestro experimento, nos interesa modelar esta dependencia.

Por otro lado, vamos a suponer que la región 1 se encuentra afectada por la ocurrencia de terremotos provenientes de la fuente sísmica S_1 mientras que las regiones 2 y 3 se localizan lo suficientemente alejadas de la fuente sísmica de tal forma que no sufren daño alguno en ninguno de sus componentes. Los temblores que afectan a la región 1 pueden provocan daños físicos en los activos de la industria 1, daños que se ven reflejados en nuestro modelo CGE-M1 en forma de una reducción de su stock de capital. La disminución del stock de capital de la industria 1 causa un desequilibrio de la economía, misma que luego de realizar ajustes en sus niveles de producción y precios, según lo dictado por el modelo CGE-M1, alcanza un nuevo equilibrio. Los nuevos niveles de producción y precios con los cuales se alcanza el nuevo equilibrio son precisamente los resultados de nuestro análisis.

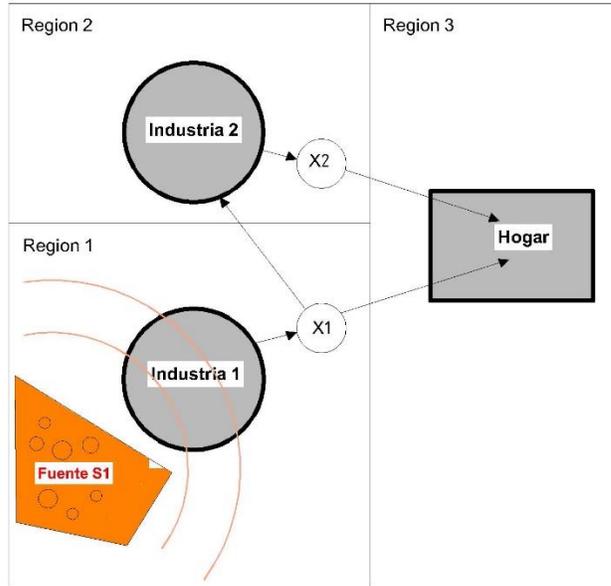


Figura 6.1 Esquema del experimento o modelo teórico E1.

Existe una pequeña economía conformada por dos industrias y un hogar. Cada industria producen un solo bien, X_1 y X_2 respectivamente, y el hogar consume estos bienes. Tanto las industrias como el hogar están localizadas en regiones geográficas distintas, siendo la región 1 y con ello la industria 1, la única afectada por la fuente sísmica S1. En este experimento, para la producción del bien X_2 , la industria 2, requiere como insumo intermedio parte de la producción de la empresa 1.

Siguiente a esto, vamos a considerar que todos los posibles temblores que pueden ocurrir en la región de estudio así como los campos de intensidades sísmicas generados por estos, están definidos por un sencillo modelo de amenaza sísmico al que se lo ha denominado AS1 y que se lo describe en la sección complementaria 12.2. Supongamos además que el stock de capital de cada industria está conformado por una sola edificación y que el daño experimentado por esta, ante la ocurrencia de un terremoto, se lo puede medir con la función de vulnerabilidad FV1, (Sección complementaria 12.2; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, Figura 12.5), tal y como lo proponen los modelos actuales de riesgo sísmico.

Llegado este punto, ya contamos con toda la información necesaria para empezar a experimentar y observar de forma teórica, qué sucede con el nuevo modelo propuesto que unifica el trabajo de los modelos de riesgo sísmico y los modelos CGE, y cuáles son los resultados que se pueden obtener.

6.1 Simulaciones de Pérdidas de Producción

Definido el modelo teórico E1, podemos realizar simulaciones de escenarios de pérdida de producción de las industrias 1 y 2 para cualquier temblor generado en la fuente sísmica AS1. El procedimiento de cálculo es el siguiente.

Simulamos un temblor T de magnitud M cuyo epicentro se localiza a una distancia R_1 de la Industria 1. El temblor provoca una intensidad sísmica a_1 en el sitio donde se ubica la industria 1 tal que causa daños a su estructura. La intensidad sísmica la estimamos con el modelo de amenaza sísmica AS1,

mientras que el daño estructural Ld_1 lo estimamos utilizando la función de vulnerabilidad $FV1$, siendo $Ld_1 = FV1(a_1)$. Dado que en nuestro enfoque el daño estructural es proporcional a la reducción del stock de capital, podemos calcular directamente el valor reducido del stock de capital K_1 con el que contará luego del sismo la industria 1 para su producción. La reducción del stock de capital desequilibra la economía, economía que tiene que alcanzar un nuevo equilibrio ajustando sus niveles de producción y precios de producto según lo indicado por el CGE-M1. La diferencia entre la producción inicial y los nuevos valores de producción de las industrias, Xp_1 y Xp_2 , respectivamente, representan el resultado de nuestra simulación i . Podemos ver que en efecto, el trabajo que realiza el modelo CGE-M1 en nuestra propuesta es propagar las pérdidas en el stock de capital de la industria 1 a través de la economía.

Dado que en nuestro modelo a_1 y Ld_1 son variables aleatorias, es decir, no conocemos el valor exacto ni de la intensidad sísmica ni del daño físico provocado en la industria 1, los resultados de las pérdidas Xp_1 y Xp_2 solo representan uno de los múltiples posibles resultados que se podrían obtener para el temblor simulado T .

Bajo el enfoque propuesto, no solo nos interesa modelar las pérdidas para un temblor en particular, sino modelar las pérdidas causadas por todos los posibles temblores que se podrían generar en la fuente sísmica S1. Se va a recurrir por tanto a la técnica de Montecarlo para simular una gran colección de posibles temblores, cada uno de los cuales genera un escenario diferente de pérdidas de producción. La colección de escenarios de pérdidas de producción contiene además la propagación de las incertidumbres existentes en el modelo riesgo sísmico. Consideremos que la Industria 1 se encuentra a 20Km de la fuente sísmica S1 mientras que la industria 2 y el hogar, a 1,000 Km de distancia. Las 2 industrias sufren pérdidas en su producción, sin embargo, las pérdidas en la industria 2 resultan ser un caso más interesante de análisis, pues según nuestro modelo teórico E1, la industria 2 no se ve directamente afectada por los temblores, sino que sus pérdidas se deben a efectos económicos de orden superior causados por la disminución de uno de sus insumos intermedios. Estas pérdidas suelen también conocerse como pérdidas indirectas o pérdidas por interrupción de negocios. La Figura 6.2 presenta los resultados de las pérdidas obtenidos en la industria 2 para un catálogo sísmico de 100,000 años de duración (aproximadamente 100,000 temblores simulados, dadas las características de sismicidad de la fuente S1).

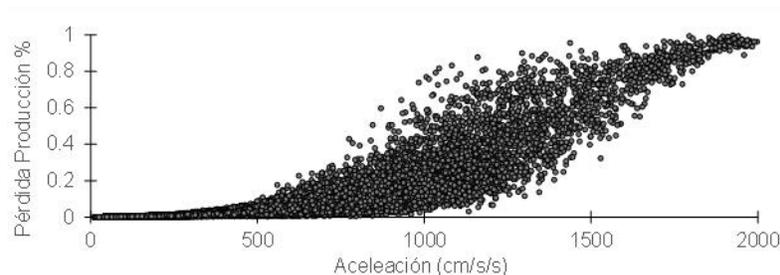


Figura 6.2 Pérdidas de producción en la industria 2.

Se muestran las pérdidas de producción Xp_2 en función de la intensidad sísmica generada por cada temblor simulado.

6.2 Cálculo de las Métricas de Riesgo por Pérdidas de Producción

En nuestro experimento teórico, calculamos los resultados de pérdidas obtenidos para un catálogo sísmico de 100,000 eventos y 100,000 años de duración. Con esta gran base de datos, procedamos a calcular la pérdida anual esperada (AAL) y la curva de excedencia de las pérdidas (LEC) de producción de las dos industrias. La AAL es la suma de las pérdidas provocadas por cada evento dividida entre el tiempo total de duración del catálogo sísmico, mientras que cada punto de la LEC será simplemente el cociente entre el conteo del número de veces que una determinada pérdida es superada o igualada, y la duración total del catálogo (100,000 años).

La pérdida anual esperada de producción obtenida para las industria 1 y 2 se muestran en la Figura 6.3 - panel b, y fueron de 3.1‰ y 0.82‰ del valor total de su producción anual respectiva. En el caso de las curvas de excedencia de pérdidas de producción, La Figura 6.3, panel a, presenta los resultados obtenidos.

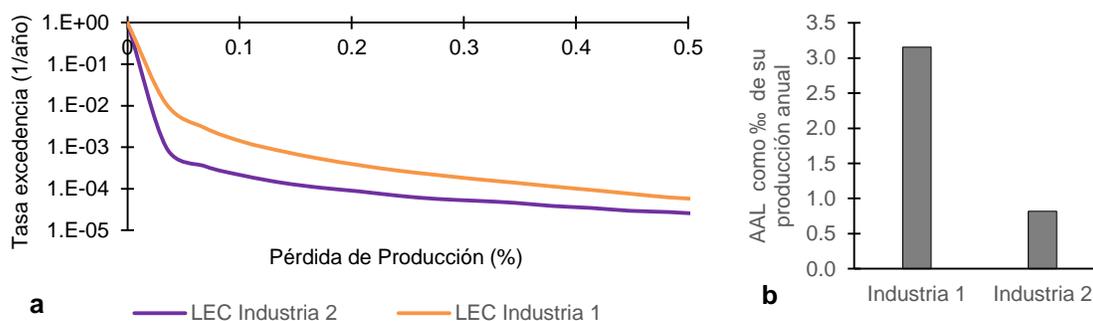


Figura 6.3 Resultados de riesgo – experimento teórico E1.

El panel **a** muestra las curvas de excedencia de producción (LEC) para las dos industrias como un % de su producción anual respectiva. El panel **b** muestra las pérdidas anuales esperadas obtenidas como una fracción (al millar) de su producción anual total respectiva.

Con los resultados obtenidos, se ha podido demostrar teóricamente, cómo el nuevo enfoque propuesto es capaz de modelar las pérdidas de producción causadas por la ocurrencia de temblores. Hemos sido capaces de calcular las métricas estándar de riesgo con la innovación de que éstas están referidas a las pérdidas de producción y que toman en cuenta y propagan las incertidumbres existentes en los modelos de riesgo sísmico.

6.3 Pérdidas de Producción Contemporáneas

En el experimento E1, los temblores solo afectaban a la región 1; sin embargo, ahora nos interesa saber qué sucede si cada sismo producido en la fuente sísmica S1 ahora también afecta a la región 2. La configuración del experimento y los modelos utilizados son exactamente los mismos, la única diferencia radica en que ahora la industria 2 se encuentra a 35Km de distancia de la fuente sísmica S1. La Figura 6.4 ilustra el modelo del experimento E2.

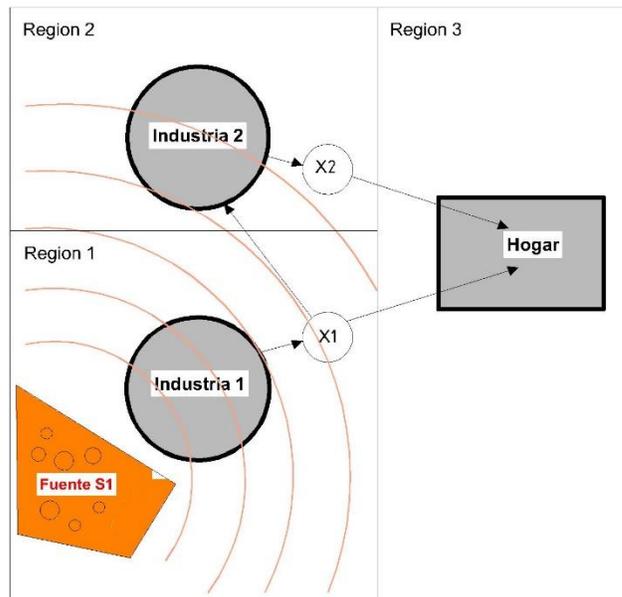


Figura 6.4 Esquema del experimento teórico E2.

La región 1 y la región 2 están afectadas por la fuente sísmica S1. La industria 1 y 2 se localizan a 20Km y 35Km de distancia de la fuente sísmica respectivamente.

Los temblores generados en la fuente sísmica S1 ahora también causan daños físicos a la industria 2, daños que se traducen en la reducción de su stock de capital. Las pérdidas de producción de la industria 2 en esta ocasión se deben a dos fenómenos: 1) la reducción de su insumo intermedio proveniente de la industria 1, y 2) la reducción de su propio stock de capital.

El procedimiento para simular las pérdidas de producción en el experimento E2 es similar al del experimento E1 pero ahora adicionalmente: 1) el temblor T de magnitud M también genera una aceleración a_2 en el sitio de la industria 2, que se ubicada a una distancia R_2 de la fuente sísmica; 2) La intensidad a_2 causa un daño estructural Ld_2 en la industria 1, el cual lo calculamos utilizando la función de vulnerabilidad $FV2$, siendo $Ld_2 = FV1(a_2)$. Este daño se traduce en la reducción de capital K_2 de la industria 2; 3) El desequilibrio provocado en la economía hora se debe a la reducción simultánea del stock de capital de ambas industrias. En esta ocasión, hemos simulado un catálogo sísmico de 200,000 años de duración. Además de la ocurrencia estocástica de los temblores en el tiempo, ahora la incertidumbre en este modelo se debe a que no conocemos el valor exacto de a_1 , Ld_1 , a_2 y Ld_2 . Con las simulaciones de Montecarlo propagaremos estas incertidumbres.

La Figura 2 - panel a, muestra cómo la curva de excedencia de pérdidas de producción de la industria 2 obtenida para el experimento E2 (ambas industrias afectadas al mismo tiempo, curva naranja) se incrementan en relación al experimento E1 (Solo industria 1 afectada, curva morada). Se incluye una tercera curva (gris) la cual muestra lo que sucedería si exclusivamente la industria 2 fuera afectada por la fuente sísmica. Se puede observar que para pérdidas inferiores a 0.08% de la producción total de la industria 2, es más perjudicial que la industria 1, proveedora de sus insumos, sea afectada por sismos (curva morada) que ser directamente afecta por estos (curva gris). Para pérdidas superiores a

0.08%, la afectación sísmica directa a la infraestructura de la industria 2 comienza a ser más perjudicial que el daño a la industria proveedora de sus insumos. Es claro observar también que si sumáramos las pérdidas de producción obtenidas en la industria 2 cuando solo la industria 1 es afectada (curva morada) con las pérdidas cuando sólo la industria 2 es afectada (curva gris) no se obtiene la curva naranja. Esto se da porque las pérdidas del experimento E2 no son independientes en el tiempo. La reducción simultánea de los stocks de capital de las dos industrias conduce a que la economía realice un ajuste contemporáneo de sus niveles de producción y precios para alcanzar el nuevo equilibrio. En el caso de las curvas morada y gris, la economía realiza sus ajustes para alcanzar el nuevo equilibrio de forma independiente para cada caso.

La Figura 2, panel b por su parte presenta los resultados de la pérdida anual esperada de producción de la industria 2 para las 3 diferentes situaciones de afectación sísmica. Al igual que en las curvas LEC, se puede evidenciar claramente el incremento de las pérdidas cuando ambas industrias son afectadas simultáneamente por temblores (AAL= 1.74% de la producción total de la Industria 2), con respecto a la pérdidas de producción de la industria 2 cuando no hay afectación simultanea de las fuentes.

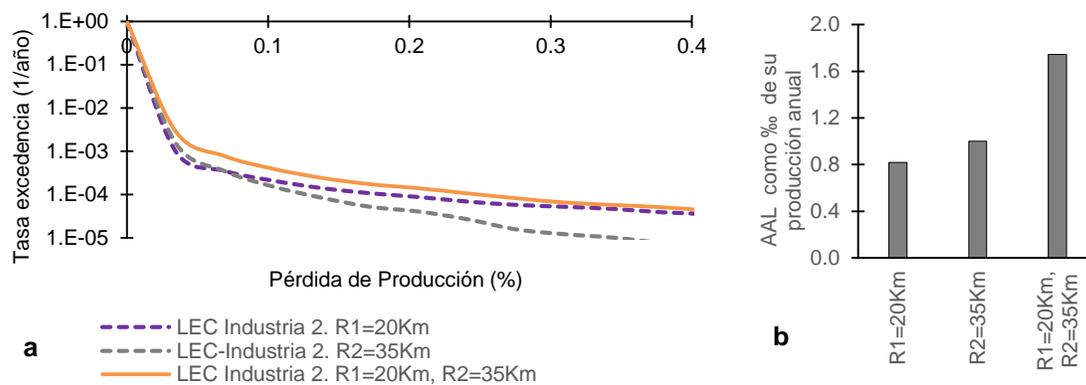


Figura 6.5 Resultados de riesgo – experimento teórico E2.

El panel a muestra las curvas de excedencia de pérdidas de producción (LEC) de la Industria 2 como un % de su producción total anual para cada caso. El panel b muestra las pérdidas anuales esperadas de producción de la industria 2 como una fracción (al millar) de su producción anual total. Caso solo industria 1 afectada por sismos, $R_1=20\text{Km}$. Caso solo industria 2 afectada por sismos $R_2=35\text{Km}$. Caso ambas industrias afectadas al mismo tiempo $R_1=20\text{Km}$, $R_2=35\text{Km}$, siendo R_i la distancia epicentral fuente-sitio respectiva de cada industria.

6.4 Análisis Paramétrico y de Sensibilidad

En esta subsección se analiza la sensibilidad de los resultados de riesgo con respecto a las variables y parámetros que presentan incertidumbre dentro del modelado y/o más importantes en el cálculo de las pérdidas de producción bajo el nuevo enfoque desarrollado.

Iniciemos revisando los principales parámetros que intervienen en el modelado económico de equilibrio general. En la literatura es bien conocido que las elasticidades de sustitución son los parámetros más difíciles de calibrar y también de los más influyentes en este tipo de modelos.

Las Figura 6.6 muestra la sensibilidad de las métricas de riesgo de pérdidas de producción de la industria 2, en el contexto del experimento E1 (solo la industria 1 afectada por sismos), al cambio de las elasticidades de sustitución del stock de capital: los paneles a y c al cambio de la elasticidad de sustitución del stock de capital de la industria 1, β_{12} , y los paneles b y d, al cambio de la elasticidad de sustitución del stock de capital de la industria 2, β_{22} . Los valores de $\beta_{12} = \beta_{22} = 0.5$ corresponden a la calibración original del experimento E1. Se puede observar claramente la influencia que tiene las elasticidades de sustitución en el cálculo de la AAL y las curvas LEC de producción. La elasticidad de sustitución o elasticidad del producto mide la respuesta del nivel de producción al cambio de los niveles de sus factores primarios. En nuestro caso, por ejemplo $\beta_{12} = 0.7$ nos dice que si en la industria 1, el stock de capital aumenta un 1%, su nivel de producción aumentará aproximadamente un 0.7%.

Analizando las curvas LEC de pérdidas de producción de la Figura 6.6, se puede ver que el cambio en la tasa de excedencia de pérdidas de producción para los diferentes valores de elasticidad utilizados depende del nivel de pérdida, pudiendo traer efectos positivos o negativos. Por ejemplo, en la Figura 6.6, panel a, se puede observar que con un valor de $\beta_{12} = 0.7$, para pérdidas inferiores a 8% del total de producción anual de la empresa 2, la tasa de excedencia disminuye con respecto a la original ($\beta_{12} = 0.5$, curva gris), pero para pérdidas superiores al 8%, la tasa de excedencia se incrementa. Un comportamiento opuesto ocurre en el caso de las elasticidades de sustitución de la industria 2, Figura 6.6, panel b. Con un valor de $\beta_{22} = 0.7$, para pérdidas inferiores al 12%, la tasa de excedencia de pérdidas se incrementa respecto a la original, y para pérdidas superiores, la tasa de excedencia se reduce. La razón de estos comportamientos tiene ver con la relación efectos positivos- negativos dados por los distintos regímenes productivos modelados con valores de elasticidades diferentes. Por ejemplo, con una elasticidad de $\beta_{12} = 0.7$ en la industria 1, dado las interacciones económicas, la industria 2 incrementaría su nivel de producción con respecto al nivel de producción normal/original con $\beta_{12} = 0.5$. Sin embargo, con $\beta_{12} = 0.7$, la producción de la industria 1 depende en mayor medida de su stock de capital, por lo que un daño en este tendría mayores consecuencias en la producción. Así, uno u otro régimen productivo podría ser más adecuado que otro dependiendo del nivel de daño del stock de capital de la industria y de las interconexiones económicas.

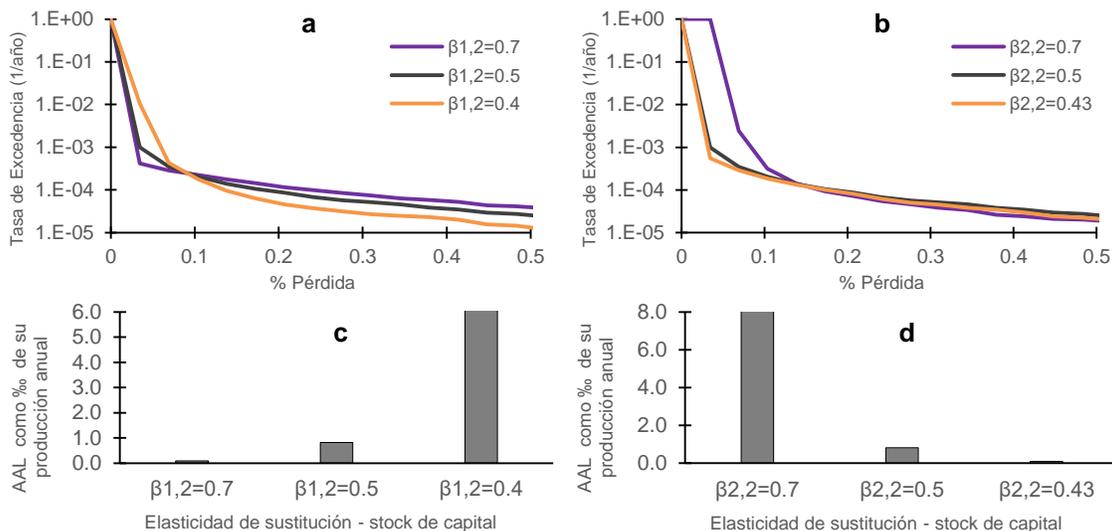


Figura 6.6 Análisis de sensibilidad de los resultados de riesgo, caso industria afectada indirectamente por sismos.

Se muestran las curvas LEC de producción de la industria 2 en el contexto del experimento E1 (solo industria 1 afecta por sismos) obtenidas para diferentes valores de la elasticidad de sustitución del stock de capital de la industria 1 (β_{12}) en panel **a**, y de la industria 2 (β_{22}), en el panel **b**. En el caso de los paneles **c** y **d**, se muestran los resultados de la pérdida anual esperada obtenida para distintos valores de las elasticidad de sustitución del stock de capital β_{12} y β_{22} respectivamente. El % de pérdida se mide con respecto a la producción anual total.

También se realiza el análisis de sensibilidad de las pérdidas de producción de cada industria dada su afectación directa por sismos de la fuente sísmica S1. La Figura 6.7, paneles a y c muestran la variación de las métricas de riesgo referidas a las pérdidas de producción de la industria 1 cuando solo esta es afectada directamente por temblores (distancia fuente-sitio = 20Km), y los paneles b y d, a las pérdidas de producción de la industria 2 cuando solo esta es afecta por temblores (distancia fuente-sitio = 35Km), para diferentes valores de elasticidad de sustitución de su respectivo stock de capital. Como era de esperarse, las pérdidas del nivel de producción de cada industria son proporcionales a la participación que su respectivo stock de capital (elasticidad) tiene en su producción.

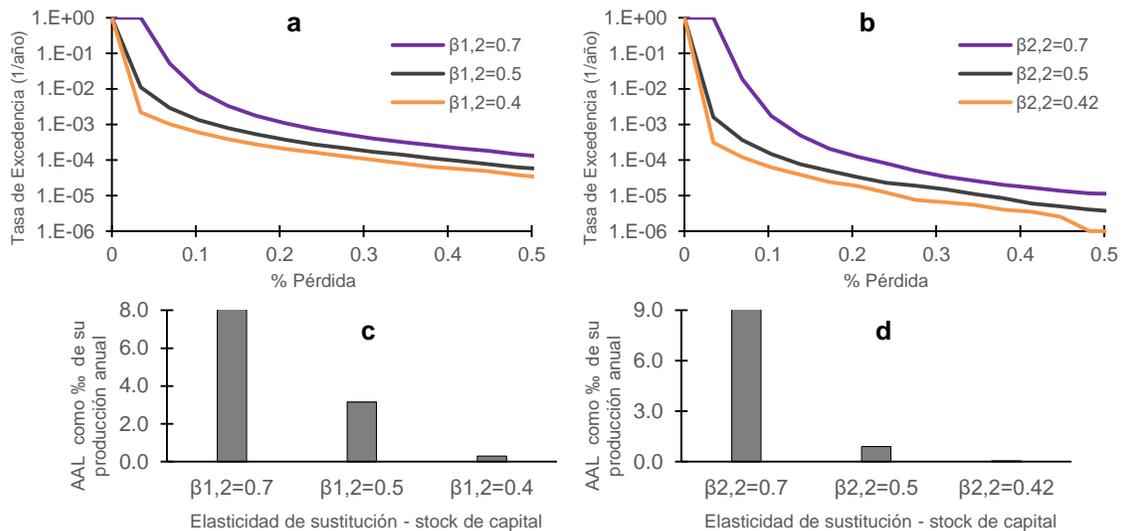


Figura 6.7 Análisis de sensibilidad de los resultados de riesgo, caso industrias directamente afectadas por sismos.

Los paneles **a** y **c** muestran respectivamente las curvas LEC y las AALs de producción de la industria 1 cuando ésta es directamente afectadas por sismos (fuente sísmica S1 a 20Km), obtenida para diferentes valores de la elasticidad de sustitución del stock de capital de la industria 1 (β_{12}). Los paneles **b** y **d** muestran respectivamente las curvas LEC y las AALs de producción de la industria 2 cuando ésta es directamente afectadas por sismos (fuente sísmica S1 a 35Km), obtenida para diferentes valores de la elasticidad de sustitución del stock de capital de la industria 2 (β_{22}).

En un segundo análisis, en la Figura 6.8, se revisa la sensibilidad de la AAL y LEC de producción respecto a las incertidumbres provenientes del modelo de riesgo sísmico en el contexto del experimento 1. Los paneles a y c exponen la variación en los resultados de riesgo de producción de la industria 2 para distintos valores de incertidumbre en el cálculo de las intensidades sísmicas, dadas por la relación de atenuación. En el caso de los paneles b y d, se muestra la sensibilidad de la AAL y LEC de producción al cambio de la incertidumbre en las funciones de vulnerabilidad utilizadas para modelar el daño estructural de los activos que forman el stock de capital de las industrias. Podemos ver que la propagación de las incertidumbres del modelo de riesgo sísmico tiene gran influencia en la estimación de las pérdidas de producción, especialmente y como sucede en un estudio de riesgo sísmico clásico, aquellas debidas a la falta de precisión en el cálculo de las intensidades sísmicas en el lugar donde se encuentran los activos.

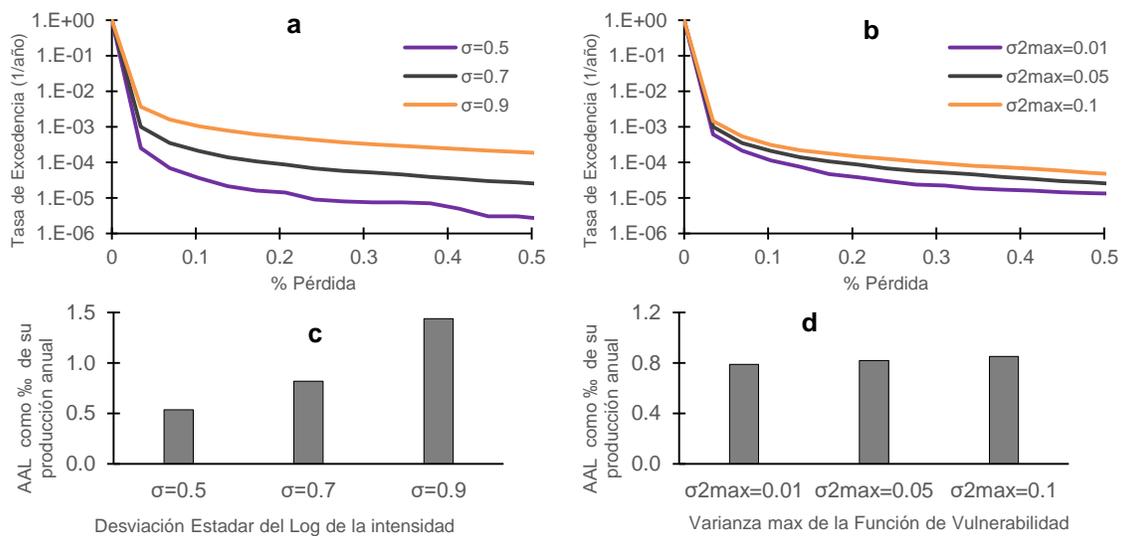


Figura 6.8 Análisis de sensibilidad de los resultados de riesgo a las incertidumbres del modelo de riesgo sísmico.

Los paneles a y c muestran respectivamente las curvas LEC y las AALs de producción de la industria 2 en el contexto del experimento E1 (solo industria 1 afectada por fuente sísmica S1), obtenida para diferentes valores del logaritmo de la desviación estándar σ de la intensidad sísmica dada por la relación de atenuación. Los paneles b y d muestran respectivamente las curvas LEC y las AALs de producción de la industria 2 en el contexto del experimento E1 obtenidas para diferentes valores de la varianza máxima (σ^2_{max}) del daño estructural dado por las funciones de vulnerabilidad.

6.5 Distribución de Probabilidad de las Pérdidas de Producción y Simulación de Escenarios

En el enfoque probabilista propuesto, las pérdidas de producción se asumen como variables aleatorias con cierta distribución de probabilidad. Aprovechando los experimentos E1 y E2 desarrollados en este capítulo, vamos a determinar la distribución de probabilidad que tienen las pérdidas de producción luego de haber propagado las incertidumbres provenientes del modelo de riesgo sísmico.

La Figura 6.9 presenta la densidad y distribución de probabilidad de las pérdidas de producción obtenidas para la industria 1 y 2 en el contexto del experimento E1. En esta ocasión se ha simulado 200,000 temblores, todos para una magnitud de momento sísmico $M_w = 8$ y una distancia fuente-industrial de $R_1 = 20km$. El objetivo es propagar las incertidumbres de la relación de atenuación y de la función de vulnerabilidad a través del modelo CGE-M1 y observar la forma de la distribución de probabilidad final de la pérdida de producción.

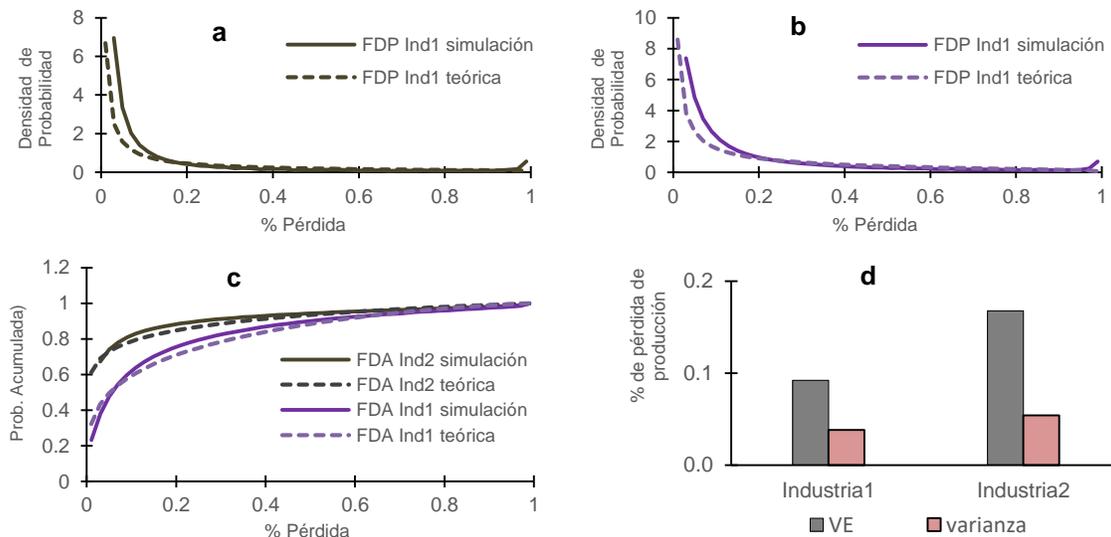


Figura 6.9 Distribución de probabilidad de la pérdida de producción.

Los paneles **a** y **b** muestran una comparación entre las densidades de probabilidad de las pérdidas de producción de las industrias 1 y 2 obtenidas con las simulaciones y las distribuciones teóricas Beta respectivas calculadas para un valor esperado y varianza conocidos (panel d). El panel **c** muestra esta misma comparación simulación-curva teórica pero con respecto a la densidad de probabilidad acumulada. El panel **d** muestra el valor esperado de la pérdida de producción y su varianza obtenido en de las simulaciones tanto para la industria 1 como para la industria 2.

Se ha encontrado que la distribución de probabilidad de las pérdidas de producción, bajo el enfoque y modelo propuesto, se ajusta bastante bien a una distribución de probabilidad Beta como se puede observar en la Figura 6.9, paneles a, b y c, donde se realiza una comparación entre las funciones de densidad de probabilidad y densidades acumuladas obtenidos de las simulaciones y las funciones teóricas calculadas para una distribución beta (con valor esperado y varianza conocida, panel d). Se realiza la comparación tanto para una afectación directa de la fuente sísmica a la producción de la Industria 1, como para una afectación indirecta de los sismos en el caso de las pérdidas de producción de la industria 2.

Finalmente, haciendo uso del nuevo enfoque planteado, también es posible simular de forma probabilista las pérdidas de producción desencadenadas por la ocurrencia de un evento en particular, tal y como lo hemos visto en los párrafos anteriores, donde se ha simulado un terremoto de magnitud $M_w = 8$ con localización de su epicentro conocida. Los resultados de pérdidas en las industrias para este evento particular estarán dados por variables aleatorias con valor esperado y varianza conocidas como se puede observar en la Figura 6.9, paneles d. Además, se asume que la distribución de

probabilidad de las pérdidas de producción de cada industria es tipo Beta, consideración que como se ha visto en esta subsección, es lo suficientemente aproximada para ser considerada como válida.

7. Caso Práctico de Aplicación

El nuevo enfoque desarrollado en esta investigación se aplica al caso chileno, país que es frecuentemente afectado por grandes terremotos. Además, desde el punto de vista económico, la economía chilena es considerada una de las más dinámicas de América Latina mostrando un notable desarrollo financiero en la región así como una destacada competitividad y libertad económica. Chile además es un país con importantes disparidades regionales. Estas características hacen a Chile un lugar ideal para ejemplificar la nueva propuesta desarrollada.

Este trabajo constituye el primer intento a nivel mundial de realizar una conexión robusta y sistemática de modelos de riesgo sísmico y modelos económicos de gran escala. Por lo tanto, para nuestro caso de estudio, no ha sido posible recolectar toda la información necesaria para llevar a cabo una calibración completa y rigurosa de los modelos. En este sentido, el ejemplo presentado debe ser considerado como una prueba de conceptos más que un producto final. A pesar de esto, los resultados obtenidos en este ejemplo son bastante razonables y pueden ser utilizados como una medida del poder de la propuesta, dentro por supuesto, de sus supuestos y limitaciones. En los cálculos se consideró un total de 44,350 eventos que colectivamente describen la amenaza sísmica de Chile.

A continuación se presenta los principales resultados obtenidos en nuestro ejemplo de aplicación. Estos resultados se constituyen como los primeros de su tipo, de los cuales se resaltan algunos de los más interesantes hallazgos. Empezamos presentando los nuevos indicadores de riesgo referidos a la producción y posteriormente se presentan los indicadores de riesgo referidos a otros componentes relevantes de la economía. Además de los nuevos indicadores, también se presentan las métricas estándar de riesgo de pérdidas directas que nos servirán para comparar y discutir los resultados.

7.1 Resultados Generales

La Tabla 7.1 presenta descriptores generales de la economía chilena y algunos de los resultados más agregados de nuestro análisis respecto a pérdidas de producción y pérdidas directas. Las pérdidas directas calculadas se refieren exclusivamente al daño en edificios no residenciales. La razón para esta restricción es que estamos tratando de modelar daños solo en los stocks de capitales que se utilizan en el proceso de producción, en el sentido de que su disrupción física es susceptible de ser propagada en la economía del País.

Tabla 7.1 Valores generales de la economía chilena (2014) y principales resultados agregados.

Descripción	Valor total	Pérdida anual esperada
Valor total de los edificios no residenciales	103,720 millones de USD	302 millones de USD
Valor total de la producción total anual	442,805 millones de USD	583 millones de USD
PIB	251,020 millones de USD	305 millones de USD
Empleo total	6,671,072 trabajadores	7,786 trabajadores
Volumen total de exportación	83,102 millones de USD	62 millones de USD
Ingresos arancelarios	1,187 millones de USD	0.91 millones de USD

Vamos a expresar el riesgo sísmico debido a pérdidas directas e indirectas en términos de las métricas estándar de estándar de riesgo presentadas en el capítulo 4: la pérdida anual esperada (AAL) y la curva de excedencia de pérdidas (LEC). Empecemos presentado los resultados a nivel país.

La Figura 7.1a muestra las curvas de excedencia de pérdidas directas y de producción para Chile. Notemos que las curvas LEC se presentaran con el período de retorno (el inverso de la tasa de excedencia) en el eje horizontal y los valores de pérdida en el eje vertical. La LEC para pérdidas directas es una métrica común utilizada el mundo del riesgo sísmico; sin embargo, la LEC para pérdidas de producción se introduce por primera vez en esta investigación. La pérdida de producción asociada a un período de retorno de 250 años para Chile se estima en 15,870 millones de dólares (3.58% de la producción total anual) mientras que la pérdidas directas fueron de 5,025 millones de dólares, esto es 4.9% del valor total de edificios no residenciales. Para un período de retorno de 1,000 años, la pérdida de producción y la pérdida directa fueron de 28,760 y 9,583 millones de dólares.

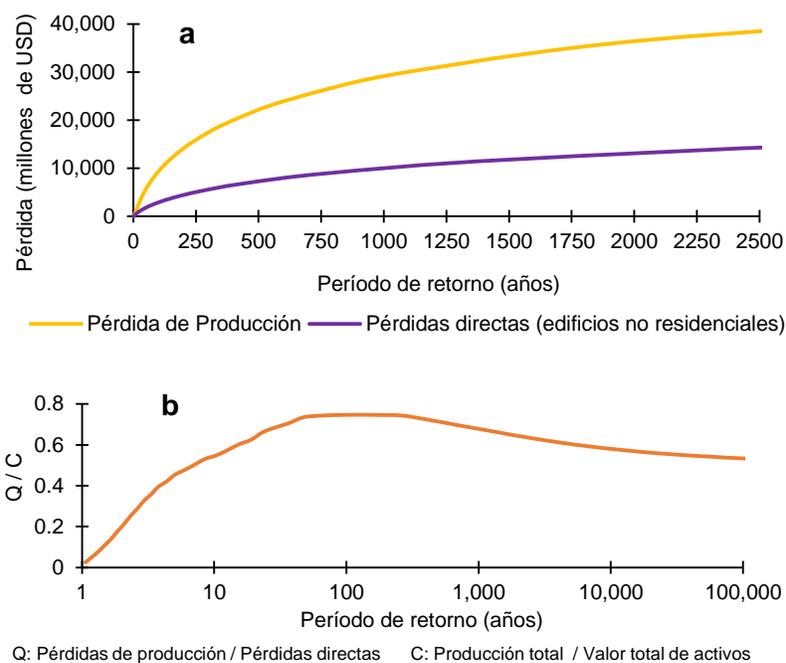


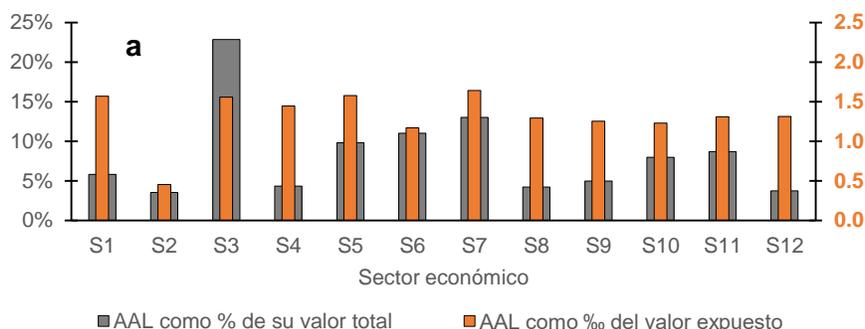
Figura 7.1 Curva de excedencia de pérdida directas y de producción.

En el panel a se ilustra las LECs expresadas en millones de dólares. Las pérdidas directas se refieren exclusivamente a edificios no residenciales del país. En el panel b se muestra la relación entre las pérdidas de producción y las pérdidas directas, Q , como una función del período de retorno. Los cocientes están normalizados con respecto a C , siendo C el cociente entre la producción total y el valor total de los activos (edificaciones no residenciales en este caso).

Además, como se muestra en la Figura 7.1b, se encontró que para eventos menos severos, con períodos de retorno hasta de 50 años, las pérdidas de producción siguen una relación proporcional positiva con la pérdidas directas, la cual va desde casi cero hasta un valor máximo de $0.74C$, siendo C el cociente entre la producción total y el valor total de edificios no residenciales). Para pérdidas con períodos de retorno entre 50 y 400 años, se observa que la relación proporcional entre pérdidas de producción y las pérdidas directas conserva su valor más alto. En un tercer tramo, a medida que las pérdidas son menos probables y más severas (períodos de retorno superiores a 400 años), las pérdidas de producción presentan una muy suave relación proporcional negativa con las pérdidas directas. Por ejemplo, para períodos de retorno de 10,000 y 100,000 años, la relación entre las pérdidas de producción y pérdidas directas cae a $0.6C$ y $0.5C$ respetivamente.

En el caso de la pérdida anual esperada a nivel país, la referente a pérdidas directas se estimó en 302 millones de dólares, la cual representa el 0.29% del valor total de los edificios no residenciales de Chile. A su vez, la AAL de producción alcanzó 583 millones de dólares, que es el 0.132% de la producción total anual del País.

La Figura 7.2 expone la AAL para Chile agrupada por sector económico, tanto para el caso de pérdidas directas como de producción. Los resultados de la AAL se presentan: 1) como un porcentaje de su valor total, con el objetivo de ver la influencia de cada sector en el valor total de la AAL; y 2) como una fracción (al millar) de su valor expuesto sectorial, tanto de activos como de producción anual, respectivamente, con el objetivo de ver cuán riesgoso es cada sector. Claramente, en la Figura 7.2, se puede ver que tanto la distribución de la AAL por sector económico así como el nivel de riesgo de estos, son diferentes para pérdidas directas y para pérdidas de producción. Por ejemplo, en el caso de pérdidas directas, el sector más riesgoso y aquel que más contribuye a la AAL, con un 35%, es el sector S6 “Comercio, hoteles y restaurantes”. Sin embargo, con respecto a las pérdidas de producción, el sector económico más riesgoso es S7, “Transporte comunicaciones y servicios de información”, mientras que aquel que con la más alta contribución a su AAL es S3, “Industria manufacturera”, con un 23%. Como se pudo ver, el sector S6 es el más afectado en sus activos físicos, con una AAL de 4.7 al millar de su valor expuesto, mientras que el caso de la producción, el sector S6 experimenta las más grandes pérdidas, con una AAL de 1.65 al millar de su producción total. Los sectores S1, S3 y S5 también presentan pérdidas considerables en su producción, con una AAL de alrededor de 1.56 al millar de sus respectivas producciones anuales.



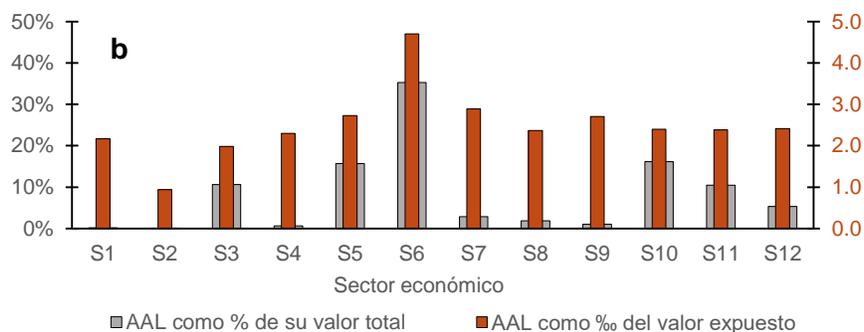


Figura 7.2 Pérdida anual esperada para Chile por sector económico.

El panel **a** muestra la AAL de producción como porcentaje de su valor total (gris) y como una fracción (al millar) del su producción total sectorial (naranja). El panel **b** muestra la AAL de pérdidas directas como porcentaje de su valor total (gris) y como una fracción (al millar) del valor total de los edificios no residenciales que forman parte de cada sector económico (rojo).

De forma similar, la Figura 7.3 presenta la AAL por región del país para ambos tipos de pérdida, conjuntamente con un indicador del nivel de amenaza sísmica, expresada en términos de la aceleración máxima del terreno (PGA) asociada a un período de retorno de 475 años. Esta figura muestra que la distribución regional de la AAL de las pérdidas directas de Chile es similar a la distribución regional de la AAL de pérdidas de producción. Como es de esperarse, la Región Metropolitana de Santiago, R7, concentra la mayor parte de la pérdida anual esperada: 40% de la AAL de pérdidas directas y 41% de la AAL de pérdidas de producción. Por el contrario, los indicadores de riesgo regional respecto a pérdidas directas no son proporcionales a sus correspondientes indicadores de pérdida de producción, como se puede observar en la Figura 7.3 y la Figura 7.4. Se encontró que la región más riesgosa (valor más alto de AAL relativa) en términos de pérdida directa es la Región de Atacama (R4) mientras que en términos de las pérdidas de producción, la más riesgosa es la Región de Valparaíso (R6). En el caso de la Región de Antofagasta (R3), esta es la 5ª región más riesgosa en términos de pérdidas directas y la 12ª en términos de pérdidas de producción. Esto claramente demuestra la importancia de tomar en cuenta las pérdidas económicas de orden superior ya que, mientras puede haber regiones físicamente más afectadas por la amenaza sísmica, existen otras regiones que experimentan los más grandes impactos en términos de pérdidas de producción. En las quince regiones de Chile, hemos visto que, en promedio anual, las pérdidas económicas causadas por los terremotos en su producción son mayores a las pérdidas causadas por el daño en las edificaciones no residenciales que conforman parte de sus respectivos stocks de capital.

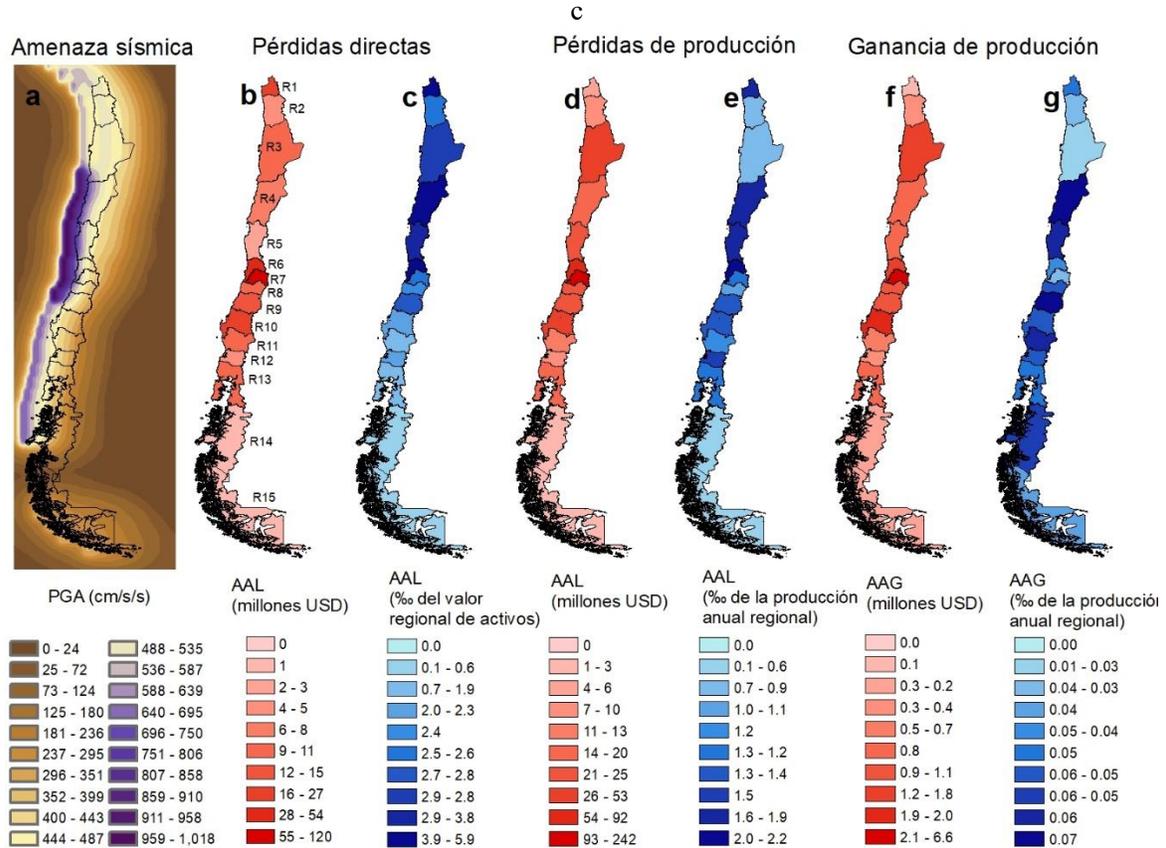


Figura 7.3 Distribución de la AAL de pérdidas de producción y pérdidas directas en Chile.

El panel **a** muestra la amenaza sísmica de Chile, expresada en términos de la aceleración máxima del suelo (PGA) asociada a un período de retorno de 475 años. El panel **b** presenta la pérdida anual esperada debida al daño físico de los edificios no residenciales (pérdidas directas) por región mientras que el panel **c** muestra esta misma pérdida como una fracción (al millar) de su respectivo valor expuesto regional. La pérdida anual esperada de producción por región se muestra en el panel **d** en millones de dólares y en el panel **e** como una fracción (al millar) de la producción anual regional correspondiente. Finalmente los paneles **f** y **g** presentan la ganancia anual esperada (AAG) de producción por región en millones de dólares y como una fracción (al millar) de la producción anual regional correspondiente.

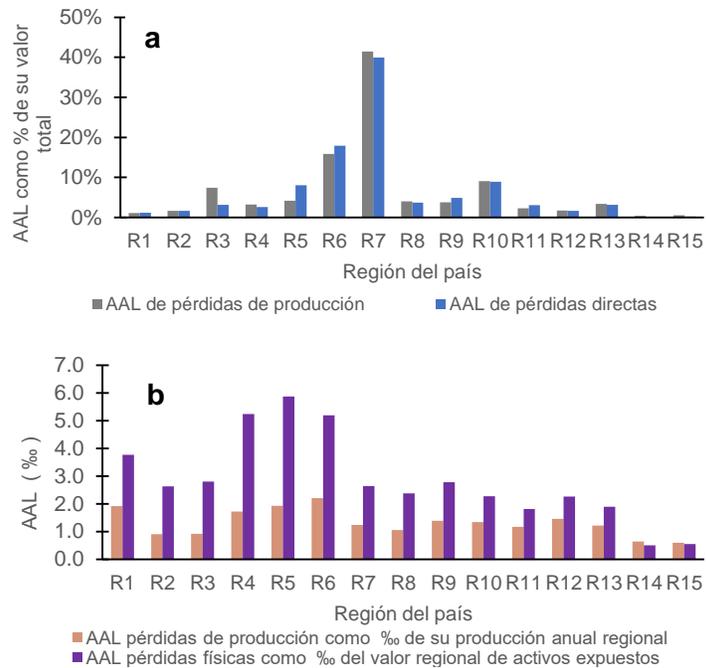


Figura 7.4 Pérdida anual esperada en Chile por región.

El panel **a** muestra la contribución de cada región de Chile al valor total de la pérdida anual esperada tanto para pérdidas directas como de producción. El panel **b** presenta 1) la AAL de pérdidas directas como una fracción (al millar) de su respectivo valor regional de edificaciones no residenciales y 2) la AAL de producción por región como una fracción (al millar) de la producción anual regional correspondiente.

La propuesta presentada permite también obtener las LEC de producción para regiones y sectores económicos individuales del país, como se muestra en la Figura 7.5, paneles a y b. Similar a lo mencionado anteriormente, la Región Metropolitana de Santiago, R7, presenta las mayores pérdidas de producción en términos absolutos. Por ejemplo, para un período de retorno de 250 años, la región R7 muestra una pérdida de 10,674 millones de dólares, la cual representa el 5.45% de su producción anual total. Sin embargo, en términos relativos a su producción anual, hasta un período de retorno de 450 años, la región más afectada es R6, mientras que para períodos de retorno superiores a 450 años, la región más afectada es R1 (Figura 7.5, panel c). En el caso de los sectores económicos, la industria manufacturera, S3, experimenta las mayores pérdidas de producción en términos absolutos mientras que el sector de transporte, comunicaciones y servicios de información, S7, las más grandes pérdidas en términos relativos a su producción sectorial, para cualquier periodo de retorno.

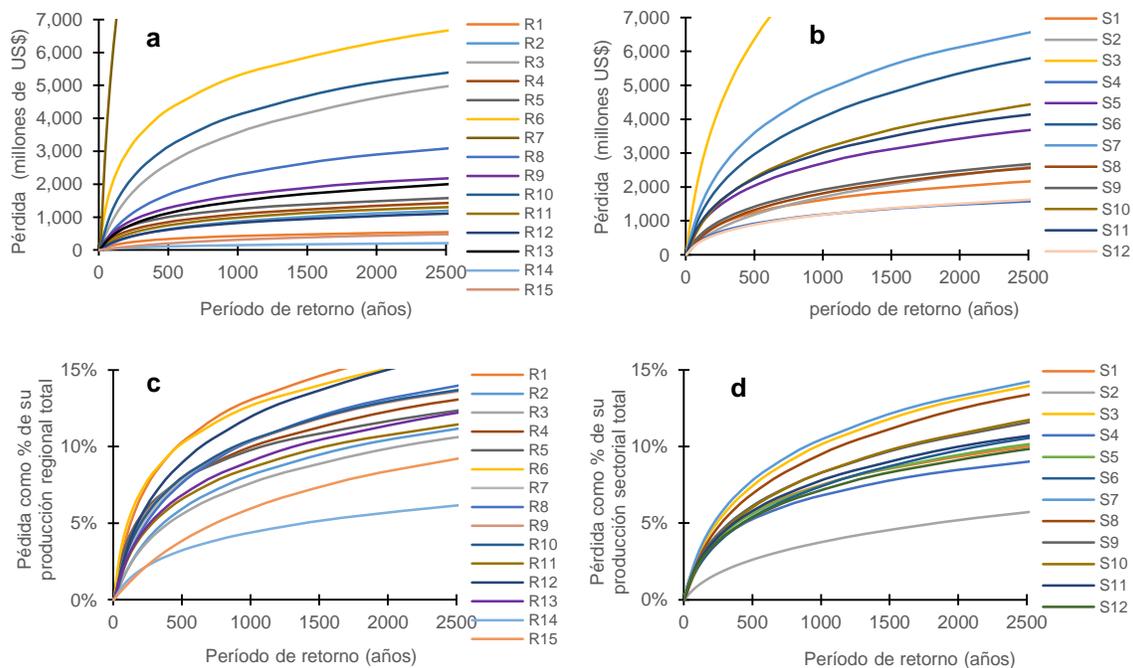


Figura 7.5 Curvas de excedencia de pérdidas de producción agrupadas por sector y región.

El panel **a** muestra las LECs en millones de dólares para cada una de las regiones de Chile mientras que el panel **b** las LECs para cada sector económico. En el caso de los paneles **c** y **d**, estos exponen las LECs por región y por sector pero expresadas como % de su respectiva producción total regional o sectorial.

En el caso de las pérdidas de producción al interior de cada región, y como se puede observar en la Figura 7.6 y Figura 7.7, nos es posible calcular y evaluar las AAL y LECs de producción de los diferentes sectores económicos dentro de cada región de Chile, permitiéndonos claramente vislumbrar las diferencias en el comportamiento económico de los sectores en cada región. Esta caracterización individual del riesgo nos permite estudiar una región en particular pero considerando las interacciones económicas generadas en todo el país así como también con la de un componente extranjero modelado como un solo agente individual.

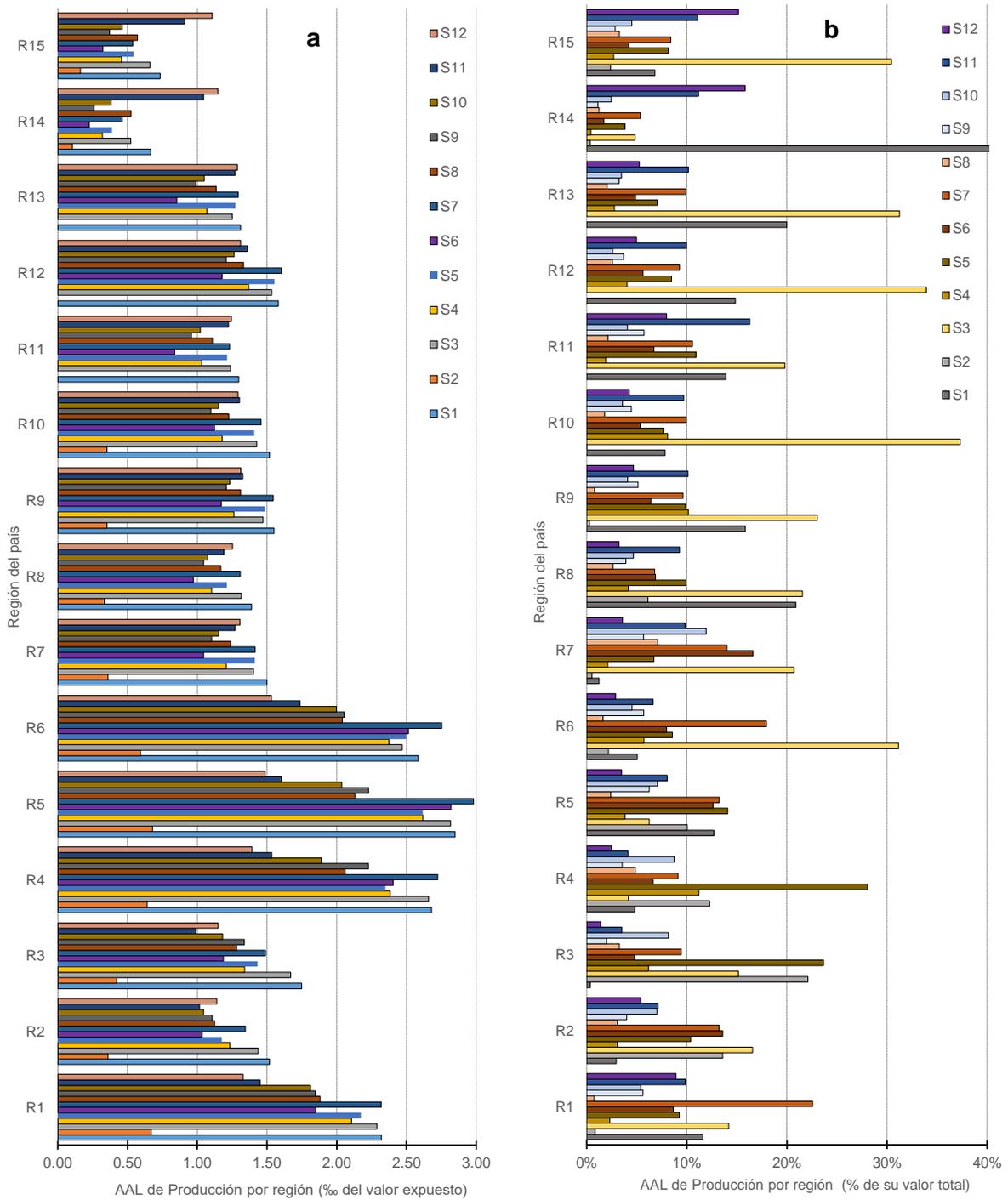


Figura 7.6 Pérdida anual esperada de producción en Chile por sector económico a nivel regional.

El panel **a** muestra la AAL como una fracción (al millar) de su producción anual sectorial/regional. El panel **b** muestra la contribución de cada sector económico a la AAL de producción regional correspondiente para las 15 regiones de Chile.

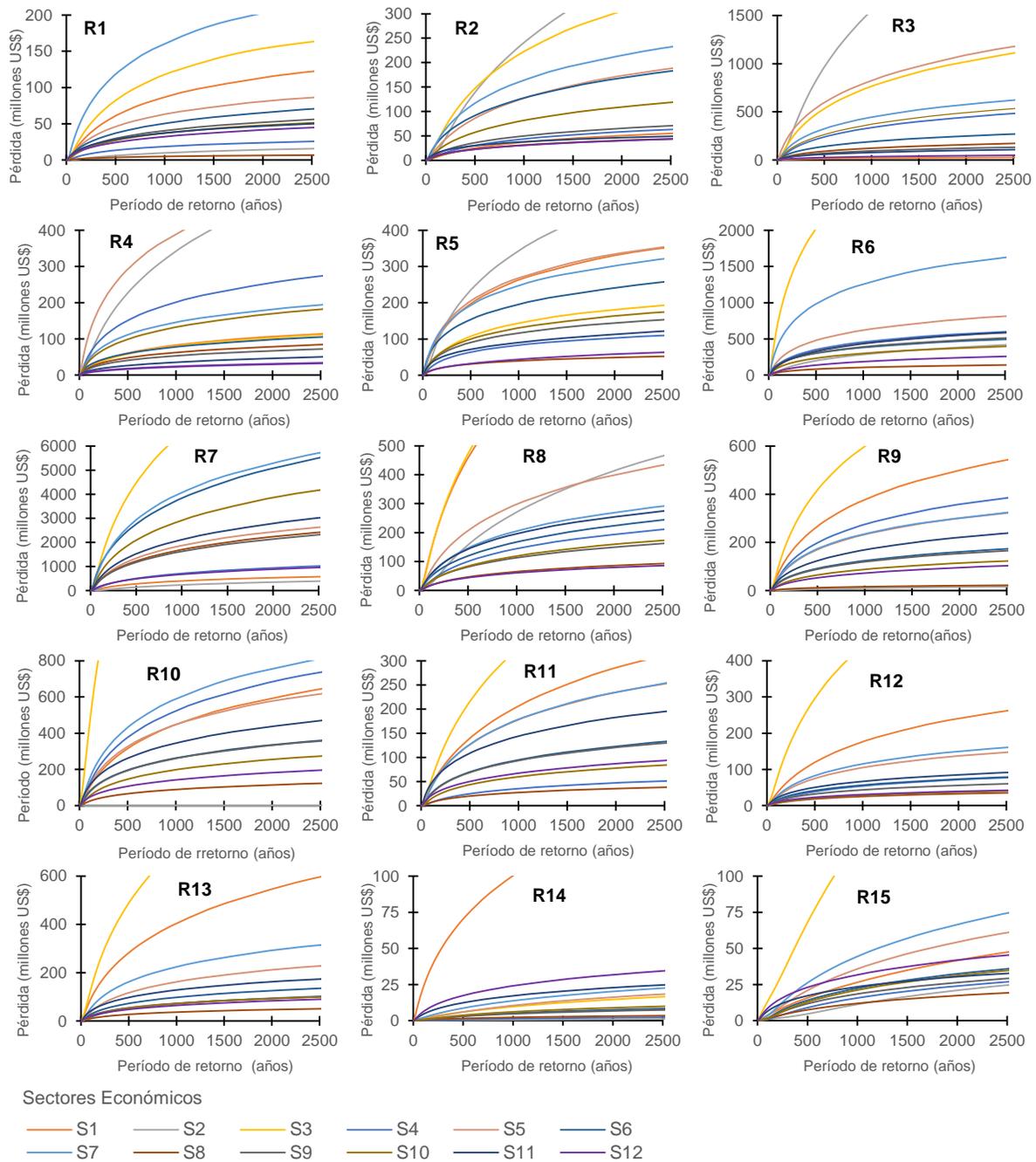


Figura 7.7 Curvas de excedencia de pérdidas de producción por sector económico para cada región de Chile.

Las curvas de excedencia de pérdidas se presentan con el período de retorno (el inverso de la tasa de excedencia) en el eje horizontal y los valores de pérdida en el eje vertical.

7.2 Nuevos Indicadores de Riesgo

Empleo: La AAL de empleo y la pérdida de empleo asociada a un período de retorno de 250 años para Chile son 7,786 y 237,165 trabajadores. Por otro lado, La Figura 7.8, paneles a y b, muestra la AAL de empleo por región del país en número de empleos perdidos y como un porcentaje de su empleo total regional, mientras que la Figura 7.9, paneles a y b, se muestra las LEC de empleo a nivel país y por región. A nivel regional, La Región Metropolitana de Santiago (R7) es la que presenta mayor pérdida absoluta de empleos, en promedio, con 4,250/año. Sin embargo, la región más afectada en términos relativos a su empleo total es la Región de Valparaíso (R6) con una AAL de 0.15% de su empleo total.

Producto Interno Bruto: La AAL y la pérdida asociada a un período de retorno de 250 años en el PIB de Chile debido a la amenaza sísmica se estiman en 305 y 9,415 millones de dólares, que corresponden al 0.122% y 3.77% de su valor total. Las pérdidas en el PIB y en el producto regional bruto (PRB) que se han calculado en este trabajo no incluyen las pérdidas directas (daño físico de activos). La Figura 7.8, paneles c y d, muestra la contracción anual promedio del PRB en millones de dólares y en términos relativos, como consecuencia de la ocurrencia de terremotos. La Figura 7.9, panel c por su parte expone la curva de excedencia de pérdidas del PIB mientras que la Figura 7.9, panel d, presenta las curvas de excedencia de pérdidas de GRP. La mayor contracción anual del GRP, similar a la producción y al empleo, tiene lugar en la Región de Valparaíso (R6), con un promedio anual del 0.2%.

Volumen de exportación: la pérdida anual esperada en el volumen de exportación de Chile causado por la amenaza sísmica se estima en 62 millones de dólares, esto es, el 0.075% del volumen total de exportación del País. En el caso de la pérdida del volumen de exportación, asociada a un período de retorno de 250 años, fue del 2.25% del volumen anual total de exportación de Chile. La Figura 7.8, paneles e y f, expone la AAL del volumen de exportación por región del país en millones de dólares y como un porcentaje de su respectivo volumen de exportación regional, mientras que los paneles e y f de la Figura 7.9 presentan las curvas de excedencia de pérdidas del volumen de exportación a nivel país y a nivel regional respectivamente. La región más afectada en su volumen de exportación, con una AAL de 0.17%, es la Región de Arica y Parinacota (R1), sin embargo, esta pérdida representa tan solo el 1% de la pérdida total, mientras que la Región Metropolitana de Santiago concentra el 38% de las pérdidas anuales totales en el volumen de exportación chileno.

Ingresos arancelarios: la pérdida anual esperada en los ingresos arancelarios de Chile así como la pérdida asociada a un período de retorno de 250 se estiman en 0.91 y 25 millones de dólares respectivamente, estas son, el 0.077% y el 2.07% del ingreso total arancelario del país. La región más afectada de Chile en sus ingresos arancelarios es la Región de Valparaíso (R6), con una AAL de 0.14% de su ingreso anual regional por aranceles. La Figura 7.9, en sus paneles g y f, expone las curvas de excedencia de pérdidas en los ingresos arancelarios tanto a nivel país como a nivel regional mientras que la Figura 7.10, panel c, muestra las AAL de ingresos arancelarios para cada región de Chile.

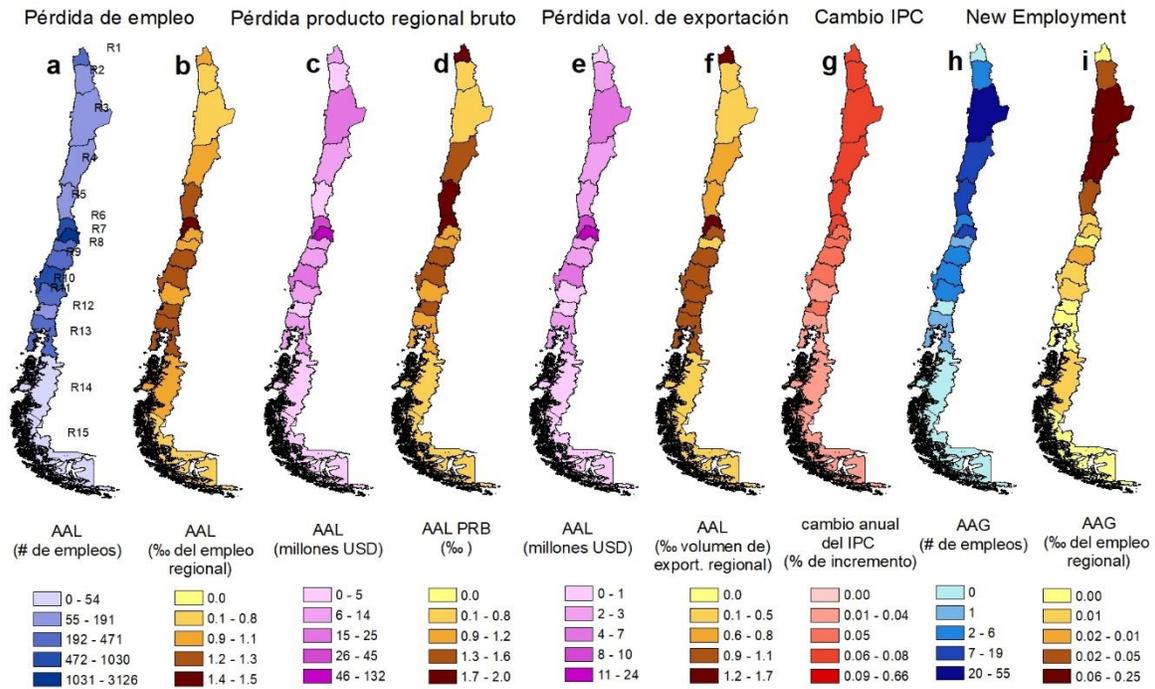
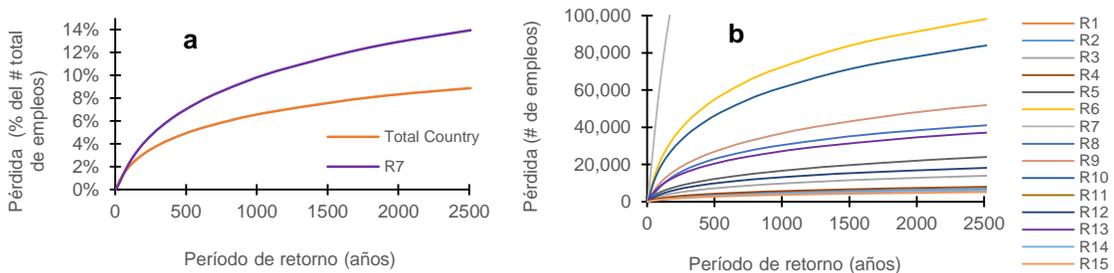


Figura 7.8 Nuevos indicadores de riesgo para Chile debido a la amenaza sísmica

La pérdida anual esperada de empleo por región de Chile se muestra en el panel **a**, en número de empleos perdidos, y en el panel **b**, como una fracción (al millar) del empleo regional correspondiente. El panel **c** y panel **d** presentan la pérdida anual esperada del producto regional bruto (PRB) en millones de dólares y en términos relativos respectivamente. El panel **e** y el panel **f** presentan la pérdida anual esperada del volumen de exportación de cada región de Chile en millones de dólares y como una fracción (al millar) de su volumen total de exportación regional respectivo. El panel **g** muestra el porcentaje de incremento en el índice de precio al consumidor para cada región de Chile. Finalmente la ganancia anual esperada en cada una de las regiones de Chile se muestra en el panel **h**, en millones de dólares, y en el panel **i**, como una fracción (al millar) de la producción regional total correspondiente.



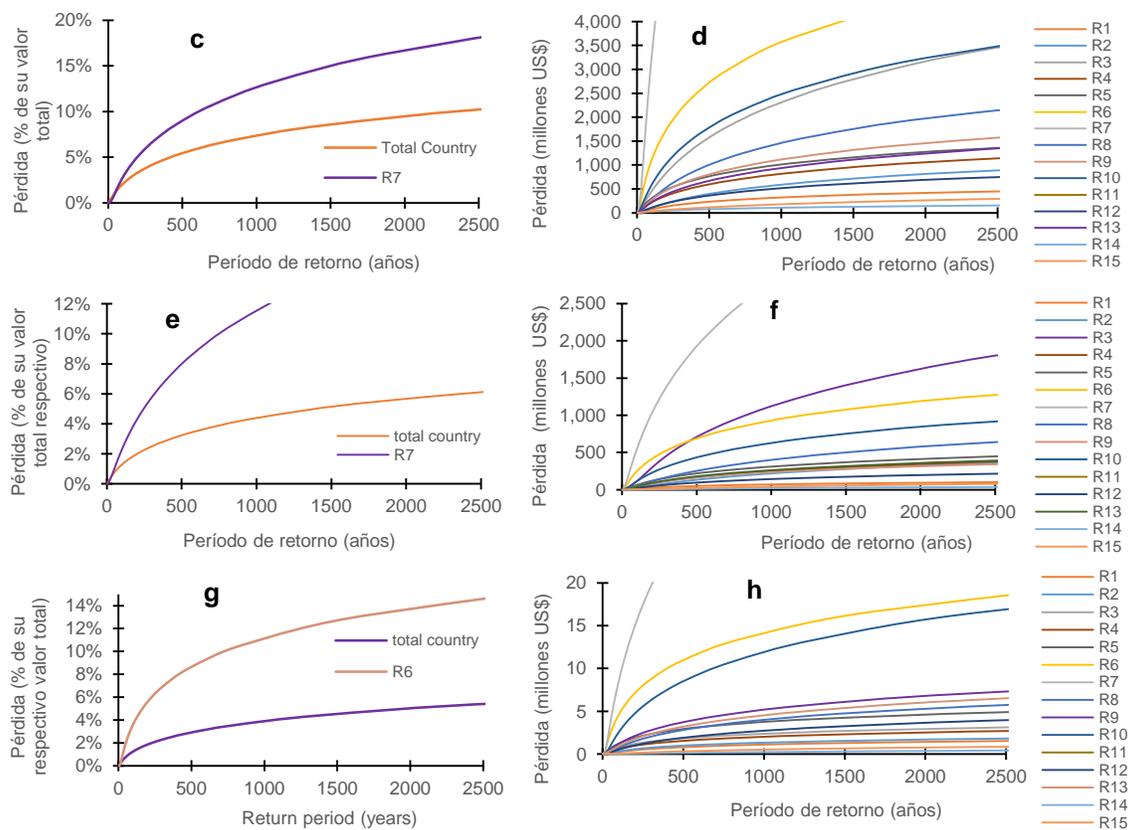


Figura 7.9 Curvas de tasas de excedencia pérdidas para Chile referidas a los nuevos indicadores de riesgo.

El panel **a** muestra las curvas de excedencia de pérdida de empleo para todo el país y para la Región 7 (Región Metropolitana de Santiago). El panel **b** las LEC de pérdidas de empleo para cada región de Chile. EL panel **c** ilustra la curva de excedencia de pérdidas respecto al PIB de Chile y la LEC respecto a las pérdidas del PRB (Producto Regional Bruto) de la Región 7. El panel **d** muestra las curvas de excedencia de pérdidas del PRB de cada región de Chile. El panel **e** muestra las curvas de excedencia de pérdidas del volumen total de exportación de todo el país y para la Región 7. El Panel **f** muestra las LEC de pérdidas del volumen de exportación de cada región de Chile. El panel **g** muestra las LEC de pérdidas por ingresos arancelarios de todo el país y para la Región Metropolitana de Santiago (R7). El panel **h** muestra las curvas de excedencia de pérdidas de ingresos arancelarios de cada una de las regiones de Chile.

Índice de precio al consumidor (IPC): más que una medida cuantitativa, este es un ejemplo de un indicador cualitativo de riesgo que podría ser utilizado para observar el efecto de los temblores en la inflación tanto a nivel país como a nivel regional. La Figura 8g y la Figura 7.10 presentan el cambio del IPC por región de Chile. Se ha podido observar que las regiones ubicadas en el cetro-norte del país son más sensibles al incremento de los precios como consecuencias de los terremotos.

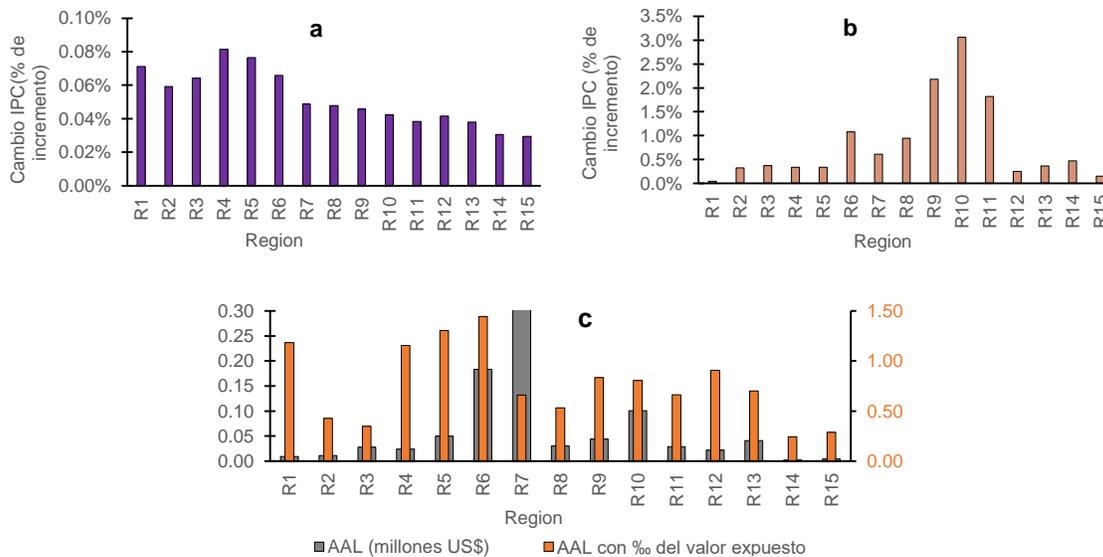


Figura 7.10 Cambio del índice de precio al consumidor (IPC) y pérdidas de ingresos arancelarios.

El panel **a** muestra el incremento promedio anual del índice de precio al consumidor para cada región de Chile. El panel **b** muestra el incremento del índice de precio al consumidor por región del país dada la ocurrencia de un evento simulado Mw8.8 con similares características a la del terremoto de Maule 2010. El panel **c** muestra la pérdida anual esperada de los ingresos arancelarios por región de Chile en millones de dólares (barras grises) y como una fracción (al millar) de la recaudación anual regional respectiva.

7.3 Efectos económicos positivos

El análisis del caso chileno confirma que, para ciertos eventos, existen ganancias, y no pérdidas, en algunas regiones y sectores económicos debido al efecto de sustitución de insumos. La ganancia anual esperada (AAG, por sus siglas en inglés) de producción calculada para Chile fue de 18.32 millones de dólares, esto es, 0.041% de la producción total anual, mientras que la ganancia de producción asociada a un período de retorno de 250 años se estimó en 335 millones de dólares (ver Figura 8c). La AAG de producción se distribuye por sector económico como se muestran en la Figura 8a y por región, como se muestra en las Figuras 3f, 3g y 8b. Como es de esperarse, el sector de la construcción (S5) acapara la mayor parte de la ganancia anual esperada de producción del país con aproximadamente el 51%. En el caso de empleo, las Figuras 7h y 7i exhiben la ganancia anual esperada por región de Chile. Es importante recalcar sin embargo, que los efectos positivos son en promedio muchos más pequeños que los efectos negativos desencadenados a causa de la amenaza sísmica.

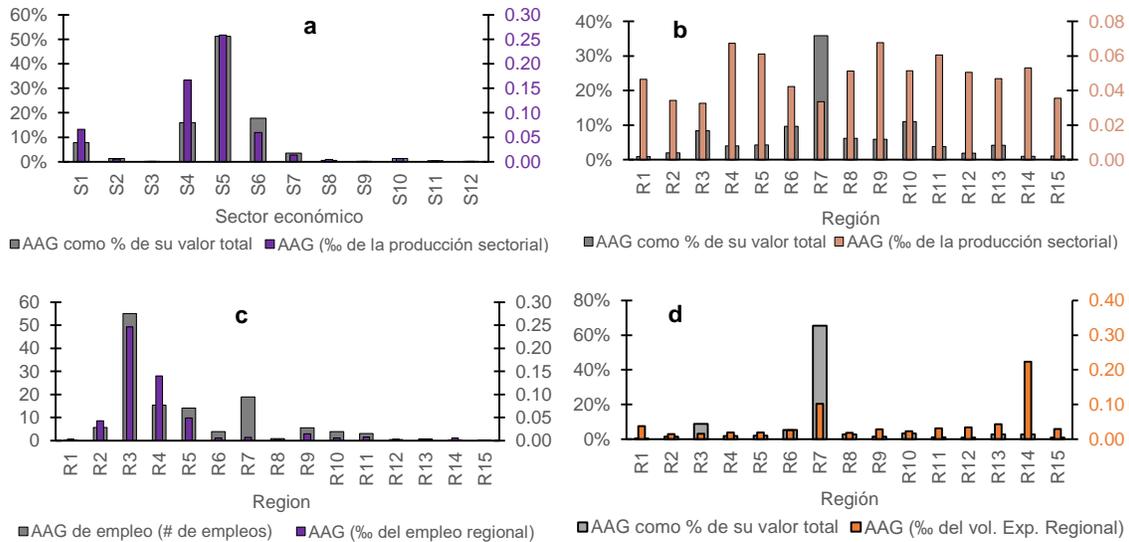


Figura 7.11 Efectos económicos positivos en Chile.

Los paneles **a**, **b** y **d** muestran la Ganancia anual esperada (AAG) como 1) un porcentaje de su valor total y 2) como una fracción (al millar) de su respectivo valor expuesto. Los paneles **a** y **b** muestran la ganancia anual promedio de producción por sector económico así como por región de Chile. El panel **c** la AAG de empleo por región del país en número de empleos ganados y como una fracción (al millar) del empleo regional respectivo. El panel **a** muestra la AAG en el volumen de exportación por región del Chile.

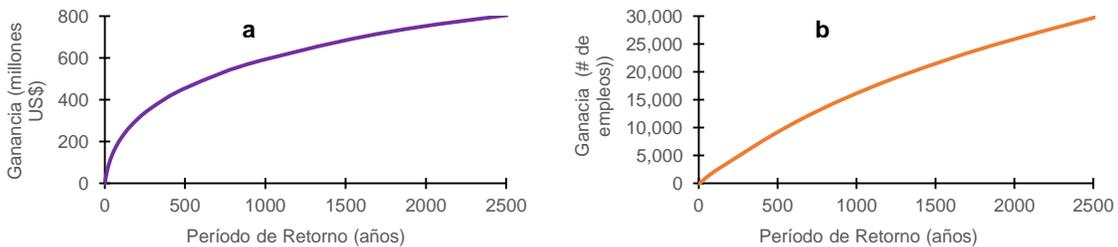


Figura 7.12 Curvas de excedencia de efectos positivos en Chile.

El panel **a** muestra la tasa de excedencia de ganancias de producción de Chile como consecuencia de la amenaza sísmica. El panel **b** por su parte muestra la tasa de excedencia de las ganancias en el empleo de Chile.

7.4 Resultados por escenario

Para ejemplificar el análisis de las pérdidas indirectas por escenario, la Figura 7.13 presenta la distribución espacial de las intensidades sísmicas así como las pérdidas directas, de producción y de empleo (agrupadas por región), causadas por la ocurrencia de un terremoto simulado Mw8.8 con similares características al terremoto de Maule 2010. Se observa claramente como las pérdidas

directas, asociadas al daño físico de los activos, se localizan en las regiones aledañas al epicentro del sismo mientras que las pérdidas de producción y empleo, se distribuyen a lo largo de todas las regiones del país. Los resultados de pérdida se presentan en términos absolutos y en términos relativos a sus respectivas producciones/empleos totales regionales. La pérdida en la producción causada por este evento se ha estimado en 3.9% del total de producción anual del país y se distribuye por sector económico como lo indica la Figura 7.14, panel a y por región como se muestra en la Figura 7.13, paneles d y e, y Figura 7.14, panel c. La Figura 7.14, panel b, también nos muestra cómo ciertos efectos económicos positivos, producidos a consecuencia del terremoto Mw8.8, se concentran en el sector económico S4 (electricidad, gas y gestión de residuos) mientras que regionalmente se distribuyen por aquellas zonas que no presentan daños en sus activos físicos (panel d).

La ocurrencia de un sismo de esta magnitud también tendría un efecto inflacionario en el país. La Figura 7.13, panel g y en la Figura 7.10, panel b, muestran el incremento en el índice del precio al consumidor en las diferentes regiones de Chile. Se encontró que el máximo incremento de los precios tendría lugar en la Región de Bio-Bio (R10), con un 3%.

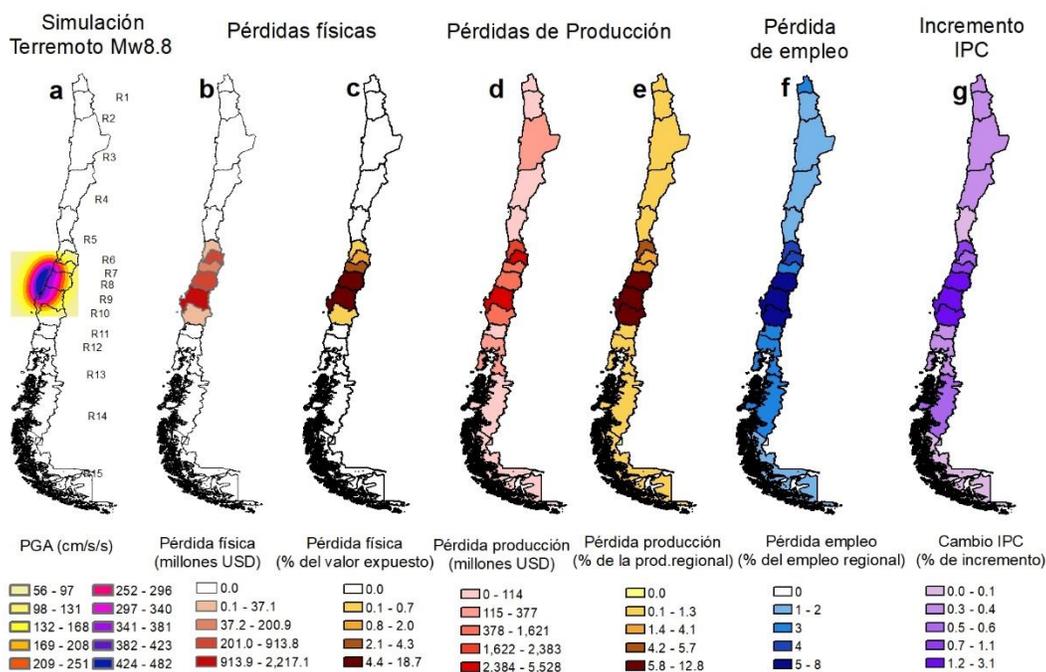


Figura 7.13 Pérdidas económicas causadas en las diferentes regiones de Chile por un terremoto simulado Mw8.8, con similares características al terremoto de Maule 2010.

El panel a muestra la intensidad sísmica producida por el evento expresada en de Chile, expresada en términos de la aceleración máxima del suelo (PGA). El panel b presenta las pérdidas directas debido al daño físico de los edificios no residenciales por región mientras que el panel c muestra esta misma pérdida como un porcentaje de su respectivo valor expuesto regional. Las pérdidas de producción por región se muestran en el panel d en millones de dólares y en el panel e como porcentaje de la producción anual regional correspondiente. Finalmente el panel f presenta la pérdida de empleo por región como un porcentaje del empleo regional correspondiente y el panel g, el incremento porcentual del índice de precio al consumidor en cada región del Chile.

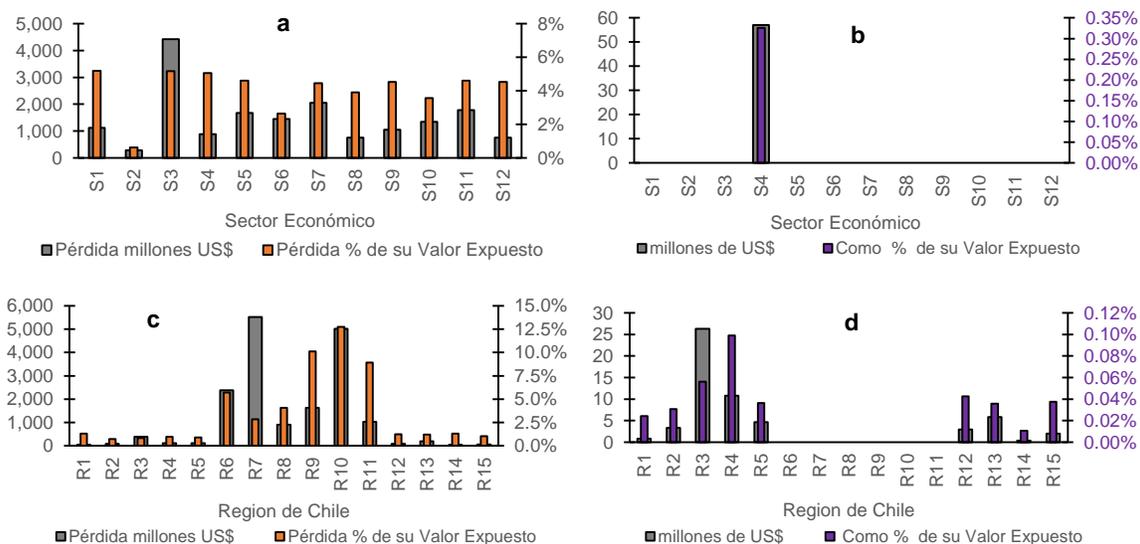


Figura 7.14 Pérdidas económicas por sector económico y por región causadas en Chile por un terremoto simulado Mw8.8.

Los panel a y c muestran las pérdidas de producción por sector económico y por región de Chile en millones de dólares y como un porcentaje de la producción sectorial/regional respectiva. Los paneles b y c muestran las ganancias en la producción por sector y por región de Chile.

8. Conclusiones

En esta investigación se ha presentado exitosamente un modelo probabilista útil para la estimación de las pérdidas económicas indirectas ocasionadas por los terremotos. Se ha mostrado cómo el modelo de equilibrio general computable CGE y el modelo probabilista de riesgo sísmico son capaces de trabajar conjuntamente, permitiendo un robusto y sistemático vistazo de las distintas consecuencias que las perturbaciones por terremotos pueden provocar dentro de toda una economía. El enfoque presentado abordó exitosamente las pérdidas de producción, ejemplificando la metodología propuesta mediante el cálculo de las métricas estándar de riesgo como son, la pérdida anual esperada de producción y la curva de excedencia de pérdidas de producción, ambas calculadas a nivel país, regional y sectorial. El enfoque presentado no se limita exclusivamente a las pérdidas de producción; por el contrario, y aprovechando la riqueza de la modelación CGE, se ha mostrado cómo es posible calcular las métricas estándar de riesgo referidas a pérdidas en diferentes aspectos de la economía como son el empleo, PIB, PRB, volumen de exportación, inflación, ingresos arancelarios, entre otros. Todas las pérdidas se calcularon para una vasta colección de eventos con frecuencias de ocurrencia conocidas que colectivamente describen la amenaza sísmica de todo un país, y que además, permiten el cálculo de las medidas de riesgo. Estas nuevas medidas de riesgo son útiles y están pensadas como un complemento a los indicadores tradicionales de riesgo de daño físico existentes, y que además pueden contribuir para un mejor manejo integral del riesgo así como en el diseño de instrumentos financieros de transferencia del riesgo para los gobiernos y la industria aseguradora. El nuevo modelo captura no solo las consecuencias negativas de los terremotos sino también algunos efectos positivos en la economía proponiendo nuevas métricas probabilísticas referidas a estas ganancias. El nuevo enfoque no es exclusivo para la amenaza sísmica sino que puede ser fácilmente extendido a otros desastres naturales como inundaciones, huracanes, sequías, etc.

Contar con indicadores cuantitativos sobre las pérdidas de producción esperadas en los próximos 100, 500, 1000 años, la pérdida anual esperada de empleo en un país o en un estado/región específica, un indicador de las pérdidas anuales en las importaciones o exportaciones, el tener una metodología sólida y transparente para cuantificar la contracción anual esperada del PIB o su contracción esperada en los próximos 50 años, todo esto causadas por la ocurrencia de desastres naturales, en nuestro caso, sismos, ejemplifican el aporte de este trabajo de investigación.

Los desastres naturales en un área determinada afectan los activos localizados en esa área. Pero las pérdidas se pueden transmitir hacia otras zonas por medio de una variedad de canales como los vínculos comerciales, vínculos de demanda y la movilidad interregional de los factores de producción. Una mejor comprensión de estas dimensiones espaciales y económicas de los desastres naturales es particularmente importante para cuantificar las pérdidas económicas y humanas y para direccionar los esfuerzos para prepararse y mitigar las pérdidas. La preparación y planificación ante desastres se vuelve más efectiva cuando se calculan y consideran los costos totales (directos e indirectos). A pesar de que los impactos directos son usualmente más grandes que los impactos indirectos, estos últimos son cada vez más importantes para la evaluación de las pérdidas económicas totales. No considerar estos efectos indirectos puede conducir a malas decisiones respecto a la asignación de fondos durante la recuperación. Las políticas deberían considerar acciones de socorro en conjunto para mitigar el impacto tanto en las áreas directamente afectadas así como en las regiones vecinas afectadas indirectamente. El modelo y los nuevos indicadores de riesgo desarrollados en esta investigación son de gran utilidad para contribuir en los aspectos mencionados.

Caso Chile

La pérdida anual esperada y la pérdida de producción asociada a un período de retorno de 250 años para Chile fueron estimadas en 583 y 15 870 millones de dólares, esto es el 0.132% y el 3.58% de la producción total anual del país. En base a consultas realizadas con expertos en el tema, estos resultados lucen razonables en relación a las pérdidas directas obtenidas (0.29% del valor total de los activos expuestos). Respecto a la pérdida anual esperada del PIB, volúmenes de exportación e impuestos arancelarios, estas fueron de 305, 62 y 0.91 millones de dólares, mientras que sus pérdidas respectivas asociados a un período de retorno de 250 años fueron de 3.77% del PIB, 2.25% del volumen anual de exportación y 2.07 de los ingresos arancelarios anuales. La pérdida anual esperada de empleos así como la pérdida de empleos para un período de retorno de 250 años se estimaron en 7 786 y 237 165 empleos perdidos. Por otro lado, la Región Metropolitana de Santiago concentra alrededor del 41% de la AAL de producción de Chile mientras que la Región de Valparaíso es la que mayor riesgo sísmico presenta, con una AAL de su producción regional de 0.22%.

En base al análisis de las curvas de excedencia de pérdidas del caso Chileno, se observó que para terremotos menos severos con períodos de retorno bajos (hasta de 50 años), las pérdidas de producción siguen una relación proporcional positiva con la pérdidas directas, la cual va desde casi cero hasta un valor máximo. Para pérdidas con períodos de retorno entre 50 y 400 años, se observa que la relación proporcional entre pérdidas de producción y las pérdidas directas conserva su valor más alto. En un tercer tramo, a medida que las pérdidas son menos probables y más severas (períodos de retorno superiores a 400 años), las pérdidas de producción presentan una muy suave relación proporcional negativa con las pérdidas directas.

Una conclusión inmediata de estas últimas observaciones es que, claramente, la relación entre el tamaño de las pérdidas directa e indirectas no es constante, y varía significativamente dependiendo del período de retorno analizado.

Los resultados expuestos para el caso Chileno ejemplifican muy bien toda la información que es posible general con el nuevo enfoque desarrollado en esta investigación. Su uso y aplicación es diversa, no solo dentro del campo ingenieril sino para economistas, expertos en el manejo de desastres, experto del sector asegurador, tomadores de decisiones políticas relaciones a desastres, entre otros.

9. Referencias

- Aguilar, A., Ordaz, M., De la Puente, J., Pujades, L., Barbat, A., Rodríguez, H., . . . Campos Rios, A. (2018). Sensitivity Analysis of Seismic Parameters in the Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA) for Barcelona Applying the New R-CRISIS. *Computación y Sistemas*, 22(4), 1099-122. doi: 10.13053/CyS-22-4-3084
- Arrow, K. J., Chenery, H., Minhas, B., & Solow, R. (1961). Capital-labor Substitution and Economic Efficiency. *The Review of Economics and Statistics*, 43(3), 225-250.
- Aubrecht, C., & Leon Torres, J. (2015). Top-Down Identification of Mixed vs. Residential use in Urban Areas: Evaluation of Remotely Sensed Nighttime Lights for a Case Study in Cuenca City, Ecuador. In *Proceeding of the 1st Int. Electron. Remote Sens., Sciforum Electronic Conference Series, 1*. doi:doi:10.3390/ecrs-1-d005.
- Aubrecht, C., & Leon Torres, J. (2016). Evaluating multi-sensor nighttime Earth Observation data for identification of mixed vs. residential use in urban areas. *Remote Sens.*, 8(114).
- Aubrecht, C., Steinnocher, K., Kostl, M., Zuger, J., & Loibl, W. (2013). Long-term spatiotemporal social vulnerability variation considering health-related climate change parameters particularity affecting elderly. *Nat. Hazards*, 68(3), 1371-1383.
- Avelino, A., & Hewings, G. (2019). The Challenge of Estimating the Impact of Disasters: Many Approaches, Many Limitations and Compromise. En Y. Okuyama, & A. Rose, *Advances in Spatial and Economic Modeling of Disaster Impacts* (págs. 163-189). Cham: Springer.
- Barker, K., & Haines, Y. Y. (2009). Uncertainty Analysis of Interdependencies in Dynamic Infrastructure Recovery: Application in Risk-Based Decision Making. *Journal of Infrastructure Systems*, 15(4), 394-504.
- Bertero, V., Anderson, J., Krawinder, H., & Miranda, E. (1991). *Design Guidelines for Ductility and Drift Limitations: Review of the State-of-the-Practice and State-of-the-Art in Ductility and Drift-Based Earthquake Resistant Design Buildings*. U.C. Berkeley: Report No. UCB/EERC-91/15,EERC.
- Bourguignon, F., & Maurizio, B. (2012). Income Distribution in Computable General Equilibrium Modeling. En P. Dixon, & D. Jorgenson, *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling* (págs. 1383-1437). Oxford: North-Holland, Elsevier.
- Brookshire, D. S., Chang, S. E., Cochrane, H., Olson, R. A., Rose, A., & Steenson, J. (1997). Direct and Indirect Economic Losses from Earthquake Damage. *Earthquake Spectra*, 13(4), 683-701. doi:10.1193/1.1585975
- Burfisher, M. (2011). *Introduction to Computable General Equilibrium Models*. New York: University Press.
- Cardona, O., Ordaz, M., Mora, M., Salgado-Gálvez, M., Bernal, G., Zuloaga-Romero, D., . . . González, D. (2014). Global risk assessment: A fully probabilistic seismic and cyclone tropical wind risk assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*.

- Cardona, O., Ordaz, M., Reinoso, E., & Yamin, L. (2012). CAPRA - Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment: International Initiative for Risk Management Effectiveness. *15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisboa, Portugal.
- Chang, S., & Dowlatabadi, H. (2019). Transportation Disruptions and Regional Supply Chains: A Modelling Framework with Application to Coastal Shipping. En Y. Okuyama, & A. Rose, *Advances in Spatial and Economic Modeling of Disaster Impacts* (págs. 243-264). Cham: Springer.
- Cobb, C., & Douglas, P. (1928). A Theory of Production. *American Economic Review*, 18, 139-165.
- Cobb, C., & Douglas, P. (1948). Are there Laws of Production? *The American Economic Review*, 38, 1-41.
- Cornell, C. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin Seismological Society of America*, 58(2), 1583-1606.
- Cornell, C. A., & Vanmarcke, E. H. (1969). The Major Influences on Seismic Risk. *4th World Conf on Earthquake Engineering*. Santiago, Chile.
- Devis, K., de Melo, J., & Robinson, S. (1982). *General Equilibrium Model for Development Policy*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dixon, P., & Jorgenson, D. (2013). *Handbook of Computable General Equilibrium Modelling*. Oxford: North-Holland - Elsevier.
- Dixon, P., & Parmenter, B. (1996). Computable General Equilibrium Modeling for Policy Analysis and Forecasting. En H. Amman, D. Kendrick, & J. Rust, *Handbook of Computational Economics*. Elsevier Science.
- Dixon, P., Koopman, R., & Riemmer, M. (2011). The MONASH Style of Computable General Equilibrium Modeling: A Framework for Practical Policy Analysis. En P. Dixon, & D. Jorgenson, *handbook of Computable General Equilibrium Modeling* (págs. 23-103). Oxford: North-Holland.
- Dixon, P., Parameter, B. R., Sutton, J., & Vincent, D. P. (1982). *ORANI: A Multisectoral Model of the Australian Economy*. Oxford: North-Holland.
- Dixon, P., Parmenter, B., Powell, A., & Wilcoxon, P. (1992). *Note and Problems in Applied General Equilibrium Economics*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science B.V.
- Douglas, P. H. (1934). *The Theory of Wages*. New York: The Macmillan Co.
- ERN. (2015). *Modelo de Peligro Sísmico para Chile*. Ciudad de México, México.
- ERN-AL. (2010). CAPRA, Assessment Models of Natural Hazards and Selection. Obtenido de <https://www.ecapra.org>. Accessed 10 December 2019
- ERN-AL. (2010). CAPRA, *Methodology of Probabilistic Risk Assessment*. Obtained from: <http://www.ecapra.org/>. Accessed 1 April 2020.
- ERN-AL. (2010). CAPRA, *Metodología de definición del inventario de activos expuestos*. <http://www.ecapra.org/>. Acceso: 10 de abril del 2020.

- ERN-AL. (2010). *CAPRA: Vulnerabilidad de Edificaciones e infraestructura*.
- Esteva, L. (1967). Criterios para la construcción de espectros para diseño sísmico. *3er Simposio Panamericano de Estructuras*, (págs. 3-8). Caracas, Venezuela.
- Esteva, L. (1970). *Seismic Regionalization of Mexico for Engineering Purposes*. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México (in spanish).
- Geary, R. C. (1950). A Note on A Constant-Utility Index of the Cost of Living. *Review of Economic Studies*, 18(2), 65-66.
- GFDRR. (2012). *DaLA database*. World Bank.
- Gunasekera, R., Ishizawa, O., Aubrecht, C., Blankespoor, B., Murray, B., Pomonis, A., & Daniel, J. (2015). Developing and adaptive global exposure model to support the generation of country disaster risk profile. *Earth-Science Reviews*, 150, 594-608.
- Haddad, E. (1999). *Regional Inequality and Structural Changes: Lessons from the Brazilian Economy* (1 ed.). Aldershot: Ashgate.
- Haddad, E. (2009). Interregional Computable General Equilibrium Models. En M. Sonis, & G. Hewings, *Tool Kits in Regional Science: Theory, Models and Estimation* (págs. 199-154). Berlin: Springer.
- Haddad, E. A. (2005). Market Imperfections in a Spatial Economy: some Experimental Results. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 45(2-3), 476-796.
- Haddad, E., & Hewings, G. (2005). Market imperfection in a spatial economy: some experimental results. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 45(2-3), 476-496.
- Haddad, E., & Okuyama, Y. (2016). Spatial Propagation of the Economic Impacts of Bombing: The case of 2006 War in Lebanon. *Rev. Middle East Econ. Fin.*, 12(3), 225-256.
- Haddad, E., & Teixeira, E. (2015). Economic Impacts of Natural Disasters in Megacities: The case of Floods in Sao Paulo. *Habitat International*, 45, 106-113.
- Haddad, E., Araújo, I., Ibarraán, M., Boyd, R., Elizondo, A., Liedo-Orozco, P., . . . Belausteguigoitia, J. (2019). *Interregional Input-Output System for Mexico, 2013*. Sao Paulo: University of Sao Paulo Urban and Regional Economics lab (NEREURS).
- Haddad, E., Aroca, A., Arantes, A., Días, S., Fernandes, L., Pimienta, R., . . . Ussami, K. (2018). *Interregional Input-Output System for Chile, 2014*. Sao Paulo: The University of Sao Paulo Regional and Urban Economics Lab (NEREUS).
- Haddad, E., Aroca, A., Arantes, A., Días, S., Fernandes, L., Pimienta, R., . . . Ussami, K. (2019). *Modelo Interregional de Equilibrio General Computable para Chile*. Sao Paulo: University of São Paulo Regional and Urban Economics Lab (NEREUS).
- Haddad, E., Domingues, E., & Perobelli, F. (2002). Regional effects of economic integration: the case of Brazil. *Journal of Policy Modeling*, 24(5), 453-482.
- Haimes, Y. Y., & Jiang, P. (2001). Leontief-based model of risk in Complex Interconnected Infrastructures. *Journay of Infrastructure Systems*, 7(1), 1-12. doi:10.1061/(ASCE)1076-0342(2001)7:1(1)

- Hallagatte, S., & Vogt-Schilb, A. (2019). Are Losses from Natural Disasters More Than Just Assets Losses? En Y. Okuyama, & A. Rose, *Advances in Spatial and Economic Modeliing of Disaster Impacts. Advances in Spatial Science (The Regional Science Series)*. Cham : Springer.
- Heatowole, N., & Rose, A. (2013). A reduced-form rapid economic consequence estimating model: application to property damage from U.S. earthquakes. *Int J Disaster Risk*, 4, 20-32.
- Horrige, M. (2001). *MINIMAL. A Simplified General Equilibrium Model*. Melbourne, Australia: Centre of Policy Studies and the Impact Project, Victoria University.
- Horrige, M. (2006). *ORANI-G: A Generic Single Country Computable General Equilibrium Model*. Melbourne: Centre of Policy Studies and Impact Project, Monash University, Australia.
- Horrige, M., Meeraus, A., Pearson, K., & Rutherford, T. (2013). Solution Software for Computable General Equilibrium Modeling. En P. Dixon, & D. Jorgenson, *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling* (págs. 1331-1381). Oxford: North-Holland.
- Johansen, L. (1960). *A Multisector Study of Economic Growth*. Amsterdam (second edition 1974): North-Holland.
- Johansen, L. (1960). *A Multisectorial Study of Economic Growth. Contributions to Economic Analysis 21*. Amsterdam: North-Holland.
- Kajitani, E., & Tatano, H. (2019). Advantages of the Regional and Sectoral Disaggregation of a Spatial Computable General Equilibrium Model for the Economic Impact Analysis of Natural Disasters. En Y. Okuyama, & A. Rose, *Advances in Spatial and Economic Modeling of Disaster Impacts* (págs. 323-358). Cham: Springer.
- Kajitani, Y., & Tatano, H. (2014). Estimation of production capacity loss rate after the Great East Japan earthquake and Tsunami in 2011. *Econ Syst Res*, 26(1), 13-38.
- Kajitani, Y., & Tatano, H. (2018). Applicability of a spatial computable general equilibrium model to assess the short-term economic impact of natural disaster. *Economic System Reseach*, 30(3), 289-312.
- Kajitani, Y., & Tatano, H. (2019). Advantages of the Regional and Sectoral Disaggregation of a Spatial Computable General Equilibrium Model for the Economic Impact Analysis of Natural Disasters. En Y. Okuyama, & A. Rose, *Advances in Spatial and Economic Modeling of Disaster Impacts* (págs. 327-358). Cham: Springer.
- Klein , L., & Rubin, H. (1947). A Constant-Utility Index of the Cost of Living. *Review of Economic Studies*, 15(2), 84-87.
- Koks, E., & Thissen, M. (2016). A multiregional Impact Assessment Model for disaster analysis. *Economic System Reseach*, 28(4), 429-449.
- Koks, E., Bockarjova, M., de Moel, H., & Aerts, J. (2015). Integrated Direct and Indirect Flood Risk Modeling: Development and Sensitivity Analysis. *Risk Analysis*, 34(5), 882-900.
- Koks, E., Pant, R., Husby, T., Tobben, J., & Oosterhaven, J. (2019). Multiregional Disaster Impact Models: Recent Advances and Comparison of Outcomes. En Y. Okuyama, & A. Rose,

- Advances in Spatial and Economic Modeling of Disaster Impacts* (págs. 191-218). Cham: Springer.
- Koks, E., Rozenberg, E., Zorn, C., Tariverdi, M., Vousdoukas, M., Fraser, S., . . . Hallegatte, S. (2019). A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets. *Nat Commun.*, *10*, 2677.
- León , J. A. (2015). *Desarrollo del Modelo de Exposición Top-Down a nivel Urbano y Evaluación del Riesgo Sísmico de la Ciudad de Cuenca, Ecuador*. Ciudad de México: Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- León Torres, J. A. (2019). *City Disaster Risk Profile: Tegucigalpa City*. Washington DC, USA: The World Bank.
- Leontief, W. (1936). Quantitative Input-Output Relations in the Economic System of the United States. *Review of Economics and Statistics*, *18*, 105-125.
- Leontief, W. (1951). Input-Output economic. *Scientific American*, *185(4)*, 15-21.
- Leontief, W. (1986). *Input-Output Economics* (2nd ed.). New York: Oxford University Press.
- Leontief, W., Morgan, A., Polenske, K., Simpson, D., & Tower, E. (1965). The Economic Consequences - Industrial and Regional - of an Arms Cut. *Review of Economics and Statistics*, *47(3)*, 217-241.
- Lian, C., & Haimés, Y. Y. (2006). Managing the Risk of Terrorism to Interdependent Infrastructure Systems Through the Dynamic Inoperability Input-Output Model. *Systems Engineering*, *9(3)*, 241-258.
- Lian, C., Santos, J. R., & Haimés, Y. Y. (2007). Extreme Risk Analysis of Interdependent Economic and Infrastructure Sectors. *Risk Analysis*, *27(4)*, 1053-1064. doi:10.1111/j.1539-6924.2007.00943.x
- Marulanda, M., Carreño, M., Cardona, O., Ordaz, M., & Barbat, A. (2013). Probabilistic Earthquake Risk Assessment using CAPRA: application to the city of Barcelona. *Nat Hazard*, *59*, 59-84.
- McGuire, R. (2007). Probabilistic seismic hazard analysis: Early history. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, *37*, 329-338. doi:10.1002/eqe.765
- Miller, R. E., & Blair, P. B. (2009). *Input-Output Analysis* (Second Edition ed.). New York: Cambridge University Press.
- Miranda, E. (1997). Estimation of Maximum Interstory Drift Demands in Displacement-Based Design Balkema: *Balkema: Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes*, H. Krawinkler and P. Fajfar editor.
- Miranda, E. (1999). Approximate Seismic Lateral Deformation Demands on Multistory Buildings. *Journal of Structural Engineering*, *125*, 417-425.
- Naqvi, F., & Peter, M. (1995). *MONASH-MRF: A Multiregional, Multisectoral Model of the Australian Economy*. Melbourne: Centre of Policy Studies Monash University.
- Okuyama, Y. (2007). Economic Modeling for Disaster Impact Analysis: Past, Present and Future. *Systems Research*, *19(2)*, 115-124.

- Okuyama, Y., & Chang, S. (2004). *Modeling Spatial and Economic Impacts of Disasters*. New York: Springer.
- Okuyama, Y., & Rose, A. (2019). *Advances in Spatial and Economic Modeling of Disaster Impacts*. Switzerland: Springer.
- Ordaz, M. (2000). *Metodología para la evaluación del riesgo sísmico enfocada en la gerencia de seguros por terremoto*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ordaz, M. (2008). *Curvas de Fragilidad y Vulnerabilidad*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería UNAM.
- Ordaz, M. G., Salgado-Gálvez, M., Cardona, O., & Contreras, M. (2019). R-CRISIS: 30 years of continuous developments and improvements towards better probabilistic seismic hazard analyses. *Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Cali, Colombia.
- Ordaz, M., Cardona, D., Salgado-Gálvez, M., Bernal, G., Singh, S., & Zuloaga, D. (2014). Probabilistic seismic hazard assessment at global level. *International Journal of Disaster Risk Reduction*.
- Orsi, M. J., & Santos, J. R. (2010). Probabilistic Modeling of Workforce-based disruptions and Input-Output Analysis of Interdependent Ripple Effects. *Economic Systems Research*, 22(1), 3-18. doi:10.1080/09535311003612419
- Peter, M., Horridge, M., Meagher, G., Naqvi, F., & Parmenter, B. (1996). *The theoretical structure of Monash-MRF*. Clayton: Monash University, Working paper No. OP-85, IMPACT Project.
- Peter, M., Horridge, M., Meagher, G., Naqvi, F., & Parmenter, B. (1996). *The theoretical structure of MONASH-MRF*. Victoria University, Center of Policy Studies/IMPACT centre.
- Pindyck, R., & Rubinfeld, D. (2009). *Microeconomía* (Séptima ed.). Madrid, España: Pearson Prentice Hall.
- Pomonis, A. (2014). *Central America (Costa Rica-El Salvador-Guatemala-Honduras & Nicaragua: Estimation of residential inventory and exposure in urban and rural areas for disaster loss estimation*. Washington DC, USA: The World Bank - Social, Urban, Rural & Resilience (GSURR), Disaster Risk Management (DRM).
- Pomonis, A. (2014). *Panama: Estimation of residential inventory and exposure in urban and rural areas for disaster loss estimation*. Washington DC, USA: The World Bank- Social, Urban, Rural & Resilience (GSURR), Disaster Risk Management.
- Priestley, M. (1997). Displacement-Based Assessment of Reinforced Concrete Buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 1, 157-192.
- Raschky, P. (2013). *Estimating the effects of West Sumatra Public Asset Insurance Program on short-term recovery after the September 2009 Earthquake*, Working Papers DP-2013-35. Economic Research Institute for ASEAN and East Asia (ERIA).
- Reed, D., Wang, S., Kapur, K., & Zheng, C. (2016). Systems-Base Approach to Interdependent Electric Power Delivery and Telecommunications Infrastructure Resilience Subject to Weather-Related Hazards. *Journal of Structural Engineering*, 142(8), C4015011. doi:DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943541X.0001395

- Reinoso, E., & Jaimes, M. (2012). Estimation of Earthquake Life Loss Computed from the Expected Probabilistic Building Loss. *Journal of Earthquake Engineering*, UEQE-2012-1519.
- Resurreccion, J. Z., & Santos, J. R. (2013). Uncertainty modeling of hurricane-based disruptions to interdependent economic and infrastructure systems. *Natural Hazard*, 69(3), 1947-1518. doi:10.1007/s11069-013-0760-5
- Rose, A. (2005). Modeling regional economic resilience to disasters: a computable general equilibrium analysis of water service disruptions. *Journal of Regional Science*, 45(1), 75-112.
- Rose, A. (2019). Incorporating Cyber Resilience into Computable General Equilibrium Models. En Y. Okuyama, & A. Rose, *Advances in Spatial and Economic Modeling of Disaster Impacts* (págs. 99-120). Cham: Springer.
- Rose, A., & Huyck, C. K. (2016). Improving Catastrophe Modelling for Business Interruption Insurance Needs. *Risk Analysis*. doi:DOI: 10.1111/risa.12550
- Rose, A., Oladosu, G., & Liao, S. (2007). Business interruption impacts of a terrorist attack on the electric power system of Los Angeles: Customer resilience to a total blackout. *Risk Analysis*, 27(3), 513-531.
- Rose, A., Oladosu, G., & Salvino, D. (2005). Economic Impacts of Electricity Outages in Los Angeles. En M. Crew, & M. Spiegel, *Obtaining the Best from Regulation and Competition. Topic in Regulatory Economics and Policy Series*. Boston, MA: Springer.
- Rosenblueth, E. (1981). Two-point estimates on probabilities. *Appl. Math. Modelling*, 5, 329-335.
- Salgado-Gálvez, M., Ordaz, M., Singh, K., Cardona, O. D., Reinoso, E., Aguado, A., . . . Bernal, G. (2018). Homogeneous and Continuous Probabilistic Seismic Hazard Model for Latin America and the Caribbean. *16th European Conference on Earthquake Engineering*. Tesseloniki, Grecia.
- Salgado-Gálvez, M., Zuloaga, D., Bernal, G., Mora, M., & Cardona, O. (2013). Fully Probabilistic seismic risk assessment considering site effects for the portfolio of buildings in Medellín, Colombia. *Bull Earthq Eng*, 12, 671-695.
- Santos, J. R., & Jaimes, Y. Y. (2004). Modeling the Demand Reduction Input-Output (I-O) Inoperability Due to Terrorism of Interconnected Infrastructure. *Risk Analysis*, 24(6), 1437-1450. doi:10.1111/j.0272-4332.2004.00540.x
- Santos, J. R., Pagsuyoin, S. T., Herrera, L. C., Tan, R. R., & Yu, K. D. (2014). Analysis of drought risk management strategies using dynamic inoperability input-output modeling and event tree analysis. *Environment Systems & Decisions*, 34(4), 492-506. doi:10.1007/s10669-014-9514-5
- Santos, J. R., Yu, K. D., Pagsuyoin, S. A., & Tan, R. R. (s.f.). Time-varying Disaster Recovery Model for Interdependent economic systems using hybrid input-output and event tree analysis. *Economic Systems Research*, 26(1), 60-80. doi:10.1080/09535314.2013.872602
- Shinozuka, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Abrams, D. P., Hwang, H. H., & Rose, A. (1997). Advances in Earthquake Loss Estimation and Application to Memphis, Tennessee. *Earthquake Spectra*, 13(4), 739-758. doi:10.1193/1.1585978

- Solow, R. (1957). Technical Change and the Aggregate Production Function. *The Review of Economics and Statistics*, 39(3), 312-320.
- Stone, R. (1954). Linear Expenditure Systems and Demand Analysis: An Application to the Pattern of British Demand. *Economic Journal*, 64(255), 511-527.
- Taylor, L. (1975). Theoretical Foundations and Technical Implications. En C. Blitzer, P. Clark, & L. Taylor, *Economy-wide Models and Development Planning* (pág. 100). New York: Oxford Unversity Press.
- Tierney , K. (1997). Business impact of the Northridge earthquake. *Journal of Cantingencies and Crisis Management*, 5(12), 87-97.
- Tirasirichai, C., & Enke, D. (2007). Applying a Regional CGE Model for Estimation of Indirect Economic Losses Due to Damaged Highway Bridges. *The Engineering Economist*, 52, 267-401.
- Tokunga, S., & Resosudarmo, B. (2017). Spatial Modelling of Megathrust Earthquake in Japan. New Frontiers in Regional Science. *New Frontiers in Regional Science: Asian Perspectives 11*. Singapore: Springer Nature.
- UN Voluntarios. (2012). *El Impacto Macroeconómico de los Desastres*.
- Varian, H. (2010). *Microeconomía Intermedia* (Octava ed.). (A. Bosch, Ed.) Berkeley, California: W. W. Norton & Company, Inc.
- Wouter Botzen, W., Deschenes, O., & Sanders, M. (219). The Economic Impact of Natural Disasters: A Review of Models and Empirical Studies. *Review of Environmental Economics and Policy*, 13, 167-188. doi:10.1093/reep/rez004

10. Anexo A. Componentes de un Modelo de Riesgo Sísmico

10.1 Amenaza Sísmica

La amenaza sísmica, también conocida como peligro sísmico, es la evaluación de la frecuencia anual de excedencia de la intensidad del movimiento del suelo en un sitio. Típicamente, las intensidades más utilizadas para su representación son la aceleración máxima del terreno (PGA) y/o la aceleración espectral, de modo que el resultado del análisis es una curva que relaciona la frecuencia anual de excedencia con alguna medida de intensidad del movimiento del terreno (McGuire, 2007).

No es posible establecer el peligro sísmico de un sitio determinado contando las veces que un valor de intensidad dado se excede porque muy rara vez tenemos disponible un catálogo completo de las aceleraciones producidas en un sitio específico por terremotos anteriores. La opción entonces es calcular el peligro sísmico indirectamente. Para esto, el procedimiento a seguir es evaluar la actividad sísmica de cada una de las fuentes que producen temblores, integrando el efecto que cada terremoto, originado en esas fuentes, puede tener en un sitio específico. Actualmente, la metodología más utilizada para este proceso es el análisis probabilista de amenaza sísmica (PSHA, por sus siglas en inglés), desarrollado por Esteva y Cornell (Esteva L. , 1967), (Cornell C. , 1968) en la década de los sesenta, el cual además integra las incertidumbres involucradas en el proceso.

El primer paso en el análisis de peligro sísmico es dividir al territorio bajo estudio en fuentes sísmicas en base a la información geotécnica y sísmica disponible. La actividad de la i -enésima fuente se asume uniforme a lo largo de toda su extensión y se la caracteriza utilizando los catálogos sísmicos en términos de la tasa de excedencia de magnitudes $\lambda_i(M)$, la cual define cuán frecuentemente se generan terremotos de diferentes magnitudes en dicha fuente sísmica. En la mayoría de los casos, el proceso de ocurrencia de temblores dentro de las fuentes sísmicas o también conocidas como fuentes sismogénicas se modela como un proceso de Poisson en el cual la función $\lambda_i(M)$ es la versión modificada de la relación Gutenberg-Richter (Cornell & Vanmarcke, 1969) dada por la siguiente ecuación:

$$\lambda_i(M) = \lambda_{0i} \frac{e^{-\beta_i M} e^{-\beta_i M_{ui}}}{e^{-\beta_i M_0} e^{-\beta_i M_{ui}}} \quad (10.1)$$

donde M_0 es la magnitud umbral (comúnmente tomado igual a 4.5) y λ_{0i} , β_i y M_{ui} son parámetros que caracterizan la tasa de excedencia de cada fuente sísmica. El parámetro λ_{0i} es el número de eventos promedio en cada fuente sísmica que igualan o exceden la magnitud umbral, β_i representa la pendiente inicial de la regresión logarítmica, y M_{ui} es la máxima magnitud esperada en cada fuente. Para estimar estos parámetros se puede hacer uso de herramientas como los estimadores de máxima verosimilitud, análisis de completitud de catálogos sísmicos, información experta entre otras.

Una vez definida la tasa de actividad de cada fuente sísmica, necesitamos ahora evaluar el efecto que, en términos de intensidad sísmica, produce cada fuente en un sitio específico. Las expresiones que relacionan la magnitud de terremoto, la posición relativa fuente-sitio, las características del suelo y la intensidad son las ecuaciones de predicción del movimiento del suelo (GMPes). Estas se calculan mediante leyes de atenuación espectral que incluyen diferentes tipos de fuentes y efectos de amplificación local basado en estudios de microzonificación e información complementaria

disponible. En la mayoría de los casos, se hace uso de GMPEs ya existentes, eligiendo la más apropiada para cada estudio en particular. Las intensidades calculadas no están exentas de incertidumbres de modo que la intensidad se considera como una variable aleatoria con distribución lognormal comúnmente presentada mediante la mediana de la intensidad y su correspondiente valor de incertidumbre $\sigma_{\ln a}$. El modelo de amenaza asume que, dada la magnitud M y la distancia fuente-sitio R_0 , la variable intensidad tiene una distribución lognormal de tal forma que la probabilidad de que se exceda una intensidad a , $Pr(A > a|M, R_0)$, está dada por:

$$Pr(A > a|M, R_0) = \Phi\left(\frac{1}{\sigma_{\ln a}} \ln \frac{MED(A|M, R_0)}{a}\right) \quad (10.2)$$

Donde $\Phi(\cdot)$ es la distribución estándar normal, $MED(A|M, R_0)$ es la mediana de la variable intensidad (dada por la GMPE) y $\sigma_{\ln a}$ es la desviación estándar del logaritmo natural de la intensidad a . Si multiplicamos la probabilidad $Pr(A > a|M, R_0)$ por el número de eventos con magnitud $M + dM$, $d\lambda_i(M)/dM$, generados en la i -ésima fuente sísmica, se puede calcular el número de veces que se excede la intensidad a (calculada para un sitio específico) dada la ocurrencia de temblores con magnitud M . Este valor se lo conoce como tasa de excedencia de intensidades. Podemos realizar este mismo cálculo no solo para una magnitud y una fuente, sino para todas las magnitudes y todas las fuentes sísmicas, en cuyo caso, sumando todos los resultados parciales, podemos obtener la tasa de excedencia final $\nu(a)$ con la siguiente expresión:

$$\nu(a) = \sum_{i=1}^N \int_{M_0}^{M_{ui}} -\frac{d\lambda_i(M)}{dM} Pr(A > a|M, R_i) dM \quad (10.3)$$

Donde la sumatoria abarca las N fuentes sísmicas y las funciones $\lambda_i(M)$ representan sus tasas de actividad. La integral se realiza tomando en cuenta la contribución de todas las magnitudes desde M_0 a M_{ui} . A partir de la tasa de excedencia de intensidades, se pueden determinar espectros de peligro uniforme (UHS, por sus siglas en inglés) para cualquier sitio en particular. En la ingeniería estructural, es bastante común el uso de la aceleración espectral como medida de intensidad sísmica, la cual se obtiene de las ordenas del espectro de respuesta pseudo-aceleración calculado generalmente para un 5 por ciento de amortiguamiento crítico y el período natural de vibrar respectivo.

Una forma alternativa de presentar la amenaza sísmica es a través de un conjunto de eventos que definen la intensidad y la frecuencia de ocurrencia de cientos o miles de terremotos estocásticos, generados en localizaciones aleatorias dentro de cada una de las fuentes sísmicas (ERN-AL, 2010). Los eventos simulados se consideran mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos razón por la cual definen completamente la amenaza sísmica de la región bajo estudio. Podemos aprovechar la representación de la amenaza por evento para generar, mediante el uso de las GMPEs, mapas tipo grilla del campo de intensidades producido por cada terremoto simulado. Cada punto del campo de intensidades tiene una distribución de probabilidad conocida y se expresa comúnmente en términos del valor esperado de la intensidad y su respectiva desviación estándar. Esta representación tipo grilla del campo de intensidades se la conoce como escenario de amenaza (con frecuencia de ocurrencia igual a la del temblor que lo originó) y es particularmente útil para fines de evaluación del riesgo sísmico. Existen en la actualidad programas especializados para llevar a cabo el análisis PSHA como

el programa R-CRISIS, conocido mundialmente y como más de 30 años de continuo desarrollo y mejoras (Ordaz, Salgado-Gálvez, Cardona, & Contreras, 2019), (Aguilar, y otros, 2018).

Para nuestro caso de estudio de Chile, se utilizó un modelo de peligro sísmico para América Latina y el Caribe denominado ASLAC desarrollado por la empresa consultora ERN (Salgado-Gálvez, y otros, 2018).

10.2 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad se define como la predisposición de un sistema, elemento o componente de ser afectado ante la ocurrencia de una amenaza específica. La vulnerabilidad es diferente de un activo a otro y cambia de acuerdo con el tipo de amenaza y las características estructurales del elemento. Por ejemplo, los edificios en una región podrían tener una alta vulnerabilidad frente a la ocurrencia de huracanes pero baja vulnerabilidad ante terremotos, ya sea porque la magnitud y frecuencia de los temblores es muy baja o porque la estructura fue reforzada para sismos y no para huracanes.

En la evaluación probabilista del riesgo, las funciones de vulnerabilidad (FV) son probablemente la manera más apropiada de trasladar el daño estructural de un activo a pérdidas que puedan ser utilizadas para los cálculos de riesgo. En el contexto de nuestra investigación, el uso de funciones de vulnerabilidad resulta ser idóneo para trasladar directamente el daño estructural hacia pérdidas que reducen el stock de capital de los sectores económicos o industrias.

Las funciones de vulnerabilidad (Ordaz M. , 2000), (ERN-AL, 2010) definen de una forma probabilista la vulnerabilidad de un activo, relacionando la intensidad de una amenaza específica con la pérdida causada en dicho activo dado la ocurrencia de un evento con tal intensidad. En la ingeniería estructural, el daño de los edificios es frecuentemente representado mediante funciones de fragilidad, las cuales estipulan la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño como una función de cierto parámetro de demanda sísmica. El inconveniente con el uso directo de las funciones de fragilidad dentro de la evaluación del riesgo es que el daño está asociado a un estado discreto que, por un lado representa un número arbitrario y por el otro, no está relacionado a pérdidas. Sin embargo es posible establecer relaciones entre las funciones de vulnerabilidad y funciones de fragilidad (Ordaz M. , 2008).

En los modelos probabilistas de riesgo, las pérdidas son tratados como variables aleatorias. Una función de vulnerabilidad define la variación de los momentos estadísticos de las pérdidas como una función de cierta intensidad, en el caso temblores, como una función de la demanda sísmica. A pesar de que es posible utilizar tantos momentos como se desee para definir la distribución de probabilidad completa de la pérdida, cuando utilizamos FVs es común asumir la pérdida como una distribución de probabilidad tipo Beta y solo especificar los dos primeros momentos estadísticos, el valor esperado y la desviación estándar. La distribución beta de la pérdida $P_{L|S}(L)$ se define como:

$$P_{L|S}(L) = \frac{\Gamma(a + b)}{\Gamma(a) + \Gamma(b)} L^{a-1}(1 - L)^{b-1} \quad (10.4)$$

Donde a y b son parámetros de la distribución que se pueden obtener para cualquier valor de la demanda sísmica S , relacionando el valor esperado y la desviación estándar de la pérdida L asociada a la demanda sísmica. Así, el valor de a y b está dado por:

$$a = \frac{1 - E(L|S) - E(L|S)C^2(L|S)}{C^2(L|S)} \quad (10.5)$$

$$b = a \cdot \frac{1 - E(L|S)}{E(L|S)} \quad (10.6)$$

$E(L|S)$ es el valor esperado de la pérdida y $C(L|S) = SD(L|S)/E(L|S)$ es el coeficiente de variación de la pérdida, dada una demanda sísmica S , siendo $SD(L|S)$ la desviación estándar de la pérdida dada la demanda sísmica S .

Las funciones de vulnerabilidad junto con una suposición de la forma de la distribución de la pérdida contiene toda la información necesaria para fijar la distribución de probabilidad de la pérdida condicionada a cierto valor de demanda. La pérdida se define utilizando escalas numéricas (en lugar de una escala cuantitativa como para los estados de daño) y en una FV, es común utilizar el radio entre el costo de reparación y el costo total de reposición del activo dada la ventaja en su uso directo en los cálculos de riesgo y pérdidas.

La probabilidad de alcanzar o exceder un valor de pérdida está dado por:

$$P(L \geq l|S) = \int_l^{\infty} \varphi_{L|S}(L) dL \quad (10.7)$$

donde l es un valor de pérdida en el dominio de la variable aleatoria L y S es la demanda sísmica.

Llegado a este punto, ya somos capaces de calcular la probabilidad de exceder un determinado valor de pérdida, de modo que lo que nos falta por definir es un camino para calcular el valor esperado y la desviación estándar de la pérdida que conforman una función de vulnerabilidad. El valor esperado de daño lo vamos a definir relacionado el concepto de radio medio de daño (MDR, por sus siglas en inglés) con una medida de intensidad, en nuestro caso, una medida de intensidad sísmica como PGA, aceleración espectral, deriva de entrepiso, entre otras. El MDR se define como el radio entre el costo esperado de reparación y el valor total de reposición del activo. Así, dado un valor de demanda sísmica para un tipo de específico activo, el radio medio de daño MDR puede ser expresado como una función de la intensidad sísmica mediante (Miranda E. , 1999), (Ordaz M. , 2000):

$$E(L|\gamma_i) = 1 - \exp\left(\ln 0.5 \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0}\right)^\epsilon\right) \quad (10.8)$$

Donde L es la pérdida, γ_i y γ_0 son parámetros que definen la vulnerabilidad del activo dependiendo de su tipo y características estructurales, y $E(\cdot)$ es el valor esperado de la pérdida o MDR. Por definición, L solo admite valores entre 0 y 1, y se calculan como el cociente entre el costo de reparación y el costo total del activo. Usualmente, en el caso de edificaciones, el parámetro γ , empleado para cuantificar el nivel de daño en edificios es la deriva máxima de entrepiso, la cual se define como el cociente entre el desplazamiento relativo entre dos pisos contiguos y la altura de entrepiso, siendo este parámetro uno de lo que mejor correlación presenta con el dalo estructural (Bertero, Anderson, Krawinder, & Miranda, 1991), , (Priestley, 1997), (Miranda E. , 1997).

Una vez defino el primer componente de una función de vulnerabilidad, el valor esperado de la pérdida como una función de la demanda sísmica, vamos a ver qué sucede con la desviación estándar de la pérdida. Hay información limitada para determinar la varianza (o el coeficiente de variación) de la pérdida L , dado γ_i , $\sigma^2(L|\gamma_i)$, sin embargo lo que si conocemos es que cuando el valor esperado de la pérdida es nulo, su dispersión también lo es. De forma similar, cuando el valor esperado de la pérdida es total, su dispersión es nuevamente nula. En el caso de valores intermedios, es difícil especificar, con bases empíricas, cuán grande es la varianza de la pérdida. Para fijar la varianza de la pérdida como una función de la intensidad de la amenaza, en nuestro caso particular, como una función de la demanda sísmica, metodologías actuales sugieren utilizar la expresión de la distribución de probabilidad asignada por el reporte clásico ATC-13 cuya varianza tiene la siguiente forma funcional:

$$\sigma_{\beta}^2(\beta|\gamma_i) = Q(E(\beta|\gamma_i))^{r-1}(1 - E(\beta|\gamma_i))^{s-1} \quad (10.9)$$

Donde

$$Q = V_{max}/(D_0^{r-1}(1 - D_0)^{s-1}) \quad (10.10)$$

$$s = \left(r - 1/D_0\right) - r + 2 \quad (10.11)$$

Donde V_{max} , D_0 y r son parámetros que dependen del tipo estructural. V_{max} es la máxima varianza que ocurre en el nivel de daño , D_0 y r el factor de forma de la varianza. Así, ya tenemos definidos los dos componentes que forman una función de vulnerabilidad: $E(L|\gamma_i)$ y $\sigma^2(L|\gamma_i)$. La Figura 12.7 presenta varios ejemplos de funciones de vulnerabilidad sísmica.

10.3 Base de Datos de Exposición

El componente de exposición dentro del modelo de riesgo sísmico se constituye en una base de datos geo-referenciada con la información de aquellos activos susceptibles de sufrir daños ante la ocurrencia de un temblor y que son relevantes para el análisis como bienes inmuebles, infraestructura, contenidos, maquinaria, etc. La calidad de los resultados de la evaluación de riesgo depende en gran medida del nivel de resolución y detalle del modelo de exposición de activos. Generalmente 3 componentes son indispensables en la base de datos de exposición de activos: 1) geo-localización de los activos, 2) información estructural específica que caracterice el comportamiento estructural de cada activo como uso, números de pisos, material de los muros-paredes, piso, techo, entre otros. 3) Valor físico de reposición y valor físico u ocupación humana. Sin embargo, para fines de nuestra investigación, es necesario agregar un cuarto componente referente al sector o grupo económico al cual pertenece el activo, pues no es particularmente relevante diferenciar el daño estructural total sufrido en cada uno de estos sectores.

Las bases de datos más completas y de mejor calidad de los activos se las obtiene de los organismos estatales y gubernamentales dedicados a la compilación de este tipo de información, como las agencias nacionales de estadísticas y censos, los ministerios de vivienda, municipios, etc. Una completa descripción de la forma de procesar esta información se puede encontrar en León (2015), ERN-AL (2010).

En la actualidad, los avances tecnológicos permiten además hacer uso de información proveniente de imágenes satelitales, percepción remota, capas de geo-información disponibles a nivel mundial, e inteligencia artificial, entre otras, para complementar o generar base de datos de exposición útiles para estudio de riesgo y perfiles de desastres (ERN-AL, 2010), (León, 2015), (Gunasekera, y otros, 2015), (Aubrecht & Leon Torres, 2015), (Aubrecht & Leon Torres, 2016), (León Torres, 2019). Existen ya hoy en día herramientas de inteligencia artificial que, conjuntamente con los ingenieros, localizan y caracterizan grandes conjuntos de edificaciones de casi cualquier lugar del planeta. Un ejemplo de esta tecnología es el robot ERNEST desarrollado por la empresa ERN.

10.4 Pérdidas Directas Individuales

El modelo convencional de riesgo sísmico, mediante su componente de amenaza, toma en cuenta el efecto de todos los posibles terremotos que podrían ocurrir en una determinada región, y haciendo uso de su componente de vulnerabilidad y exposición, traslada estos efectos hacia pérdidas directas de los activos. La pérdida física (directa) de un activo individual, dentro del análisis probabilista del riesgo, se la puede modelar como una variable aleatoria, cuya incertidumbre resulta de la propagación de las incertidumbres proveniente de la amenaza sísmica y de la vulnerabilidad estructural. En nuestro caso, vamos a considerar que la pérdida directa L_i de un activo i es una variable aleatoria con distribución Beta y de la cuál conocemos sus dos primeros momentos estadísticos, el valor esperado de la pérdida $E(L_i)$ y su varianza $E(L_i^2)$, cuyos valores están dados por:

$$E(L_i) = \int_0^{\infty} E(L_i|Sa) \varphi_{Sa}(Sa|M, R) dSa \quad (10.12)$$

$$E(L_i^2) = \int_0^{\infty} E(L_i^2|Sa) \varphi_{Sa}(Sa|M, R) dSa \quad (10.13)$$

Donde $E(L_i|Sa)$ y $E(L_i^2|Sa)$ son respectivamente el valor esperado de la pérdida física y su varianza dada que ocurre la intensidad sísmica Sa . De hecho, estos dos componentes son los dos componentes de una función de vulnerabilidad (sección 10.2). Finalmente, $\varphi_{Sa}(Sa|M, R)$ es la función de probabilidad de la intensidad Sa dado que ocurrió un terremoto de magnitud M a una distancia R del sitio donde se localizaba el activo. Se asume que dada la ocurrencia de un evento, con magnitud y localización de su hipocentro conocida, la intensidad Sa que se originó sobre el activo es una variable aleatoria con distribución lognormal con mediana y desviación estándar del logaritmo conocidas, cuyos valores dependen, en general, de la magnitud y la distancia fuente-sitio.

En nuestro enfoque propuesto para la estimación de las consecuencias económicas ocasionadas por los terremotos, las pérdidas directas en cada uno de los activos, por lo general, necesitan ser agregadas a nivel regional y/o por sectorial, dada la baja resolución de los modelos espaciales CGE con respecto a los modelos de riesgo sísmico. El procedimiento de agregación se expone en la sección 4.5.

11. Anexo B. Modelado de Equilibrio General Computable

El modelado de equilibrio general computable (CGE) es un campo desafiante. Requiere de conocimientos de la teoría económica, una meticulosa preparación de los datos y familiaridad con las convenciones contables subyacentes, conocimientos de métodos econométricos y conocimientos sobre algoritmos de solución y software especializado para la solución de extensos sistemas de ecuaciones. Un modelo CGE es un modelo de simulación multi-mercado que describe las motivaciones y comportamiento de todos los productores y consumidores en una economía basada en la optimización individual simultánea de sus componentes y sujeta a un balance económico de cuentas y restricciones de fuente. La característica más atractiva de la modelación CGE es que nos permite pensar claramente sobre las posibles implicaciones de los eventos para los que no hay experiencia directa en el registro histórico.

En 2020, la modelación CGE cumple 60 años desde que Johansen publicara en 1960 su trabajo titulado, “A Multi-sectorial Study of Economic Growth” (Johansen, 1960), en el cual describe un modelo con 22 sectores de la economía noruega y que es generalmente reconocido como el primer modelo CGE. Lo que distingue a este modelo de otros modelos económicos de gran escala de aquel tiempo es la identificación explícita del comportamiento mediante agentes separados. En el modelo de Johansen, los hogares maximizan su utilidad sujetos a sus restricciones de presupuesto, las industrias escogen sus insumos de tal forma que minimicen sus costos para producir el nivel de outputs que satisfaga la demanda y los capitalistas colocan el stock de capital de la economía entre las industrias de modo que las tasas de retorno reflejen relatividades históricas. El comportamiento de estos agentes individuales se coordina a través de precios determinados por la interacción entre la oferta y la demanda. Sesenta años después, la modelación CGE es un campo bien establecido dentro de la economía (Devis, de Melo, & Robinson, 1982), (Dixon P. , Parmenter, Powell, & Wilcoxon, 1992), (Dixon & Parmenter, 1996), (Burfisher, 2011), (Dixon & Jorgenson, 2013) utilizado para modelar políticas económicas y públicas, impuestos, crisis financieras, cambio climático, ataques terroristas y desastres naturales, entre otros.

En el caso específico de los desastres naturales, las técnicas CGE se ha empleado en el análisis de las consecuencias económicas causados por estos por cerca de 30 años (Okuyama & Rose, 2019). Sin embargo, debido a la complejidad en sus cálculos, los modelos Input-Output eran los más utilizados. Actualmente, la complejidad computacional en los cálculos CGE ha quedado atrás, y estos modelos se van posicionando como una de las mejores opciones para el análisis de desastres de toda índole. De todos los enfoques que existen para el modelado de una economía, y utilizados para estudiar las consecuencias económicas de los desastres, el modelado CGE posiblemente es el más poderoso, en parte porque es capaz de utilizar algunas de las más sofisticadas funciones de producción, tales como la de elasticidad constante de sustitución (CES), la Translog, y la generalizada de Leontief, así como también, para estudios a corto plazo, es capaz de incorporar funciones de producción más rígidas. (Rose A. , 2019). Por otro lado, permite la incorporación de conceptos de resiliencia tanto estática como dinámica.

Los modelos CGE son capaces de modelar una amplia gama de impactos de orden superior, los cuales en lugar de estar confinados a la interdependencia económica, capturan la respuesta al cambio de los precios en los factores y mercados de productos. El enfoque CGE toma en cuenta muchas de las formas más populares de otros modelos, pero sin varias de sus limitaciones. A pesar que el modelo describe todas las actividades microeconómicas en una economía, la suma de estas describe el comportamiento macroeconómico de la economía, incluyendo el producto interno bruto (PIB),

ahorros e inversiones, balanza comercial, y algunos otros modelos como el déficit y superávit del gobierno. Dada la no linealidad en su forma, el modelado puede reflejar condiciones más reales del mundo, tales como economías de escala y funciones de comportamiento y/o daño económico no lineal.

Una característica a resaltar de los modelos CGE es su capacidad para modelar la respuesta a la escasez de insumos y condiciones cambiantes de mercado. Las funciones de producción que se utilizan en los modelos CGE consideran no solo factores primarios sino también todos los insumos (inputs), y a diferencia de los modelos I-O, éstas permiten la sustitución de insumos reflejando así de una forma más adecuada la respuesta del mundo real. Estos modelos también permiten la sustitución de bienes importados por bienes producidos localmente. La capacidad de sustitución no es exclusiva de las funciones de producción sino también de las funciones de consumo. Los modelos CGE también son útiles para realizar análisis socioeconómicos (desagregar los hogares rangos de ingreso) y de recuperación luego de la ocurrencia de desastres naturales. La versión estática del modelado CGE nos brinda características suficientes para el estudio de los impactos por desastres naturales (Rose A. , 2005), (Rose, Oladosu, & Salvino, 2005), (Haddad & Teixeira, 2015), (Haddad & Okuyama, 2016) sin embargo, los modelos CGE dinámicos son capaces de incluir variables de tiempo que pueden proporcionar aspectos extras en el modelado.

Otra notable ventaja de la modelación CGE es que puede introducir y adaptar más fácilmente datos ingenieriles dentro del modelo, permitiendo por ejemplo, modelar el rol de la infraestructura y líneas vitales para tomar en cuenta las necesidades de la sociedad respecto a electricidad, agua, transporte y telecomunicaciones. Las disrupciones en uno o más componentes se pueden propagar corriente abajo a través de toda la economía. Dentro del contexto de nuestra investigación, hemos visto cómo la modelación CGE permite introducir el daño físico en los activos y como éste se puede propagar a lo largo de la economía.

Existen dos escuelas que se han desarrollado respecto a la modelación CGE: la noruego-australiana de linealización y la norteamericana, que se base en sistemas de ecuaciones no lineales. El estilo noruego-australiano hace uso de ecuaciones de cambio porcentual (ver sección 11.1.1), y generalmente requiere de una gran y detallada cantidad de información que proviene principalmente de una base de datos Input-Output. Su uso ha estado más orientado a estudios a corto plazo (2 años), manteniendo fijos factores específicos de las industrias (capital y mano de obra). No considera algunas relaciones macro, razón por la cual algunas variables más son exógenas. Acepta muchas variables de precios, tiene un enfoque de análisis ganadores-perdedores y permite variedad de cierres del modelo. La modelación CGE estilo norteamericano, por su parte, utiliza ecuaciones de niveles y requiere una menor cantidad de datos. Se han utilizado más para estudios a mediano y largo plazo (7-20 años) y para probar puntos de vista teóricos. La base de datos utilizada en este tipo de modelos proviene de la matriz de contabilidad social (SAM). Los modelos norteamericanos son en su mayoría modelos cerrados con vínculos entre ingresos y gastos de la oferta de trabajo. En este modelado se utilizan pocas variables de precios, generalmente se permite la movilidad del capital y la mano de obra (factores primarios) y están sujetos a un solo cierre principal del modelo.

En nuestra investigación, se hace uso de los dos estilos de modelación CGE. En primer lugar, se utilizó el estilo norteamericano para probar, estudiar y analizar el nuevo enfoque propuesto desde un punto de vista teórico, analizado la fusión de los modelos de riesgo sísmico y CGE; y en un segundo caso, se utilizó el estilo de modelación noruego-australiana para la implementación práctica del nuevo enfoque desarrollado.

Los modelos CGE se construyen a diferentes escalas de resolución según lo que se desee estudiar y modelar. Existen modelos CGE locales, regionales, nacionales e incluso globales, los cuales toman en cuenta las interacciones económicas entre varios países del mundo. En el modelado de los impactos por desastres, los modelos a nivel región-estado suelen ser los más comunes. Existen además una clase especial de modelos de equilibrio general conocidos como modelos CGE espaciales, los cuáles toman en cuenta la localización geográfica, con un determinado nivel de resolución, de las diferentes industrias y sectores económicos que forman un economía. Esta particularidad resulta de vital importancia para los fines de esta investigación, razón por la cual, como lo veremos más adelante, haremos uso de los modelos CGE estilo MONASH, que entre sus notables características, poseen la capacidad de localizar geográficamente (a una resolución regional) los agentes económicos que forman la economía de un país.

Un modelo de equilibrio general computable se estructura de dos partes fundamentales como lo describe la Figura 11.1. La primera parte corresponde a la estructura analítica y funcional que describe los mecanismos de funcionamiento de la economía, y la segunda, a la estructura numérica de una economía real, dada a través de una base de datos. Los mecanismos de funcionamiento de la economía empleados en la modelación CGE siguen una tendencia neoclásica, en donde las ecuaciones de demanda son coherentes con un comportamiento de optimización (minimización de costos y maximización de la utilidad) mientras que en los mercados competitivos, los precios de los productos son a costo marginal. En el caso de la estructura numérica del modelo, esta está dada la sea por la matriz I-O o por la matriz SAM.

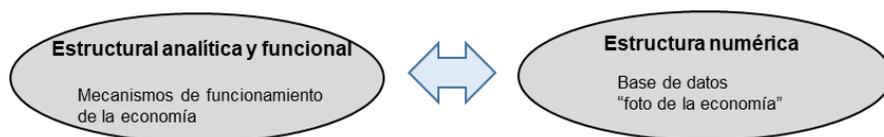


Figura 11.1 Estructura de un modelo CGE

11.1 Modelación CGE Estilo MONASH

Los modelos estilo MONASH son actualmente operados tanto por gobiernos como por el sector privado en una gran cantidad de países del mundo como Australia, Estados Unidos, Japón, Holanda, Taiwán, Indonesia, Sudáfrica, Brasil, Colombia, Finlandia, China, México, Chile por citar algunos. Los modelos MONASH permiten 4 enfoques de modelado para simulaciones históricas, simulaciones de descomposición, simulaciones de pronósticos, simulaciones de políticas, y recientemente simulaciones de desastres, cada una de las cuales está asociada a un cerrado de modelo diferente. Los modelos estilo MONASH son modelos multisectoriales y multi regionales descendientes directos de los modelos estilo Johansen (Johansen, 1960) y pertenecen a la escuela de modelización noruego-australiano, basada en ecuaciones de cambio porcentual siendo. El esquema del flujo típico de los insumos en un modelo CGE estilizado se muestra en la Figura 11.2. (Haddad, 2020).

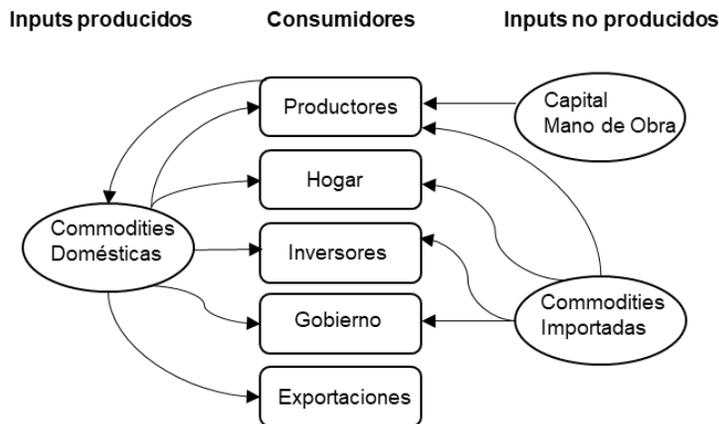


Figura 11.2 Flujo de los materiales en un modelo de equilibrio general estilizado

Los modelos estilo MONASH presentan una serie de mejoras respecto a su predecesor Johansen incluyendo: 1) un procedimiento computacional que elimina los errores de linealización sin sacrificar la simplicidad del método de resolución; 2) endogenización de los flujos de comercio por medio de la introducción al modelado CGE de la sustitución imperfecta entre variedades importadas y domésticas (supuesto de Armington); 3) mayor dimensionalidad que permite detalles relevantes para las políticas como los márgenes de transporte; 4) cerrados flexibles; 5) formas funcionales complejas para especificar la tecnología de producción; y 6) el carácter multi regional y multisectorial del modelado.

Existen dos enfoques de modelación estilo MONASH (Naqvi & Peter, 1995) . El primero de ellos es el enfoque top-down, el cual se base en el método desarrollado por Leontief et al (1965). En el enfoque top-down, los resultados de producción y empleo de las industrias se generan a partir del modelo CGE nacional y posteriormente se asignan a las regiones en base a coeficientes constantes que miden la participación regional que cada industria tiene en su respectiva producción nacional total. Una de las principales limitaciones de esta técnica es que el modelado de cambios específicos en una región está virtualmente excluido de este tipo de enfoques. El modelo denominado ORANI (Dixon, Parameter, Sutton, & Vincent, 1982), fue el primero realizado con el estilo MONASH top-down seguido de versión más actuales de ORANI como ORANI-G and ORANI-F (Horridge M. , ORANI-G: A Generic Single Country Computable General Equilibrium Model, 2006).

El segundo enfoque estilo MONASH modela el comportamiento de los agentes a nivel regional en lugar de nacional, este es el llamado enfoque bottom-up. En principio, el modelo bottom-up consiste en una colección de modelos de economías regionales ligadas por varios flujos interregionales de commodities, factores de producción, población, políticas económicas etc., mientras que el comportamiento a nivel nacional es la suma de resultados regionales. Los modelos bottom-up están diseñados para manejar shocks específicos en una región y pueden adaptarse a las variaciones en la estructura de las economías regionales a lo largo del tiempo. La mayor limitación para el desarrollo de modelos multi regionales bottom-up está en la cantidad de datos requeridos. Esencialmente, lo que se requiere es una matriz insumo-producto (I-O) multi regional. Sin embargo, hoy en día se cuenta con unas bases de datos mucho más ricas en información, lo que abre la puerta para que los modelos bottom-up puedan ser implementados en la mayoría de los países del mundo. Por otro lado, una

característica un poco oculta de los modelos MONASH, pero que a la vez es fundamental para nuestra investigación, es que al tener un carácter multi regional, son también modelos CGE espaciales, dado que nos brindan información de la localización geográfica de los agentes económicos, en este caso con una resolución regional. Como se ha mencionado anteriormente, esta característica es crucial para el desarrollo de nuestra investigación, pues permite diferenciar aquellas regiones que serán más y menos afectadas directamente por un terremoto, dada su cercanía o no al epicentro.

Un ejemplo sobresaliente de los modelos estilo MONASH bottom-up es el modelo MMRF (Peter M. , Horridge, Meagher, Naqvi, & Parmenter, 1996), (Dixon, Koopman, & Riemmer, 2011) modelo que ha servido como base de una gran cantidad de modelos multi regionales actualmente existentes alrededor del mundo y también ha sido la base de nuestro modelo CGE presentado a detalle en las secciones 3 y 5. Al igual que todo modelo CGE, la estructura esencial de los modelos MONASH se genera a partir de las decisiones de oferta y demanda de consumidores y productores junto con supuestos de la estructura del mercado.

Una de las partes más complicadas en la modelación CGE estilo MONASH es la compilación de una base de datos para el año cero. En los modelos CGE MONASH, el componente central de información es un conjunto de cuentas insumo-producto como el ilustrado en la Figura 11.3 así como también estimación del stock de capital de cada industria. Lo que dificulta bastante la recopilación de estos datos, en su mayor parte, es que deben obtenerse de boletines preparados por agencias de estadísticas con fines muy alejados a la modelación CGE. Las convenciones contables adaptadas por las agencias en muchas ocasiones suelen no ser claras y difíciles de seguir. A pesar de estas dificultades es la mayoría de los casos sí es posible compilar una base de datos adecuada, pagando el precio de un tiempo bastante considerable en su elaboración.

		Matriz de Absorción					
		1	2	3	4	5	6
		Productores	Inversores	Hogares	Exportaciones	Gobierno	Inventarios
Tamaño		← I →	← I →	← 1 →	← 1 →	← 1 →	← 1 →
Flujos Básico	↑ C x S ↓	BAS1	BAS2	BAS3	BAS4	BAS5	BAS6
Márgenes	↑ C x S x N ↓	MAR1	MAR2	MAR3	MAR4	MAR5	MAR6
Impuestos sobre las ventas	↑ C x S ↓	TAX1	TAX2	TAX3	TAX4	TAX5	TAX6
Mano de obra	↑ M ↓	LABOR					
Capital	↑ 1 ↓	CAPITAL					
Tierra	↑ 1 ↓	LAND					
Impuestos de Producción	↑ 1 ↓	TAX0					

C = Número de commodities
 I = Número de Industrias
 S = Número de fuentes, usualmente 2 (dom & imp)
 M = Número de ocupaciones

Matriz de Producción Conjunta	
Tamaño	← I →
↑ C ↓	MAKE

Impuestos de Entrada	
Tamaño	← I →
↑ C ↓	TARIFF

Figura 11.3 Base de datos Input-Output típica para un modelo estilo MONASH.

La matriz de absorción está compuesta por BAS1, BAS2,..., BAS6 las cuales muestra los flujos, en el año cero de las commodities hacia los productores, inversores, hogares, exportaciones, consumo público y acumulación de inventario. Todos los flujos de estas matrices son valorados a precios básicos (no incluye impuestos, costos de transporte y otros márgenes).

Los costos que separan a los productores o puertos de entrada de los consumidores aparecen en la base de datos Input-Output en las matrices de márgenes (costos extra) y en la fila de matrices de impuestos sobre las ventas. Las matrices de márgenes MAR1,..., MAR6 son los valores de los márgenes de las N commodities utilizados para facilitar los flujos identificados en BAS1,..., BAS6. Los márgenes típicos de las commodities son las variedades de comercio mayorista, comercio minorista, transporte por carretera, transporte por tren, transporte marítimo, transporte aéreo, gas natural y otros gasoductos. Cada una de las matrices MAR1,..., MAR6 tienen C x S x N filas correspondientes al uso de los N márgenes de las commodities para facilitar los flujos de las C commodities desde las S fuentes. Las matrices de impuestos sobre las ventas TAX1,..., TAX6

muestran las recaudaciones de impuestos sobre las ventas (positivos) o los pagos de subsidios (negativos) asociados con cada uno de los flujos en las matrices BAS. Los pagos que las industrias realizan a los M grupos ocupaciones se registran en la matriz LABOR. En los modelos y aplicaciones que se centran en el mercado laboral, M puede ser muy extensa y tener varias categorías. Por otro lado, en los modelos MONASH, los pagos que las industrias realizan por el uso del capital y tierra son registrados en la base de datos input-output mediante vectores: CAPITAL and LAND. En el caso del vector TAX0, este contabiliza las recaudaciones de impuestos netos de subvenciones a la producción. Los dos ítems finales de la base de datos son TARIF y MAKE. TARIFF es un vector de $C \times I$ que muestra los ingresos arancelarios por importaciones. Finalmente la matriz de producción conjunta MAKE tiene dimensiones $C \times I$. Su componente típico es el output (valorado en precios básicos) de la commodity c por la industria i (Dixon, Koopman, & Riemmer, 2011). Para modelos multi regionales, como es el caso del modelo presentado en las secciones 3 y 5, la base de datos I-O sigue exactamente la estructura de la Figura 11.3 con la diferencia que se incorpora una dimensión más a ciertas matrices, para tomar en cuenta las multi regiones (Haddad, y otros, 2019). Así, todas las sub-matrices de la matriz de absorción referente a Productores e Inversionistas serán de dimensión, $I \times Q$, y la sub-matrices de Hogares, Gobierno e Inventarios de dimensión Q , siendo Q el número de regiones del país. La matriz interregional I-O utilizada en nuestro ejemplo de aplicación se la puede encontrar en (Haddad, y otros, Interregional Input-Output System for Chile, 2014, 2018).

11.1.1 Modelos CGE Estilo Johansen

Los modelos de equilibrio general tipo Johansen, como es el caso de los modelos MONASH, son modelos CGE cuya solución se obtiene de un conjunto de ecuaciones linealizadas derivadas de un sistema de ecuaciones no lineales del modelo económico original. Estos modelos aplican la técnica de análisis de desplazamientos, esto es, un sistema de ecuaciones diferenciales que describe los desplazamientos en el equilibrio causado por movimientos en las variables exógenas. El enfoque de Johansen considera una clase de modelo de equilibrio general en el cual el vector V , de longitud n , representa un equilibrio y satisface el sistema de ecuaciones:

$$F(V) = 0 \quad (11.1)$$

Donde F es una función vectorial de longitud m . Se asume que F es diferenciable y que el número de variables n excede el número de ecuaciones m . En el sistema linealizado de ecuaciones de Johansen, las variables representan cambios, porcentajes de cambio o cambios en los logaritmos de los componentes de V . Johansen (1960) interpreta a las variables del sistema linealizado como tasas de crecimiento (Taylor, 1975).

Dado que el sistema original de ecuaciones del modelo CGE contiene más variables que ecuaciones, se necesita asignar exógenamente valores a las $(n - m)$ variables y se resuelve el problema para las m variables endógenas restantes. La asignación de cuáles variables serán exógenas o endógenas puede cambiar en función de los requerimientos del problema a estudiar.

Para obtener la versión linealizada del sistema, se aplica derivación total a (11.1) y se tiene:

$$A(V)v = 0 \quad (11.2)$$

Donde $A(V)$ es una matriz de $n \times m$ cuyos componentes son funciones de V . El vector v de $n \times 1$ denota los porcentajes de cambio o los cambios en los logaritmos de las variables de V . La versión linealizada (aproximada) del sistema de ecuaciones original, que se utiliza en el cálculo al estilo Johansen, se genera al remplazar la matriz de variables $A(V)$ por una matriz fija $A(V^I)$, donde V^I es la solución inicial de equilibrio del modelo. A partir de aquí, todos los resultados generados para nuevas condiciones de equilibrio se reportarán como porcentajes de cambio respecto a la solución inicial.

El método de Johansen nos da la posibilidad de evaluar las derivadas o elasticidades de las variables endógenas con respecto a las variables exógenas, sin la necesidad de obtener formas explícitas de la solución del sistema de ecuaciones. Todo lo que se requiere son operaciones matriciales simples. Sin embargo, es importante mencionar que estas operaciones nos proporcionan las derivadas o las elasticidades solo para los valores iniciales V^I de las variables. Si nos movemos fuera de V^I , las derivadas y elasticidades cambiarán.

Para calcular cuán lejos se pueden mover las variables endógenas respecto a sus valores iniciales, como respuesta al cambio de las variables exógenas, evaluamos $A(V)$ en $V = V^I$, Entonces $A(V^I) = 0$ se puede reescribir como:

$$A_\alpha(V^I)v_\alpha + A_\beta(V^I)v_\beta = 0 \quad (11.3)$$

Donde v_α es un sub-vector de los componentes endógenos de v y v_β es un $(n - m)$ sub-vector de componentes exógenos. $A_\alpha(V^I)$ es una sub-matriz de $m \times m$ formada por las columnas de $A(V^I)$ correspondientes a las variables endógenas y $A_\beta(V^I)$ una sub-matriz de $m \times (m - n)$ formada por las columnas correspondientes a las variables exógenas. Finalmente, si resolvemos (11.3) para v_α en términos de v_β tenemos:

$$v_\alpha = B(V^I)v_\beta = 0 \quad (11.4)$$

Donde $B = A_\alpha^{-1}(V^I)A_\beta(V^I)$. Si v es un vector de porcentajes de cambio o de cambios en los logaritmos, el elemento de $B_{ij}(V^I)$, de $B(V^I)$, es la elasticidad evaluada en V^I de la i -ésima variable endógena con respecto a la j -ésima variable exógena.

El método clásico de Johansen funciona bien para evaluar los efectos en las variables endógenas dado cambios pequeños en las variables exógenas. Sin embargo, para cambios grandes de las variables exógenas, no es posible conseguir una aproximación adecuado de las variaciones originadas en las variables endógenas. Para afrontar este problema, se aplica el método de Johansen multipunto, el cual consiste en una secuencia de cálculos estilo Johansen. De forma sencilla, este proceso consiste en dividir el cambio en la variable exógena en pasos o intervalos más pequeños de cambio, e ir evaluando el efecto de cada uno de estos pequeños cambios en nuestra estimación de V . Por ejemplo, si queremos evaluar que sucede con un 100% de incremento en el valor de las variables exógenas, primero evaluamos el efecto del 50% de su incremento. Esto nos llevará de $V = V^I$ a $V = V^I + \Delta V_{50\%}$, donde $\Delta V_{50\%}$ denota el cambio de nuestra estimación V . Luego revaluamos la matriz de elasticidades B , en $V = V^I + \Delta V_{50\%}$ y utilizamos la matriz revaluada para calcular los efectos por ir de 50% al 100% del

cambio de los valores de las variables exógenas. A mayor precisión requerida, mayor número de pasos se deben utilizar para discretizar el cambio en la/las variables exógenas.

Las tablas Input-Output juegan un rol fundamental en los modelos CGE tipo Johansen ya que se utilizan para obtener la solución inicial del modelo así como para establecer varios parámetros del modelo (coeficientes de participación para el sistema linealizado).

La implementación de un modelo CGE tipo Johansen típicamente implica 4 pasos (Dixon P. , Parmenter, Powell, & Wilcoxon, 1992):

1. Desarrollo de la estructura teórica
2. Linealización de las ecuaciones del modelo
3. Uso de las tablas Input-Output para proporcionar estimaciones de los costos relevantes y cuotas de ventas.
4. Desarrollo de un programa computacional flexible para la manipulación de sistemas lineales.

Para derivar la forma linealizada (porcentajes de cambio) de las ecuaciones del modelo, existen sencillas reglas preestablecidas para los tipos más comunes de ecuaciones utilizadas en los modelo CGE, mismas que se las puede encontrar en (Horridge M. , 2001).

11.2 Principales Estructuras y Formas Funcionales Utilizadas en la Modelación CGE

En la modelación de equilibrio general, se utiliza una estructura anidada por niveles para definir la producción y consumo de los diferentes agentes económicos. Existen formas funcionales de agregación que comúnmente se utilizan en las diferentes etapas de agregación y las cuales las describimos a continuación. Vamos a incluir también la forma en porcentaje de cambio de algunas de las ecuaciones de demanda finales dado que son las formas funcionales con las que se trabaja en los modelos CGE de la escuela noruego-australiana que hemos utilizado en nuestro enfoque. Como es habitual en la formulación CGE estilo Johansen – MONASH, las letras minúsculas de las variables se refieren a niveles y las minúsculas a porcentajes de cambio. Las letras griegas siempre se refieren a parámetros del modelo.

Función Cobb-Douglas

La función de producción Cobb-Douglas (Cobb & Douglas, A Theory of Production, 1928), (Douglas, 1934), (Cobb & Douglas, 1948) fue obtenida empíricamente a través de la distribución de la renta nacional total de los Estados Unidos entre el capital y el trabajo (mano de obra). Los datos mostraron que se mantiene más o menos constante a lo largo del tiempo y a medida que la producción se incrementaba, la renta total de trabajadores crecía en la misma proporción que la renta del conjunto de empresarios. La función es de la forma:

$$Q = AL^{\alpha}K^{\beta} \quad (11.5)$$

Siendo Q la producción total, L la mano de obra, K el capital, A el factor tecnológico o de productividad y α y β las elasticidades producto del trabajo y del capital respectivamente. La elasticidad mide la respuesta de un producto al cambio en los niveles de trabajo o capital utilizados para la producción si permanecen constantes los demás factores. Si se cumple que $\alpha + \beta = 1$, se dice que la función de producción tiene rendimiento a escala constantes, lo que significa que si L y K aumentan un 20%, Q también aumentará en un 20%.

La función de producción Cobb-Douglas se la puede generalizar para n factores, cuya forma funcional es:

$$Q = A \prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i} \quad (11.6)$$

Donde X_i los factores de producción y comúnmente se asume que $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ (rendimiento a escala constantes).

En los modelos de equilibrio general, una de las opciones para modelar la demanda de los factores de producción que necesita una industria para su producción es resolver el problema de minimización de su costo de producción, C , sujeta a una restricción tecnológica dada por la función Cobb-Douglas, así:

$$\text{Min } C = \sum_{i=1}^n X_i P_i \quad (11.7)$$

Sujeta a (11.6), donde P_i son los precios de los factores de producción respectivos. La solución de este problema de minimización nos proporciona la función de demanda de input (en este caso factores de producción) de las industrias:

$$X_i = \left(\alpha_i G Q \prod_{j=1}^n P_j^{\alpha_j} \right) / P_i \quad (11.8)$$

Con

$$G = \left(\prod_{j=1}^n P_j^{-\alpha_j} \right) / A$$

La forma en porcentaje de cambio de la ecuación (11.8) está dada por:

$$x_i = q - \left(p_i - \sum_{j=1}^n \alpha_j p_j \right) \quad (11.9)$$

Función de Elasticidad Constante de Substitución (CES)

La función CES es un tipo particular de función agregadora que combina dos o más tipos de insumos de producción (producción) o dos o más clases de bienes de consumo (consumo) exhibiendo una elasticidad constante de sustitución. En el caso de la producción, esto significa que la tecnología de producción tiene un porcentaje de cambio constante en las proporciones de sus factores (ej. capital y mano de obra) debido a un porcentaje de cambio en la tasa marginal de sustitución técnica. Estas funciones fueron trabajos desarrollados principalmente por Solow (1957) y Arrow et al., (1961). Las funciones Cobb-Douglas así como las de Leontief se constituyen en casos particulares de la CES. La forma funcional de la función CES en el caso de la producción es:

$$Y = A * \left[\sum_{i=1}^n \delta_i X_i^{-\rho} \right]^{-1/\rho} \quad (11.10)$$

donde Y y A son parámetros positivos y $\sum_i \delta_i = 1$ y ρ es un parámetro mayor o igual a -1 pero diferente de cero. Y es el nivel de outputs, A es el factor tecnológico o de productividad, X_i es la cantidad disponible del insumo i y σ es la elasticidad de sustitución donde $\sigma = 1/(1 - \rho)$.

En la modelación CGE, las funciones CES trabajan en conjunto con restricciones presupuestarias para formar sistemas de optimización individual. Por ejemplo, es muy común que las funciones anidadas de producción estén formados por estos sistemas de optimización en el cual una industria o empresa busca minimizar sus costos de producción sujeta a una restricción tecnológica dada por la función CES. La solución de este sistema nos da como resultado. El problema de minimización sería: $Min Costo = \sum_{i=1}^n X_i P_i$ sujeta a (11.10). Aplicando los multiplicadores de Lagrange, la solución de este problema de minimización determina las cantidades óptimas de insumos:

$$X_i = \frac{y (P_i/\delta_i)^{-\sigma}}{A P^*} \quad (11.11)$$

Siendo P_i el precio de cada uno de los insumos o factores X_i e:

$$P^* = \left[\sum_{i=1}^n \delta_i (P_i/\delta_i)^{1-\sigma} \right]^{\sigma/(\sigma-1)}$$

La forma de cambio porcentual de la ecuación de demanda de las cantidades óptimas de insumos está dada por:

$$x_k = y - \sigma \left(p_k - \sum_{i=1}^n S_i p_i \right) \quad (11.12)$$

Siendo

$$S_i = \frac{P_i X_i}{\sum_i P_i X_i}$$

En el caso de las funciones CES de consumo, su forma funcional surge como una función de utilidad en la teoría del consumidor. Por ejemplo, si existen n tipos de bienes de consumo X_i , entonces la utilidad o el consumo agregado, según sea el caso, puede expresarse con la forma funcional:

$$U = \left[\sum_{i=1}^n \delta_i X_i^{-\rho} \right]^{-1/\rho} \quad (11.13)$$

En el caso de la demanda de consumo, la modelación CGE propone estimar la demanda de consumo de cada uno de los bienes X_i mediante un proceso de maximización de la utilidad sujeta a una restricción de presupuesto, esto es maximizar (11.13) sujeta a $\sum_{i=1}^n X_i P_i = Y$, donde Y en este caso es el presupuesto total disponible del hogar y P_i el precio de cada uno de los bienes de consumo o commodities.

Sistema de Gasto Lineal (LES)

El sistema de gasto lineal (Stone, 1954) es un enfoque utilizado para modelar el comportamiento de la demanda de varios agentes y de múltiples bienes. Este sistema no solo se preocupa de la demanda individual de commodities o grupos de commodities considerándolas de forma aislada sino de la demanda de todas las commodities compradas por los consumidores clasificadas dentro de un número de grupos. El modelo LES no es más que la solución de un problema de maximización de la función de utilidad de Stone-Geary (Klein & Rubin, 1947), (Geary, 1950), (Stone, 1954), sujeta a una restricción de presupuesto. El problema de maximización es:

$$Max \ln[U(X)] = \sum_{i=1}^k \alpha_i \ln(X_i - \gamma_i) \quad x_i - \gamma_i > 0 \quad (11.14)$$

Sujeta a:

$$Y = \sum_{i=1}^k P_i X_i$$

donde $U(X)$ es la utilidad, X_i es el consumo del bien o commodity i , γ_i es el consumo mínimo o de subsistencia del bien i ; Se cumple que $\sum_i \alpha_i = 1$, siendo $\alpha_i > 0$ la elasticidad ingreso de la demanda asociada a la commodity i ; Y es el presupuesto total del hogar y P_i es el precio de la commodity i .

Solucionado el problema obtenemos la ecuación (11.15) que se conoce como el sistema de gasto lineal (LES).

$$P_k X_k = P_k \gamma_k + \alpha_k \left(Y - \sum_i P_i \gamma_i \right) \quad x_i - \gamma_i > 0 \quad (11.15)$$

El gasto $P_k X_k$ en cada bien es una función *lineal* de los precios y el ingreso. Esto explica bastante de la popularidad de esta función de utilidad para n commodities. La diferencia entre el presupuesto total del hogar y la renta mínima de subsistencia $\sum_i P_i \gamma_i$ es lo que se conoce como “renta supernumeraria”, es decir el valor $(Y - \sum_i P_i \gamma_i)$ y es lo que el consumidor distribuye en la compra de los k bienes existentes en proporciones $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$. La forma en cambio porcentual de la ecuación (11.1) está dada por:

$$V_k(x_k + p_k) = P_k \gamma_k(x_k + p_k) + \alpha_k \left(Y - \sum_i P_i \gamma_i(x_k + p_k) \right) \quad x_i - \gamma_i > 0 \quad (11.16)$$

Con:

$$V_k = \frac{P_k X_k}{\sum_i P_i X_i}$$

Función de Leontief

La función de producción de Leontief o función de producción de proporciones fijas es una función cuya tecnología de producción está predeterminada por proporciones fijas de sus factores de producción, por lo que no existe posibilidad de sustitución entre estos. Se la puede utilizar en varias circunstancias. En un extremo, cuando la tecnología tiene un solo proceso posible de producción en la cual los factores primarios pueden ser combinados de una sola forma, En el otro extremo, pueden existir varios procesos productivos disponibles, cada uno con su propia combinación de factores productivos, pero solo uno de los procesos es seleccionado en base a condiciones exógenas. Esta función es más importante de los podría aparentar a primera vista y se la usa en la mayoría de los modelos CGE. Su forma funcional es:

$$Q = \min \left(\frac{X_1}{\alpha_1}, \dots, \frac{X_n}{\alpha_n} \right) \quad (11.17)$$

Donde Q es el nivel de producción total de la industria, X_i y α_i son la cantidad del factor de producción i y su respectivo coeficiente de requerimiento mínimo por unidad de producción.

Al igual que en casos anteriores, las funciones de Leontief se utilizan como la restricción tecnológica en problemas de maximización del beneficio o minimización de los costos de producción. En cualquier de los casos, la ecuación de demanda óptima de los factores de producción está dada por:

$$X_i = \alpha_i Q \quad (11.18)$$

Las funciones de tipo Leontief se utilizan en casi todos los modelos CGE. Sin embargo, en los casos prácticos de aplicación, se emplean comúnmente como parte de funciones de producción y utilidad separables. Como su nombre lo indica, funciones separables son aquellas que se pueden disgregar en un determinado número de particiones (Dixon P. , Parmenter, Powell, & Wilcoxon, 1992). La suposición de separabilidad reduce el número de parámetros que requieren evaluación explícita.

Un caso muy utilizado de este tipo de funciones es $Y = \min[CES(X_{11}, X_{12}), \dots, CES(X_{n,1}, X_{n,2})]$ en donde X_{ij} representa el insumo i proveniente de la fuente j ; $CES(X_{11}, X_{12})$ significa que los insumos X_{11} y X_{12} se combinan de acuerdo a la función CES. En este ejemplo, el output o producción final Y es visto como una combinación Leontief de outputs efectivos donde cada output efectivo es una combinación CES de insumos provenientes de varias fuentes. La suposición subyacente en esta función de producción es que los insumos efectivos no se pueden sustituir entre sí (Leontief), sin embargo, si existe sustitución entre insumos provenientes de distintas fuentes (suposición CES). Si asumimos que esta función será utilizada considerando un comportamiento de minimización de costos de producción, resulta que la función de demanda óptima de insumos provenientes de cada región tiene la misma forma que la ecuación (11.11) y su forma en porcentaje de cambio que la (11.12).

Demanda de Exportación Extranjera

En la estructura CGE-MONASH, las exportaciones se modelan enfrentando funciones individuales de demanda extranjera con pendiente negativa. Las exportaciones del producto i de la fuente s se distinguen de las exportaciones del producto i de la fuente r (r no es igual a s). $EXP_ELAST(i)$ es la elasticidad (constante) del precio propio de la demanda de exportación extranjera del producto i . Dado que $EXP_ELAST(i)$ es negativa, la ecuación de la Figura 11.4 nos dice que las exportaciones son una función negativa de sus precios en los mercado mundiales ($P4R_{i,s}$). Las variables $FEQ_{i,s}$ y FEP_i permiten cambios horizontales (cantidad) y verticales (precios) en los esquemas de demanda. La variable $NATFEP$ y $NATFEQ$ permiten cambios verticales (precios) y horizontales (cantidad) en los esquemas de demanda de toda una economía en su conjunto.

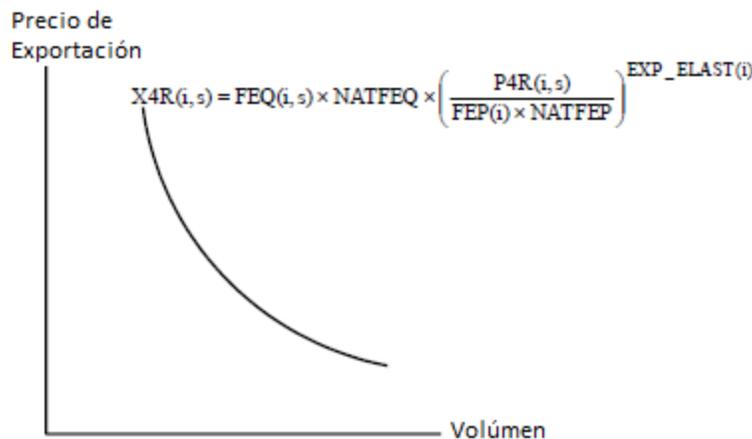


Figura 11.4 Modelo de demanda de exportación extranjera.

12. Anexo C. Modelos de Riesgo Sísmico y CGE utilizados en la investigación

12.1 Modelo de Equilibrio General Computable - M1

El modelo M1 es un modelo básico de equilibrio general desarrollado con el estilo norteamericano de la modelación CGE (ver sección 11). Está formado por 2 industrias, cada una de las cuales produce un solo bien X_1 y X_2 respectivamente, dos factores primarios, capital (W_2) y mano de obra (W_1), y un consumidor final, el sector hogar. Nótese que, por practicidad, se utiliza otra nomenclatura para el capital K y la mano de obra L del cuerpo principal del documento. La Figura 12.1 muestra un diagrama de la estructura del modelo. Cada industria usa una tecnología de producción anidada en dos etapas como la mostrada en la Figura 12.2, panel a, donde las líneas entrecortadas representan las formas funcionales de agregación utilizadas. Se reconocen dos amplias categorías de insumos para la producción: factores primarios FP e insumos intermedios II . En el caso del hogar, este selecciona su consumo en base a una estructura sencilla de una sola etapa (Figura 12.2, panel b). En el modelo M1, cada industria necesita un solo insumo intermedio (II) para su producción; el II para la industria 2 es proporcionado en su totalidad por la industria 1, mientras que el II para la industria 1 es abastecido externamente por una tercera industria, cuya única función es dotar a la industria 1 de su cantidad óptima del insumo intermedio a un precio fijo. Por otro lado, la mano de obra necesaria para la producción de cada industria es suministrada exclusivamente por el hogar, cumpliéndose además que, el presupuesto total del hogar se vacía completamente en la compra de los bienes 1 y 2 producidos por las industrias.

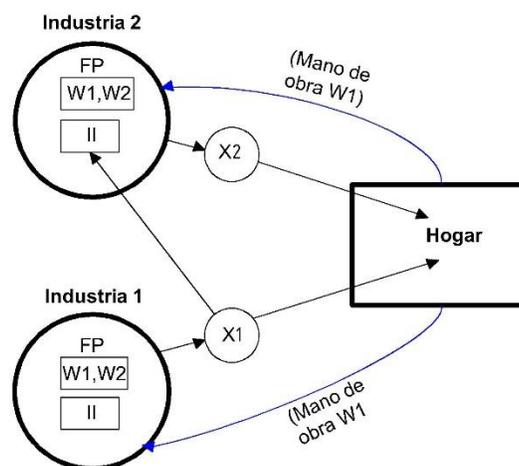


Figura 12.1 Esquema de la estructura del modelo de equilibrio general M1.

Las industrias 1 y 2 necesitan de dos categorías de insumos para la producción de su bien X_1 y X_2 respectivamente, factores primarios FP e insumo intermedio II . Los factores primarios que cada industria necesita están conformados por capital W_2 y mano de obra W_1 , mano de obra que por otro lado es suministrada en su totalidad por el hogar. Finalmente, la figura esquematiza como la industria 2 obtiene su II de la industria 1.

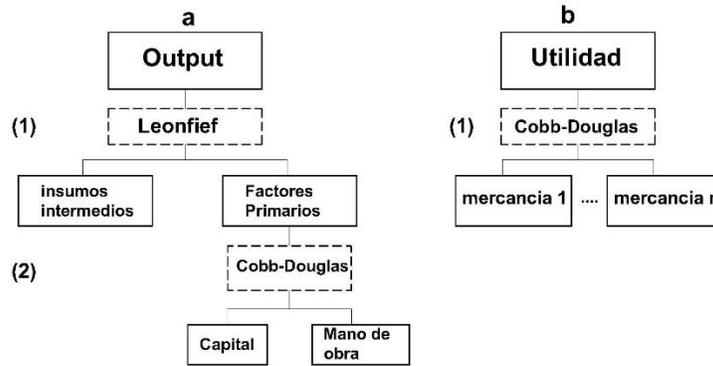


Figura 12.2 Estructuras anidadas de producción y demanda utilizadas en el modelo M1.

El panel a muestra la estructura anidada de tecnología de producción en dos etapas utilizada por cada industria del modelo M1, mientras que el panel b, su estructura de demanda del hogar en 1 etapa. Las líneas entrecortadas representan las formas funcionales utilizadas en el proceso de agregación en cada etapa respectiva.

En el modelo M1, los subíndices $i=1,2$ denotan a los bienes e industrias 1 y 2 mientras que las letras d y s denotan demanda o suministro del bien. A continuación, se detalla la estructura teoría e hipótesis asumidas en el modelo.

- i. El sector hogar elige sus niveles de consumo de los bienes 1 y 2 (X_{1d} , X_{2d}) para maximizar la función de utilidad Cobb-Douglas:

$$U = \prod_{i=1}^2 X_{id}^{\alpha_i} \quad (12.1)$$

Sujeta a una restricción de presupuesto:

$$Y = \sum_{i=1}^2 P_i X_{id} \quad (12.2)$$

Donde Y es el nivel de gasto del hogar, P_1 y P_2 son los precios de los bienes 1 y 2. α_1 y α_2 son parámetros positivos (elasticidades) que suma 1. Luego de solucionar (12.1) sujeta a (12.2) utilizando los multiplicadores de Lagrange, las funciones de demanda de bienes por parte del hogar son:

$$X_{id} = \frac{\alpha_i Y}{P_i} \quad i = 1,2 \quad (12.3)$$

- ii. La industria i , para $i = 1,2$ elige sus niveles de consumo de insumos intermedios y factores primarios para maximizar la función de producción de Leontief:

$$X_{is} = \min\left(\frac{II_{id}}{a_i}, \frac{FP_{id}}{l_i}\right) \quad i = 1,2 \quad (12.4)$$

Sujeta a una restricción de beneficio:

$$B_i = P_i X_{is} - P_{IIi} II_{id} - P_{FPi} FP_{id} \quad i = 1,2 \quad (12.5)$$

Donde B_i es el beneficio de la industria i , e X_{is} , su nivel de producción. II_{id} y FP_{id} son el nivel de demanda del insumo intermedio y de factores primarios que la empresa i requiere para su producción. a_i y l_i son los coeficientes de participación (coeficientes de requerimientos mínimos) del insumo intermedio y de factores primarios en la producción de la industria i . Por último, P_{FPi} y P_{IIi} , son los precios de los factores primarios e insumo intermedio para cada industria.

Adicionalmente, cada industria elige sus niveles de consumo capital W_{2id} y mano de obra W_{1id} , para maximizar el uso del componente de factores primarios, mediante una función Cobb-Douglas:

$$FP_{is} = A_i \prod_{j=1}^2 W_{jid}^{\beta_{jid}} \quad i = 1,2 \quad (12.6)$$

Sujeta a:

$$B_{FPi} = P_{FPai} FP_{is} - \sum_{j=1}^2 P_{wji} W_{jid} \quad i = 1,2 \quad (12.7)$$

Donde B_{FPj} es el beneficio de la industria i genera por el uso de los factores primarios FP_{is} , y P_{FPi} el precio del componente de factores primarios respectivo de cada industria. P_{w1i} y P_{w2i} son los precios de renta de mano de obra y capital de la industria i , A_i son positivos y representan el factor tecnológico o de productividad de cada industria. β_{ji} son parámetros positivos (elasticidades) donde

$$\sum_{j=1}^2 \beta_{ji} = 1, \text{ para } i = 1,2$$

Al solucionar (12.4) sujeta a (12.5), obtenemos la cantidades óptimas de factores primarios e insumo intermedio. Recordando que la función de Leontief asume complementariedad perfecta entre sus

factores, las cantidades óptimas de II y FP se obtienen como una solución de esquina de (12.4), de donde:

$$II_{id} = a_i X_{is} \quad i = 1,2 \quad (12.8)$$

$$FP_{id} = l_i X_{is} \quad i = 1,2 \quad (12.9)$$

Además, reemplazando (12.8) y (12.9) en (12.5) y considerando la condición de beneficio 0 (ley de Walras),ecuación (12.13), observamos que los precios de los bienes 1 y 2 no están en función de las cantidades producidas, sino únicamente dependen de los precios del insumo intermedio y del componente de factores primarios, así:

$$P_i = P_{FPi} a_i + P_{Iii} l_i \quad i = 1,2 \quad (12.10)$$

En el caso de los factores primarios, al solucionar (12.6) sujeta a (12.7) nuevamente con el uso de los multiplicadores de Lagrange, y considerando además la condición de beneficio 0 de la ecuación (12.14), tenemos que las cantidades óptimas de capital y mano de obra son:

$$W_{ijd} = \frac{\beta_{ji} P_{FPi} FP_{is}}{P_{wji}} \quad i = 1,2 \quad j = 1,2 \quad (12.11)$$

Si reemplazamos (12.11) en (12.6) observamos que el precio del componente de factores primarios de la industria i está únicamente en función de los precios del capital y la mano de obra:

$$P_{FPi} = \left(\frac{1}{A_i}\right) \prod_{j=1}^2 \left(\frac{P_{wji}}{\beta_{ji}}\right)^{B_{ji}} \quad i = 1,2 \quad (12.12)$$

- iii. El modelo toma en cuenta todos los costos de tal manera que en cada industria, el valor de los bienes producidos es igual al valor de sus insumos, es decir la condición de beneficio 0.

$$B_i = 0 \quad \therefore \quad P_i X_{is} = P_{Iii} II_{id} - P_{FPi} FP_{id} \quad i = 1,2 \quad (12.13)$$

$$B_{vai} = 0 \quad \therefore \quad P_{FPi} FP_{is} = \sum_{j=1}^2 P_{wji} W_{jid} \quad i = 1,2 \quad (12.14)$$

- iv. La industria 1 suministra el insumo intermedio necesario para la producción de la industria 2. Esto es:

$$II_{2s} = f_{p1}X_{1s} \quad (12.15)$$

$$P_{II2} = P_1 \quad (12.16)$$

Donde f_{p1} es el factor que define qué cantidad de la producción total de la industria 1 se destina como insumo intermedio de la industria 2.

- v. El insumo intermedio necesario para la producción de la industria 1 es proporcionado por una tercera industria. Esta tercera industria no interactúa con el sistema, su única función es proporcionar siempre la cantidad óptima del insumo intermedio para la empresa 1. Esto es:

$$II_{1s} = \frac{a_1}{l_1} FP_{1s} \quad (12.17)$$

Además, de tal forma que la empresa 2 aprovecha en su totalidad su insumo intermedio, en su producción, se incluye la ecuación:

$$II_{2s} = \frac{a_2}{l_2} FP_{2s} \quad (12.18)$$

- vi. Los niveles de producción y demanda de los bienes 1 y 2 así como de capital y mano de obra satisfacen que:

$$X_{1d} + II_{2s} = X_{1s} \quad (12.19)$$

$$X_{2d} = X_{2s} \quad (12.20)$$

$$\sum_{i=1}^2 W_{1id} = W_{1s} \quad (12.21)$$

$$W_{2id} = W_{2is} \quad j = 1,2 \quad (12.22)$$

- vii. El presupuesto del hogar Y es igual a la renta de sus factores, esto es

$$Y = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 P_{wji} W_{jid} \quad (12.23)$$

Resumen de las ecuaciones

Ecuación	Índices	Descripción
$X_{id} = \frac{\alpha_i Y}{P_i}$	i=1,2	Demanda del hogar del bien i
$II_{id} = a_i X_{is}$	i=1,2	Demanda de insumo intermedio por parte de la empresa i
$FP_{id} = l_i X_{is}$	i=1,2	Demanda del componente de factores primarios por parte de la empresa i
$X_{is} = \min\left(\frac{II_{id}}{a_i}, \frac{FP_{id}}{l_i}\right)$	i=1,2	Bienes producidos o suministrados por la empresa i
$W_{ijd} = \frac{\beta_{ji} P_{PFI} FP_{is}}{P_{wji}}$	i=1,2 j=1,2	Demanda del factor primario j por parte de la empresa i
$P_i = P_{FPI} a_i + P_{II} l_i$	i=1,2	Precio del bien i producido por la industria i
$P_{FPI} = \left(\frac{1}{A_i}\right) \prod_{j=1}^2 \left(\frac{P_{wji}}{\beta_{ji}}\right)^{B_{ji}}$	i=1,2	Precio del componente de factores primarios i utilizado por la industria i para su producción
$II_{2s} = f_{p1} X_{1s}$		Insumo intermedio de Industria 2 es proporcionado por la industria 1.
$P_{II2} = P_1$		Precio del insumo intermedio 2 es igual al precio del bien 2
$II_{is} = \frac{a_i}{l_i} FP_{is}$		Optimización del uso del insumo intermedio i suministrado
$X_{1d} + II_{2s} = X_{1s}$		Equilibrio. Cantidad del bien 1 demandado igual a cantidad del bien 1 suministrado
$X_{2d} = X_{2s}$		Equilibrio. Cantidad del bien 2 demandado igual a cantidad del bien 2 suministrado
$\sum_{i=1}^2 W_{1id} = W_{1s}$		Equilibrio. Cantidad de Mano de obra demanda es igual a la cantidad de mano de obra disponible.
$W_{2id} = W_{2is}$	i=1,2	Capital demandado i es igual al capital suministrado o disponible i
$Y = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 P_{wji} W_{jid}$		El presupuesto del hogar es igual a la renta de sus factores
$P_1 = 1$		Numerario

Resumen de variables

Variable	Índices	Descripción
X_{id}	i=1,2 d=demanda	Demanda de bien i por parte del hogar
P_i	i=1,2	Precio del bien i
Y		Presupuesto total del hogar
X_{is}	i=1,2 s=suministro	Suministro del bien i producido por la empresa i
II_{id}	i=1,2	Demanda del insumo intermedio por parte de la empresa i
FP_{id}	i=1,2	Demanda del componente de factores primarios por parte de la empresa i
P_{IIi}	i=1,2	Precio del insumo intermedio de la empresa i
P_{FPi}	i=1,2	Precio del componente de factores primarios de la empresa i
II_{is}	i=1,2	Suministro del insumo intermedio para la empresa i
FP_{is}	i=1,2	Suministro del componente de factores primarios para la empresa i
W_{jid}	i=1,2 j=1,2	Demanda del factor primario j por parte de la industria i. Donde j=1 es la renta de mano de obra y j=2 es la renta de capital
P_{wji}	i=1,2 j=1,2	Precio pagado por la empresa i por la renta del factor primario j
f_{p1}		factor que define la cantidad de producción de la industria 1 que se destina como insumo intermedio de la industria 2
W_{1is}	i=1,2	Mano de obra suministrada a la industria i
W_{2s}		Capital total disponible.

Resumen de parámetros y coeficientes

Ecuación	Índices	Descripción
α_i	i=1,2	Elasticidad de la utilidad respecto a cada bien i
a_i	i=1,2	Coefficiente de requerimientos mínimo del insumo intermedio i para la producción del bien i
l_i	i=1,2	Coefficiente de requerimientos mínimo de valor agregado i para la producción del bien i
β_{ji}	i=1,2	Elasticidad del valor agregado i respecto a cada factor primario j
A_i	i=1,2 j=1,2	Factor tecnológico o de productividad de la industria i

Cerrado del modelo

El modelo CGE-M1 consta de 27 ecuaciones y 31 variables, de las cuales 4 han sido seleccionadas como exógenas. Las variables seleccionadas como exógenas son los capitales disponibles de cada industria W_{21s} y W_{22s} , la cantidad total de mano de obra disponible W_{2s} , y el precio del insumo intermedio de la empresa 1, P_{II1} . El cerrado del modelo fue diseñado de tal forma que permita introducir al modelo shocks externos al capital de cada una de las empresas, simulado el daño estructural que podrían tener los activos de las industrias ante la ocurrencia de un terremoto.

Matriz de Contabilidad Social (SAM)

	Industria			Factores		Hogar	Total ventas
	1	2	3	L	K		
Bien 1		100				200	300
Bien 2						300	300
Bien 3	100						100
Mano de Obra L	100	100					200
Capital K	100	100					200
Hogar			100	200	200		500
Producción	300	300	100	200	200	500	1600

Con relación a los precios iniciales de los bienes y factores primarios del modelo M1, se han considerados todos de valor unitario, esto es $P_i = P_{Ii} = P_{wi} = 1$.

Calibración del Modelo

En el modelo CGE-M1, los parámetros exógenos a calibrar son aquellos que caracterizan las funciones de producción y demanda. Los valores de los parámetros luego de la calibración se presentan a continuación.

Para la función Cobb-Douglas de utilidad: $\alpha_1 = 0.4$, $\alpha_2 = 0.6$.

Para la función de producción Cobb-Couglas que modela la cantidad de factores primarios: $A_1 = 2$, $\beta_{11} = 0.5$, $\beta_{21} = 0.5$ y $A_2 = 2$, $\beta_{12} = 0.5$, $\beta_{22} = 0.5$.

Para la Función de producción de Leontief: $a_1 = 0.666$, $a_2 = 0.666$ y $l_1 = 0.333$, $l_2 = 0.333$.

12.2 Modelo de Riesgo Sísmico – Ejercicio Teórico

Amenaza Sísmica - AS1

El modelo de amenaza sísmica AS1 que se ha utilizado en el experimento E1 es un modelo extremadamente sencillo y de carácter académico, pero que sin embargo, contiene todos los componentes de un análisis PSHA. El modelo está conformado por una sola fuente sísmica S1, la cual la vamos a considerar puntual y cuya sismicidad está descrita por versión modificada de la relación Gutenberg-Richter (Cornell & Vanmarcke, 1969) dada por la ecuación (10.1) con parámetros: $\beta = 2.3$, $\lambda_0 = 1$, $M_0 = 4 M_u = 8$. La Figura 12.3, panel a presenta la tasa de excedencia de magnitudes de la fuente sísmica S1. Para estimar el campo de intensidades sísmicas provocadas por la fuente S1, se define la relación de atenuación (GMPE) dada por:

$$\ln(I) = 3.6 + 0.7M_i - 1\ln(R_j) - 0.008R_j \quad (12.24)$$

$$\sigma = 0.7 \quad (12.25)$$

Donde I es el la mediana de la intensidad sísmica medida en cm/s^2 y σ su la desviación estándar. M_i es la magnitud i de momento sísmico mientras que R_j la distancia epicentral fuente sitio j en Km . Vamos a suponer que esta relación de atenuación es válida para todas las ordenas espectrales (períodos de vibración). La Figura 12.3, panel b ejemplifica la relación de atenuación de nuestro modelo.

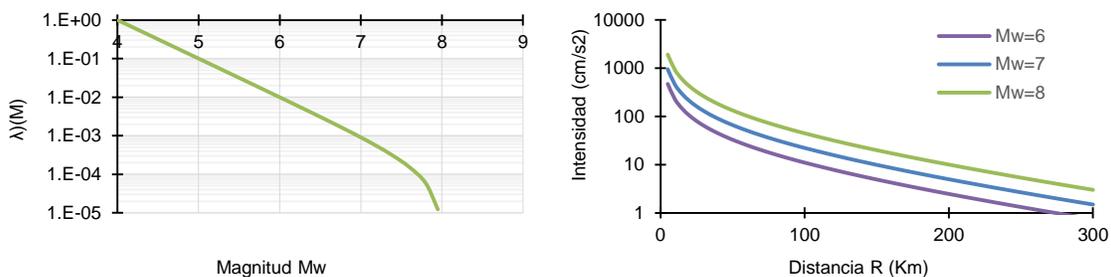


Figura 12.3 Modelo de amenaza sísmica del experimento E1.

El panel **a** muestra la curva de tasa de excedencia de magnitudes de la fuente sísmica S1. El panel **b** muestra la relación de atenuación utilizada en el modelo de amenaza sísmica AS1.

Como último paso de la metodología PSHA, y considerando que la distribución de probabilidad de las aceleraciones sísmicas sigue una distribución lognormal, aplicamos la ecuación (10.3) para calcular la curva de tasa de excedencia de aceleración para cualquier punto del espacio (Figura 12.4).

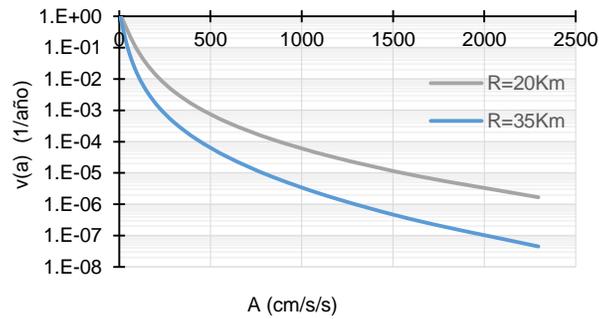


Figura 12.4 Tasa de excedencia de aceleraciones – Modelo de Amenaza sísmica AS1.

Se muestran las tasas de excedencia de aceleraciones para dos sitios ubicados uno a 20 Km y otro a 35 Km de la fuente.S1.

Funciones de Vulnerabilidad

La Figura 12.5 muestra la curva de vulnerabilidad utilizada para modelar el daño estructural de las industrias 1 y 2 ante la ocurrencia de sismos.

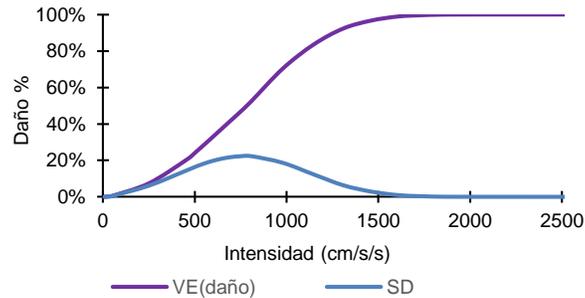


Figura 12.5 Función de vulnerabilidad estructural para las industrias 1 y 2.

La curva morada muestra el valor esperado del daño de la estructura mientras que la curva azul, su desviación estándar.

12.3 Modelo de Riesgo Sísmico – Chile

Amenaza Sísmica

El modelo de amenaza sísmica utilizado para Chile se lo denomina ASLAC y fue un modelo de amenaza sísmica desarrollado para América Latina y el Caribe por la empresa ERN cuya descripción a detalle se la puede encontrar en (Salgado-Gálvez, y otros, 2018).

Base de Datos de Exposición

En nuestro caso práctico de estudio, la base de datos se refiere exclusivamente a las edificaciones no residenciales de Chile. Esto debido a que estamos tratando de modelar los daños de los stocks de capitales utilizados en el proceso productivo. La base de datos se la estimó tomando como base la metodología desarrollada por (Gunasekera, y otros, 2015), (Aubrecht & Leon Torres, 2015), (Aubrecht & Leon Torres, 2016), (Pomonis, Panama: Estimation of residential inventory and exposure in urban and rural areas for disaster loss estimation, 2014), (Pomonis, 2014) que aprovecha conjuntos de datos globales geo-referenciados y bases de datos censales para crear un modelo de exposición aproximado de edificaciones (León Torres, 2019).

En primer lugar, la metodología propone una división principal del inventario de edificaciones en edificios residenciales y no residenciales. Los edificios no residenciales abarcan estructuras tales como fábricas, supermercados, bodegas, edificios de oficinas, edificios públicos y gubernamentales, etc., mientras que los edificios residenciales se refieren exclusivamente a vivienda. En nuestro estudio, nos referiremos solo a las no residenciales. Hay 3 componentes clave que conforman el modelo de exposición: 1) Desagregación de la exposición, 2) estimación del stock de edificios y 3) estimación del costo de los activos. La desagregación de la exposición envuelve la elección, organización y aprovechamiento de la información contenida en bases de datos globales geo-localizadas disponibles a nivel mundial, las cuales se utilizan para estimar la localización y densidad de población. La metodología asume que la distribución de la densidad de población es proporcional a la distribución de la densidad de edificaciones y en general, es proporcional a la distribución del área construida (Aubrecht, Steinnocher, Kostl, Zuger, & Loibl, 2013). De este modo, al calcular la densidad de población, seremos capaces de estimar la densidad de edificaciones. Como resultado del proceso de desagregación, en nuestro caso de estudio, obtendremos la densidad de población no residencial de Chile con una resolución de 30 segundos de arco, esto es, una grilla de 1x1 km aproximadamente. En el proceso hacemos uso de cinco conjuntos de datos: LandScan2015, WorldPop2015, GHS2015, ISA and VIIRS. Las 3 primeras capas son utilizadas para estimar la distribución espacial de la densidad de población de Chile en celdas de aproximadamente 1x1 km y las 2 últimas, para seleccionar únicamente las celdas que corresponden a edificaciones no residenciales (Aubrecht & Leon Torres, 2016), (Aubrecht & Leon Torres, 2015).

En un segundo componente se realiza la estimación del inventario de edificaciones no residenciales de Chile utilizando como base información de las Encuestas Nacionales de Empleo realizadas por el INE-Chile. Como resultado de este componente, se obtiene el número de metros cuadrados construidos respecto a cada sector económico (S1, S2,..., S12) y para cada región de Chile (R1, R2,..., R15). El proceso es el siguiente: 1) de la encuesta nacional de empleo obtenemos la distribución de

trabajadores por Sector/Región de Chile. 2) Asignamos una cantidad de m2 construidos por persona en función del tipo de edificaciones predominante en cada sector económico. La densidad de m2 construidos por/persona por tipo de ocupación la obtenemos del trabajo de Reinoso et al., (2012). 3) multiplicamos el # de trabajadores por la cantidad de m2 construidos por persona según sea el caso y obtenemos la Tabla 12.1.

Para estimar el costo de los activos requerido en el tercer componente de la metodología, necesitamos estimar el precio promedio de construcción por metro cuadrado para las edificaciones no residenciales de Chile. Se ha optado por tomar el costo de construcción dado por el proyecto SARA (2013-2015) que para el caso de las ediciones no residencial de Chile lo estima en 900 USD por metro cuadrado. El costo total de los activos en cada sector/región de Chile será el producto del total de m2 construidos por el costo por m2.

Finalmente juntamos la información del paso 1 y 2 para obtener el modelo de exposición de edificaciones no residenciales de Chile, modelo que posee toda la información necesaria para llevar a cabo un estudio de riesgo. Utilizamos el programa TDMv1.8, desarrollado en el II UNAM, para realizar la fusión de la información. El proceso de fusión se trata de distribuir el total de metros cuadrados construidos y costo total de activos para cada sector/región en función de la distribución de la densidad de población no residencial respectiva de cada caso. La Figura 12.6 presenta del valor total de las edificaciones no residenciales por región de Chile a una resolución aproximada de 1 Km2.

Tabla 12.1 Metros cuadrados construidos por sector/región de Chile (millones de m2)

	Total	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Total	115,243,513	258,589	32,232	17,900,268	929,666	19,270,618	25,121,291	3,325,993	2,611,647	1,203,085	22,600,693	14,660,047	7,329,385
R1	1,025,836	2,798	591	109,677	4,694	218,316	241,841	30,028	8,305	6,321	196,220	89,527	117,519
R2	2,134,826	4,698	1,961	232,250	24,493	366,124	565,863	74,488	21,009	24,869	453,672	178,285	187,113
R3	3,743,954	2,592	7,606	550,982	50,697	712,180	932,711	108,268	40,373	43,910	656,075	408,493	230,069
R4	1,659,629	3,094	3,302	238,953	21,737	243,243	461,305	41,632	23,239	29,514	321,307	128,608	143,695
R5	4,581,280	15,692	4,612	579,944	70,367	807,407	1,237,981	112,595	57,583	57,429	827,252	512,062	298,357
R6	11,556,304	19,296	4,230	1,415,035	108,284	2,091,229	2,442,992	375,469	199,340	207,492	2,570,098	1,387,030	735,810
R8	5,187,786	37,287	2,275	1,010,311	33,827	875,499	1,028,644	124,601	59,382	48,970	988,746	579,595	398,650
R9	5,856,471	43,842	398	946,620	57,673	1,135,729	1,323,373	132,274	76,700	30,683	1,077,334	707,172	324,672
R10	13,197,889	36,897	2,589	2,416,621	156,591	2,091,996	2,552,704	284,398	131,068	49,831	2,747,644	1,582,679	1,144,872
R11	5,664,433	30,123	121	690,281	72,164	1,006,136	1,246,968	107,691	73,670	23,501	1,491,715	501,034	421,028
R12	2,422,962	10,688	121	392,041	23,147	414,917	432,595	54,150	23,178	21,394	474,674	347,742	228,316
R13	5,551,617	24,594	9	1,184,338	31,081	784,007	1,215,137	151,556	53,015	39,142	944,167	612,093	512,477
R14	784,563	1,905	147	107,911	7,504	98,188	180,575	21,589	9,582	2,353	157,793	83,606	113,412
R15	1,152,682	2,006	511	106,357	3,251	178,395	271,756	41,461	18,794	1,000	255,463	103,984	169,703
R7	50,723,411	23,078	3,760	7,918,969	264,155	8,247,251	10,986,858	1,665,797	1,816,424	616,661	9,438,551	7,438,229	2,303,678

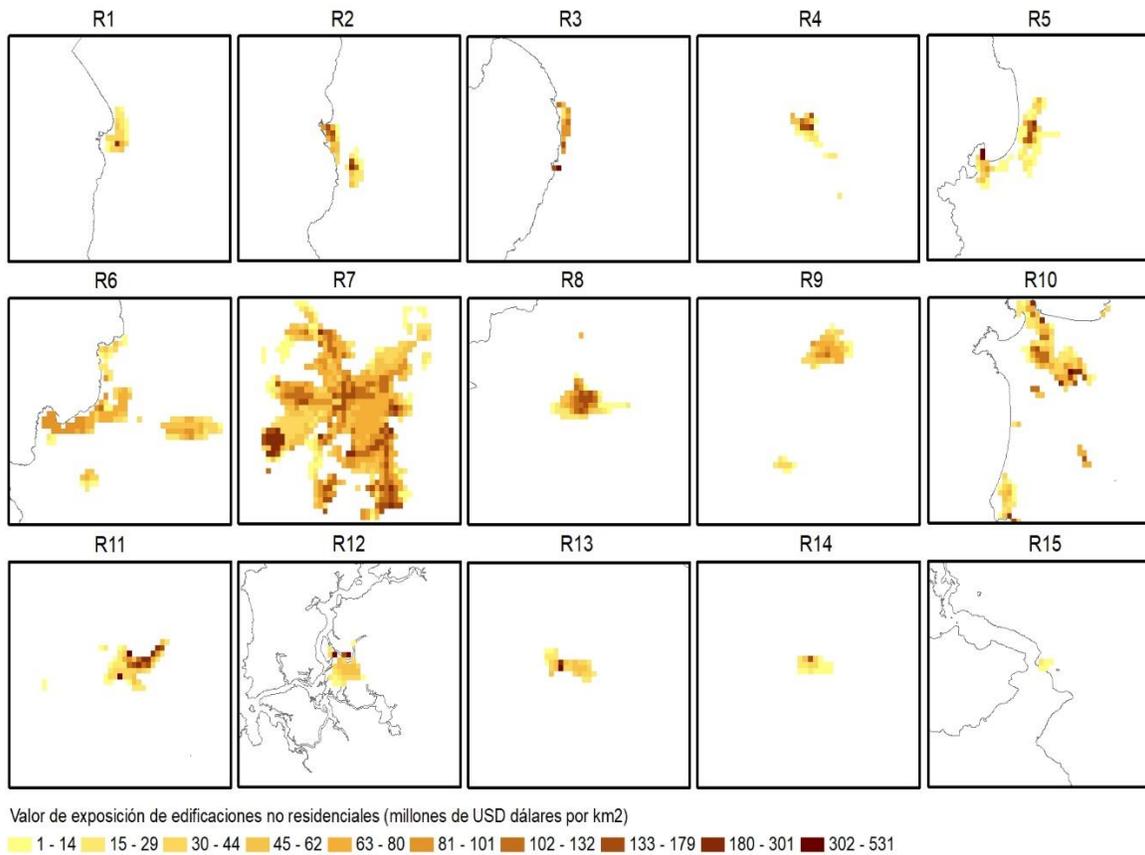


Figura 12.6 Modelo de exposición de edificaciones no residenciales de Chile por región.

La figura ilustra el valor expuesto total de edificaciones no residenciales a una resolución espacial de 30 segundos de arco (aproximadamente una grilla de 1x1-Km en el Ecuador) en millones de dólares para las regiones más densamente edificadas de cada región de Chile.

Funciones de Vulnerabilidad

Las funciones de vulnerabilidad de los edificios no residenciales utilizadas para el estudio de Chile fueron desarrolladas utilizando la metodología descrita en la sección 10.2. La metodología necesita como insumo los valores del parámetro γ_i que define el comportamiento de daño de las edificaciones dada la ocurrencia de cierta intensidad sísmica. Para nuestro estudio, el daño estructural es aproximado mediante el radio máximo de distorsión de entrepiso (IDR, por sus siglas en inglés) dado por la expresión (Miranda E. , 1997), (Miranda E. , 1999):

$$\gamma_i = \frac{\beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 \eta^2 N^{\frac{3}{4}}}{4\pi^2 h} S_a(T) \quad (12.26)$$

Donde $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ son factores dados por Miranda que permiten estimar, de una forma simplificada, el comportamiento estructural de un edificio. η es un factor que permite estimar el período fundamental de vibración de una estructura, H es el número de pisos, $S_a(T)$ es la aceleración espectral que depende tanto de la amenaza sísmica en el sitio de estudio así como del período de vibración y amortiguamiento de la estructura. h es la altura de entrepiso del edificio.

Para la calibración de cada curva de vulnerabilidad, se utilizaron 3 puntos de daño conocido asociados a niveles de daño específicos, 0%, 50% y 100% CAPRA (ERN-AL, 2010). Los niveles de daño son dados a través de radios máximos de distorsiones de entrepiso que son indirectamente calculado en base a factores dados por (León , 2015) y a información local de las características estructurales de algunos edificios no residenciales de Chile que forman parte de cada sector económico. La Figura 12.7 presenta las funciones de vulnerabilidad utilizadas para el estudio de Chile y la Tabla 12.2 y Tabla 12.3 presentan los parámetros de capacidad y daño asumidos para modelar el comportamiento estructural de los edificios tipo más representativos de cada sector económico ante la ocurrencia de un temblor.

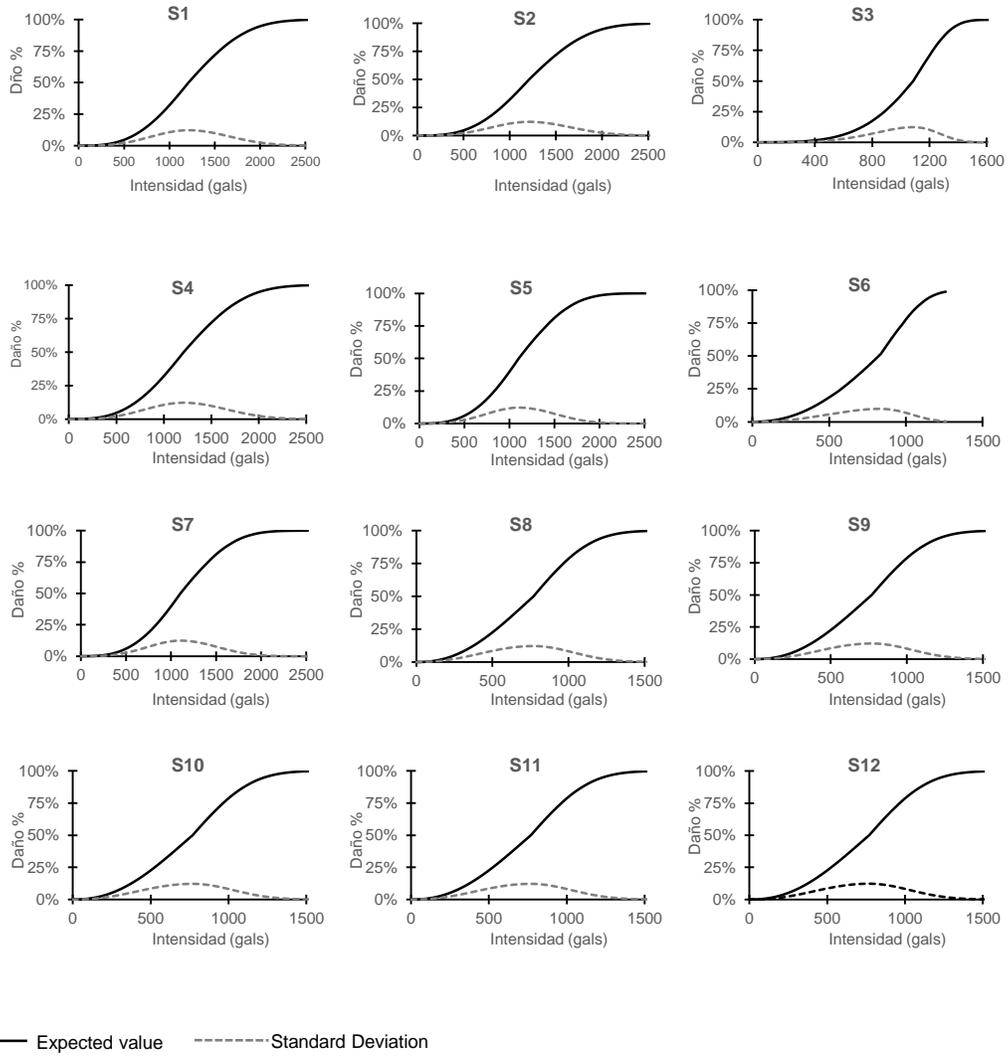


Figura 12.7 Funciones de vulnerabilidad utilizadas para Chile.

Se presenta las funciones de vulnerabilidad referidas al daño físico de los edificios no residenciales que conforman el stock de capital de los diferentes sectores económicos de Chile.

Tabla 12.2 Parámetros de capacidad y daño que caracterizan cada tipo de edificio

ID	H (m)	T (s)	# de pisos	H int	μ max	γ_u	C_s
S1	15	0.54	5	3	4	0.0340	0.30
S2	15	0.54	5	3	4	0.0340	0.30
S3	8	0.38	1	8	6	0.0163	0.36
S4	15	0.54	5	3	4	0.0340	0.30
S5	12	0.44	4	3	5	0.0280	0.28
S6	6	0.19	2	3	4	0.0069	0.18
S7	12	0.44	4	3	5	0.0280	0.28
S8	24	0.82	8	3	6	0.0325	0.20
S9	24	0.82	8	3	6	0.0325	0.20
S10	24	0.82	8	3	6	0.0325	0.20
S11	24	0.82	8	3	6	0.0325	0.20
S12	24	0.82	8	3	6	0.0325	0.20

Tabla 12.3 Parámetros de capacidad y daño que caracterizan cada tipo de edificio-continuación

ID	Fr	F50%	ρ_1	ρ_2	σ_2 max	r	a	α
S1	0.2	0.4	3.02	2.72	0.015	r	a	α
S2	0.2	0.4	3.02	2.72	0.015	3	0.01	4
S3	0.4	0.5	3.40	4.23	0.015	3	0.01	4
S4	0.2	0.4	3.02	2.72	0.015	3	0.01	4
S5	0.1	0.4	3.00	2.55	0.015	3	0.01	4
S6	0.0	0.4	2.10	3.00	0.015	3	0.01	4
S7	0.1	0.4	3.00	2.55	0.015	3	2.13	30
S8	0.2	0.4	2.28	2.94	0.015	3	0.01	4
S9	0.2	0.4	2.28	2.94	0.015	3	0.01	4
S10	0.2	0.4	2.28	2.94	0.015	3	0.01	4
S11	0.15	0.4	2.28	2.94	0.015	3	0.01	4
S12	0.15	0.4	2.28	2.94	0.015	3	0.01	4

H : Altura total (m).

T : Período fundamental de vibración (s).

H_{int} : Altura de entrepiso (m).

μ max: Ductilidad máxima

γ_u : Radio máximo de la distorsión de entrepiso (IDR).

C_s : Coeficiente sísmico de diseño.

F_R : Cociente entre el IDR de fluencia y el IDR asociado con el punto inicial del daño estructural.

$F_{50\%}$: Cociente entre el rango del IDR que contiene el primer 50% de daño estructural y el rango del IDR que contiene el 50% del daño final.

ρ_1 : Curvatura de la FV (MDR) de 0% al 50% del daño.

ρ_1 : Curvatura de la FV (MDR) de 50% al 100% del daño.

σ_{max}^2 : Varianza máxima.

r : Factor de forma de la varianza.

α : Forma de la distribución lateral de carga: 0.01 para triangular, 2.13 para parabólica e ∞ para carga uniforme.

α : Forma de la deformación lateral (comportamiento estructural): 0 para estructuras que se deforman lateralmente como edificios de flexión, 30 para estructuras que se deforman lateralmente como edificios de cortante y valores intermedios para comportamiento mixto.

13. Anexo D. Artículo Científico

El artículo se envió a la revista Nature Communications.

Risk caused by the propagation of earthquake losses through the economy of a country

J.A. León^{1*}, M. Ordaz¹, E. Haddad^{2,3}, I. Araújo³

The economy of a country is exposed to catastrophe-induced disruptions caused by natural and man-made disasters. We present for the first time a set of probabilistic risk indicators regarding losses of production, employment, GDP, gross regional product, export volume, inflation, tariff revenue, among others, due to earthquakes. All indicators are computed by using a systematic probabilistic approach, which considers a vast collection of events that collectively describe the entire seismic hazard of a country. We illustrate this novel approach with an example developed for Chile. Results reveal that the Average Annual Loss (AAL) of production, GDP and export volume in Chile are 583, 305 and 62 million dollars, while the employment AAL is 7,786 workers. Metropolitan Region of Santiago concentrates ~41% of the total production AAL while Region of Valparaiso is the riskiest, with a regional production AAL of 0.22%. We also present the loss exceedance curves for different components of the Chilean economy at country and regional levels.

¹Instituto de Ingeniería, National Autonomous University of Mexico (UNAM), Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 Mexico, DF, Mexico. ² Department of Economics, University of Sao Paulo, Av. Prof. Luciano Gualberto, 908, FEA 1, Cidade Universitária, Sao Paulo, SP, Brazil., ³ The University of Sao Paulo Regional and Urban Economics Lab (NEREUS), Av. Prof. Luciano Gualberto, 908, FEA I, Cidade Universitária, Sao Paulo, SP, Brazil. Correspondence and requests for materials should be addressed to J.A.L. (email: jleont@ingen.unam.mx)

There is evidence that economic production losses caused by disasters, on occasion called *indirect losses*, can sometimes be much larger than those produced by physical damage¹⁻². We have witnessed recent catastrophic events that have made evident the economic implications and new features brought by disaster occurrence. The 2004 Indian Ocean earthquake and tsunami, hurricane Katrina in 2005, the 2010 Haiti earthquake, and the 2011 Japan earthquake and tsunami highlighted the importance of matters as disaster risk governance, reconstruction strategies, vulnerability of the economy of developing countries, the multinational disaster aspects and how disasters can cascade. The importance of accounting for indirect losses in risk is crucial and becomes larger as the supply-chain complexity increases in the age of globalization³⁻⁶. However, it is not easy to account for the economic consequences of earthquakes with historical information alone, because these catastrophic events are infrequent, so relevant information is scarce, and it is not always easy to distinguish between direct and indirect losses.

Catastrophe modeling of physical damage caused by earthquakes is today a well-developed technique, to the point that it is possible to estimate, in a probabilistic manner, the seismic risk of individual assets⁷⁻¹⁰ (infrastructure, buildings, contents, machinery, equipment, etc.) Modeling of indirect losses, in comparison, lags far behind, mainly due to the difficulties in empirically translating property damage into indirect losses⁵ and due to the lack of adequate models that relate these two

kinds of losses. Usually, indirect losses are estimated roughly as a percentage of physical losses, establishing this percent with empirical information obtained from a very limited historic database of events occurred around the world; this is clearly unsatisfactory.

However, there is a well-developed literature on the economic impact of natural and man-made disasters, whose most recent advances have been compiled by Okuyama and Rose¹¹. On one hand, efforts have been focused on improving and extending the quantitative models used for disaster impact analysis, such as cyber-attacks, extreme weather events, earthquakes, flooding, climate change, and terrorist attacks, amongst others¹²⁻¹⁷. Additionally, new frameworks have been proposed to integrate models of transportation, critical supply chains, and community demand¹⁸. On the other hand, researchers have devised tools to directly estimate economic damages and/or losses based on some physical data of natural hazards^{19,20}, or to evaluate, for instance, the changes in economic activities with a set of satellite data on annual difference in nighttime light intensity²¹.

In spite of the existence of this large and rich analytical framework to study the impact of disasters into the economy, efforts have concentrated in the analysis of individual events²²⁻²⁶, without appropriate consideration of their frequency of occurrence. But frequency of occurrence matters. Clearly, decisions and policy would be very different if one knew that the economic impacts of a certain size are to be expected, on average, once every 100 years or once every 1000 years. Further, it would seem that little attention has been given to linking physical damage to infrastructure or economic components with higher-order economic losses.

In view of this, we present here a probabilistic approach to the estimation of higher-order losses that takes into account that: 1) natural events –earthquakes in our case– take place as a stochastic process

in time; 2) frequency of occurrence of events matters for measuring risk; and 3) there are links between the level of physical damage to economic components and the reduction of capital stock. In our approach, we start with a Computable General Equilibrium (CGE) model of the economy, specified as a fully integrated interregional system. This model describes the economic interactions among regions and industrial sectors, and is in equilibrium under a certain level of inputs, outputs and prices. Then, an earthquake happens, and produces physical damage (direct losses) to the economic components associated with the available capital stock (e.g. buildings, factories and infrastructure) of the affected portion of the region; these losses are estimated with conventional seismic risk techniques^{27,28}. Direct losses, in turn, produce partial reductions in some inputs to the CGE model, namely regional-sectorial capital stocks, which attains a new equilibrium after proper adjustments, reaching new levels of outputs and prices. The result is that the occurrence of the earthquake produces direct losses plus other types of indirect losses that result from the propagation of the reduction of available primary factors through the economy described by our CGE model. As in the case of conventional seismic risk models, the analysis is then repeated for a vast set of earthquakes (44,350 events for our case of study) with known occurrence frequencies, that collectively describe the hazard of the region under study. Results for all earthquakes allow for various probabilistic risk metrics to be computed, now including the effect of indirect losses as well.

This work is the first effort to join, in a systematic way, the probabilistic seismic risk and the CGE modeling frameworks, both robust and well-known models used worldwide in their respective fields. CGE models are used widely for studying and simulating economic effects within an economy, given the occurrence of different types of shocks, such as economic policies, taxes, financial crises, terrorist attacks, natural disasters, etc²⁹⁻³³. We make use of a special type of CGE models, known as spatial CGE models³⁴⁻³⁵, which have the ability to take into account the geographic location of economic agents and endowments.

Our modeling approach is fully probabilistic on the earthquake occurrence side, but for now is deterministic on the CGE side. We assume that the physical damage produces a proportional reduction on the value of the capital stock of components hit by the earthquake, which initially causes a direct reduction on production and later propagates into the economy in ways dictated by the interactions contained in the CGE model.

Besides dealing with the estimation of indirect monetary losses, our approach allows for a better glance of the likely consequences of the earthquake occurrence into the full economy. As we will see, the richness of the CGE modelling allows for carrying out risk assessment referred to different economic variables, such as employment, GDP, GRP, wages, tariff revenue, consumer price index, export volume, and so on. Furthermore, we have observed the capacity of the CGE model to catch positive economic impacts of earthquakes on certain sectors and regions, through substitution effects. The new methodology is applied to Chile, a country that is frequently affected by large earthquakes. From an economic point of view, the Chilean economy is considered one of the most dynamic in Latin America, showing remarkable competitiveness, economic freedom and financial development. Chile is also a country with remarkable regional disparities. These characteristics make Chile an ideal place to exemplify our approach. Supplementary Table 1 in the Supplementary Materials shows the regions and economic sectors that constitute our model.

We find that the average annual loss (AAL) and the production loss associated to a return period of 250 years, for the whole country, were 0.132% and 3.58% of its total yearly production, respectively. From the authors' experience, these results look reasonable in comparison with the direct economic losses obtained (0.29% of the total value as AAL of non-residential buildings). We also find that the

employment AAL in Chile is 7,786 workers and the AAL in the GDP and export volume are 305 and 62 million dollars, corresponding to 0.122% of the GDP and 0.08% of the annual export volume, respectively. We have computed loss exceedance curves for different components of the Chilean's economy at country, regional and sectorial level.

We conclude that the approach presented has successfully joined together the probabilistic seismic risk and the CGE modeling frameworks, allowing for a robust and systematic probabilistic glance of the consequences of the earthquake occurrence process, through the computation of the standard risk metrics for several components of the economy. We believe that the results presented are useful as complementary risk indicators in the field of catastrophe modelling.

Results

As we have mentioned before, this is the first time in which a robust, probabilistic and systematic connection between entire seismic risk and large-scale economic models has been attempted. Therefore, we have not been able to collect all data required to carry out a full joint calibration of the models, in particular the proportional relation between the reductions of the capital stock and the direct losses in non-residential buildings. In this sense, our example should be considered a proof-of-concept rather than a final product. In spite of this, we believe that the results obtained in this example are quite reasonable and can be used to gauge the power of the approach, within, of course, its assumptions and limitations. In what follows we will present the main results of our example, highlighting some of the most interesting findings.

General results. Table 2 presents general descriptors of the Chilean economy and some of the more aggregated results of our analysis. Direct losses computed refers exclusively to non-residential buildings. The reason for this restriction is that we are trying to model damages only in capital stocks used in the production process, in the sense that their physical disruption is susceptible of being propagated in the economy of the country.

Table 1 General value of Chilean economy (2014) and main aggregated results

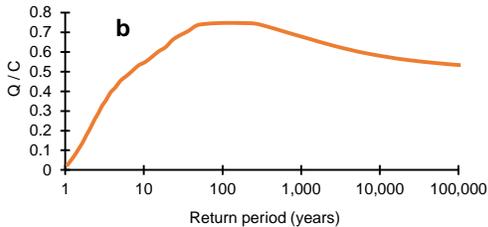
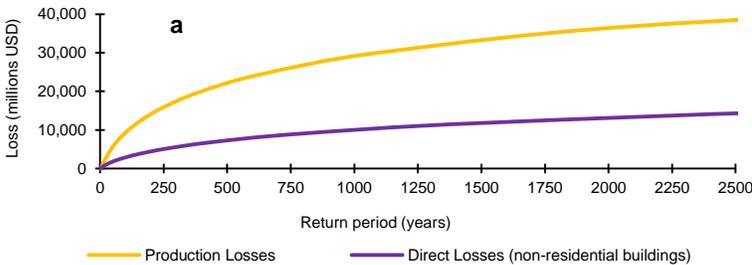
Item	Total Value	Average annual loss
Total value of non-residential buildings	103,720 million USD	302 million USD
Total value of yearly production	442,805 million USD	583 million USD
GDP	251,020 million USD	305 million USD
Total employment in Chile	6,671,072 workers	7,786 workers
Total export volume	83,102 million USD	62 million USD

We will express seismic risk, due to direct or indirect losses, in terms of a few standard risk metrics. We will use the average annual loss (Methods, equations 1-2) and the loss exceedance curve (LEC; Methods, equations 3-4). Let us start presenting the results at the country level.

Fig.1a shows the loss exceedance curve of Chile’s direct and production losses. It must be noted that we are representing the LEC with the return period (the inverse of the exceedance rate) in the horizontal axis and the loss values in the vertical axis. The LEC for physical losses is a common metric within the risk assessment world; however, the LEC for production losses is introduced for the first time in this paper. The production loss associated to 250 years of return period for Chile was

estimated in 15,870 million dollars (3.58% of the total yearly production) while direct losses were 5,025 million dollars, that is 4.9% of the total value of non-residential buildings. For 1,000 years of return period, the production and direct losses were 28,760 and 9,835 million dollars, respectively.

Furthermore, as shown in Fig. 1b, we found that for less severe events with low return periods (up to 50 years), the production losses follow a positive proportional relation with the direct losses, which goes from almost zero up to a maximum value of $0.74C$, being C the ratio between total production and total value of non-residential buildings. For losses with return periods between 50 and 400 years, we observed that production losses are larger than direct losses. In a third stretch, as soon as the losses become less probable and more severe (return periods higher than 400 years), the production losses present a very soft negative proportional relation with direct losses. For instance, for return periods of 10,000 and 100,000 years, the relation between production and direct losses dropped to $0.6C$ and $0.5C$ respectively.



Q: Production loss / direct loss C: Total Production / Total assets value

Fig. 1 Loss Exceedance curves of direct and production losses. Panel **a** shows the LECs expressed in million dollars. Direct losses refer exclusively to non-residential buildings of the country. Panel **b** shows the relation between production losses and direct losses, Q , as a function of the return period. The ratios are presented normalized to C , being C the ratio between total production and total value of assets (non-residential buildings).

In the case of the AAL for the whole country, that of direct losses has been estimated as 302 million dollars, which is 0.29% of the total value of non-residential buildings. In turn, the AAL of production losses reaches 583 million dollars, that is, 0.132% of the total yearly production of the country.

Fig.2 shows the AAL for Chile grouped by economic sector, both for direct and production losses. We present the AAL results: 1) as a percentage of its total value, in order to see the influence of each sector in the total AAL; and 2) as a fraction (per mile) of its exposed sectorial value of assets and yearly production, respectively, in order to see how risky each sector is. Clearly, we can see in Fig.2 that both the AAL distribution by sector and the risk rank of economic sectors are different for direct and indirect losses. For instance, in the case of direct losses, the riskiest sector and the one that contributes the most to its total AAL, with 35%, is sector S6 “Commerce, hotels and restaurants”. However, regarding production losses, the riskiest sector is S7 “Transport, communications and information services” while the one with highest contribution to its total AAL is S3 “Manufacturing industry”, with 23%. As mentioned, sector S6 is the most affected on its physical assets, with an AAL of 4.7 per mile of its exposed value, but in the case of production, sector S7 presents the highest losses, with an AAL of 1.65 per mile of its total production. Sectors S1, S3 and S5 also present considerable losses in their production, with an AAL of about 1.56 per mile.

Similarly, Fig.3 depicts the AAL by region of the country for both types of losses, together with an indication of the seismic hazard level, expressed in terms of the peak ground acceleration (PGA) associated to a return period of 475 years. Fig.3 and Supplementary Fig.1 show that the regional distribution of the AAL of direct losses of Chile is similar to the regional distribution of the AAL of production losses. As expected, the Metropolitan Region of Santiago, R7, concentrates the greatest part of the average annual loss: 40% of the AAL of direct losses and 41% of the AAL of production losses. On the contrary, regional risk indicators of direct losses are not proportional to their corresponding ones of production loss, as shown in Fig.3 and Supplementary Fig.1. We have found that the riskiest region (highest value of relative AAL) in terms of direct losses are Region of Atacama (R4) while in terms of production losses the riskiest is Region of Valparaiso (R6). In the case of Region of Antofagasta (R3), it is the 5th riskiest region in terms of direct losses and the 12th in terms of production losses. This clearly demonstrates the importance of taking into account the high-order economic losses since, while there are regions most physically affected by the earthquake hazard, there are other regions that suffer the largest effects in terms of loss of production. In the fifteen regions of Chile, we saw that, in annual average, the economic losses caused by earthquakes over their production are higher than the losses over their non-residential buildings that are part the capital stock of Chile.

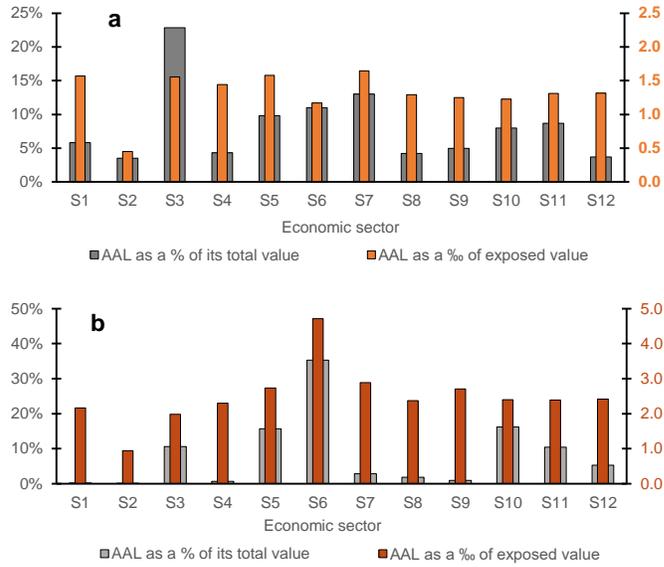


Fig. 2 Average annual loss for Chile by economic sector. Panel **a** shows the production AAL as a percentage of its total value (gray) and as a fraction (per mille) of its sectorial yearly production (orange). Panel **b** shows the direct AAL as a percentage of its total value (grey) and as a fraction (per mille) of the corresponding sectorial value of non-residential buildings (red).

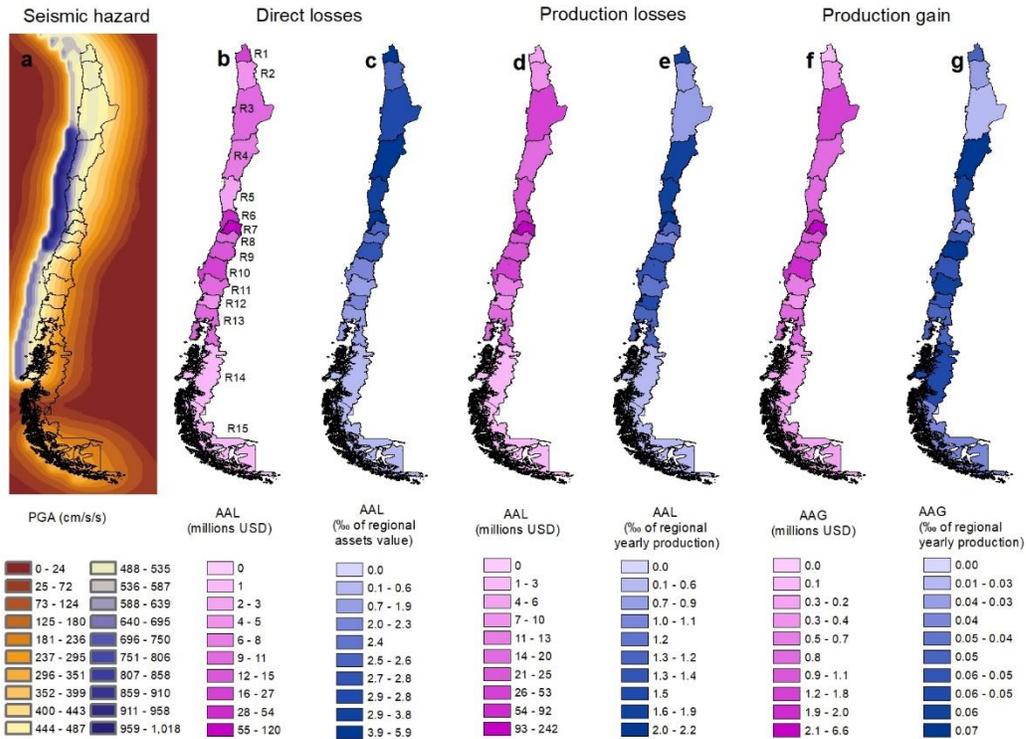


Fig. 3 Distribution of AAL in Chile. Panel **a** shows the seismic hazard for Chile, expressed in terms of the peak ground acceleration (PGA) associated to 475 years of return period. The average annual loss due to physical damage of non-residential buildings (direct losses) by region is shown in panel **b** in millions of USD and in panel **c** as a fraction (per mile) of its regional exposed value. The average annual loss in production by region is shown in panel **d** in millions of USD and in panel **e** as a fraction (per mile) of the corresponding regional annual production. Finally, panels **f** and **g** present the annual average gain (AAG) of production by region in millions of USD and as a fraction (per mile) of the corresponding regional annual production.

Our approach also allows us to obtain the LEC of production for individual regions or economic sectors, as shown in Fig. 4. As mentioned before, the Metropolitan Region of Santiago, R7, presents the highest losses in absolute terms. For example, for a return period of 250 years, region R7 shows

a loss of 10,674 million dollars, which is 5.45% of its total yearly production. However, in relative terms to its corresponding regional yearly production, up to a return period of about 450 years, the most affected region is R6, while for return periods greater than 450 years, the most affected one is R1 (Supplementary Fig. 2). In the case of economic sectors, manufacturing industry, S3, presents the highest losses in the country in absolute terms, and, transport, communications and information services, S7, the highest losses in in relative terms to its sectorial production, for any return period.

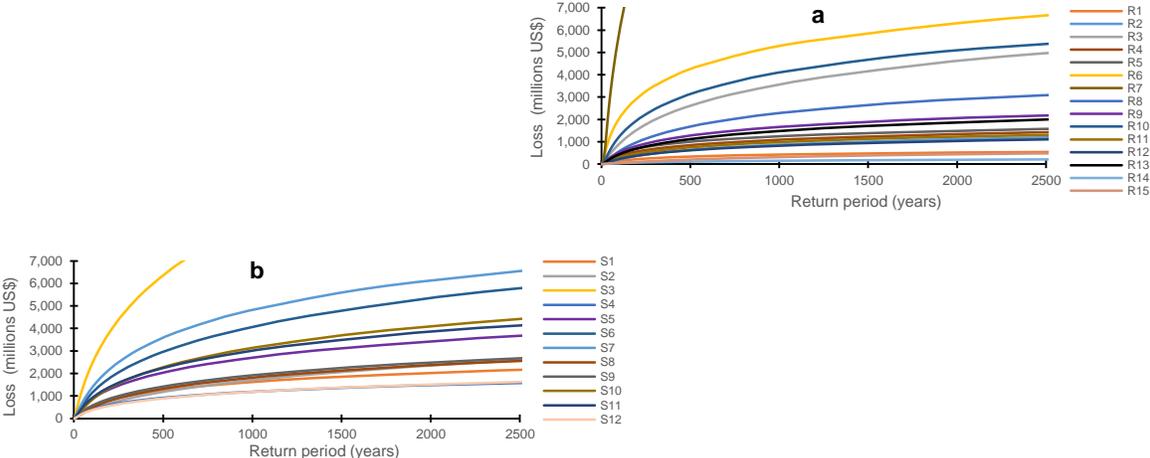


Fig. 4 Production loss exceedance curves of Chile by region. Panel **a** by region of the country, Panel **b** by economic sector.

Fig.5 presents AAL of production losses, by economic sector, and for four regions of Chile, two located in the economic core of the country (R6 and R7) and two located at the extreme north and south of it. Supplementary Fig. 3 and Supplementary Fig.4 present both the AAL of production losses and the production LEC by economic sector, for all regions of the country; these figures clearly show the differences in the production loss behavior of economic sectors into each region of Chile. This

individual risk characterization allows us to study a particular region but considering the economic interactions generated at the whole country, with the foreign component modeled as a single agent.

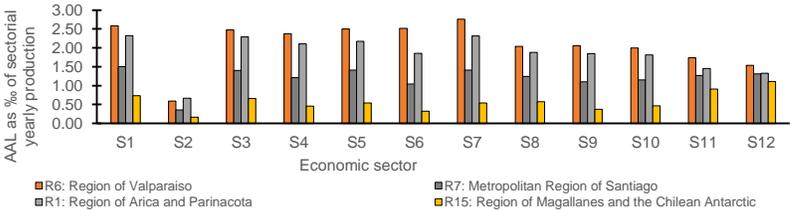


Fig. 5 Average annual loss of production by economic sector at regional level. AAL is shown as a fraction (per mile) of its corresponding sectorial/regional yearly production for the Metropolitan region of Santiago (R7), for the Region of Valparaiso (R6), for the Region of Arica and Parinacota (R1) and for the Region of Magallanes and Chilean Antarctic (R15).

New risk indicators. The richness of CGE modelling regarding the amount of interesting output variables, each one of them reflecting a different aspect of the economy, allows for the computation of many interesting and useful risk measures. Besides calculating the risk measures in terms of production loss, it is possible to compute risk measures for losses of employment, GDP, GRP, tariff revenue, consumer price index, export volume, among others. These novel indicators can be useful for seismic risk management, as they provide a way to measure the losses in various aspects of an economy facing earthquake hazard.

Employment: The employment AAL and the employment loss associated to 250 years of return period for Chile are 7,786 and 237,165 workers. Besides, Fig.7a and Fig. 7b show the AAL of employment by region of the country in number of employments lost and as a percentage of its total regional employment, while Fig. 6a and Fig. 6b show LEC of employment. At regional level, the Metropolitan region of Santiago is the one which loses more employments, on average, with 4,520/year. However, the most affected region in relation to its total employment is the Region of Valparaiso (R6) with an AAL of 0.15% of its total employment.

Gross domestic product (GDP): the GDP AAL and the loss associated to a return period of 250 years due to seismic hazard have been estimated in 305 and 9,415 million dollars, those are, 0.122% and 3.77% of the total GDP of the Country. GDP and GRP losses do not include direct losses (physical damage). Fig. 7c and Fig. 7d show the average annual GRP contraction in million dollars and in relative terms, because of the occurrence of earthquakes. Fig. 6c shows the GDP loss exceedance curves, while Fig.6d the GRP loss exceedance curve. The largest yearly contraction in GRP, similar to production and employment, occurs in Region of Valparaiso (R6), with a yearly average of 0.2%.

Export volume: the average annual loss in the export volume of Chile caused by the seismic hazard has been estimated in 62 million dollars, that is, 0.075% of the total export volume of the country. The export volume loss associated to 250 years return period is 2.25% of the total yearly export volume. Fig.7e and Fig. 7f show the AAL of export volume by region of the country in million dollars and as a percentage of its total regional export volume, while Fig. 6e and Fig. 6f show loss exceedance curves of export volume at country and regional levels.

The most affected region on its export volume, with an AAL of 0.17%, is Region of Arica and Parinacota (R1); however, it only represents 1% of the country total, while Metropolitan Region of Santiago concentrates 38% of Chilean’s yearly export volume loss.

Supplementary Fig. 5 in Supplementary Material presents a summary of the exact values of the AAL computed for employment, GDP, GRP and export volume for Chile.

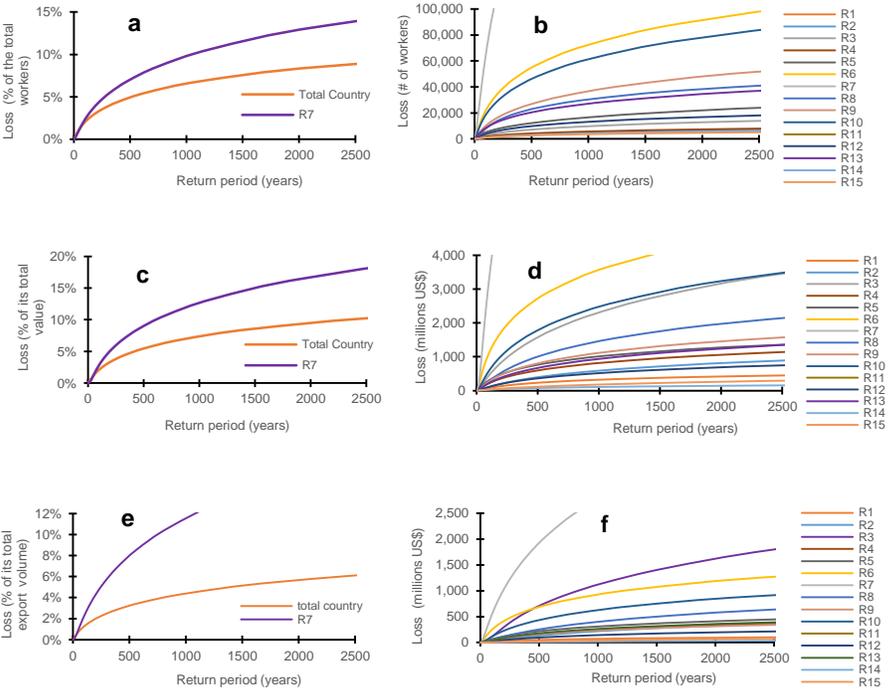


Fig. 6 Loss exceedance curves for Chile of employment, GDP, GRP and export volume. Panel **a** shows the loss exceedance curves of employment for the whole country and for Region 7 (Metropolitan Region of Santiago). Panel **b** shows the employment loss exceedance curves for each region of Chile. Panel **c** illustrates the loss exceedance curves of GDP for Chile and the loss

exceedance curve of GRP for Region 7. Panel **d** illustrates the GRP loss exceedance curves for each region of Chile. Panel **e** shows the loss exceedance curves of export volume for the whole country and for Region 7. Panel **f** shows the loss exceedance curves of export volume for each region of Chile.

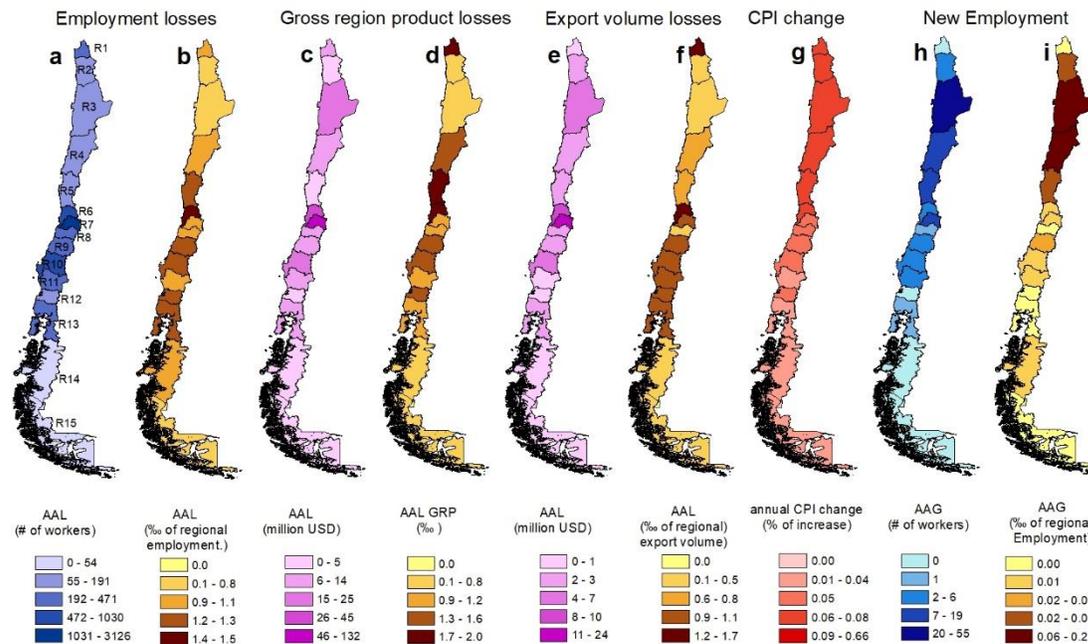


Fig. 7 New risk indicator for Chile. Panel **a** and panel **b** show the average annual loss (AAL) of employment by region of Chile in number of workers and as a fraction (per mile) of the corresponding regional employment. Panel **b** and panel **c** show the AAL of gross regional product in millions dollars and in relative terms. Panel **e** and panel **f** show the AAL of export volume by region in million dollars and as a fraction (per mile) of the regional export volume. Panel **g** shows the average annual change of the consumer price index by region of Chile. Panel **h** and **i** show the average annual gain of employment by region in number of workers and as a fraction (per mile) of the regional employment.

Consumer price index (CPI): more than a quantitative measure, it is an example of a qualitative indicator of risk that can be used to see the effect of earthquakes on inflation either at the country level or at regional level. Fig. 7g presents the annual CPI change by region of Chile. We see that

regions located at the center-north of the country are more sensitive to the price increase as consequence of earthquakes (see also Supplementary Fig.7a).

By-scenario analysis

CPI changes, production losses, employment losses, and so on, can also be computed for any particular event, as shown in Supplementary Fig. 6, which presents the results obtained for a simulated Mw8.8 event similar to the Maule 2010 Earthquake. We found that for this event, the maximum price increase take places in Region of Biobío (R10), with a 3% (Supplementary Fig. 6g and Supplementary Fig. 7b) and would cause an average production loss of 3.9% of the total yearly production of Chile.

Positive economic effects. Because of an earthquake, economic losses usually occur; however, surprisingly, but not completely unexpected, in certain regions one or various economic sectors can have positive effects, like production increases given the decrease of production in other regions.

In fact, we are able to measure, using the same indicators, the positive effects in the same components of the economy for which we calculated the negative impacts. These novel probabilistic indicators of positive effects can be also useful for a better understanding and management of the seismic risk. Similar to economic losses, positive effects are captured for a vast collection of events that collectively describe the seismic hazard of the country.

Our analysis confirms that, for certain events, there are gains, not losses, in some sectors and regions. The average annual gain of production computed for Chile was 18.32 million US dollars, that is, 0.041% of its total yearly production, while the production gain associated to 250 years return period

is 335 million dollars (see Fig. 8c). The AAL of production is distributed by sector as shown in Fig. 8a and by region as shown in Fig. 3f, Fig. 3g and Fig. 8b. The construction sector (S5), as expected, hoards up the largest part of the average annual production gain with close to 51%. In the case of employment, Fig. 7h and Fig. 7i present the average annual gain by region of the country. We note, however, that the positive effects are, on average, much smaller than the negative effects.



Fig. 8 Positive economic effects in Chile. Panel **a** shows the average annual gain of production by sector, 1) as a percentage of its total value (gray) and 2) as a fraction (per mile) of its total sectorial yearly production (purple). Panel **b** shows the average annual gain of production by region and Panel **c** the gain exceedance curve of production of Chile.

Discussion

Our approach has shown how the Computable General Equilibrium model and the probabilistic model for seismic risk assessment are able to work together, allowing for a robust and systematic probabilistic glance of the consequences of the earthquake disturbance into the full economy. We were able to successfully deal with the production losses, exemplifying our methodology with the computation of the standard risk metrics respect to production losses, that is, the average annual production loss and the production loss exceedance curve, both at country and regional levels, and computed by considering a vast collection of earthquakes, with known annual occurrence frequencies, that collectively describe the entire seismic hazard of a country. We also have shown how our approach can go beyond production losses and, harnessing the richness of the CGE modelling, we have computed the standard risk metrics for different economic variables, such as losses of employment, GDP, GRP, export volume and consumer price index. We believe that these new risk measures are useful and complement well the usual risk indicators of physical damage, and can contribute for a better integral disaster risk management as well as in designing financial hedging instruments for governments and the insurance industry. Our model captures not only the negatives consequence of earthquakes but also some positive effects on the economy proposing new probabilistic measures of these gains. Our methodology is not exclusive for earthquakes and can be easily extended to other natural disaster as flooding, hurricanes, drought, etc.

Natural disasters in a given area affect assets located in the area. But losses can be transmitted to other areas through a variety of channels, such as trade linkages, demand linkages, and interregional mobility of production factors³⁶. Better understanding of these spatial and economic dimensions of natural disaster is particularly important to properly measure the human and economic losses and to

direct efforts to prepare for and mitigate the losses. The disaster planning and preparedness become more effective when the full cost (direct and indirect) is calculated. Although direct impacts are usually higher than indirect impacts, the latter are increasingly important for total economic loss assessment; neglecting these spillover effects may lead to poor decisions about allocation of funds during recovery³⁷. Policies should consider jointly relief actions to mitigate both the impact on directly affected areas and on indirectly affected neighboring regions³⁸.

Methods

General Approach. We start generating a stochastic earthquake catalog that is coherent with a seismic hazard model for the region under study. We then simulate the occurrence of the first earthquake in the catalog and compute the physical damage (direct losses) produced to buildings, factories and infrastructure by using the conventional techniques of probabilistic seismic risk assessment. Direct losses perturb the initial equilibrium of the CGE model, so we run it again until it reaches a new equilibrium, but with different levels of outputs and prices, which allows for computation of the losses due to that particular event. The analysis is then repeated for each event belonging to the stochastic earthquake catalog. Finally, we compute various probabilistic risk metrics, now including the effects of indirect losses, by using the results obtained for all earthquakes. The remainder of this section will explain our approach and each of its components with some depth.

Seismic risk model. First, the seismic risk model contains an *exposure database*³⁹ that includes all assets at risk that are relevant for the analysis. In our case, the relevant assets are buildings, factories, infrastructure and, in general, all assets that provide input of some kind to the economic model. In other words, all assets whose damage might have a potential impact in the economic flows. Each asset

must be identified by its location, seismic vulnerability characteristics and, particularly relevant for our present purposes, the economic sector to which it belongs. Supplementary Fig. 8 shows the exposure database of non-residential buildings used for our study in Chile. It was developed following a proxy methodology⁴⁰⁻⁴³ that harnesses global geo-referenced datasets and census data.

At random instants, with all assets intact, and following a Poisson process, the economic equilibrium is perturbed by the occurrence of an earthquake with known focal characteristics (magnitude, hypocentral location, orientation of the rupture plane), which in turn will produce a spatial random field of intensities (peak ground acceleration, spectral values). In contemporary seismic risk models, this information is provided by its *hazard component*⁴⁴⁻⁴⁶. This component provides a potentially very large event set, each one associated to an annual frequency of occurrence and to one or more intensity random fields. Therefore, the hazard component provides information about how frequently different kinds of earthquakes take place and gives probabilistic indications of the intensities it produces. In principle, the hazard component should contain information about occurrence frequencies and intensity distributions of all earthquakes that could take place in the future. In other words, the event set must be collectively exhaustive. For the case of Chile, we have used a seismic hazard model developed by consulting company ERN.⁴⁷

Once a hypothetical earthquake has taken place and its intensities are known –or, more precisely, the probability distributions of the intensities are known–, the seismic risk model⁴⁸ provides tools to assess, in probabilistic terms, the level of direct losses suffered by each one of the assets contained in the exposure database; this part of the model is usually referred to as the *loss component*. The level of damage sustained by an asset depends on its location, the size of the intensity and its vulnerability characteristics. Thus, once a hypothetical event has taken place, we have means to determine the

probability distribution of the losses sustained by each one of the assets at risk. Supplementary Fig. 9 presents a set of functions, called vulnerability functions⁴⁸⁻⁵⁰ that we have used to characterize the seismic vulnerability of non-residential buildings belonging to the economic sectors of Chile.

In general, and in view of the lower geographical resolution of the CGE models compared to that of the seismic risk models, a loss aggregation is required in order to sum all the losses that correspond to the same economic sector at the same economic region. Since the losses at the various assets are not numbers but correlated random variables, the aggregation process is not trivial, because of the correlation among losses for the same event. Supplementary Note 1 presents the loss aggregation process used in our study.

Therefore, as it can be noticed, the seismic risk model is used in our approach to determine two important pieces of information for each one of the members of the event set: 1) the probability distributions of the losses incurred by assets belonging to all economic sectors and regions, that is, the severity of the direct losses; and 2) the annual frequency with which that particular loss scenario takes place. We will see later how this information is used in the overall risk calculations.

So far, the use of the seismic risk model is not at all different from its classic use in risk assessment. However, we will see later how these results from the classic risk model are used as inputs to the economic modelling.

Economic model. We use the BMCH model, a fully operational spatial CGE model for Chile. The model uses an approach similar to ⁵¹⁻⁵³ to incorporate the interregional economic structure. We use an absorption matrix as the basis to calibrate the CGE model, together with a set of elasticities borrowed from the econometric literature applied for Chile. This database allows capturing economy-wide effects through an intricate plot of input-output relations.

The current version of the BMCH model recognizes the economic structures of the 15 Chilean regions. Results are based on a bottom-up approach – i.e. national results are obtained from the aggregation of regional results. The model identifies 12 production/investment sectors in each region producing 12 commodities, a representative household in each region, regional governments and a Central government, and a single foreign area that trades with each domestic region. Two local primary factors are used in the production process, according to regional endowments (capital and labor). Special groups of equations define government finances, accumulation relations, and regional labor markets. The BMCH model qualifies as a Johansen-type model in that the solutions are obtained by solving the system of linearized equations of the model, following the Australian tradition. A typical result shows the percentage change in the set of endogenous variables, after a policy is carried out, compared to their values in the absence of such policy, in a given environment. Interregional linkages play an important role in the functioning mechanisms of the model. These linkages are driven by trade relations (commodity flows), and factor mobility (capital and labor migration). In the first case, interregional trade flows are incorporated; interregional input-output relations are required to calibrate the model, and interregional trade elasticities play an important role³⁴. Supplementary Note 2 in Supplementary material presents the complete specification of the model.

When an earthquake takes place it produces direct losses, whose probability distributions were determined with the seismic risk model described succinctly in the previous subsection. Once aggregated, the direct losses by sector and by region are entered into the CGE model as “shocks” to the capital stock component of the sector/region combination. These shocks are nothing more than exogenous capital stock reductions, which are usually calculated as the ratio between physical loss and the total cost of the capital stock. When entering the set of shocks to the CGE model, the equilibrium conditions of the model are lost, so that we need to run the CGE model again in order to reach a new equilibrium that reflects how the economy adjusts to the received shock. The new equilibrium condition is obtained with a new value-set of the endogenous variables, which are the results of the model.

A CGE model can be made of hundreds or even thousands of variables (exogenous and endogenous); each one of them can provide us with a different type of result, either of economic or social interest. The richness of the CGE model in terms of the amount of results is extraordinary, allowing for the possibility of developing a broad range of analyses. Initially, we will focus on the variables that quantify the total production of the industries; later, however, we will analyze other, non-economic types of losses.

We will define the *production loss* of sector i in the spatial region j , L_{pij} , as the difference between the production before and after the earthquake, for the same sector/region. In other words, as a consequence of the decreased capital stock in certain sectors and regions, hit by the earthquake, the economy attains a new equilibrium in which the production at that sector/region is smaller (or higher...) after the earthquake than before. We regard this difference as a production loss, and this

will be our initial measure of indirect losses, although we will later explore the use of results related to other variables.

At this initial phase of our research, the behavioral parameters and structural coefficients of the CGE model, that is, the parameters and coefficients required to establish the relations between exogenous and endogenous economic variables, are considered deterministic. In spite of this, the outputs of the CGE model – the indirect losses – are not numbers, but random variables, because some of the inputs were also random variables. We do not distract the attention of the reader with details on how the probability distributions of the CGE model outputs are determined. For the time being, it suffices to say that it is possible – although computationally challenging – to obtain the probability distributions of all relevant CGE model outputs, either at the sector/region level or for any required aggregation.

At this point, we are able to compute, for each event of the event set, probabilistic direct and indirect losses. In the following section we will illustrate the way in which the most common risk measures can be obtained with the results presented so far.

Risk measures. The most common risk measures, both in the disaster risk management world as well as in the insurance sector, are: 1) the average annual loss; and 2) the loss exceedance curve, which indicates the average frequency with which given values of loss would be exceeded. We will focus only for illustration purposes, on the total direct and indirect losses. The total losses are, of course, the sum of the losses for all assets, in the case of the direct losses, and for all sectors and regions, for the case of the indirect losses.

For instance, the k -th event of the event set produces probabilistic direct and indirect losses Ld_k and Lp_k , respectively. Then, the corresponding average annual loss, AAL_d would be given by:

$$AAL_d = \sum_{k=1}^{Events} E(Ld_k) F_k \quad (1)$$

$$AAL_p = \sum_{k=1}^{Events} E(Lp_k) F_k \quad (2)$$

where $E(.)$ denotes expected value and F_k is the annual frequency of occurrence of event k . AAL_d is a quantity that is routinely computed in conventional risk analyses; AAL_p is introduced in this paper.

The loss exceedance curves, $v_d(.)$ and $v_p(.)$ of direct and indirect loss, respectively, are computed with the following expressions:

$$v_d(l) = \sum_{k=1}^{Events} \Pr(Ld_k > l) F_k \quad (3)$$

$$v_p(l) = \sum_{k=1}^{Events} \Pr(Lp_k > l) F_k \quad (4)$$

where $\Pr(Ld_k > l)$ and $\Pr(Lp_k > l)$ are, respectively, the probabilities of direct and indirect losses exceeding a given value, l . In this case, $v_p(\cdot)$ is introduced in this paper.

New complementary risk indicators. The procedure for the computation of the probabilistic risk measures regarding employment, GRP, consumer price index, export volume and any other economic variable of the CGE model, is exactly the same but for the corresponding economic variable instead of that of production one. In the case of positive economic effects, the procedure for the computation is again the same, with the difference that, in this case, we only account for the positive effects that each earthquake triggers in the CGE model.

The risk calculations shown in this paper have been carried out with program DIRAS-2020, developed at the Instituto de Ingeniería, UNAM. This piece of software has been specifically created to join and process the information coming from a conventional seismic risk model and a spatial CGE model.

Data availability

All data generated and used in this analysis can be accessed at <https://github.com/JALeonTorres/RAPELE->

Code availability

All pieces of software used and generated in this analysis can be accessed and downloaded at

<https://github.com/JALeonTorres/RAPELE->

References

1. GFDRR, Annual Report 2014 (2014).
2. UNISDR. Annual Report 2015 (2015).
3. Tierney, K. (1997). Business Impact of the Northridge Earthquake. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 5(12), 87-97 (1997).
4. Okuyama, Y., & Chang, S. E. *Modeling Spatial and Economic Impacts of Disasters*. New York: Springer (2004).
5. Rose, A., & Huyck, C. K. Improving Catastrophe Modeling for Business Interruption Insurance Needs. *Risk Analysis*, 36(1), 1896-1915 (2016).
6. Okuyama, Y. Economic Modeling for Disaster Impact Analysis: Past, Present and Future. *Economic Systems Research*, 19(2), 115-124 (2007).
7. Koks, E.E., Rozenberg, J., Zorn, C. et al. A Global Multi-hazard Risk Analysis of Road and Railway Infrastructure Assets. *Nature Communiton* 10, 2677 (2019).
8. Marulanda, M., Carreño , M., Cardona, O. D., Ordaz, M. G., & Barbat, A. Probabilistic Earthquake Risk Assessment using CAPRA: Application to the City of Barcelona, Spain. *Nature Hazards*, 59, 59-84 (2013).
9. Cardona, O.D. et al. Global Risk Assessment: A Fully Probabilistic Seismic and Cyclone Tropical wind Risk Assessment. *International Journal of Disaster Risk Reduction* (2014).

10. Salgado-Gálvez, M., Zuloaga, D., Bernal, G., Mora., & Cardona D. Fully Probabilistic Seismic Risk Assessment Considering Site Effects for the Portfolio of Buildings in Medellín, Colombia. *Bull Earthquakes Engineer* 12:671–95 (2013).
11. Okuyama, Y., & Rose. A. *Advances in Spatial and Economic Modelling of Disaster Impacts*. Switzerland: Springer (2019).
12. Avelino, A., & Hwwings, G. The Challenge of Estimating the Impact of Disasters: Many Approaches, Many Limitations and Compromise. In: Okuyama Y., & Rose A. (eds). *Advances in Spatial and Economic Modeling of Disaster Impacts*. *Advances in Spatial Science (The Regional Science Series)*. Springer, Cham (2019).
13. Koks, E., Pant, R., Husby, T., Többen, J., & Oosterhaven, J. Multiregional Disaster Impact Models: Recent Advances and Comparison of Outcomes. In: Okuyama Y., & Rose A. (eds). *Advances in Spatial and Economic Modeling of Disaster Impacts*. *Advances in Spatial Science (The Regional Science Series)*. Springer, Cham (2019).
14. Kajitani, Y., & Tatano, H. Advantages of the Regional and Sectoral Disaggregation of a Spatial Computable General Equilibrium Model for the Economic Impact Analysis of Natural Disasters. In: Okuyama Y., & Rose A. (eds). *Advances in Spatial and Economic Modeling of Disaster Impacts*. *Advances in Spatial Science (The Regional Science Series)*. Springer, Cham (2019).
15. Koks, E., Bockarjova, M., de Moel, H., & Aerts J. Integrated Direct and Indirect Flood Risk Modeling: Development and Sensitivity Analysis. *Risk Analysis*, 34(5): 882-900 (2015).
16. Koks, E., & Thissen, M. A Multiregional Impact Assessment Model for Disaster Analysis. *Economic Systems Research*, 28(4): 429-449 (2016).
17. Rose, A, Oladosu, G, & Liao, S. Business Interruption Impacts of a Terrorist Attack on the Electric Power System of Los Angeles: Customer Resilience to a Total Blackout. *Risk Analysis*, 27(3):513–531 (2007).

18. Chang, S., & Dowlatabadi, H. Transportation Disruptions and Regional Supply Chains: A Modelling Framework with Application to Coastal Shipping. In: Okuyama Y., & Rose A. (eds). *Advances in Spatial and Economic Modeling of Disaster Impacts*. *Advances in Spatial Science (The Regional Science Series)*. Springer, Cham (2019).
19. Heatwole, N., & Rose, A. A Reduced-form Rapid Economic Consequence Estimating Model: Application to Property Damage from U.S. Earthquakes. *International Journal Disaster Risk Science*, 4:20–32 (2013).
20. Kajitani, Y., & Tatano, H., Estimation of Production Capacity Loss Rate after the Great East Japan Earthquake and Tsunami in 2011. *Economic System Researcher* 26(1):13–38 (2014).
21. Raschky, P. A. Estimating the Effects of West Sumatra Public Asset Insurance Program on Short-term Recovery after the September 2009 Earthquake, Working Papers DP-2013-35, Economic Research Institute for ASEAN and East Asia (ERIA) (2013).
22. Tirasirichai, C., & Enke, D. Case Study: Applying a Regional CGE Model for Estimation of Indirect Economic Losses Due to Damaged Highway Bridges. *The Engineering Economist*, 52:367-401 (2007).
23. Rose, A., Oladosu, G., & Salvino, D. Economic Impacts of Electricity Outages in Los Angeles. In: Crew M. A., Crew M. A., & Spiegel M. (eds). *Obtaining the Best from Regulation and Competition*. *Topic in Regulatory Economics and Policy Series*, col45. Springer Boston, MA (2005).
24. Tokunaga, S., & Resosudarmo, B. Spatial Modelling of Megathrust Earthquake in Japan. *New Frontiers in Regional Science: Asian Perspectives* 11. Singapore: Springer Nature (2017).
25. Kajitani, Y., & Tatano, H. Applicability of a Spatial Computable General Equilibrium Model to Assess the Short-term Economic Impact of Natural Disaster. *Economic Systems Research*, 30(3): 289-312 (2018).

26. Rose, A. Modeling Regional Economic Resilience to Disasters: a Computable General Equilibrium Analysis of Water Service Disruptions. *Journal of Regional Science*, 45(1):75-112 (2005).
27. Cardona, O. D., Ordaz, M., Reinoso, E., & Yamin, L. CAPRA – Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment: International Initiative for Risk Management Effectiveness. 15th World Conference of Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal (2012).
28. ERN-AL. CAPRA, Methodology of Probabilistic Risk Assessment. Obtained from: <http://www.ecapra.org/>. Accessed 1 April 2020.
29. Wing, I. & Timilsina, G. Technology Strategies for Low-Carbon Economic Growth. Development Research Group Environment and Energy Team, Policy Research Working Paper 7742, World Bank (2016).
30. Dixon, P. Evidence-based Trade Policy Decision Making in Australia and the Development of Computable General Equilibrium Modelling. Center of Policy Studies, Monash University (2006).
31. Jorgenson, D. Econometric General Equilibrium Modeling. *Journal of Policy Modeling*, 38:436-337 (2016).
32. Brandsma, A., Kancs, A., Monfort, P., & Rillaers A. RHOMOLO: Dynamic Spatial General Equilibrium Model for Assessing the Impact of Cohesion Policy. Working paper WP 01/2013. European Commission (2013).
33. Haddad, E., & Teixeira, E. Economic Impact of Natural Disaster in Megacities: The Case of Floods in Sao Paulo, Brazil. *Habitat International*, 45:106-113 (2015).
34. Haddad, E. Interregional Computable General Equilibrium Models. In: Sonis M., Hewings G. J. D. (Ed.) *Tool Kits in Regional Science. Advances in Spatial Science (The Regional Science Series)*. Springer, Berlin, Heidelberg (2009).
35. Sundberg, M. *Essays on Spatial Economies and Organization*, Ph.D. thesis, TRITA-TEC_PHD 09-005, Royal Institute of Technology (2009).

36. Capello, R. Spatial Spillovers and Regional Growth: A Cognitive Approach *European Planning Studies*, 17(5), 639-658 (2009).
37. Gladdis, E. B., Miles, B., Morse, S., & Lewis, D. Full-cost Accounting of Coastal Disaster in the United States: Implication of Planning and Preparedness. *Ecological Economics*, 63(2), 307-318.
38. Lima, R C. D. A., & Barbosa, A V. B. Natural Disasters, Economic Growth and Spatial Spillovers: Evidence from a Flash Flood in Brazil. *Paper in Regional Science*, 98(2), 905-924 (2019).
39. ERN-AL. CAPRA, Methodology Definition of Exposed Assets Inventory (2010). <http://www.ecapra.org/>. Accessed 10 April 2020.
40. Gunasekera, R., Ishizawa, O., Aubrecht, C., Blankespoor, B., Murray, S., Pomonis, A., & Daniel, J. Developing an Adaptive Global Exposure Model to Support the Generation of Country Disaster Risk Profile. *Earth-Science Reviews*, 150:594–608 (2015).
41. Aubrecht C., León Torres, J.A. Top-Down Identification of Mixed vs. Residential Urban Areas: Evaluation of Remotely Sensed Nighttime Lights for a Case Study in Cuenca City, Ecuador, In *Proceeding of the 1st Int. Electron. Remote Sens., Sciforum Electronic Conference Series*, Vol. 1 (2015).
42. Aubrecht, C., & León Torres, J. A. Evaluating Multi-sensor Nighttime Earth Observation Data for Identification of Mixed vs. Residential Use in Urban Areas. *Remote Sens*, 8, 114 (2016).
43. Gunasekera, R., et al. Methodology Note on the Global Rapid post-disaster Damage Estimation (GRADE) approach. GFDRR, World Bank Group. Washington (2018).
44. Esteva, L. Criteria for the Construction of Spectra for Seismic Design. 3rd Pan-American Symposium of Structure (in Spanish), (pages. 3-8). Caracas, Venezuela (1967).
45. Cornell, C. A. Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin Seismological Society of America*, 58(5):1583-1606 (1968).

46. Ordaz, M, Cardona, D., Salgado-Gálvez, M., Bernal, G., Singh, S., & Zuloaga, D. Probabilistic Seismic Hazard Assessment at Global Level. *International Journal of Disaster Risk Reduction* (2014).
47. Salgado-Gálvez M., et al. CAPRA – Homogeneous and Continuous Probabilistic Seismic Hazard Model for Latin America and the Caribbean. 16th European Conference on Earthquake Engineering, Tessaloniki, Greece (2018).
48. Ordaz, M., Miranda, E., Reinoso, E., Pérez-Rocha, L. Seismic Loss Estimation Model for Mexico City. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand (2000).
49. Miranda, E. Approximate Seismic Lateral Deformation Demands on Multistory Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 125:417-425 (1999).
50. ERN-AL. CAPRA, Vulnerability of Buildings and Infrastructure (2010). <http://www.ecapra.org/>. Accessed 10 April 2020.
51. Peter, M. W.; Horridge, M.; Meagher, G. A.; Naqvi, F.; Parmenter, B. R. The Theoretical Structure of Monash-MRF. Monash University, Clayton: Working paper No. OP-85, IMPACT Project (1996).
52. Haddad, E. A. Regional Inequality and Structural Changes: Lessons from the Brazilian Economy. 1. ed. Aldershot: Ashgate (1999).
53. Haddad, E. A., & Hewings, G. J. Market Imperfections in a Spatial Economy: some Experimental Results. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 45(2–3):476–496 (2005).

Acknowledgments

J.A.L was supported by the scholarship program of graduate studies from the National Council for Science and Technology of Mexico, CONACYT, and the Instituto de Ingeniería of the Universidad Nacional Autónoma de México. E.H. (Grant 302861/2018-1) acknowledge financial support from CNPq. I.A. acknowledges financial support from FAPESP (Grant 2019/00057-9). This work was partially supported by the National Institute of Science and Technology for Climate Change Phase 2 under the CNPq Grant 465501/2014-1, FAPESP Grant 2014/50848-9 and the National Coordination for High Level Education and Training (CAPES) Grant 16/2014.

Author contribution

J.A.L and M.O conceived and designed the conceptual framework for the study. J.A.L implemented the study and performed all calculations, simulations and data analysis. E.H designed and E.H and I.A. implemented the BMCH model for Chile. All authors contributed in writing the manuscript. All authors discussed the results and contributed to paper refinement.

Competing interests

The authors declare no competing interests.