



Serie Proyectos de Investigación e Innovación

Superintendencia de Seguridad Social
Santiago - Chile

INFORME FINAL

Evaluación de la Incidencia de accidentes e incidentes en accidentes graves y fatales, como guía para una estrategia de prevención de factores de riesgo conductuales. Una Metodología para Validar la Pirámide de Heinrich.

Pablo Marshall
2015





SUPERINTENDENCIA DE SEGURIDAD SOCIAL

SUPERINTENDENCE OF SOCIAL SECURITY

La serie Proyectos de Investigación e Innovación corresponde a una línea de publicaciones de la Superintendencia de Seguridad Social, que tiene por objetivo divulgar los trabajos de investigación e innovación en Prevención de Accidentes y Enfermedades del Trabajo financiados por los recursos del Seguro Social de la Ley 16.744.

Los trabajos aquí publicados son los informes finales y están disponibles para su conocimiento y uso. Los contenidos, análisis y conclusiones expresados son de exclusiva responsabilidad de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente la opinión de la Superintendencia de Seguridad Social.

Si requiere de mayor información, sobre el estudio o proyecto escriba a: investigaciones@suseso.cl.

Si desea conocer otras publicaciones, artículos de investigación y proyectos de la Superintendencia de Seguridad Social, visite nuestro sitio web: www.suseso.cl.

The Research and Innovation Projects series corresponds to a line of publications of the Superintendence of Social Security, which aims to disseminate the research and innovation work in the Prevention of Occupational Accidents and Illnesses financed by the resources of Law Insurance 16,744.

The papers published here are the final reports and are available for your knowledge and use. The content, analysis and conclusions are solely the responsibility of the author (s), and do not necessarily reflect the opinion of the Superintendence of Social Security.

For further information, please write to: investigaciones@suseso.cl.

For other publications, research papers and projects of the Superintendence of Social Security, please visit our website: www.suseso.cl.

Superintendencia de Seguridad Social
Huérfanos 1376
Santiago, Chile.

Informe Final Proyecto

Evaluación de la incidencia de accidentes e incidentes en accidentes graves y fatales, como guía para una estrategia de prevención de factores de riesgo conductuales

(Código 176-2015)

Una Metodología para Validar la Pirámide de Heinrich

Pablo Marshall

Escuela de Administración
Pontificia Universidad Católica de Chile
(pmarshall@uc.cl)

Alejandro Hirmas

Escuela de Administración
Pontificia Universidad Católica de Chile
(abhirmas@uc.cl)

Marcos Singer

Escuela de Administración
Pontificia Universidad Católica de Chile
(msinger@uc.cl)

Este proyecto fue financiado por la Asociación Chilena de Seguridad, a través de la Fundación Científica y Tecnológica en el Ciclo 2015 de proyectos de investigación

Fecha Entrega: febrero 2017

Índice

1. Introducción	3
2. Marco Teórico	5
3. Metodología	8
4. Los Datos	13
5. Resultados	15
6. Discusión y Conclusiones	20
Referencias	22

Resumen

El objetivo de este proyecto fue identificar los incidentes/accidentes que se correlacionan con los graves y fatales de manera de poder inferir cuáles son los factores que más están incidiendo en los accidentes graves y fatales

Para ello se acudió a la Pirámide de Heinrich, que postula que la distribución de severidad de los accidentes laborales es relativamente constante, es una de las principales herramientas de la gestión de la seguridad ocupacional. Sin embargo, ha sido objeto de cuestionamiento, pues hay evidencia de que la disminución de accidentes leves no siempre se ha acompañado de una disminución de los accidentes graves y fatales. Para testear la validez estadística de la Pirámide, se utilizó un modelo bayesiano en dos partes: la primera estima la tasa de accidentabilidad mediante la distribución Poisson - Gamma, y la segunda estima la proporción de accidentes leves, graves y fatales mediante una distribución Multinomial - Dirichlet. Si tal proporción no cambia cuando se reduce la accidentabilidad entonces se valida la Pirámide, y si cambia entonces se refuta. Nuestros datos provienen de más de 50.000 empresas observadas por 28 meses en Chile.

Para distintos sectores de actividad económica y distintas regiones geográficas se comprueba que la Pirámide de Heinrich no se cumple desde el punto de vista estadístico, pero la desviación es tan pequeña que, para efectos prácticos, la Pirámide sí es válida. De lo anterior concluimos que mantener bajo control los accidentes leves no sólo tiene un valor en sí mismo, sino significa una mejora generalizada de la seguridad ocupacional.

1. Introducción

El objetivo de este proyecto fue identificar los incidentes/accidentes que se correlacionan con los graves y fatales de manera de poder inferir cuáles son los factores que más están incidiendo en los accidentes graves y fatales y generar un conjunto de alertas a las empresas, basadas en la evidencia.

Para cumplir este objetivo se trabajó con la Pirámide de Heinrich (Heinrich, 1932; Heinrich, Petersen & Ross, 1980), también llamada de Bird (Bird & Germain, 1966; Bird & Loftus, 1976), que es una de las principales hipótesis sobre la cual se basa la gestión de la seguridad ocupacional (Khanzode, Maiti & Ray, 2012). Ésta plantea que existe una fuerte correlación entre la ocurrencia de los casi-accidentes, accidentes leves, accidentes graves y fatalidades, porque la mayoría tienen causas comunes (Lozada-Larsen & Laughery, 1987; Gnoni et al. 2013). Por lo mismo, la mitigación de una cierta condición de riesgo reduce la frecuencia de accidentes en todos los niveles de severidad. A modo de ejemplo, Kines (2002) estudia las caídas de trabajadores de la construcción, en donde la mayoría son de baja altura y por ende leves, pero algunas son de mediana altura con efectos graves, y tarde o temprano se dan caídas fatales. La correlación entre las tasas de accidentes de diferente severidad no es porque los de mediana gravedad causen uno fatal, sino porque las caídas en la construcción tienen causas comunes que generan una cierta propensión de ocurrencia y, por encima de ésta, existen factores de riesgo que generan una distribución de probabilidades para la proporción de accidentes de leves, gravedad y fatales.

La Pirámide es un instrumento metodológico muy usado en la investigación académica. Hale (2001) recomienda construir pirámides por "causa inmediata" (en inglés "deviation", o último evento que se desvía de la normalidad), tal como lo hacen Jacinto & Soares (2008) en la industria de Explotación de Minas y Canteras en Portugal o Konstandinidou et al (2011) en la industria petroquímica en Grecia. En el ámbito profesional ("practitioner", en inglés), la relación estadística entre los accidentes leves (más bien frecuentes) y los graves (infrecuentes) y fatales (muy infrecuentes) permite a las empresas monitorear la propensión de la empresa a ser víctima de estos últimos. Cuando el número de accidentes leves aumenta, la Pirámide de Heinrich predice que también lo hará el de accidentes graves y fatalidades, lo cual pondría en alerta a la empresa y la predispondría a mejorar su labor de prevención (Bourassa, Gauthier & Abdul-Nour, 2015). Así, mantener bajo control los accidentes leves no sólo tendría un valor en sí mismo, sino produciría una mejora generalizada de la seguridad ocupacional y con ello reduciría el riesgo de eventos catastróficos.

Sin embargo, se han planteado cuestionamientos a los supuestos detrás de la Pirámide (Manuele, 2011). Shannon & Manning (1980) contradicen a Heinrich Petersen & Ross (1980) respecto de que los accidentes de distinto grado de severidad tengan causas

esencialmente comunes. Como veremos más adelante, nuestra técnica de validación se centrará justamente en este punto. Otra objeción es la de Hale (2001), quien señala que la Pirámide se ha usado de manera indiscriminada, como si la mera prevención de accidentes leves causara automáticamente la reducción de los graves. En defensa de la herramienta, ninguno de los autores de la Pirámide postula que exista causalidad. Ignoramos si dicho mal uso es tan grave en la práctica, pero de cualquier manera no nos hacemos cargo de esta controversia, y la dejamos planteada como un futuro tema de investigación.

Un cuestionamiento que pone en duda la utilidad de la Pirámide como herramienta descriptiva y, sobre todo, predictiva, del que sí nos hacemos cargo, es que ni siquiera se da la correlación que pretende (Martin & Black, 2015). Existe abundante evidencia de catástrofes en empresas que mostraban previamente bajísimas tasas de accidentes leves y terminaron en desastres: la Refinería Tesoro en Anacortes, Washington (2010, 5 muertos), la minera de Massey Energy, West Virginia (29 muertos), la plataforma Deepwater de British Petroleum del Golfo de México (11 muertos), y el oleoducto de PG&E en San Bruno, California (4 muertos), entre otras. Más en general, mientras en EEUU se ha reducido la ocurrencia de accidentes no-fatales un 51% en los últimos 15 años, los fatales sólo lo han hecho en 25,5%. Algo similar está pasando en otros países desarrollados y en diversas industrias. Consecuentemente, diversos actores relevantes han llamado a reformar los sistemas de gestión de riesgo, poniendo especial atención en los precursores de alto potencial de daño (Nash, 2008). A partir de estos hechos surge la pregunta central de nuestro estudio: ¿es cierto que una reducción en el número de accidentes en la base de la pirámide correlaciona con una disminución proporcional en la punta? En caso afirmativo, aportaríamos evidencia en favor de un modelo amplio de gestión de la seguridad, en el cual prevenir todo tipo de accidentes se relacionaría (no necesariamente por causalidad) con una disminución de la ocurrencia de accidentes graves o fatales. En caso contrario, en el cual se refuta la Pirámide de Heinrich, se reforzaría la hipótesis de un modelo de prevención focalizado en los accidentes de alto impacto.

Respondemos a la pregunta propuesta mediante un modelo bayesiano conjugado de dos etapas (Bernardo y Smith 1994, Lee 2004), que hasta donde sabemos no ha sido utilizado en el contexto de la seguridad ocupacional. La primera etapa modela el número total de accidentes mediante un proceso de conteo Poisson con incidencias heterogéneas por empresa de acuerdo a una distribución Gamma (Marcoulaki, Papazoglou & Konstandinidou, 2012). La segunda etapa modela la severidad de los accidentes (leves, graves y fatales), condicional en su número total, de acuerdo a una distribución Multinomial - Dirichlet con probabilidades heterogéneas. El modelo propuesto está basado en un enfoque bayesiano lo cual permite que cada empresa en la muestra tenga características específicas tanto en la incidencia de accidentes como en su severidad. Esta separación del modelo en etapas permite analizar el impacto que tiene una disminución en la incidencia de accidentes (primera etapa) en las proporciones de leves, graves y fatales (segunda etapa): si las proporciones no cambian, entonces se valida estadísticamente la Pirámide, y en caso contrario, se refuta.

Estimados los modelos propuestos, el análisis de la accidentabilidad laboral y el test de la Pirámide de Heinrich, utilizando una base de datos de accidentes laborales de la Asociación Chilena de Seguridad (ACHS). La ACHS es una asociación de empresas y trabajadores en Chile que tiene como propósito central prevenir accidentes y enfermedades laborales. La ACHS administra el seguro de la ley de accidentes del trabajo y enfermedades profesionales promoviendo una cultura que garantice la seguridad, salud y calidad de vida de los trabajadores. La base de datos disponible para este estudio cuenta con más de 50.000 empresas observadas durante 28 meses. Las estimaciones de los modelos propuestos en la base de datos de la ACHS muestran buenos indicadores de bondad de ajuste, lo cual significa que la especificación bayesiana del modelo es adecuada. Las estimaciones muestran también que para la incidencia de accidentes es preferible separar las estimaciones por sector de actividad económica, mientras que para las probabilidades de los tipos de accidentes el modelo global que considera a todas las empresas de manera conjunta es apropiado.

Para hacer un test de la hipótesis de la Pirámide de Heinrich correlacionamos las estimaciones de la incidencia de accidentes con las probabilidades estimadas de accidentes leves, graves y fatales a nivel de cada empresa.

El resto de este manuscrito se organiza de la siguiente manera. En la Sección 2 presentamos un marco teórico con hipótesis respecto de las razones que podrían explicar que la Pirámide de Heinrich no se cumpla. En la Sección 3 mostramos las principales características del modelo estadístico propuesto, mientras que en la Sección 4 describimos la base de datos utilizada. En la Sección 5 mostramos las estimaciones de los modelos propuestos, y presentamos los test de la validez estadística y la interpretación económica. Finalmente, en la Sección 6 discutimos las conclusiones y limitaciones de nuestro estudio.

2. Marco Teórico

Khazode, Maiti & Ray (2012) conceptualizan a la teoría detrás de la pirámide como una lógica de cinco "dominós": (i) cultura y ambiente social, (ii) falla humana, (iii) acción o condición insegura, (iv) accidente y (v) daño a la persona. Bird & Loftus (1976) reemplazan (i) por fallas de gestión. Según Heinrich (1932), remover cualquiera de estos dominós, en especial el conductual (ii), detiene la propagación del incidente. Uno de las conjeturas más controvertidas de la Pirámide es que todos los accidentes, independientemente de su grado de severidad, se producen por "causas comunes" (Heinrich, 1932; Kines, 2002). De ahí que cuando estas causas se mitigan, los accidentes leves, graves y fatales bajen en la misma proporción. Por ejemplo, Lozada-Larsen and Laughery (1987) estudiaron 7.131 accidentes leves y graves en una empresa manufacturera durante cinco años y comprobaron que gran parte de los incidentes individuales (no los catastróficos, con múltiples muertes) se producen por las mismas causas. Diversos estudios posteriores han refutado esta conjetura (Petersen, 1989; Salminen et al., 1992), al punto que ya ha sido reinterpretada por sus autores originales: "[Different] things cause severe injuries [from those that cause] minor

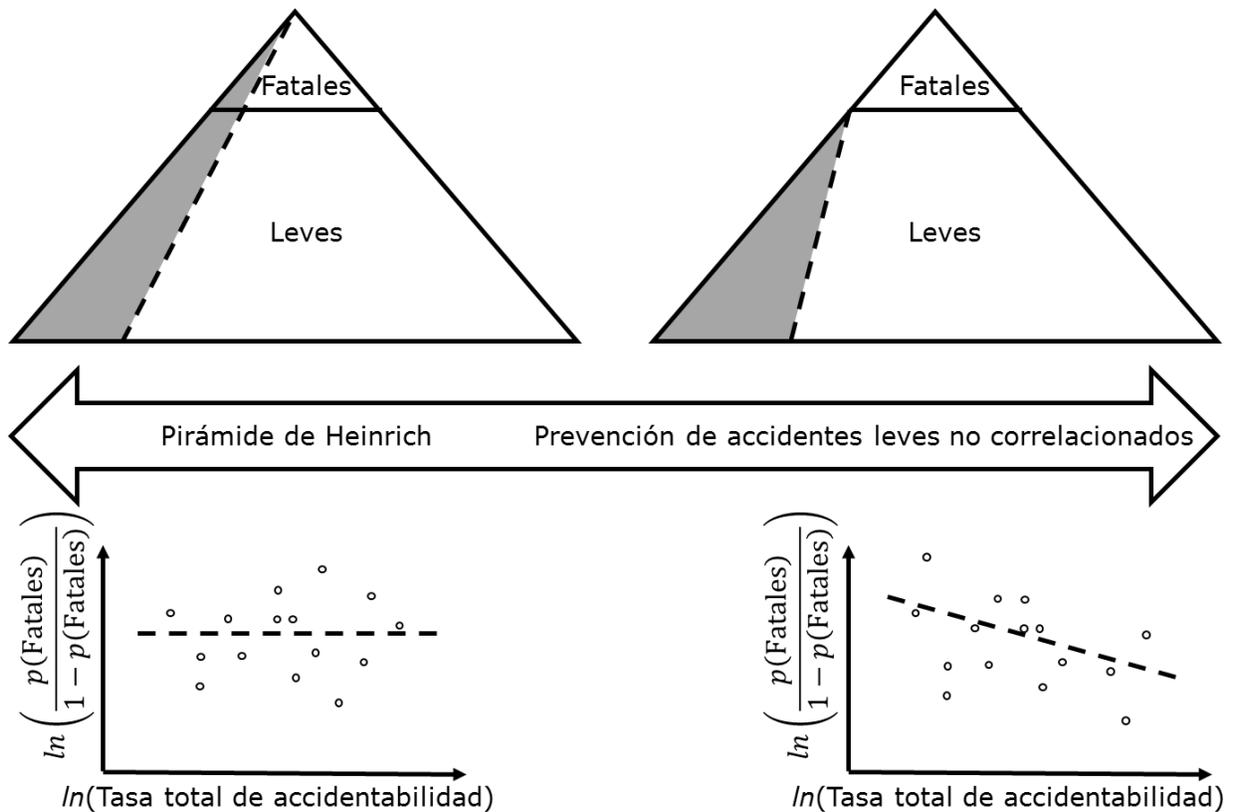
injuries; thus, —there are different ratios for different accident types, for different jobs, for different people, etc.” (Heinrich, Petersen, & Roos 1980, pp. 64-65).

Aunque hoy en día está claro que las causas de los accidentes leves, graves y fatales no son las mismas, la Pirámide seguiría siendo válida si tales causas están fuertemente correlacionadas. Siguiendo el ejemplo de Kines (2002) de las caídas de los trabajadores de la Construcción, habría que comprobar que las causas de las caída fatales (predominantemente en la tarde y por falta de uso de elementos de protección personal) y las graves (en la mañana, por una falta de conciencia del riesgo) se correlacionan por el hecho de que la empresa no ha capacitado a su gente en trabajo en altura (Brahm & Singer, 2013), no maneja protocolos de uso de infraestructura para la sujetar arneses, o cualquier otra falencia en la prevención. Para ello había que conducir estudio forense de detalle (Dzviarek 2004, Nenonen 2011, Martin & Black 2015). Recientemente, gracias a la sofisticación y estandarización de los registros de accidentes, se está pudiendo sistematizar una metodología de este tipo (Jacinto & Soares, 2008; Konstandinidou et al, 2011). Sin embargo, en países en desarrollo como Chile se hace impracticable a nivel masivo, dada la variedad de las formas de registro y clasificación y, más importante, por la diversidad de los sistemas de gestión del riesgo.

Una forma de indagar la validez estadística de la Pirámide de Heinrich es observando cada empresa por un período de muchos años, y comprobar si ocurre que cuando baja (sube) la tasa total de accidentes, bajan (suben) en la misma proporción los accidentes graves y los fatales. Esta técnica no es viable para nosotros porque la ocurrencia de accidentes graves, y especialmente de fatales, es muy baja y por ende no puede observarse la Pirámide a nivel de cada empresa individual, ni mucho menos sus cambios. Aunque la tasa no fuera baja, los cambios en las tasas ocurren de manera muy paulatina, por lo cual se necesitarían muchos años de datos confiables por cada empresa.

Dadas las limitaciones de nuestra base de datos, estudiamos a las empresas por categorías: industria y localización. Para comprobar la presencia de la Pirámide de Heinrich, dentro de cada categoría verificamos si la proporción entre accidentes leves, graves y fatales se mantiene para diferentes valores de la tasa total de accidentabilidad. La parte izquierda de la Figura 1 muestra esta intuición, simplificando la Pirámide en la relación entre accidentes fatales y leves solamente. En la medida en que la empresa elimina el área oscura de su base de accidentes leves de la Pirámide de Heinrich, la misma proporción de accidentes fatales de la cúspide también se elimina. Esto se observa en el gráfico de correlación de la izquierda, en donde cada punto representa una empresa durante todo el período observado. Por estabilidad numérica, el eje de las abscisas muestra el logaritmo natural de la tasa total de accidentabilidad, mientras que el eje de las ordenadas está expresado en el logaritmo natural de la chance de fatalidad. Dado que la recta de correlación es horizontal, sabemos que en esta categoría de empresas sí se valida estadísticamente la Pirámide.

Figura 1: Dos Hipótesis del Efecto de Reducción de Accidentes



La parte derecha de la Figura 1 muestra el caso contrario a la Pirámide de Heinrich, en el cual los accidentes que se han eliminado no han incidido en los accidentes fatales. Denominamos a esta situación "Prevención de accidentes leves no correlacionados". Esto se traduce en el gráfico de la derecha, en donde la recta de correlación tiene pendiente negativa, porque en la medida en que baja la tasa total de accidentabilidad, la chance de accidentes fatales aumenta.

Conjeturamos que el tercer caso, en el cual se eliminan más rápido los accidentes fatales que los leves y por lo tanto la pendiente de la correlación de la Figura 1 es positiva, no se da en la práctica. Más abajo en esta sección presentamos un número de argumentos que justificarían una correlación negativa, mismos que casi descartan la correlación positiva. Además, en la Sección de Resultados estimamos estas pendientes y, para el caso de los accidentes fatales, la correlación negativa se da en todos los sectores económicos, y en casi todos con un 99% de certeza.

Identificamos al menos tres motivos por los cuales la relación estadística que propone la Pirámide de Heinrich no necesariamente tiene que ocurrir en la práctica. Un primer motivo es, paradójicamente, la Pirámide misma. Dada su difusión como herramienta de control de gestión de seguridad, podría estarse dando que la prevención se enfoca en los accidentes leves, porque es el indicador más utilizado, y por lo mismo desentiende los accidentes

graves o fatales, que son inusuales. Por ejemplo, el indicador de *Total Recordable Incident* (TRI) de la metodología OSHA, o el de tasa de accidentabilidad utilizada en Chile (Brahm & Singer, 2013), no diferencia entre los incidentes con alto y bajo potencial de riesgo y, por lo mismo, reduce el énfasis en los accidentes de mayor gravedad. Dado que la mayoría de los accidentes son de bajo potencial de riesgo, al darle el mismo énfasis en la práctica se estarían abordando riesgos de bajo potencial principalmente, lo cual desacoplaría la ocurrencia de accidentes leves con los graves y fatales.

Una segunda explicación de por qué la Pirámide de Heinrich podría ser inadecuada es porque no captura la complejidad de los precursores al alto riesgo, especialmente en industrias de alta sofisticación (Khazode, Maiti & Ray, 2012). A modo de ejemplo, la muerte de los astronautas del Challenger no se relaciona con una eventual conducta descuidada observable a través de accidentes leves durante su entrenamiento. Puesto de otra manera, no podría haberse anticipado tales fatalidades por una sucesión de accidentes laborales menores. En cambio, actividades más intensivas en capital humano, sí podrían pronosticarse a partir de muchos accidentes menores relacionados. Por lo mismo, la aviación, la generación eléctrica, la minería y la industria química y petroquímica, entre otras, han desarrollado modelos de gestión de riesgo sistémicos, en los cuales el factor humano es un componente que interactúa con muchos otros. Ahondado en el punto anterior, cuando los accidentes leves son relativamente frecuentes en una cierta empresa respecto de otras de su misma industria y características, posiblemente tienen un componente conductual muy relevante (Heinrich, 1932), lo cual podría incidir en una fatalidad. Por el contrario, si los accidentes leves son infrecuentes, lo más probable es que las falencias conductuales estén bajo control, lo cual podría significar que las fatalidades están causadas por problemas sistémicos (Manuele, 2011).

Una tercera causa del desacoplamiento entre la ocurrencia de accidentes leves y los fatales es que se diluya la Ley de los Grandes Números que está detrás de cualquier regularidad estadística. Si no se dispone de datos por periodos suficientemente extensos puede darse la casualidad de que la Pirámide no se cumple, cuando en realidad sí.

3. Metodología

Suponemos que la ocurrencia de accidentes y la severidad de estos se puede representar por procesos aleatorios superpuestos. El proceso que determina el número total de accidentes es modelado mediante la distribución Poisson – Gamma y la severidad de los accidentes mediante la distribución Multinomial – Dirichlet.

Modelo Poisson – Gamma

El modelo de Poisson, así como su extensión Poisson – Gamma, ha sido usado en distintos contextos en la literatura para representar procesos de conteo. El modelo de regresión de Poisson ha sido aplicado en accidentes en el trabajo en la industria minera (Mallick and Mukherjee 1996) así como en otras industrias (Boyd and Radson 1999, Bailer et al. 1997,

Richardson et al. 2004). El modelo Poisson también ha sido usado para medir el impacto en intervenciones para la seguridad en las condiciones laborales (Smitha et al. 2001; Wing et al. 1991; Frome et al. 1997). En un contexto algo diferente, el modelo Poisson se ha usado para modelar accidentes en vehículos motorizados (Li et al, 2001; Lord et al. 2005 Yang et al, 2014; Gomes, Geedipally and Lord, 2012) y en procesos de conteo en otras disciplinas como es el caso del Marketing donde se ha utilizado para representar el número de compras de un consumidor o el número de exposiciones a una publicidad (Goodhardt, Ehrenberg and Chatfield, 1984; Danaher, 2007). En términos generales se supone que el modelo Poisson – Gamma es más flexible que el modelo Poisson y esta mayor flexibilidad no está acompañada de una complejidad excesiva (Marcoulaki, Papazoglou & Konstandinidou, 2012; das Chagas et al. 2016).

Se supone que el número de accidentes laborales totales en un intervalo de tiempo T tiene una distribución de frecuencias o probabilidades Poisson, lo cual es usual en muchos contextos en los cuales se analizan procesos de conteo y accidentes. Para una unidad de análisis, que podría ser una empresa, unidad económica, centro de trabajo o sucursal en un intervalo de tiempo y para un número N dado de trabajadores, la cantidad promedio de eventos por trabajador y unidad de tiempo tiene media igual a $(\lambda N T)$, donde la componente λ representa la incidencia de accidentes por unidad de tiempo y trabajador y $(N T)$ corresponde a un factor de escala definido como la multiplicación entre el intervalo de tiempo considerado, T , y el número de trabajadores en la empresa, N . La incidencia λ es específica a cada unidad de análisis y , debido a que eventualmente se tiene muestras pequeñas para cada empresa y un gran número de unidades de análisis, es mejor definirla como una componente aleatoria en un ambiente de estimación Bayesiano. Si la incidencia de cada empresa fuese un parámetro fijo e independiente de las otras incidencias, se requeriría una muestra relativamente grande de trabajadores y/o un período de tiempo extenso para alcanzar una estimación confiable. La ventaja de un ambiente bayesiano es que las distintas incidencias están relacionadas a través de una distribución de probabilidades de manera que la información proveniente de otras unidades de análisis también aporta a la estimación.

La distribución de probabilidades que determina las incidencias λ , por conveniencia en el análisis y por ser un modelo usual en modelación Bayesiana de procesos de conteo, se supone que sigue una distribución de probabilidades Gamma con parámetros r y s . Estos parámetros son considerados fijos aunque desconocidos. Así, la incidencia de accidentes promedio a través de las empresas es $E(\lambda) = (r/s)$ mientras que la dispersión a través de las empresas está representada por la varianza $V(\lambda) = (r/s^2)$. Incorporando la especificación Poisson, para el proceso de conteo, el modelo para el número de accidentes se denomina Poisson – Gamma o Binomial Negativo y se puede representar por

$$Y | \lambda \sim \text{Poisson}(\lambda N T)$$

$$\lambda \sim \text{Gamma}(r, s)$$

Esto es, la incidencia de accidentes laborales se distribuye a través de las empresas de acuerdo a una distribución Gamma mientras que, para una empresa particular, la distribución del número de accidentes dada la incidencia λ y el factor NT que representa un factor de escala en función del número de trabajadores y el intervalo de tiempo observado, tiene distribución Poisson con parámetro (λNT) .

La probabilidad de que en un período de tiempo se observen y accidentes, en una empresa promedio, tiene una probabilidad igual a

$$P(Y = y) = \frac{\Gamma(r + y)}{\Gamma(r)\Gamma(y + 1)} \left(\frac{s}{s + NT}\right)^r \left(\frac{NT}{s + NT}\right)^y, \quad y = 0, 1, 2, \dots$$

Se demuestra a partir de este modelo que la media y la varianza en el número de accidentes están dadas por

$$E(Y) = \frac{r}{s} NT \quad V(Y) = \frac{r}{s} NT \left(1 + \frac{NT}{s}\right)$$

Desde aquí se observa que la varianza en un proceso de conteo Poisson – Gamma tiene, respecto de la distribución Poisson, un factor de inflación determinado por el último término en la expresión de la varianza, y más específicamente, determinado por el factor de escala NT y el parámetro s . Mientras mayor es el coeficiente s en la distribución Gamma, menor es la varianza en el número de accidentes por empresas y por ende las incidencias de los accidentes de las distintas unidades económicas, tienden a ser similares. Por el contrario, un valor de s cercano a cero implica una alta dispersión o variabilidad en las incidencias de accidentes a través de unidades económicas.

Así, se postula la hipótesis

Hipótesis H1: *El modelo Poisson-Gamma describe de mejor manera los datos de accidentabilidad por unidad económica que el modelo Poisson.*

Los parámetros del modelo Poisson – Gamma, r y s , deben ser estimados a partir de los datos. Es usual en aplicaciones a procesos de conteo que se utilice el método Bayesiano Empírico, en el cual los parámetros r y s son considerados constantes no aleatorias que se estiman mediante el método de máxima verosimilitud (Bernardo y Smith 1994). Si bien el modelo especificado permite heterogeneidad en la accidentabilidad por unidad económica, una forma de hacer más flexible el modelo para que se ajuste a datos de empresas de distintos sectores económicos y distintas regiones geográficas, es definir parámetros específicos para tales categorías. En base a los análisis anteriores, se plantea la siguiente hipótesis respecto de la metodología econométrica apropiada para analizar y predecir procesos aleatorios de conteo de accidentes laborales

Hipótesis H2: *Los parámetros para los modelos Poisson y Poisson-Gamma dependen tanto de la región como del rubro de la empresa.*

Una de las cualidades de la especificación Gamma para modelar la tasa de incidencia de accidentes a través de las empresas es que, utilizando resultados estándar de teoría bayesiana, se puede establecer la distribución de probabilidades de una empresa particular a la cual se le han observado y accidentes en un período de tiempo y para una dotación de trabajadores. En efecto,

$$\lambda | y \sim \text{Gamma}(r + y, s + NT)$$

Esta distribución de probabilidades ajustada a la nueva información permite hacer predicción de la accidentabilidad en futuros períodos considerando toda la información disponible. Esta distribución de probabilidades contiene parámetros estimados con todas las unidades económicas: r, s y contiene características propias de la unidad económica: y, NT .

Modelo Multinomial – Dirichlet

El proceso considerado hasta aquí modela el número de accidentes laborales en una unidad económica pero no distingue los distintos tipos de gravedad del accidente. Aceptando que los factores que inciden en la frecuencia de los accidentes no son exactamente los mismo que los que afectan la severidad (Khanzode, Maiti & Ray, 2012), planteamos un modelo de severidad que se anida al de frecuencia (Petersen, 1989; Salminen et al., 1992). Por simplicidad clasificamos los accidentes en tres tipos: leves, graves y fatales. Para modelar el número de accidentes de cada tipo, dado el número total de accidentes en un período de tiempo y en una unidad económica se considerará la distribución de probabilidades Multinomial, que asume que cada accidente puede ser leve, grave o fatal con probabilidades π_l, π_g, π_f respectivamente. Siguiendo con el ejemplo de las caídas, se supone que el incidente responde a un proceso Poisson – Gamma que modela la ocurrencia de la pérdida de equilibrio del trabajador. De las pérdidas de equilibrio, una proporción ocurrirá a baja altura, otra a mediana y otra gran altura, lo cual producirá accidentes leves, graves y fatales. Estas ocurrencias tienen probabilidades específicas.

Como los estados leve, grave y fatal son excluyentes y exhaustivos, la suma de estas probabilidades es igual a 1. Al igual que en el proceso definido para el número total de accidentes, las probabilidades asociadas a cada uno de los tres posibles estados de los accidentes se supone que varían según unidad económica. Esto permite relajar el supuesto implícito en la Pirámide de Heinrich de que los accidentes ocurren con probabilidades predeterminadas y que intervenciones orientadas a disminuir los accidentes tienen el mismo impacto en todos los accidentes. De esta manera, la estimación del modelo permitirá testar la hipótesis de la Pirámide.

Por conveniencia en el análisis y por ser usual en un modelo Multinomial en un contexto bayesiano (Bernardo y Smith 1994), se supone que las probabilidades (π_l, π_g, π_f) son aleatorias y siguen, a través de las unidades económicas, una distribución de probabilidades Dirichlet con parámetros $(\alpha_l, \alpha_g, \alpha_f)$. Esta especificación permite a las probabilidades de cada estado de accidente variar por unidad económica, aunque estas probabilidades no son

completamente libres debido a que siguen un patrón de frecuencia determinado por la distribución Dirichlet. El modelo Multinomial – Dirichlet está definido de la siguiente manera

$$(Y_l, Y_g, Y_f) | Y \sim \text{Multinomial}(Y, \pi_l, \pi_g, \pi_f)$$

$$(\pi_l, \pi_g, \pi_f) \sim \text{Dirichlet}(\alpha_l, \alpha_g, \alpha_f)$$

Donde (Y_l, Y_g, Y_f) corresponde al número de accidentes de cada tipo y la suma de estas tres variables es igual al número total de accidentes Y . En base a este desarrollo se plantea la hipótesis

Hipótesis H3: *El modelo Multinomial – Dirichlet describe de mejor manera los datos de clasificación de accidentes por unidad económica que el modelo Multinomial.*

La probabilidad de que en un período de tiempo y y en una sucursal se observen (y_l, y_g, y_f) accidentes dado el número total de accidentes y es igual a

$$P(Y_l = y_l, Y_g = y_g, Y_f = y_f) = \binom{y}{y_l, y_g, y_f} \frac{\Gamma(A)}{\Gamma(A + y)} \prod_{k=l,g,f} \frac{\Gamma(\alpha_k + y_k)}{\Gamma(\alpha_k)}$$

Donde $y = (y_l + y_g + y_f)$, $\pi = (\pi_l, \pi_g, \pi_f)$, $\alpha = (\alpha_l, \alpha_g, \alpha_f)$ y $A = \sum_k \alpha_k$. La función $\Gamma(\cdot)$ corresponde a la función matemática Gamma. Este proceso aleatorio permite estudiar las probabilidades de los tres tipos de accidentes considerando heterogeneidad a través de las unidades económicas. La esperanza y la varianza del número de accidentes del tipo k son

$$E(Y_k) = y \frac{\alpha_k}{A} \quad V(Y_k) = y \frac{\alpha_k}{A} \left(1 - \frac{\alpha_k}{A}\right) \left(\frac{y + A}{1 + A}\right) \quad k = l, g, f$$

Al igual que en el modelo Poisson – Gamma, en este modelo se considera la opción que el vector de parámetros α dependan del sector y región de la unidad económica. Por lo tanto, se considera la hipótesis

Hipótesis H4: *Los parámetros para los modelos Multinomial y Multinomial Dirichlet dependen tanto de la región como del rubro de la unidad económica.*

Para una empresa particular y un período en el cual se han observado $y = (y_l + y_g + y_f)$ accidentes, la distribución ajustada a la nueva información disponible es

$$(\pi_l, \pi_g, \pi_f) | y \sim \text{Dirichlet}(\alpha_l + y_l, \alpha_g + y_g, \alpha_f + y_f)$$

Finalmente, asumiendo que estos procesos actúan de manera independiente y secuencial, es decir, primero se determina el número de accidentes y luego, que tipo de accidentes son,

entonces se pueden combinar los dos modelos. El modelo de probabilidad Dirichlet se ha aplicado con éxito en modelos de elección en otras disciplinas (Goodhardt, Ehrenberg and Chatfield, 1984). En Marketing, el modelo Multinomial – Dirichlet representa la probabilidad de elección de marca en un contexto de consumo en el cual el número total de artículos comprados se modela mediante el proceso Poisson – Gamma.

4. Los Datos

Para la realización de este estudio se utiliza una base de datos de accidentes laborales de la Asociación Chilena de Seguridad (ACHS). La ACHS es una asociación de empresas y trabajadores en Chile que tiene como propósito central prevenir accidentes y enfermedades laborales promoviendo una cultura que garantice la seguridad, salud y calidad de vida de los trabajadores en Chile. La ACHS es la asociación de seguridad más grande y más antigua en Chile que administra el seguro de la ley de accidentes del trabajo y enfermedades profesionales. Actualmente el número de instituciones afiliadas supera las 70 mil y el número de trabajadores afiliados supera los 2 millones según la memoria anual del último año (www.achs.cl).

La ACHS registra en sus bases de datos cada uno de los accidentes laborales ocurridos en las instituciones afiliadas. Para este estudio se dispone de los datos de las empresas afiliadas para 28 meses correspondientes al período entre enero del 2013 y abril del 2015. Cada uno de los accidentes ocurridos durante este período fue clasificado como leve, grave o fatal según las características del evento. La unidad económica de análisis corresponde a empresas o sucursales de empresas definidas como unidades de producción, operación, gestión o comercialización de las empresas afiliadas a la ACHS. Para cada una de las sucursales se dispone de la siguiente información:

- Masa de trabajadores: Número de trabajadores de la sucursal en base a una estimación calculada por la ACHS prorrateando los trabajadores totales de la empresa en base a información que le entregan los expertos.
- Código CIIU: Clasificación de las empresas afiliadas según el código CIIU. Se utiliza la clasificación a 1 dígito de manera de que cada grupo tuviera una cantidad significativa de sucursales para ser analizadas.
- Región Geográfica: La región geográfica en la cual se encuentra la sucursal con códigos 1 a 15.

La clasificación de los accidentes en las categorías leve, grave y fatal es obtenida de la Denuncia Individual de Accidente de trabajo que corresponde al registro del evento en la ACHS. En esta denuncia se infiere la severidad del accidente lo cual podría estar sujeta a ciertos elementos de subjetividad. La gran mayoría de los tipos de accidentes están clasificados dependiendo del requerimiento de cuidado (e.g. amputaciones, caídas de altura, accidentes que requieran hospitalización son clasificados como graves). Esto implica que los accidentes graves suelen estar clasificados correctamente. A modo de revisar si los

accidentes terminaron en una fatalidad luego de la hospitalización, se corrigieron los casos en que las fichas de los pacientes tenían una fecha de defunción cuando estaban clasificados como leves o graves. Esto no corrige completamente los posibles errores de medición, pero sí permite tener una medida más precisa de accidentes fatales.

En el Cuadro 1 se presentan estadísticas descriptivas de los datos según sector de actividad económica. Este cuadro reporta el número de sucursales o empresas en cada sector, el número promedio de trabajadores, el número de accidentes totales y la proporción desagregada por tipo de accidente. La última columna del Cuadro 1 reporta la tasa de accidentabilidad promedio en cada sector. Esta tasa se calcula como el número de accidentes por el período de tiempo y por el número de trabajadores. Los sectores de actividad económica difieren considerablemente en el número de empresas; los más grandes corresponden a Actividades Inmobiliarias y a Comercio. Las tasas de siniestralidad promedio de todas las empresas llegan a 8,9% y difiere marcadamente entre sectores. El coeficiente de variación, desviación estándar respecto de la media, llega al 21%. Los sectores con mayores tasas de accidentabilidad son Industria Manufacturera, Construcción y Hoteles y Restaurantes. En los tres casos mencionados la tasa supera el 10%. Como se esperaría, el número de accidentes graves y fatales es considerablemente menor al número de accidentes leves en todos los sectores de actividad económica.

Cuadro 1 Estadísticas Descriptivas por Sector

Sector	Empresas	Promedio Trabajadores	Total Accidentes	Proporción			Tasa
				Leves	Graves	Fatales	Accidentabilidad
Agricultura, Ganadería	8229	25	35656	0.992	0.007	0.001	0.086
Pesca	641	40	4971	0.995	0.004	0.001	0.092
Expl. De Minas y Canteras	590	67	3129	0.960	0.035	0.004	0.066
Industrias Manufactureras	9042	35	62366	0.994	0.005	0.000	0.101
Electricidad, Gas y Agua	905	16	1525	0.994	0.005	0.001	0.057
Construcción	5604	22	19663	0.992	0.007	0.001	0.101
Comercio	16752	24	78817	0.996	0.003	0.000	0.090
Hoteles y Restaurantes	4997	26	22113	0.998	0.002	0.000	0.118
Transporte y Com.	7010	23	24799	0.994	0.004	0.001	0.091
Intermediación Financiera	3108	25	6096	0.998	0.002	0.000	0.059
Act. Inmobiliarias	19348	19	44744	0.996	0.003	0.001	0.084
Adm. Publica y Defensa	3730	58	24467	0.996	0.003	0.000	0.081
Enseñanza	4875	43	27512	0.997	0.003	0.000	0.087
Serv. Sociales y De Salud	2269	45	16642	0.999	0.001	0.000	0.086
Serv. Comunitarios	6415	24	22746	0.996	0.004	0.000	0.092
Hogares Priv. y Serv. Dom.	1607	6	927	0.999	0.001	0.000	0.045

El Cuadro 2 presenta las estadísticas descriptivas de la siniestralidad separadas por región geográfica. La Región Metropolitana acapara el mayor número de empresas. La variabilidad de la tasa de accidentabilidad por región geográfica llega a 14%, en términos de coeficiente de variación, lo cual es menor que la variabilidad a través de sectores de actividad. Las

regiones geográficas con menor tasa de accidentabilidad son las regiones 3 y 11; mientras que las que presentan mayores siniestralidades son la 13 (Región Metropolitana) y la 15

Cuadro 2 Estadísticas Descriptivas por Región

Región	Empresas	Promedio Trabajadores	Total Accidentes	Proporción			Tasa Accidentabilidad
				Leves	Graves	Fatales	
1	1182	23.2	5471	0.997	0.003	0.000	0.080
2	3164	25.9	12025	0.987	0.011	0.001	0.086
3	1817	27.7	6191	0.989	0.010	0.001	0.062
4	3638	23.4	12865	0.995	0.004	0.001	0.070
5	6759	17.9	22750	0.996	0.004	0.000	0.084
6	4847	26.6	22827	0.995	0.005	0.001	0.089
7	4153	27.5	18307	0.990	0.009	0.001	0.080
8	9671	30.5	40424	0.995	0.005	0.001	0.085
9	3173	26.7	14827	0.996	0.004	0.001	0.087
10	4697	20.0	15715	0.995	0.004	0.001	0.079
11	654	19.8	1516	0.991	0.007	0.002	0.059
12	801	21.1	2904	0.997	0.003	0.000	0.070
13	46890	28.9	208347	0.996	0.003	0.000	0.096
14	2014	21.4	7596	0.995	0.004	0.001	0.089
15	989	21.7	4408	0.996	0.004	0.000	0.096

5. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en las estimaciones de los modelos de conteo Poisson – Gamma y los modelos de distribución por tipo de accidentes Multinomial – Dirichlet. Al hacer las estimaciones de los modelos se testean las hipótesis H1 a H4 planteadas en la sección anterior.

Estimación de la Accidentabilidad: Modelo Poisson – Gamma

El modelo Poisson – Gamma presentado en la Sección 2 se estimó mediante máxima verosimilitud. Distintas versiones de este modelo, con distintos supuestos, son presentadas en el Cuadro 3. Para cada modelo descrito en la primera columna, se reporta el número de parámetros, la función verosimilitud (LL) y los indicadores Criterio de Información de Akaike (AIC), Criterio de Información Bayesiano (BIC) y (pseudo) R^2 . Los indicadores AIC y BIC son indicadores de bondad de ajuste que se forman a partir de la función verosimilitud pero castigan a modelos con un número elevado de parámetros de manera de considerar la parsimonia en el modelo, lo cual no es considerado por la función de verosimilitud. Tanto en AIC como BIC, el criterio consiste en elegir el modelo con el menor valor; en general es preferido el criterio BIC que tiene un castigo mayor al número de parámetros. El número de observaciones en la estimación reportada en el Cuadro 3 es 95.127 sucursales o empresas. Los resultados del Cuadro 3 muestran claramente que el modelo Poisson – Gamma se ajusta mejor a los datos que el modelo Poisson. Usando los criterios menor AIC, menor BIC o mayor R^2 se concluye que las tasas de accidentabilidad son diferentes entre sucursales y por tanto el modelo Poisson – Gamma representa mejor la accidentabilidad. La hipótesis $H1$, entonces, es aceptada. En el panel inferior del Cuadro 3 se compara el modelo Poisson –

Gamma con modelos que permiten que la distribución Gamma, que captura la variabilidad en la incidencia de accidentes, varíe por sector y por región. Los resultados muestran ganancias muy menores cuando se consideran modelos por sector de actividad económica y ganancias nulas en modelos por región geográfica. El modelo con menor BIC corresponde al modelo Poisson – Gamma con parámetros específicos por sector de actividad económica. La hipótesis H_2 también podría aceptarse aunque sólo marginalmente para el sector de actividad. Las ganancias del modelo propuesto, respecto del modelo Poisson básico, según el estadígrafo R^2 , llegan a 53%. Si la hipótesis H_2 es aceptada, los parámetros para los modelos dependen del sector de actividad económica. El Cuadro 4 presenta las estimaciones. Las tasas esperadas de accidentabilidad varían en promedio 23% respecto de su media 8,1%. La correlación entre las tasas observadas de accidentabilidad y las tasas esperadas llega a 99%. Adicionalmente, en la última columna del Cuadro 5 se muestra la inflación de varianza que logra el modelo Poisson – Gamma respecto del modelo Poisson. El promedio de los factores de inflación de varianza llega a 13%.

Cuadro 3: Estimación Modelo Poisson – Gamma

Modelo	Parámetros	LL (x 10 ⁻³)	AIC (x 10 ⁻³)	BIC (x 10 ⁻³)	R2
Poisson	1	-375.1	750.2	750.2	
Poisson por Sector	16	-365.5	731.1	731.3	0.025
Poisson por Región	15	-373.4	746.9	747.0	0.004
Poisson por Sector y Región	240	-358.0	716.5	718.8	0.045
Poisson - Gamma	2	-177.2	354.4	354.4	0.528
Poisson - Gamma por Sector	32	-176.2	352.5	352.8	0.530
Poisson - Gamma por Región	30	-176.9	353.8	354.0	0.528
Poisson - Gamma por Sector y Región	480	-175.0	351.0	355.5	0.532

El Cuadro 4 presenta las estimaciones del modelo Poisson – Gamma separado para cada uno de los sectores de actividad económica. Los parámetros (r, s) varían significativamente a través de los sectores mientras que las tasas de siniestralidad estimada por sector tiene una correlación de más de 99% con la tasa observada.

Estimación de la Clasificación de Accidentes: Modelo Multinomial – Dirichlet

Condicionales en el número total de accidentes en una sucursal, el modelo Multinomial – Dirichlet describe la proporción de estos accidentes que se clasifican en las categorías leves, graves y fatales. El Cuadro 5 presenta las estimaciones con los estadígrafos LL, AIC, BIC y (pseudo) R^2 . Si bien la muestra total es 95.127 empresas-sucursales, sólo 48.903 de ellas presentaron accidentes. Esto implica que el resto no entrega información adicional sobre la distribución por tipos de accidentes.

De acuerdo a los criterios de selección de los modelos, especialmente el criterio BIC, el mejor modelo sería el modelo Multinomial – Dirichlet general debido a que el estadígrafo BIC es mínimo en ese modelo. El criterio AIC también podría considerar como válido el modelo por sector de actividad económica. La hipótesis H3 es aceptada y la hipótesis H4 podría ser aceptada, según el criterio AIC pero no según BIC. Esto coincide con Hull et al. (1996) que muestran que la locación geográfica del accidente no incide en su severidad. Es interesante notar en el Cuadro 5 que las ganancias del modelo Multinomial – Dirichlet, en relación con el modelo Multinomial, son mucho más modestas que las ganancias que la especificación bayesiana en el modelo Poisson – Gamma. Esto quiere decir que las incidencias de accidentes varían de manera significativa entre sucursales pero, dada la siniestralidad total, las probabilidades de accidentes leves, graves y fatales varían mucho menos.

Cuadro 4: Resultados de Modelo Poisson – Gamma por Sector de Actividad Económica

Sector	Empresas	r	s	Tasa Esperada	Tasa Observada	Inflación Varianza
Agricultura, Ganadería	8229	0.66	7.65	0.086	0.086	1.13
Pesca	641	0.75	8.33	0.090	0.092	1.12
Expl. De Minas y Canteras	590	0.35	5.58	0.063	0.066	1.18
Industrias Manufactureras	9042	0.63	6.22	0.101	0.101	1.16
Electricidad, Gas y Agua	905	0.71	12.82	0.055	0.057	1.08
Construcción	5604	0.50	5.11	0.098	0.101	1.20
Comercio	16752	0.73	8.04	0.091	0.09	1.12
Hoteles y Restaurantes	4997	0.61	5.34	0.114	0.118	1.19
Transporte y Com.	7010	0.6	6.74	0.089	0.091	1.15
Intermediación Financiera	3108	0.55	10.05	0.055	0.059	1.10
Act. Inmobiliarias	19348	0.43	5.37	0.080	0.084	1.19
Adm. Publica y Defensa	3730	0.70	9.32	0.075	0.081	1.11
Enseñanza	4875	1.03	12.86	0.080	0.087	1.08
Serv. Sociales y De Salud	2269	0.68	7.50	0.091	0.086	1.13
Serv. Comunitarios	6415	0.65	7.43	0.087	0.092	1.13
Hogares Priv. y Serv. Dom.	1607	1.65	38.57	0.043	0.045	1.03

Cuadro 5: Estimación Modelos Multinomial – Dirichlet

Modelo	Parámetros	LL (x 10 ⁻³)	AIC (x 10 ⁻³)	BIC (x 10 ⁻³)	R2
Multinomial Global	3	-6.35	12.71	12.74	0.000
Multinomial por Sector	48	-6.17	12.43	12.85	0.029
Multinomial por Región	45	-6.28	12.64	13.04	0.012
Multinomial por Sector y Región	720	-5.86	13.16	19.50	0.077

Multinomial - Dirichlet Global	3	-5.79	11.59	11.61	0.088
Multinomial - Dirichlet por Sector	48	-5.62	11.33	11.76	0.115
Multinomial - Dirichlet por Región	45	-5.72	11.53	11.92	0.100
Multinomial - Dirichlet por Sector y Región	720	-5.32	12.08	18.42	0.163

Cuadro 6: Estimaciones de Modelo Multinomial – Dirichlet Global

Indicador	Leves	Graves	Fatales
Coefficiente α	60.378	0.206	0.036
Probabilidad Esperada	0.996	0.003	0.001

En el Cuadro 6 podemos observar los parámetros estimados en el modelo Multinomial – Dirichlet global, la probabilidad esperada para cada uno de los tipos de accidentes y su correspondiente varianza.

Relación entre Incidencia y Probabilidades de Leves, Graves y Fatales

Con el propósito de hacer un test de la Pirámide de Heinrich, en esta sub-sección se analiza la relación que existe entre la incidencia de accidentabilidad en una unidad económica y las probabilidades de accidentes leves, graves y fatales. Si la Pirámide es una hipótesis respaldada por los datos, cuando una unidad económica disminuye la accidentabilidad total, las probabilidades de ocurrencia de los distintos tipos de accidentes se mantienen constantes, lo cual quiere decir que todos los tipos de accidentes disminuyen de la misma forma. En este escenario, los programas de prevención de accidentes afectan de igual manera a accidentes leves, graves y fatales.

Con el propósito de testear esta hipótesis se plantea el siguiente modelo de regresión logística

$$\ln\left(\frac{p_k}{1-p_k}\right) = \beta_0 + \beta_1 \ln(\lambda) \quad k = g, f$$

Donde p_k corresponde a la probabilidad de accidente del tipo k (grave, fatal) en una empresa o unidad económica, λ es la incidencia de accidentabilidad en esa empresa y (β_0, β_1) son coeficientes a ser determinados. Las probabilidades p_k y las incidencias λ son estimadas a nivel de cada empresa en base a los modelos propuestos en la sección anterior. En la relación entre las probabilidades de accidentes e incidencia de la accidentabilidad se plantea un modelo con transformación logística para evitar que las predicciones de las probabilidades se escapen del rango entre 0 y 1 y porque mediante esta transformación se estabiliza empíricamente la varianza.

El coeficiente β_1 en el modelo anterior corresponde a la elasticidad entre la chance y la incidencia de la accidentabilidad. Esto es, este coeficiente representa el cambio porcentual en la chance del evento tipo k , grave y fatal, ante un cambio de 1% en la incidencia λ . La chance de un evento se define como el cociente entre la probabilidad de un evento ocurra y

la probabilidad de que el evento no ocurra. Por otra parte, la elasticidad de la probabilidad de accidentes graves y fatales ante un cambio de 1% en la incidencia λ , después de algo de álgebra, es igual a $\beta_1(1 - p_k)$, $k = g, f$. Sin embargo, como la proporción de accidentes graves y fatales es muy pequeña, esta última expresión es, en términos prácticos igual a β_1 . Las elasticidades β_1 ó, lo que es esencialmente equivalente, $\beta_1(1 - p_k)$, $k = g, f$ pueden tomar valores entre 0 y un número cercano aunque levemente superior a -1. El valor 0 corresponde al caso en que los cambios en la incidencia no tienen impacto en las probabilidades de accidentes graves y fatales; lo cual significa que la hipótesis de la Pirámide de Heinrich se cumple porque los cambios en la incidencia afectan a todos los tipos de accidentes proporcionalmente. Por el contrario, si estas elasticidades son menores que cero, entonces los cambios en la incidencia de la accidentabilidad está mayormente asociada a cambios en los accidentes leves. Los accidentes graves y fatales, en ese caso, experimentan aumentos en la probabilidad porque la disminución de la accidentabilidad está afectando esencialmente a accidentes leves. Se puede demostrar con un ejercicio algebraico que el menor valor posible para la elasticidad es levemente superior a -1 cuando los cambios en la incidencia de los accidentes es pequeña. Por ejemplo, para cambios en la incidencia igual a 1% la elasticidad extrema es -1.01 mientras que para cambios en la incidencia iguales al 10% esta elasticidad puede llegar a -1.11.

Cuadro 7: Estimación Coeficiente β_1 Modelo de Regresión Logística

Sector de Actividad Económica	Grave	Fatal
Agricultura, Ganadería	-0.028***	-0.062***
Pesca	-0.054	-0.066**
Expl. de Minas y Canteras	-0.013	-0.100*
Industrias Manufactureras	-0.038***	-0.072***
Electricidad, Gas y Agua	-0.003	-0.012
Construcción	-0.009	-0.054***
Comercio	-0.036***	-0.067***
Hoteles y Restaurantes	-0.028***	-0.041***
Transporte y Com.	-0.021**	-0.052***
Intermediación Financiera	-0.005	-0.020***
Act. Inmobiliarias	-0.017***	-0.030***
Adm. Publica y Defensa	-0.034***	-0.029***
Enseñanza	-0.029***	-0.039***
Serv. Sociales y De Salud	-0.051***	-0.055***
Serv. Comunitarios	-0.020**	-0.031***
Hogares Priv. y Serv. Dom.	-0.069***	-0.069***

El Cuadro 7 muestra los valores del coeficiente β_1 para cada sector de actividad económica y para cada tipo de accidente no leve: grave y fatal. El tamaño de muestra total de las estimaciones es igual a 48.903 lo cual corresponde a las unidades económicas en la muestra. En todos los sectores de actividad económica el coeficiente β_1 es negativo y en la mayoría de estadísticamente significativo. Esto quiere decir que las disminuciones en la

incidencia de la accidentabilidad tienen asociados aumentos en la proporción de accidentes graves y fatales. El coeficiente asociado al sector Electricidad Gas y Agua es no significativo para graves y fatales y por tanto se puede concluir que se cumple la hipótesis de Heinrich. Las acciones orientadas a disminuir los accidentes afectan de igual manera a todos los tipos de accidentes. En los sectores Pesca, Explotación de Minas y Canteras y Construcción el coeficiente β_1 es no significativo para accidentes graves pero sí lo es para accidentes fatales. Esto quiere decir que la Pirámide de Heinrich se cumple hasta los accidentes graves pero no con los accidentes fatales. En los otros sectores de actividad económica los coeficientes son significativos y negativos para accidentes graves y fatales. Es interesante notar que los coeficientes β_1 son en la mayoría de los casos menores en accidentes fatales que en accidentes graves. Esto quiere decir que la disminución de la incidencia tiene menor efecto en accidentes fatales que en accidentes graves.

Finalmente, considerando que las elasticidades en el Cuadro 7 están entre 0 y aproximadamente -1, se observa que el orden de magnitud de los coeficientes es muy bajo. Esto quiere decir que, en la mayoría de los sectores de actividad económica, si bien en términos estrictos no se cumple la Pirámide de Heinrich y disminuciones en la accidentabilidad tienen impacto en los accidentes graves y fatales, este impacto es muy leve. Uno de los mayores impactos significativos al 1% se produce en la Industria Manufacturera en la cual el coeficiente β_1 para los accidentes fatales llega a -0.072 lo cual quiere decir que una disminución de 1% en los accidentes de este sector produce un aumento en la proporción de fatales de apenas 0.072%; un efecto poco relevante. Como en otros sectores de actividad económica, la Pirámide no se cumple desde un punto de vista estadístico pero esta desviación de la hipótesis de Heinrich prácticamente no tiene impacto económico.

6. Discusión y Conclusiones

La Pirámide de Heinrich plantea una correlación entre la ocurrencia de accidentes con distinto grado de gravedad en las empresas. Por décadas ha servido como uno de los principales instrumentos de gestión de la seguridad ocupacional, pues permite evaluar la propensión de la ocurrencia de fatalidades, eventos muy inusuales, mediante accidentes leves o casi-accidentes, que son mucho más frecuentes. Ha sido objeto de cuestionamiento respecto de sus supuestos y por su mal uso, ámbitos en los cuales no nos pronunciamos. Nuestro objetivo es validar o refutar un cuestionamiento que pone en duda su utilidad práctica: si acaso realmente se da una correlación entre la ocurrencia de accidentes leves, graves y fatales. Las dudas han surgido por cierta evidencia a nivel de empresas y de países en los cuales se ha dado que mientras ha bajado la ocurrencia de accidentes leves, no ha ocurrido lo mismo con los accidentes graves y fatales.

Hasta donde sabemos, en la literatura científica no se han planteado test serios de la validez estadística de la Pirámide de Heinrich, pues a nivel de empresa las tasas de accidentes leves y graves, y especialmente las tasas de accidentes fatales, son extremadamente bajas. Nuestra principal contribución es plantear un modelo bayesiano que permite evaluar

empíricamente la validez de la Pirámide en un conjunto de empresas. El modelo consta de dos partes: la primera cuenta el número total de accidentes mediante la distribución Poisson – Gamma, y la segunda estima la distribución de accidentes leves, graves y fatales mediante una distribución Multinomial – Dirichlet. Teniendo la frecuencia de accidentabilidad por un lado y la distribución de severidad por otro, podemos observar si acaso la proporción entre accidentes leves, graves y fatales se mantiene cuando cambia la frecuencia (en cuyo caso se valida la Pirámide) o si dicha proporción cambia (en cuyo caso se refuta).

Testeamos el modelo con datos de más de 50.000 empresas observadas por 28 meses en Chile, que corresponde a aproximadamente la mitad de las empresas y empleados formales del país. Evaluamos a las empresas de acuerdo a la industria y a la zona geográfica, y comprobamos que la distribución Poisson – Gamma y la distribución Multinomial – Dirichlet se ajustan adecuadamente a los datos. También comprobamos que la Pirámide de Heinrich no se cumple desde el punto de vista estadístico, es decir, la proporción de accidentes leves, graves y fatales sí cambia cuando se reduce la tasa total de accidentes. Sin embargo, dicho cambio es tan pequeño que, para efectos prácticos, la proporción es relativamente constante y por ende la Pirámide sí podría considerarse como un instrumento válido.

Nuestra contribución en términos prácticos para Chile es comprobar que el cambio de la tasa de ocurrencia de accidentes leves sí es indicativo de qué podría pasar con los accidentes graves y fatales. Tal como lo postula la Pirámide de Heinrich, si una empresa observa que los accidentes leves van en aumento, por proporcionalidad debería esperar una mayor propensión de los accidentes de mayor gravedad. Entonces, la Pirámide se valida como un instrumento de prevención, pues sí emite alertas creíbles. Además, queda claro que un modelo amplio de gestión de seguridad, en donde se tienen en vista todos los accidentes, no sólo tiene un efecto en los accidentes leves sino también en los de mayor gravedad.

Insistimos que esta conclusión de correlación entre tipos de accidentes no debe confundirse con causalidad. Esto es, como se explica en la Sección 1, los distintos tipos de accidentes presentan correlación, pero esto no significa que la ocurrencia de un accidente de un tipo sea la causa de accidentes de otro tipo; lo que ocurre es que las ocurrencias de los distintos tipos de accidentes tienen una causa común. De acuerdo a lo discutido, podría ocurrir que la empresa se concentra en prevenir accidentes triviales, que poco inciden en los de mayor gravedad. Lo que nuestro análisis muestra es que, en general, no se da que las empresas eviten dichos accidentes triviales solamente. De nuestros resultados deducimos que en Chile las empresas abordan la seguridad de manera más bien sistémica y, por eso, en general las tasas entre accidentes leves, graves y fatales se mantienen constantes. Esto es, cuando disminuye uno de los tipos de accidentes no necesariamente disminuyen los otros.

Tal como se explicó anteriormente, la principal debilidad de este trabajo es que no mide el efecto de los cambios de tasas de los diferentes tipos de accidentes a nivel de cada empresa. Dado que dichas tasas son tan bajas, para hacerlo tendríamos que contar con décadas de datos homologables que muestren cambios significativos en las tasas en cada

una de ellas. Por el contrario, nuestra metodología agrupa empresas en categorías, en nuestro caso de industria y región, y las compara respecto de sus tasas de accidentabilidad. Esto llama a continuar esta línea de investigación, recordando que la Pirámide de Heinrich ha sido crucial en la prevención de accidentes ocupacionales.

Referencias

Bailer, A.J. Reed, L.D. and Stayner, L.T. 1997. Modeling fatal injury rates using poisson regression: A case study of workers in agriculture, forestry, and fishing. *Journal of Safety Research* 28(3): 177-86.

Bernardo, J.M. y A.F.M. Smith (1994) *Bayesian Theory*. Wiley.

Bird, F., Germain, G., 1992. *Practical Loss Control Leadership*. International Loss Control Institute Inc., Loganville, Georgia.

Bird, F., Loftus, R., 1976. *Loss Control Management*. Institute Press, Loganville, Georgia.

Bourassa, D., Gauthier, F., & Abdul-Nour, G. (2015). Equipment failures and their contribution to industrial incidents and accidents in the manufacturing industry. *International journal of occupational safety and ergonomics*, (just-accepted), 1-23.

Boyd, A., Radson, D., 1999. Statistical analysis of injury severity rates. *IIE Transactions* 31, 207-216.

Brahm, F., & Singer, M. (2013). Is more engaging safety training always better in reducing accidents? Evidence of self-selection from Chilean panel data. *Journal of safety research*, 47, 85-92.

Danaher, P. (2007) Modeling Page Views Across Multiple Websites With an Application to Internet Reach and Frequency Prediction. *Marketing Science* 26(3): 422-437.

das Chagas Moura, M., Azevedo, R. V., Droguett, E. L., Chaves, L. R., Lins, I. D., Vilela, R. F., & Sales Filho, R. (2016). Estimation of expected number of accidents and workforce unavailability through Bayesian population variability analysis and Markov-based model. *Reliability Engineering & System Safety*, 150, 136-146.

Dzviarek M. An analysis of accidents caused by improper functioning of machine control systems. *Int J Occup Saf Ergon*. 2004;10(2):129-136.

Frome EL, Cragle DL, Watkins JP, Wing S, Shy C, Tankersley WG, and West CM. 1997. A mortality study of employees of the nuclear industry in Oak Ridge, Tennessee. *Radiation Research* 148: 64-80.

Gnoni, M. G., Andriulo, S., Maggio, G., & Nardone, P. (2013). "Lean occupational" safety: An application for a Near-miss Management System design. *Safety science*, 53, 96-104.

Gomes S.V., S.R. Geedipally and D. Lord Estimating the safety performance of urban intersections in Lisbon, *Portugal Safety Science*, 50 (9) (2012), pp. 1732-1739

Goodhardt G.J.,A.S.C. Ehrenberg and C. Chatfield (1984) The Dirichlet: A Comprehensive Model of Buying Behaviour. *Journal of The Royal Statistical Society A*, Vol. 147, pp. 621-655.

Hale, A. (2001). Conditions of occurrence of major and minor accidents. *Institution of Occupational Safety and Health, IOSH Journal*, 5(1), 7-21.

Heinrich, H., 1932. *Industrial Accident Prevention*, first ed. McGraw Hill, New York.

Heinrich, H., Petersen, D., Ross, N., 1980. *Industrial Accident Prevention*, fifth ed. McGraw-Hill, New York.

Hull, B., Leigh, J., Driscoll, T., Mandryk, J., 1996. Factors associated with occupational injury severity in the New South Wales underground coal mining industry. *Safety Science* 21, 191–204.

Jacinto, C., & Soares, C. G. (2008). The added value of the new ESAW/Eurostat variables in accident analysis in the mining and quarrying industry. *Journal of safety research*, 39(6), 631-644.

Khanzode, V. V., Maiti, J., & Ray, P. K. (2012). Occupational injury and accident research: A comprehensive review. *Safety Science*, 50(5), 1355-1367.

Kines, P. (2002). Construction workers' falls through roofs: Fatal versus serious injuries. *Journal of Safety Research*, 33(2), 195-208.

Konstandinidou, M., Nivolianitou, Z., Kefalogianni, E., & Caroni, C. (2011). In-depth analysis of the causal factors of incidents reported in the Greek petrochemical industry. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(11), 1448-1455.

Lee, P. (2004). *Bayesian Statistics. An Introduction*. Third Edition, H.Arnold.

Li, G., Shahpar, C., Grabowski, J.G., and Baker, S.P., (2001), Secular Trends of Motor Vehicle Mortality in the United States, 1910-1994, *Accident Analysis and Prevention*, 33, 423-432. Lawless JF. 1987. Negative binomial and mixed Poisson regression. *The Canadian Journal of Statistics* 15(3): 209-25.

Lord D, Washington SP, and Ivan NJ. 2005 b. Poisson, Poisson-gamma and zero inflated regression models of motor vehicle crashes: balancing statistical fit and theory. *Accident Analysis & Prevention* 37(1): 35-46.

Lozada-Larsen, S., Laughery, K., 1987. Do identical circumstances precede minor and major injuries? In: *Rising to New Heights with Technology*, vol. 1. Human Factors Society, New York, pp. 200–204.

Mallick S, and Mukherjee K. 1996. An Empirical Study for Mines Safety Management through Analysis on Potential for Accident Reduction. *Omega, The International Journal of Management Science*, 24(5): 539-50.

Manuele, F. A. (2011). Reviewing Heinrich: Dislodging two myths from the practice of safety. *Professional Safety*, 56(10), 52.

Marcoulaki, E. C., Papazoglou, I. A., & Konstandinidou, M. (2012). Prediction of occupational accident statistics and work time loss distributions using Bayesian analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(3), 467-477.

Martin, D. K., & Black, A. (2015). Preventing Serious Injuries & Fatalities: Study Reveals Precursors & Paradigms. *Professional Safety*, 60(9), 35.

Nash, J. (2008). Preventing death on the job: Did Heinrich get it wrong. *Industrial Safety & Hygiene News*, 42(11), 18-18.

Nenonen S. 2011 Fatal workplace accidents in outsourced operations in the manufacturing industry. *Saf Sci.*;49: 1394–1403.

Petersen, D., 1989. *Techniques of Safety Management: A Systems Approach*, third ed. Aloray Goshen, New York.

Richardson DB, Loomis D, Bena J, and Bailer AJ. 2004. Fatal occupational injury rates in southern and non-southern states, by race and Hispanic ethnicity. *American Journal of Public Health* 94: 1756-761.

Salminen, S., Saari, J., Saarela, K. L., & Räsänen, T. (1992). Fatal and non-fatal occupational accidents: identical versus differential causation. *Safety Science*, 15(2), 109-118.

Smitha, MW, Kirk KA, Oestenstad KR, Brown KC, Lee SD. 2001. Effect of state workplace safety laws on occupational injury rates. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 43(12): 1001-1010.

Wing S, Shy CM, Wood JL, Wolf S, Cragle DL, and Frome EL. 1991. Mortality among workers at Oak Ridge National Laboratory: Evidence of radiation effects in follow-up through 1984. *Journal of the American Medical Association* 265(11): 1397-1402.

Yang, H., O. Ozturk, K. Ozbay, and K. Xie, 2014. *Work Zone Safety Analysis and Modeling: A State-of- the-Art Review*. *Traffic Injury Prevention* (Earlier version presented at 93rd TRB Annual Meeting, 14 2014).