



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

SISTEMA DE SOPORTE DE DECISIONES PARA GESTIÓN DE RIESGO ANTE  
ALUVIONES EN MINA EL TENIENTE, CODELCO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

PAULINA ALEJANDRA RODRÍGUEZ CHITI

PROFESOR GUÍA:  
JAMES MCPHEE TORRES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MARCELO OLIVARES ALVEAL  
XIMENA VARGAS MESA

SANTIAGO DE CHILE  
2014

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TITULO DE:** Ingeniera Civil  
**POR:** Paulina Alejandra Rodríguez Chiti  
**FECHA:** 16/06/2014  
**PROFESOR GUÍA:** James McPhee Torres

## Sistema de Soporte de Decisiones para Gestión de Riesgo ante Aluviones en mina El Teniente, CODELCO

La faena minera El Teniente, CODELCO, es propensa, como cualquier otra actividad desarrollada en una zona montañosa, a sufrir los embates producidos por un aluvión. Bajo esta condición de riesgo, la actividad es paralizada en caso de presentarse una alerta, la cual se basa en un pronóstico meteorológico, considerando los posibles daños personales y materiales que puedan presentarse. Sin embargo, la generación de falsas alarmas provoca pérdidas importantes, debido a la nula producción durante dichos periodos.

Con el objetivo de mejorar el pronóstico de aluviones en la zona, el presente trabajo de título busca desarrollar un sistema de soporte de decisiones que permita conocer el valor de la información asociado a un nuevo modelo de pronóstico hidrometeorológico. Por medio de un árbol de decisiones, cuyos nodos de decisión, ligados a la paralización de la faena, reflejan la alternativa de tomar la respuesta entregada por el modelo o la de decidir directamente dado el pronóstico meteorológico, y cuyos nodos de incertidumbre están asociados a las respuestas del modelo y a los estados de la naturaleza, referidos a la ocurrencia del aluvión, se busca determinar y comparar los costos de cada una de las decisiones.

El modelo de pronóstico de aluviones integra un pronóstico meteorológico, un modelo hidrológico y un modelo de estabilidad de taludes de la cuenca, disponible en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Este modelo es utilizado bajo un enfoque de Monte Carlo, lo cual permite considerar la incertidumbre asociada su funcionamiento al incorporar, para ciertas variables, su distribución y no sólo valores promedio. El modelo utiliza información disponible de la cuenca del río Rapel, en cuanto a topografía, cobertura vegetal y uso de suelo, y registro de datos meteorológicos. Además se cuenta con un registro de eventos entre los años 2007 y 2010. Como resultado, el modelo entrega un factor de seguridad, variable que indica el grado de estabilidad del terreno. Valores menores a uno indican alerta de aluvión.

Los resultados muestran que utilizar un árbol de decisiones permite conocer el valor asociado a la utilización del modelo de pronóstico de aluviones. El valor de la información entregada por el modelo de pronóstico de aluviones depende del costo de los daños provocados por el aluvión y de la probabilidad de ocurrencia del mismo; alcanza valores cercanos a un millón de dólares, cuando los costos asociados a los daños son cercanos a los beneficios de la producción y la probabilidad de ocurrencia del evento es media, pero llega a ser nulo cuando estos costos son más bajos o bien la probabilidad de ocurrencia del aluvión lo es.

# Agradecimientos

Poco más de siete años han pasado ya desde el inicio de este proceso, y ahora que se acaba me gustaría agradecer a todos aquellos que me han acompañado en él, en particular en este último año, pero también desde mucho antes.

Agradezco a mi mamá y a mi papá por su amor, apoyo y confianza, por querer estar siempre aquí conmigo a pesar de la distancia, y por todo el esfuerzo que han hecho por nosotros, y a mi hermano que si bien hemos estado algo más lejos estos últimos años, es como si igual estuviésemos juntos. Le doy las gracias a toda mi familia, a la mami que tanto quiero y a la Ale a la distancia, a mis tías, tíos, primas y primos, que me han recibido y cuidado aquí en Santiago, y a los que están un poquito más lejos cruzando el océano. Y no me olvido de los que nos cuidan desde arriba, que se que están tan contentos como todos nosotros.

A mi profesor guía, James McPhee, y a los miembros de mi comisión, Ximena Vargas y Marcelo Olivares, por su apoyo y todo el tiempo dedicado, y en general a todos los profesores de la división por su entrega y por motivarnos a ser mejores, no sólo en el aspecto académico. También a Miguel, por la ayuda y paciencia; y a Pablo Mendonza por su modelo, tan amado y odiado al mismo tiempo. Agradezco al investigador Mark Falvey y a su equipo de trabajo, por su gran aporte a mi trabajo en lo relacionado al modelo de pronóstico meteorológico.

Al Nico y a la Karen, por aguantar mi tan apretada agenda, y en general a todo mi curso en el colegio, pues fue ese el inicio de todo esto, la siguiente aventura que nos tocó vivir.

A mis machines, con quienes aprendí a enfrentarme a este nuevo mundo universitario desde los primeros días, y a quienes quiero desde entonces.

Gracias al Coro de la Escuela, y a todos quienes participan en él, por las alegrías , por los momentos corales compartidos y por la posibilidad de disfrutar aún más de la música.

Y a mis compañeros y amigos de hidráulica, y a la Jaquie, a los del tercero... aquellos que ya están titulados y a los que aún les queda el último combate, gracias por hacer de cada día una alegría, porque al final no sólo el trabajo importa, son los recuerdos los que quedan.

Et finalement, je remercie tous mes amis Centraliens!, au 1A et tout le monde, pour ces deux années merveilleuses, pour tous les moments et les expériences qu'on a vécu ensemble.. Merci beaucoup! Muchas Gracias!

# Tabla de contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.3. Metodología . . . . .	2
1.4. Organización del documento . . . . .	4
<b>2. Recopilación Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1. Modelo de pronóstico de aluviones . . . . .	7
2.1.1. Resultados modelo Mendoza 2011 . . . . .	12
2.2. Pronóstico meteorológico . . . . .	17
2.3. Toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre . . . . .	18
<b>3. Metodología</b>	<b>21</b>
3.1. Caracterización de la Zona de Estudio . . . . .	21
3.1.1. Topografía . . . . .	22
3.1.2. Cobertura vegetal y suelos . . . . .	24
3.1.3. Datos hidrometeorológicos . . . . .	26
3.2. Árbol de Decisiones . . . . .	26
3.2.1. Probabilidades asociadas al estado de la naturaleza . . . . .	28
3.2.2. Probabilidades asociadas a los resultados del modelo . . . . .	29
3.3. Fuentes de Incertidumbre y Muestreo . . . . .	30
3.3.1. Pendiente del terreno . . . . .	31
3.3.2. Pronóstico meteorológico . . . . .	44
3.4. Costos . . . . .	45
<b>4. Análisis de Resultados</b>	<b>47</b>
4.1. Resultados del modelo, a partir de las simulaciones de monte carlo . . . . .	47
4.2. Análisis del valor de la información . . . . .	50
4.3. Influencia pronóstico meteorológico . . . . .	60
<b>5. Conclusión</b>	<b>65</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>67</b>
<b>Anexos</b>	<b>71</b>
<b>A. Distribuciones de Probabilidad</b>	<b>72</b>

# Índice de tablas

2.1. Clases de estabilidad de suelos (Kayastha, 2006) . . . . .	11
2.2. Eventos analizados y correspondencia entre el modelo de predicción y la realidad (Mendoza & McPhee, 2011) . . . . .	13
3.1. Parámetros de vegetación para cobertura del tipo suelo desnudo (adaptado de Bandaragoda <i>et al.</i> (2004) . . . . .	25
3.2. Parámetros asociados a material granular tipo grava areno limosa y arcillosa o "derrame de cerro"(APR, 2008) . . . . .	25
3.3. Parámetros de suelo obtenidos, utilizados en el modelo hidrológico (Mendoza & McPhee, 2011) . . . . .	26
3.4. Coordenadas estaciones meteorológicas, WGS84, huso 19 (Mendoza & McPhee (2011)) . . . . .	26
3.5. Estadísticos de series de pendientes en subcuencas . . . . .	31
3.6. Fechas tormentas analizadas dado pronóstico meteorológico . . . . .	44
4.1. Comparación pronóstico original y estocástico del factor de seguridad para cada tormenta . . . . .	47
4.2. Probabilidades asociadas al árbol de decisiones, según tormenta . . . . .	50
4.3. Probabilidades finales asociadas a la respuesta del modelo, dado el estado del sistema . . . . .	50
4.4. Probabilidades finales del árbol de decisiones, asociadas a cada escenario de $P(\theta_1)$ y $P(\theta_2)$ . . . . .	57

# Índice de figuras

1.1. Esquema de la metodología aplicada . . . . .	3
2.1. Representación esquemática del modelo de talud infinito para el análisis de estabilidad de suelos (Mendoza & McPhee, 2011) . . . . .	8
2.2. Procesos físicos simulados por TopNet (adaptado por Mendoza & McPhee (2011) de Clark <i>et al.</i> (2008)) . . . . .	12
2.3. Series con la profundidad del nivel freático y el factor de seguridad para las subcuencas de la cuenca experimental Coya1 (enero/2007 - julio/2010) . . .	14
2.4. Factor de seguridad en tormentas 1, 2 y 3 . . . . .	15
2.5. Factor de seguridad en tormentas 4, 5 y 6 . . . . .	16
2.6. Pronóstico de temperatura a 24hr del GFS, para el 17 de diciembre de 2009, 17:00 UTC, según los datos de <a href="http://www.ncep.noaa.gov">www.ncep.noaa.gov</a> (Biospherica Earth Vegetation, 2009) . . . . .	17
3.1. Área de Interés en la cuenca del río Rapel (Mendoza & McPhee, 2011) . . .	21
3.2. Ubicación de la cuenca experimental Coya 1, escogida para el estudio de riesgo de aluviones (Mendoza & McPhee, 2011) . . . . .	22
3.3. Trazado de subcuencas a partir de cauces con clasificación topológica de Strahler igual a 1 (Mendoza & McPhee, 2011) . . . . .	23
3.4. Distribución de valores del índice topográfico, cuenca experimental Coya 1 (Mendoza & McPhee, 2011) . . . . .	24
3.5. Esquema del árbol de decisiones . . . . .	27
3.6. Histograma distribución pendientes, subcuencas 0 y 1 . . . . .	32
3.7. Histogramas distribución pendientes, subcuencas 2, 3 y 4 . . . . .	33
3.8. Histogramas distribución pendientes, subcuencas 5 y 6 . . . . .	34
3.9. Ajuste densidad de probabilidades y función de distribución acumulada en subcuenca 0, correspondiente a una distribución t location-scale . . . . .	35
3.10. Ajuste densidad de probabilidades y función de distribución acumulada en subcuenca 1, correspondiente a una distribución gamma . . . . .	36
3.11. Ajuste densidad de probabilidades y función de distribución acumulada en subcuenca 2, correspondiente a una distribución t location-scale . . . . .	37
3.12. Ajuste densidad de probabilidades y función de distribución acumulada en subcuenca 3, correspondiente a una distribución normal . . . . .	38
3.13. Ajuste densidad de probabilidades y función de distribución acumulada en subcuenca 4, correspondiente a una distribución t location-scale . . . . .	39

3.14. Ajuste densidad de probabilidades y función de distribución acumulada en subcuena 5, correspondiente a una distribución Birnbaum-Saunders . . . . .	40
3.15. Ajuste densidad de probabilidades y función de distribución acumulada en subcuena 6, correspondiente a una distribución normal . . . . .	41
3.16. Ejemplo discretización en tres intervalos equiprobables, para selección de escenarios utilizando el método del hipercubo latino . . . . .	42
3.17. Matriz de escenarios que contiene todas las combinaciones posibles para los intervalos 1, 2 y 3, al considerar las 7 subcuencas . . . . .	42
3.18. Matriz de números aleatorios . . . . .	43
3.19. Matriz de escenarios de pendientes . . . . .	43
4.1. Distribución de factor de seguridad en tormentas 1, 2 y 3. $F^*$ representa el F.S. mínimo obtenido para la pendiente media de una subcuena, mientras que $F_{10}$ y $F_{90}$ delimitan el intervalo de confianza del 90 % . . . . .	48
4.2. Distribución de factor de seguridad en tormentas 4, 5 y 6. $F^*$ representa el F.S. mínimo obtenido para la pendiente media de una subcuena, mientras que $F_{10}$ y $F_{90}$ delimitan el intervalo de confianza del 90 % . . . . .	49
4.3. Probabilidad acumulada para factor de seguridad en tormentas 1, 2 y 3 . . . . .	51
4.4. Probabilidad acumulada para factor de seguridad en tormentas 4, 5 y 6 . . . . .	52
4.5. Árbol de decisiones incluyendo las probabilidades y costos estimados . . . . .	54
4.6. Árbol de decisiones incluyendo el procedimiento de decisión . . . . .	54
4.7. Árbol de decisiones, con resultados dados por $a_1 = 10\%$ y $a_2 = 40\%$ . . . . .	55
4.8. Costos de cada opción asociados a $P(\theta_1) = 2/6$ y $P(\theta_2) = 4/6$ , para los distintos valores del porcentaje asociado a los daños de no parar la faena cuando se produce un aluvión, $a_2$ . . . . .	56
4.9. Costos de cada opción para los distintos valores del porcentaje asociado a los daños de no parar la faena cuando se produce un aluvión, $a_2$ . Los valores consideran: $P(\theta_1) = 1/6$ . . . . .	57
4.10. Costos de cada opción para los distintos valores del porcentaje asociado a los daños de no parar la faena cuando se produce un aluvión, $a_2$ . Desde arriba, los valores consideran: $P(\theta_1) = 2/6$ y $P(\theta_1) = 3/6$ . . . . .	58
4.11. Costos de cada opción para los distintos valores del porcentaje asociado a los daños de no parar la faena cuando se produce un aluvión, $a_2$ . Desde arriba, los valores consideran: $P(\theta_1) = 4/6$ y $P(\theta_1) = 5/6$ . . . . .	59
4.12. Factor de seguridad en tormenta 5 (agosto/septiembre 2009), para pronósticos meteorológicos con alcance de 7 días . . . . .	61
4.13. Factor de seguridad en tormenta 6 (mayo/junio 2010), para pronósticos meteorológicos con alcance de 7 días . . . . .	62
4.14. Factor de seguridad en tormenta 7 (enero/febrero 2010), para pronósticos meteorológicos con alcance de 7 días . . . . .	63
4.15. Factor de seguridad en tormenta 8 (marzo/abril 2010), para pronósticos meteorológicos con alcance de 7 días . . . . .	64

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

Cada año, en la mina El Teniente, se producen uno o dos aluviones que afectan a las faenas, debido a que condiciones meteorológicas extremas provocan la crecida del Río Coya y un gran arrastre de sedimentos. Estos fenómenos causan importantes pérdidas debido a los daños materiales y significan un importante riesgo para las personas que allí trabajan. Para evitar dichos daños, existe la posibilidad de detener la faena dado un pronóstico meteorológico adverso. Sin embargo, detener un día la mina El Teniente implica importantes pérdidas económicas, razón por la cual la decisión de cerrarla frente a un pronóstico dado no es sencilla.

Enfrentar los problemas generados a partir de dichos eventos con medidas estructurales es particularmente problemático, debido a un aumento exponencial de los costos. Frente a esto, un manejo integral del riesgo y las medidas de organización se tornan especialmente relevantes (Lehning et al, 2005). Para ello es de utilidad contar con un sistema de soporte a la decisión, es decir, contar con un sistema informático interactivo que ayude a los encargados de tomar decisiones utilizando datos y modelos para resolver problemas no estructurados (Turba, 2001).

El presente Trabajo de Título busca desarrollar un sistema de soporte de ayuda a la toma de decisiones que permita, bajo condiciones de incertidumbre, determinar el valor de la información asociado a un modelo de pronóstico de aluviones y asistir en la decisión de paralización de la faena minera. Para ello se cuenta con un modelo computacional de pronóstico de aluviones en la zona, el cual integra un modelo hidrológico y un modelo de estabilidad de taludes, y se requiere implementar de forma adicional un modelo de toma de decisiones.



## 1.2. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo de título es diseñar un sistema de soporte de decisiones que permita evaluar un modelo de pronóstico de aluviones en una zona de alta montaña en presencia de actividad minera, tomando en cuenta las pérdidas por concepto de daños personales y materiales, y aquellas asociadas a la detención de faenas.

Como objetivos específicos la realización del trabajo busca:

1. Generar una herramienta computacional de pronóstico de aluviones para eventos extremos, que integre un pronóstico meteorológico, un modelo hidrológico y un modelo de estabilidad de taludes, tomando en cuenta las propiedades de incertidumbre de dicho pronóstico.
2. Sistematizar los requerimientos de información básica para árboles de decisión, como una herramienta de toma de decisiones en condiciones de incertidumbre.
3. Acoplar la herramienta computacional de pronóstico de aluviones y la metodología de soporte a la toma de decisiones, y evaluar la calidad de los resultados sobre la base de la información disponible y sus niveles de incertidumbre.

## 1.3. Metodología

El trabajo se inicia con una evaluación de la herramienta de pronóstico de aluviones disponible actualmente en el Departamento de Ingeniería Civil en la cuenca del río Coya. De esta forma se busca asegurar la aplicabilidad de la herramienta al problema tratado y, en caso contrario, realizar las modificaciones o correcciones necesarias que permitan adaptarlo a las necesidades del problema. Para ello se requiere además un estudio de los antecedentes de la cuenca intervenida.

A continuación se realiza una caracterización de las fuentes y naturaleza de la incertidumbre asociada al pronóstico hidrometeorológico. Esta caracterización es realizada inicialmente de forma general, para luego analizar específicamente la cuenca bajo estudio. Así se determinan los parámetros que presentan mayores variaciones y la influencia que tienen sobre la respuesta del modelo. Luego, utilizando un enfoque de Monte Carlo, se realiza un muestreo sobre las variables previamente definidas y se complementan los resultados del modelo de pronóstico.

Finalmente se implementa el árbol de decisiones con los pronósticos y su incertidumbre. Esta implementación se desarrolla tomando como base la información entregada por el modelo de pronóstico de aluviones, generando así un sistema que integra el modelo de la cuenca, la respuesta frente a fenómenos bajo incertidumbre y el apoyo a la decisión. La decisión a tomar hace referencia a la paralización de la faena frente a un pronóstico de aluvión y a la utilización de un modelo hidrometeorológico de pronóstico de aluviones, mientras que la incertidumbre está asociada a la variación de la pendiente del terreno y al pronóstico meteorológico. La

Figura 1.1 presenta un esquema general que resume todo el proceso realizado.

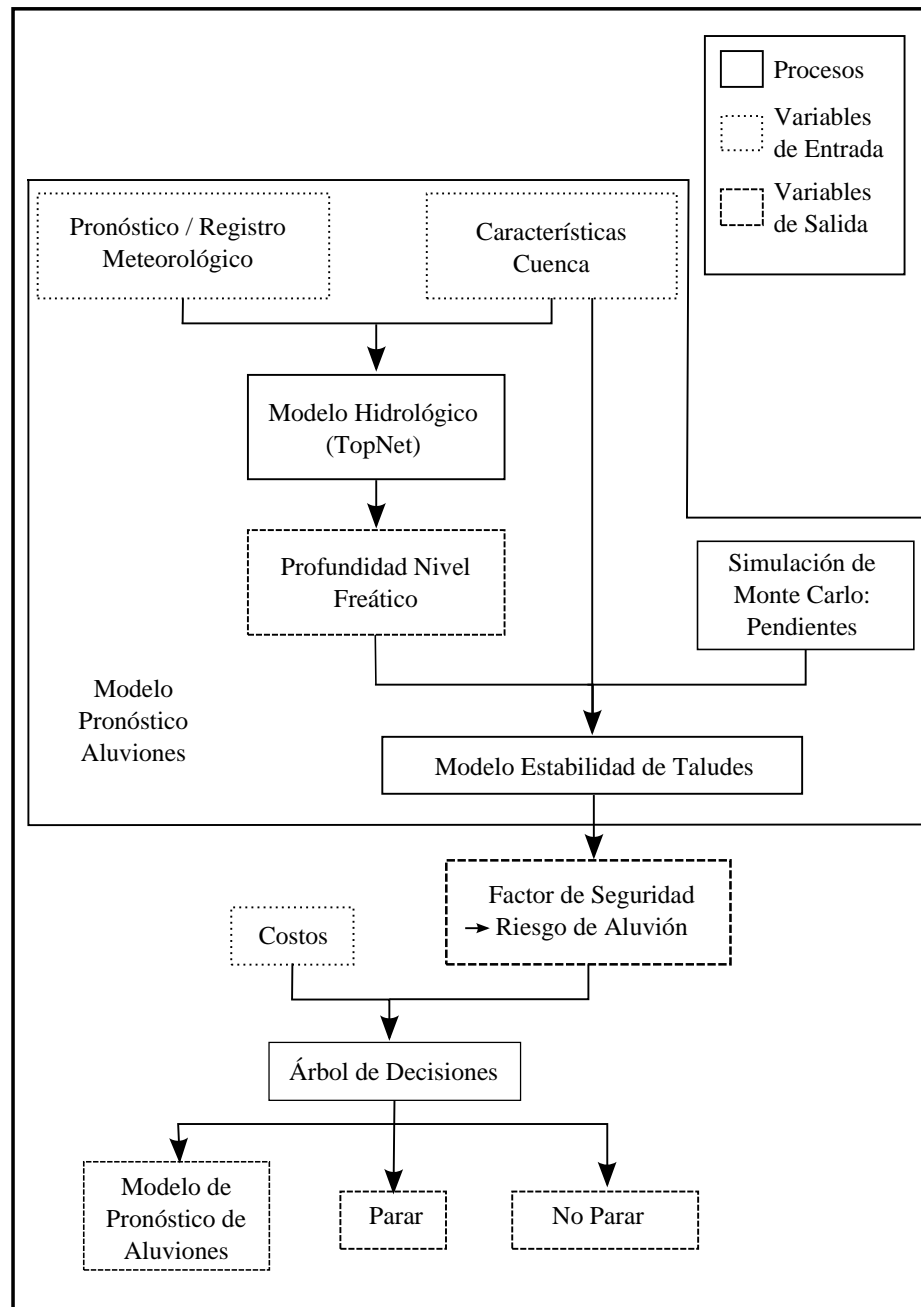


Figura 1.1: Esquema de la metodología aplicada

## 1.4. Organización del documento

El presente documento está organizado según se detalla a continuación.

En el Capítulo 2 se realiza una recopilación bibliográfica del estado del arte en la materia, entre las cuales se destacan sistemas de soporte a la decisión, sistemas de alerta temprana, modelos de pronóstico de aluviones, modelos de pronóstico meteorológicos, árboles de decisión, riesgos, probabilidades y simulaciones de monte carlo.

El Capítulo 3 corresponde a la metodología desarrollada e incluye: (i) una descripción de la zona de estudio y un análisis de las principales características relevantes para el estudio, incluyendo la topografía, el uso de suelo y el registro y pronóstico de datos meteorológicos; (ii) un detalle del árbol de decisiones utilizado, con los nodos de decisión y nodos de probabilidad, con sus respectivas probabilidades asociadas y las consecuencias o costos totales para cada rama; (iii) un análisis de las fuentes de incertidumbre del sistema, las cuales corresponden fundamentalmente a la pendiente del terreno y en menor medida al pronóstico meteorológico; y (iv) los costos asociados a los distintos estados posibles del sistema, a partir de estudios realizados por la Corporación Chilena del Cobre (COCHILCO).

En el Capítulo 4 se realiza un análisis de los resultados obtenidos, incluyendo una comparación entre los resultados originales del modelo y aquellos que consideran incertidumbre, los efectos del pronóstico meteorológico y los costos asociados a las ramas del árbol de decisiones.

# Capítulo 2

## Recopilación Bibliográfica

El crecimiento de la población y el cambio climático provocan actualmente grandes y rápidas alteraciones en regiones montañosas, con lo cual el riesgo asociado a fenómenos naturales como avalanchas, crecidas y aluviones se hace cada vez mayor (Lehning & Wilhelm, 2006). Diversos proyectos se han desarrollado para prevenir y/o informar sobre los posibles daños asociados a dichos eventos. Sunkpho & Ootamakorn (2011) muestra que es posible aplicar un sistema de monitoreo remoto para conocer las condiciones de los niveles y flujo en cuencas al sur de Tailandia en tiempo real, lo cual acoplado a una unidad de transmisión y procesamiento permite entregar la información directa al público así como establecer un canal de información entre expertos y autoridades. Aziz *et al.* (1997) concluye que un sistema de alerta efectivo, basado en un modelo hidrodinámico acoplado a un sistema de información geográfica, puede entregar alertas tempranas para 72, 48 y 24 horas.

Las medidas de protección desarrolladas pueden ser estructurales y no estructurales u organizativas. Por ejemplo, en el caso de medidas estructurales frente a crecidas, se encuentran el uso de embalses para disminuir caudales máximos, el encauzamiento del flujo a través de canales o tuberías, la reducción de caudales máximos mediante el aumento de velocidad y la división del cauce, entre otros (Linsley & Franzini, 1992). Sin embargo, este tipo de medidas tienen costos exponencialmente crecientes, en la medida en que aumenta la magnitud de los eventos. Es por esto que se requiere un manejo integral del riesgo, considerando como medida fundamental la organización de la población afectada, mediante planes de contingencia (Lehning & Wilhelm, 2006).

Un ejemplo de lo anterior se encuentra en el estudio de riesgo de avalanchas que provocan el bloqueo de rutas en Suiza (Lehning & Wilhelm, 2006). Se desarrolla para ello un modelo de cobertura de nieve y se analiza el comportamiento de los conductores para conocer el número de afectados frente a cada evento, dependiendo de la gravedad de la avalancha. El citado trabajo compara las posibles medidas a tomar frente al evento para evitar catástrofes, e incluye medidas estructurales junto a proposiciones de organización de la población. A partir de ello presenta las diferencias tanto a nivel de resultados, correspondiente a la protección de las personas, como de costos, para distintas combinaciones de ambos tipos de medidas.

Para evitar, o al menos atenuar, los posibles daños provocados por un aluvión, es necesario

contar con modelos confiables para enfrentar dichos eventos junto a un sistema de soporte de decisiones (SSD) que sea capaz de asistir a las autoridades correspondientes, quienes se encargarán de realizar las evacuaciones en el tiempo disponible. Contar con un sistema de soporte de decisiones, significa contar con un sistema informático interactivo que ayuda a los encargados de tomar decisiones utilizando datos y modelos relevantes para resolver problemas no estructurados, es decir, problemas para los cuales no es posible construir un algoritmo que permita llegar a una solución óptima única, debido a que la información es insuficiente o hay muchos factores que lo afectan (Turban & Aronson, 2001; Toro, 2004). El costo del desarrollo e implementación de un SSD resulta mucho menor que aquel asociado a los daños provocados por una crecida o un aluvión (Abebe & Price, 2005). Los aspectos funcionales de un SSD son en 4 (Simon, 1977):

- Provee inteligencia para manejar los datos y la información.
- Formula diversas opciones de solución para resolver el problema.
- Elige una alternativa que parece resolver de una mejor forma el problema.
- Entrega las razones por las cuales la opción seleccionada es la apropiada.

De forma complementaria, es posible desarrollar un sistema de alerta temprana (SAT) que permita proteger a la población. Un SAT es una alternativa costo-eficiente, es decir, una herramienta que reduce el riesgo con un bajo impacto económico y ambiental (Intrieri *et al.*, 2012). Según Medina-Cedina & Nadim (2008) un SAT como un sistema de monitoreo diseñado para evitar o al menos minimizar el impacto de un evento sobre las personas, causado daños a la propiedad, el medio ambiente o a otros elementos asociados al estilo de vida de las personas. La UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction) (2009) en tanto, lo define como el set de capacidades necesarias para generar y transmitir a tiempo y de forma útil la información de alerta, de forma de permitir que los individuos, comunidades y organizaciones afectadas por el desastre se preparen y actúen apropiadamente y en el tiempo requerido para reducir la posibilidad de daños o pérdidas. En cualquier caso, lo fundamental es mitigar el riesgo y alejar a las personas de las zonas de peligro. Un SAT eficiente debe considerar las siguientes actividades (DiBiagio & Kjekstad, 2007):

- Monitoreo, incluyendo la adquisición y trasmisión de datos, así como la mantención de los instrumentos.
- Análisis y pronóstico, los cuales pueden ser hechos utilizando ciertos criterios, juicios de expertos o modelos de pronóstico, entre otros.
- Alerta, lo cual corresponde a la distribución de un mensaje comprensible alertando de los posibles daños.
- Respuesta, lo cual corresponde a si las personas están preparadas para responder y a como reaccionan frente a la alerta.

Para desarrollar un SAT se requiere contar tanto con los datos de la zona estudiada como poder presentar un pronóstico a partir de ellos (Greco *et al.*, 2013). Este pronóstico puede basarse en modelos que correlacionen precipitaciones y ocurrencia de deslizamientos, los cuales pueden entregar resultados satisfactorios (Onondera *et al.*, 1974; Fukuoka, 1980; Govi *et al.*, 1984). A pesar de lo anterior, estudios como el de Sepulveda & Padilla (2008) muestran que la capacidad predictiva del modelo, basado en el pronóstico de una tormenta severa, puede ser baja en caso de que el modelo no esté capturando todas las variables necesarias

o bien los datos sean insuficientes. Sirangelo & Versace (1996) desarrolla el modelo FLaIR (Forecasting of Landslides Induced by Rainfall), el cual incluye dos módulos. El primero, Rainfall-Landslide, correlaciona las precipitaciones con la ocurrencia del deslizamiento de tierra, mientras que el segundo, Stochastic Rainfall, permite un pronóstico en tiempo real. Considerando ambos módulos el modelo es capaz de entregar una evaluación probabilística de la futura ocurrencia del evento.

Se han desarrollado además modelos matemáticos para pronosticar deslizamientos de tierra y aluviones por tormentas severas, los cuales se basan en el rol fundamental que juega el agua en la estabilidad del talud (Sirangelo & Versace, 1996; Sirangelo & Braca, 2004). A pesar de los múltiples avances que se han obtenido gracias al desarrollo computacional logrado en las últimas décadas, el grado de incertidumbre asociado a la estructura de dichos modelos, los parámetros y la información requerida para forzar la simulación y evaluar el rendimiento sigue siendo elevado (Liu & Gupta, 2007). La principal razón es que el pronóstico involucra una serie de modelos, donde cada uno de ellos incorpora incertidumbre, la cual es difícil de medir e incorporar al desarrollo del pronóstico (Abebe & Price, 2005). Este problema se ve lógicamente incrementado cuando se le suma la escasez de mediciones en terreno, situación común en países en desarrollo. Por ejemplo, Mendoza *et al.* (2012) analiza el desarrollo de pronósticos de flujos frente a una situación de incertidumbre. Considerando la escasa disponibilidad de información meteorológica y fluviométrica en las cuencas, se busca contar con un modelo posible de determinar dichos pronósticos. Para ello se analiza el comportamiento del modelo hidrológico y las fuentes de incertidumbre que se asocian al problema, en la cuenca del río Cautín en la Región de la Araucanía.

Es posible identificar tres fuentes de incertidumbre:

- Incertidumbre asociada al pronóstico meteorológico: Las precipitaciones, y otras variables atmosféricas, difícilmente están temporal y espacialmente distribuidas como fue predicho, debido a errores en el modelo de pronóstico meteorológico, en los parámetros y en las condiciones iniciales (Simmons & Hollingsworth, 2002).
- Incertidumbre en el modelo hidrológico del suelo: Los patrones de saturación del suelo nunca estarán exactamente distribuidos como fue predicho, debido a errores en el modelo de pronóstico hidrológico, en los parámetros y en las condiciones iniciales (Schaaque *et al.*, 2007).
- Incertidumbre en el modelo de estabilidad de taludes: Los taludes no fallarán exactamente como fue predicho, debido a errores en el modelo geotécnico y en los parámetros del suelo (Schmidt *et al.*, 2008).

## 2.1. Modelo de pronóstico de aluviones

Los aluviones son fenómenos generados por tormentas de gran intensidad que ocurren en zonas montañosas, que pueden iniciarse de manera repentina y viajar muchos kilómetros, con distintas velocidades (Mendoza & McPhee, 2011). Esto influye en el transporte de sedimentos y cambios en el paisaje que pueden ocurrir durante años e incluso milenios (Iverson, 2000).

Los aluviones constituyen fenómenos de interés no sólo por tratarse de procesos geomorfológicos complejos, sino que también por constituir un peligro natural (Iida, 1999). Esto hace que la predicción del instante y ubicación exactos en que ellos debiesen ocurrir se vuelva indispensable para evitar o reducir los daños. En este sentido, un sistema de alerta de aluviones que entregue información para la evacuación y mitigación de daños aparece como primera prioridad (Lee & Ho, 2009).

Un modelo de aluviones puede desarrollarse a través de modelos de estabilidad de talud infinito, el cual se esquematiza en la Figura 2.1. Iverson (2000) desarrolló un modelo que relaciona deslizamientos de tierra y fallas de suelo con cambios de presión en el flujo subsuperficial por efecto de intensas precipitaciones. Este es el caso del modelo desarrollado por Mendoza & McPhee (2011) para la cuenca del río Coya, en la sexta región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. El modelo analiza la estabilidad en distintas áreas, a fin de determinar la posible ocurrencia de un aluvión frente a distintas condiciones meteorológicas.

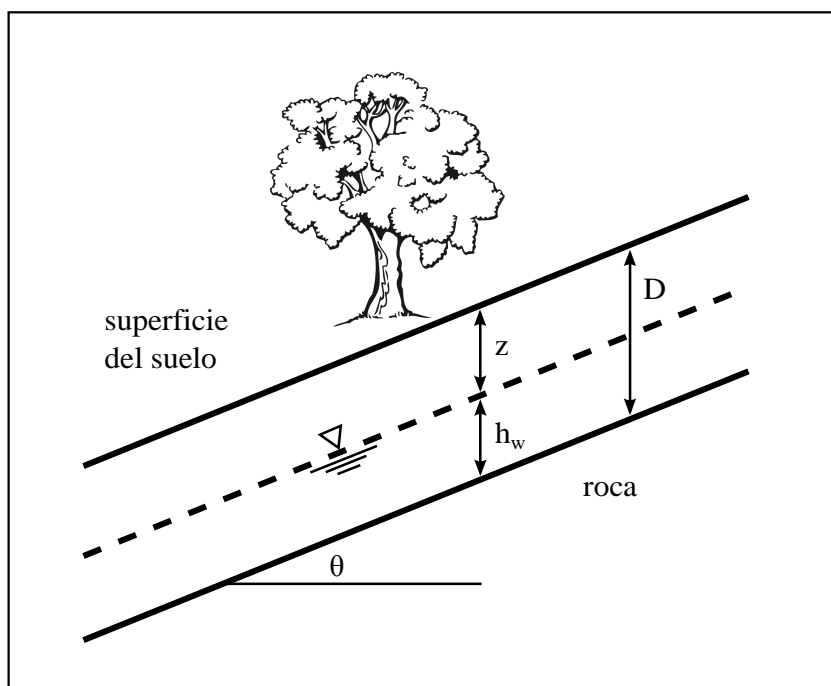


Figura 2.1: Representación esquemática del modelo de talud infinito para el análisis de estabilidad de suelos (Mendoza & McPhee, 2011)

El modelo construido por Mendoza & McPhee (2011), se basa en la ley de falla de Mohr-Coulomb para taludes infinitos (ecuación 2.1), la cual constituye una buena aproximación cuando el espesor del suelo es pequeño con respecto a la longitud del talud.

$$\tau_f = c + (\sigma - u) \tan(\phi) \quad (2.1)$$

donde:

$\tau_f$ : Tensión de corte sobre el plano de falla

$c$ : Cohesión del suelo

$\sigma$ : Tensión normal sobre el plano de corte

$u$ : Presión de poros

$\phi$ : Ángulo de fricción interna

El objetivo del modelo es comparar la resistencia de corte sobre el plano de falla con el esfuerzo aplicado sobre él, mediante un factor de seguridad, según se muestra en la ecuación 2.2. El factor de seguridad indica el grado de estabilidad del talud, mientras que la resistencia al corte equivale a la condición en la cual se genera la falla del suelo y el esfuerzo ejercido está determinado por la geometría y el peso de la columna de suelo.

$$F.S. = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (2.2)$$

donde:

$F.S.$ : Factor de seguridad

$\tau_f$ : Tensión de corte límite de falla

$\tau$ : Tensión de corte ejercida sobre el plano de falla

Tanto la tensión de corte ejercida sobre el plano de falla y la tensión normal están determinados por la geometría del talud y el peso de la columna de suelo, según se muestra en las ecuaciones 2.3 y 2.4, y este último se define además a partir de la ecuación 2.5.

$$\tau = W \operatorname{sen}(\theta) \quad (2.3)$$

$$\sigma = W \operatorname{cos}(\theta) \quad (2.4)$$

$$W = D\gamma_b \operatorname{cos}(\theta) \quad (2.5)$$

donde:

$\theta$ : Ángulo de inclinación del suelo

$W$ : Peso de la columna de suelo



$D$ : Altura de la columna de suelo

$\gamma_b$ : Peso específico del suelo húmedo

La presión de poros está dada por la ecuación 2.6.

$$u = D\gamma_w h_w \cos^2(\theta) \quad (2.6)$$

donde:

$\gamma_w$ : Peso específico del agua

$h_w$ : Profundidad de la zona saturada del suelo

Reemplazando en la ecuación 2.1 la tensión normal sobre el plano de corte ( $\sigma$ ) y la presión de poros ( $u$ ), la tensión de corte para la cual se genera la condición de falla del suelo queda dada por la ecuación 2.7.

$$\tau_f = c + (\gamma_b D - \gamma_w h_w) \cos^2(\theta) \tan(\phi) \quad (2.7)$$

Despejando  $\tau_f$  y  $\tau$  de la ecuación 2.2 se obtiene una primera expresión para el factor de seguridad (ecuación 2.8).

$$F.S. = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c + (\gamma_b D - \gamma_w h_w) \cos^2(\theta) \tan(\phi)}{D\gamma_b \sin(\theta) \cos(\theta)} \quad (2.8)$$

Finalmente, al incorporar el hecho que los modelos hidrológicos entregan la profundidad del nivel freático medido desde la superficie al suelo, se obtiene la ecuación 2.9, que representa el factor de seguridad, teniendo en cuenta que  $h_w = D - z(t)$ .

$$F.S. = \frac{c + [(\gamma_b - \gamma_w)D + \gamma_w z(t)] \cos^2 \theta \tan \phi}{D\gamma_b \sin \theta \cos \theta} \quad (2.9)$$

donde:

$c$ : Cohesión

$\gamma_b$ : Peso específico del suelo húmedo

$\gamma_w$ : Peso específico del agua

$D$ : Altura de la columna de suelo

$z(t)$ : Profundidad del nivel freático

$\phi$ : Ángulo de fricción interna

$\theta$ : Ángulo de inclinación del talud

Entonces, cuando  $F.S. < 1,0$ , la fuerza de corte predomina sobre la resistencia y se genera falla en el talud, mientras que en el caso contrario el talud será estable. Kayastha (2006) propone diferentes rangos para el valor del factor de seguridad, donde cada uno simboliza una mayor o menor probabilidad de falla, lo cual se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Clases de estabilidad de suelos (Kayastha, 2006)

Factor de seguridad	Estabilidad del talud	Observaciones
$FS > 1.5$	Estable	Sólo los principales factores perturbadores llevan a la inestabilidad
$1.25 < FS < 1.5$	Moderadamente estable	Perturbaciones de moderada intensidad provocan inestabilidad
$1 < FS < 1.25$	Casi estable	Perturbaciones menores provocan inestabilidad
$FS < 1$	Inestable	Se requieren factores estabilizadores

Uno de los parámetros fundamentales a estimar para poder calcular el factor de seguridad es la profundidad del nivel freático. Para ello se utiliza el modelo TopNet, modelo hidrológico distribuido, de base física, desarrollado por el NIWA (National Institute for Water and Atmospheric Research, Nueva Zelanda). El modelo utiliza conceptos de TOPMODEL (Beven *et al.*, 1995) para simular los procesos físicos propios del ciclo hidrológico en cada subcuenca, y posee una componente de rastreo de caudales desde cada subcuenca hasta el punto de salida mediante un algoritmo de cálculo basado en la onda cinemática (Bandaragoda *et al.*, 2004).

En la Figura 2.2 se presenta un esquema conceptual de los procesos hidrológicos simulados por TopNet, cuyas variables se presentan a continuación, mientras que las ecuaciones que rigen el modelo se encuentran en Clark *et al.* (2008).

$p$  : precipitación

$p_r$  : precipitación caída en forma líquida

$p_s$  : precipitación caída en forma de nieve

$p_t$  : precipitación no interceptada por el follaje

$e_c$  : evapotranspiración desde el follaje

$m_s$  : tasa de derretimiento de la nieve

$i$  : infiltración hacia la zona de raíces del suelo

$e_r$  : evaporación desde el suelo

$d$  : percolación

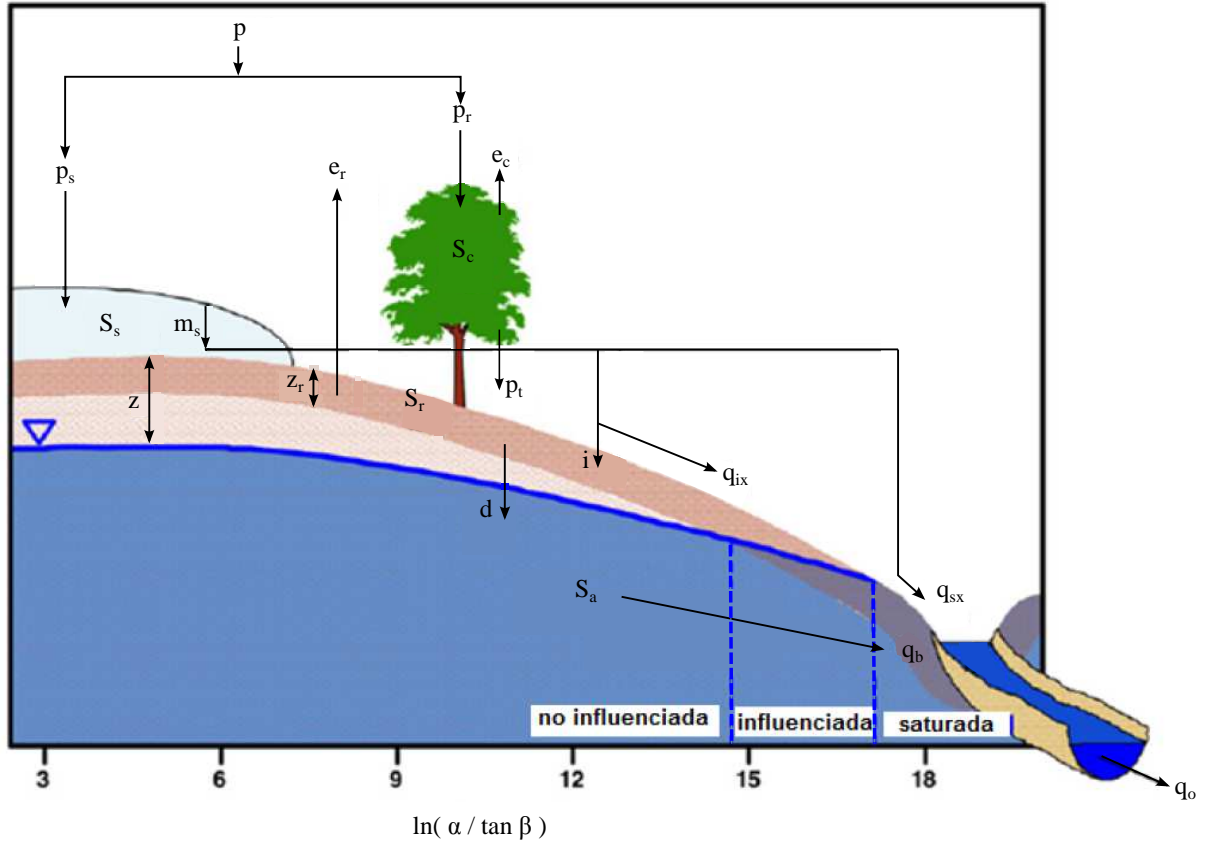


Figura 2.2: Procesos físicos simulados por TopNet (adaptado por Mendoza & McPhee (2011) de Clark *et al.* (2008))

$q_b$  : flujo base

$q_{ix}$  : caudal generado por excedencia de la capacidad de infiltración del suelo

$q_{sx}$  : caudal generado por la saturación del suelo

$q_o$  : caudal de salida de la subcuenca

### 2.1.1. Resultados modelo Mendoza 2011

El modelo original fue implementado para el periodo comprendido entre el primero de enero de 2007 y el 31 de julio de 2010 para una cuenca experimental, dividida en siete subcuencas, ubicada en la parte alta de la cuenca del río Coya. Las subcuencas fueron numeradas entre cero y seis. Para este periodo se presentan en la figura 2.3 la profundidad del nivel freático obtenido a través de TopNet y el valor del factor de seguridad para cada una de las subcuencas.

Considerando únicamente los periodos críticos para el factor de seguridad, Mendoza & McPhee (2011) seleccionan 6 eventos, de los cuales en 4 el modelo pronóstico peligro de aluvión, con una consecuente alarma en la faena minera El Teniente. Los resultados del modelo se incluyen en la Tabla 2.2, junto al estado del sistema real. Se tiene que de las 4 alertas, 2 constituyeron falsas alarmas, lo cual muestra que existen fallas en el modelo.

Tabla 2.2: Eventos analizados y correspondencia entre el modelo de predicción y la realidad (Mendoza & McPhee, 2011)

Evento	Periodo analizado	FS min	Ocurrencia del Evento	
			Modelo	Realidad
Tormenta 1	24/08/2007 11/09/2007	1.05	No	No
Tormenta 2	17/05/2008 25/05/2008	0.975	Si	Si
Tormenta 3	01/09/2008 28/09/2008	0.998	Si	No
Tormenta 4	09/05/2009 16/05/2009	0.977	Si	Si
Tormenta 5	10/08/2009 19/08/2009	1.19	No	No
Tormenta 6	22/05/2010 02/06/2010	0.988	Si	No

Junto a lo anterior, se muestra en las Figuras 2.4 y 2.5 la evolución del factor de seguridad para cada tormenta, en las distintas subcuencas. Se incluyen además los límites de falla indicados anteriormente. Las tormentas 1, 3 y 5 corresponden a tormentas de invierno, mientras que las tormentas 2, 4 y 6 ocurren en otoño. Debido a que la posición y la pendiente de las subcuencas varía, el valor de factor de seguridad es diferente para cada una de ellas, presentándose en todos los casos el menor valor en la subcuenca 5.

Es posible observar el momento en el cual el factor de seguridad es inferior a uno, provocando una alerta de aluvión, en las tormentas 2, 3, 4 y 6. Para todas ellas la falla se produce en la subcuenca 5, mientras que todas las otras sólo llegan a estar en la categoría casi estable. De acuerdo a los resultados observados el aluvión se produjo únicamente para las tormentas 2 y 4, por lo que las tormentas 3 y 6 corresponden a falsas alarmas.

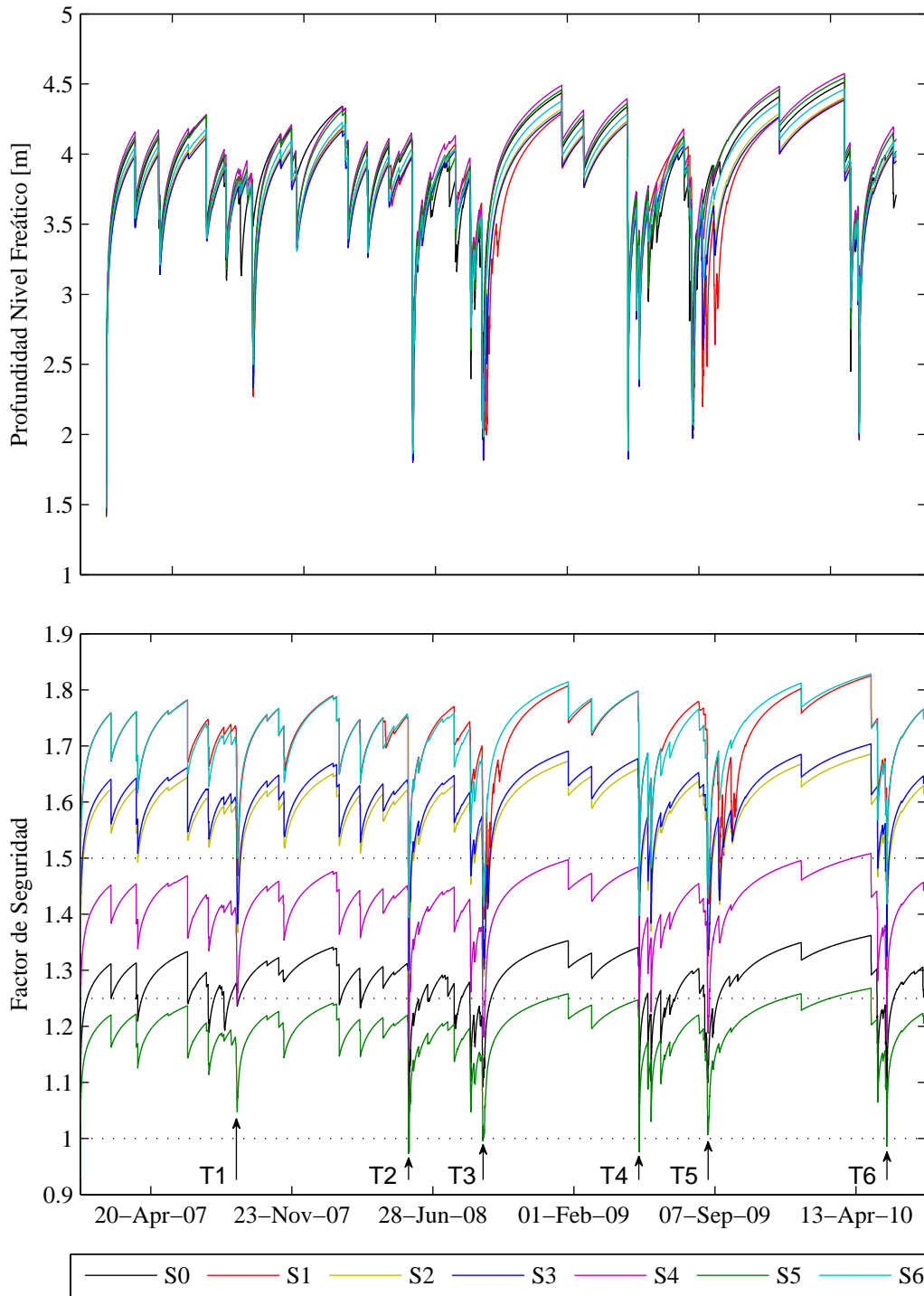


Figura 2.3: Series con la profundidad del nivel freático y el factor de seguridad para las subcuencas de la cuenca experimental Coya1 (enero/2007 - julio/2010)

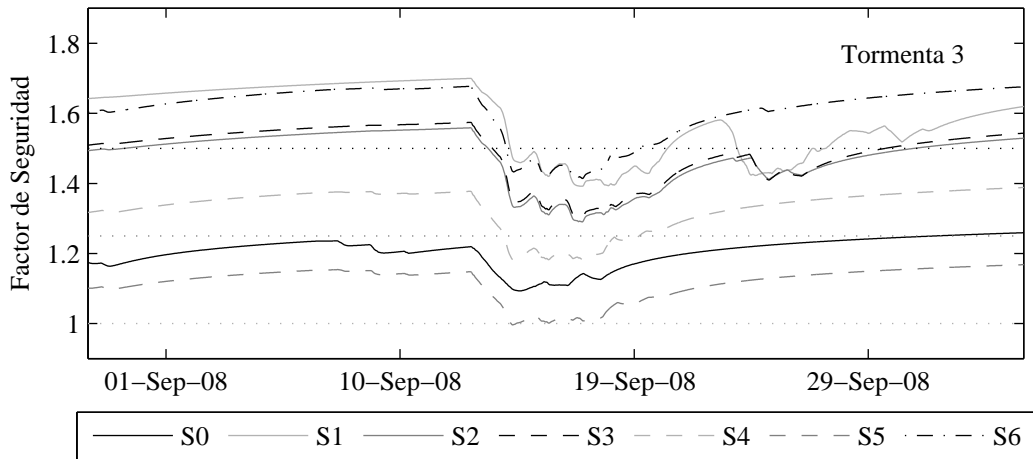
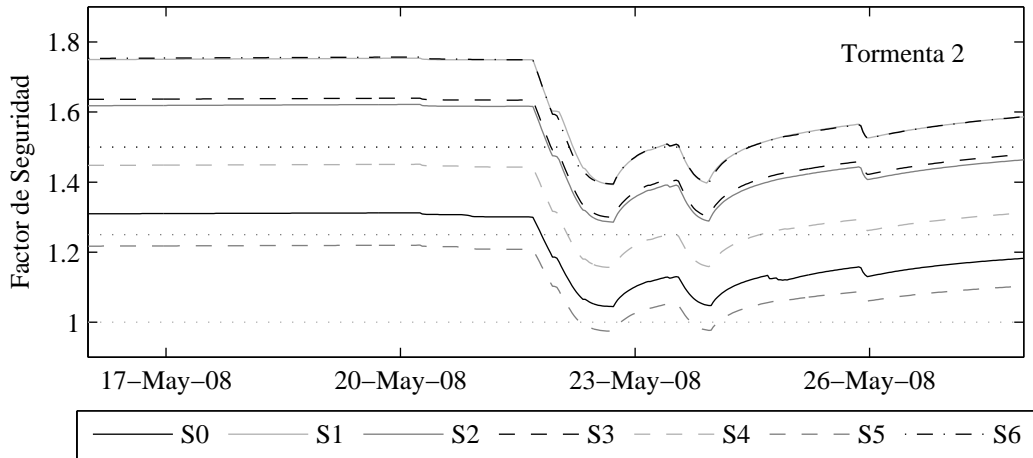
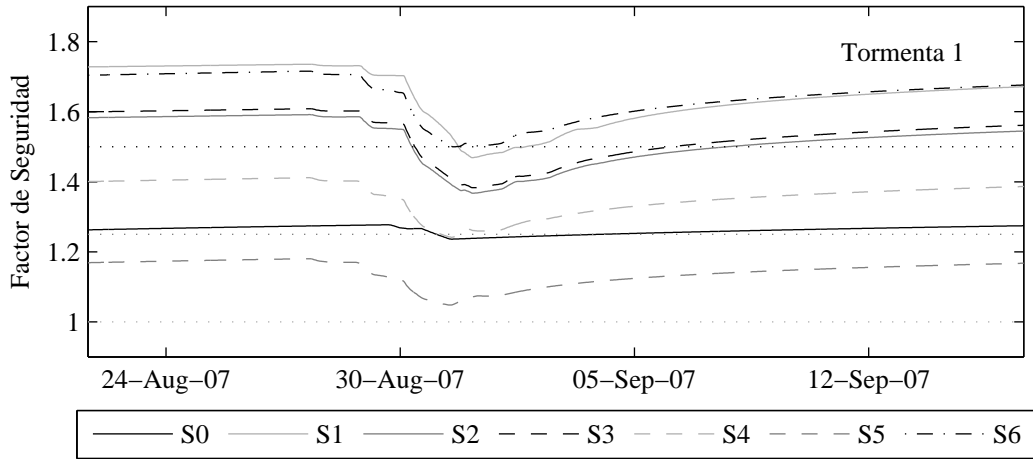


Figura 2.4: Factor de seguridad en tormentas 1, 2 y 3

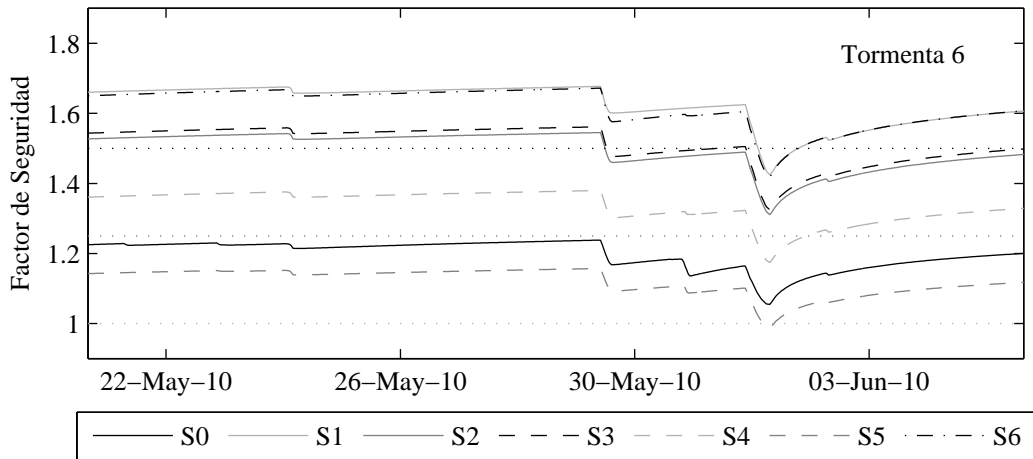
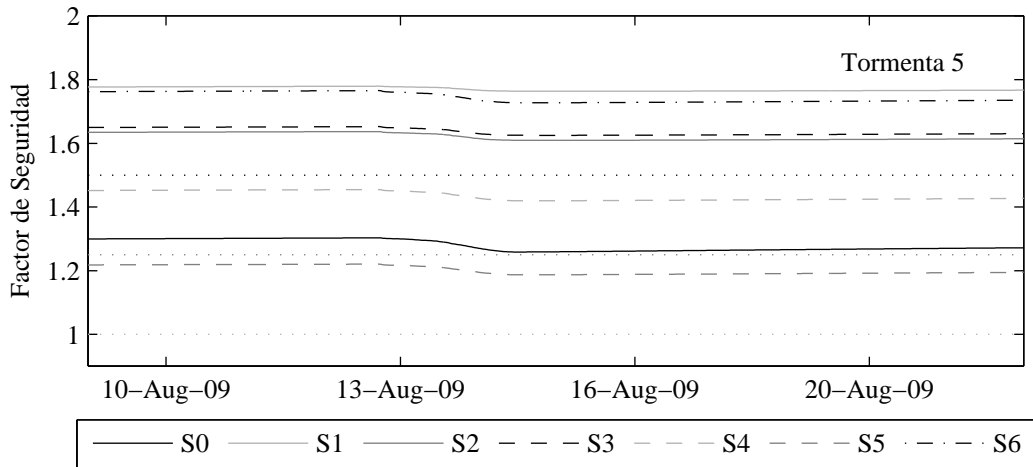
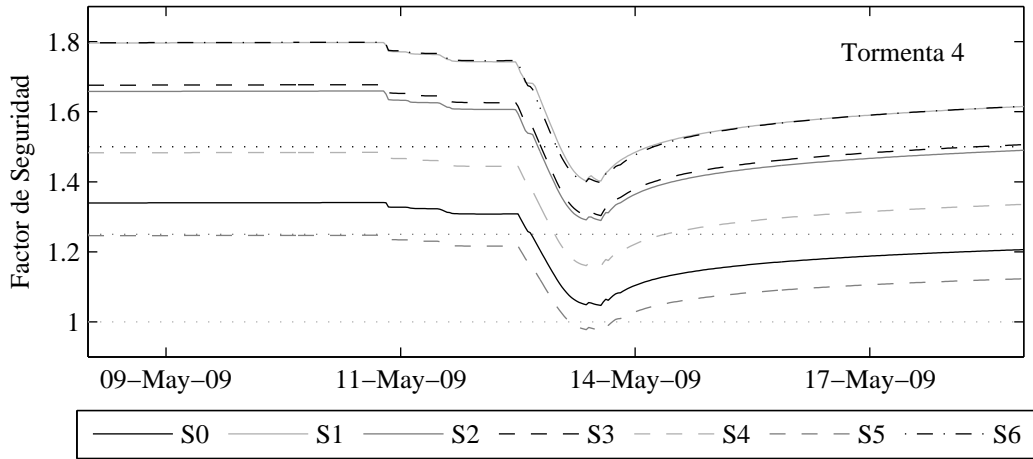


Figura 2.5: Factor de seguridad en tormentas 4, 5 y 6

## 2.2. Pronóstico meteorológico

Una de las variables de entrada del modelo de pronóstico de aluviones es el pronóstico meteorológico, incluyendo precipitaciones, temperatura y humedad relativa. Sin embargo, las predicciones numéricas del tiempo y clima son inciertas, debido a que tanto el pronóstico de las condiciones iniciales como el modelo computacional que representa la realidad son inciertos (Palmer *et al.*, 2005). Además, la atmósfera es un sistema dinámico, lo que la hace difícil de predecir (Morss *et al.*, 2008). Es por esto que algunos expertos recomiendan asociar una probabilidad al pronóstico, como por ejemplo lo expuesto por AMS (2002).

Gracias a los avances logrados en los sistemas de observación global, a la investigación realizada tanto en el análisis como en la modelación y al incremento de la capacidad de los sistemas computacionales utilizados para la operación, los modelos globales de pronóstico climático, de base numérica son cada vez mejores (Kalnay *et al.*, 1990).

El *Global Forecast System* (GFS), desarrollado por el *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), es un modelo numérico de predicción meteorológica. Este modelo presenta un pronóstico para un alcance máximo de 16 días, dividiéndose en dos según su alcance temporal y su confiabilidad. Un primer pronóstico se realiza para una semana desde la fecha de la simulación, y el segundo alcanza los 16 días. La resolución horizontal del modelo va de los 35 a los 70 kilómetros por celda, mientras que en la vertical existen 64 capas. El modelo incluye fenómenos difusivos, convectivos y radiativos, la fracción nubosa, del ciclo hidrológico y características de la superficie (Environmental Modeling Center, 2003). El modelo GFS está compuesto por 4 modelos independientes, un modelo atmosférico, uno oceánico, uno de suelo/tierra y uno de zonas de hielo, los cuales trabajan juntos para entregar una imagen mejorada de las condiciones climáticas (National Climatic Data Center, 2014). Un ejemplo de lo anterior se presenta en la Figura 2.6, la cual muestra un pronóstico de temperatura para el 17 de diciembre de 2009.

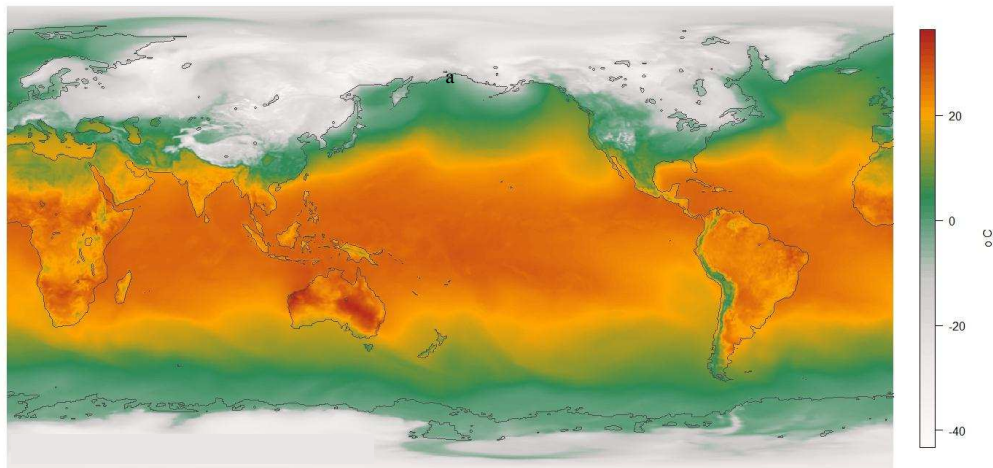


Figura 2.6: Pronóstico de temperatura a 24hr del GFS, para el 17 de diciembre de 2009, 17:00 UTC, según los datos de [www.ncep.noaa.gov](http://www.ncep.noaa.gov) (Biospherica Earth Vegetation, 2009)



## 2.3. Toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre

El proceso de toma de decisiones se dificulta debido al alto grado de incertidumbre y al riesgo asociado (Lindley & Bernardo, 1977). El riesgo está definido como la probabilidad y severidad de consecuencias adversas de un evento (Hobbs, n.d.). La incertidumbre puede estar asociada a diferentes fuentes:

- Incertidumbre asociada al comportamiento aleatorio del sistema natural, por ejemplo, en las componentes del proceso hidrológico.
- Incertidumbre en la modelo, debido a las dificultades de simular mediante un modelo el proceso natural.
- Incertidumbre en los parámetros.
- Incertidumbre en los datos recolectados.
- Incertidumbre en la operación de los sistemas.

La definición de las probabilidades asociadas a cada evento es una de las mayores complejidades de la utilización de un sistema de soporte de decisiones, y en particular de un árbol de decisión. Qi & Altinakar (2011) desarrollan una metodología que permite estimar los costos asociados a la pérdidas de vidas humanas y a los daños materiales. En conjunto con esto se pueden estimar los daños económicos causados por detener el funcionamiento de una fábrica o el normal desarrollo de una ciudad, frente a una alarma que podría no cumplirse.

Las probabilidades pueden definirse entonces como una medida numérica de la incertidumbre, y existen diversas leyes que las gobiernan (Lindley & Bernardo, 1977). En primer lugar se tiene el Teorema de Bayes, fundamental para determinar el valor de la información disponible frente a una situación de incertidumbre, y se define según se indica a continuación.

**Teorema 2.1** *Teorema de Bayes: Sean  $A_1, A_2, \dots, A_n$  un conjunto de sucesos mutuamente excluyentes y exhaustivos, y tales que la probabilidad de cada uno de ellos es distinta de cero ( $0$ ). Sea  $B$  un suceso cualquiera del que se conocen las probabilidades condicionales  $P(B/A_i)$ . Entonces, la probabilidad  $P(A_i/B)$  viene dada por la expresión:*

$$P(A_i/B) = \frac{P(B/A_i)P(A_i)}{P(B)}$$

En segundo lugar está la Tercera Ley de Probabilidades, que permite determinar la probabilidad de un suceso a partir de la probabilidad condicional de este frente a otro o a un grupo de ellos, que representen una partición total del espacio.

**Teorema 2.2** *Tercera Ley de Probabilidad: Sean  $A_1, A_2, \dots, A_n$  una partición sobre el espacio muestral y  $B$  un suceso cualquiera del que se conocen las probabilidades condicionales  $P(B|A_i)$ , entonces la probabilidad del suceso  $B$  viene dada por la expresión:*

$$P(B) = \sum_{i=1}^n P(B|A_i) * P(A_i)$$

Es posible considerar la incertidumbre utilizando métodos de muestreo que permiten analizar distintos escenarios por medio de simulaciones. La simulación es el proceso de replicar el mundo real en base a una serie de supuestos y modelos concebidos de la realidad. Este método puede ser de gran utilidad cuando los registros de datos observados son escasos, pues una serie resultante de la simulación será similar a una muestra de la observación experimental. Cuando los problemas involucran variables aleatorias con una distribución de probabilidades conocida, utilizar una simulación de Monte Carlo es necesario. Esto corresponde a repetir el proceso de simulación  $m$  veces, utilizando para cada una de ellas una serie de valores de las variables aleatorias obtenidas de acuerdo a las distribuciones de probabilidades. Al repetir el proceso se obtiene una muestra de  $m$  soluciones, cada una asociada a una serie de parámetros, las cuales, debido a sus características, pueden ser tratadas de manera estadística. El tamaño de las muestras dependerán de la precisión buscada, así como de los recursos disponibles (Alfredo & Wilson, 1984).

Existen formas de mejorar esta técnica de simulación, mejorando los métodos de muestreo. Mientras que el método original propone obtener muestras aleatorias de los parámetros base considerando la distribución de probabilidades asociadas, otros métodos, como el denominado hipercubo latino, utilizan un muestreo estratificado. Esto quiere decir que para generar  $m$  muestras utilizando el método del hipercubo latino, cada distribución será dividida en  $m$  intervalos equiprobables, obteniendo luego un valor aleatorio desde cada uno de dichos intervalos. Esto produce una muestra de  $m$  valores para cada distribución que estará más uniformemente repartida en todo el dominio que un muestreo aleatorio tradicional. La técnica del hipercubo latino hace el muestreo de probabilidades más homogéneo, por lo que cada muestra representa de mejor manera el promedio, la varianza y otros parámetros de la distribución, comparado a los resultados obtenidos en un muestreo no estratificado (Morgan & Small, 1992).

Un sistema de soporte de decisiones permite integrar el fenómeno de la incertidumbre al proceso de toma de decisiones. Uno de los más sencillos corresponde a un árbol de decisión. Un típico árbol de decisión consiste en una serie de ramas que parten desde dos tipos de nodos, de decisión o de incertidumbre. Cada rama tiene una denominación; las que parten de un nodo de decisión tienen el nombre de las distintas decisiones posibles; las que parten de uno de incertidumbre, los de los correspondientes sucesos. Por lo tanto, esta metodología permite determinar el valor y/o consecuencias de los distintos escenarios, a los cuales se les asocia una distinta probabilidad de ocurrencia (Beim & Hobbs, 1997).

Los elementos de un árbol de decisiones están clasificados, según Beim & Hobbs (1997), en:

- Descripción de las condiciones antecedentes de los estados del sistema.

- Eventos iniciales, que desencadenarán una serie de otros eventos y posibles fallas del sistema.
- Eventos intermedios, que siguen al evento inicial pero que no representan aún las fallas del sistema.
- Acciones de recuperación, que representan las alternativas para prevenir o mitigar los daños provocados por la falla del sistema.
- Eventos terminales, que representan las distintas formas o grados de severidad de la falla del sistema.

Mayores antecedentes respecto a la estructura y comportamiento de los árbol de de decisión se encuentran en Beim & Hobbs (1997).

Rosqvist *et al.* (2013) muestra la utilidad de utilizar un árbol de decisiones frente al riesgo de crecidas del río Kokemäki, en Finlandia. Para ello analizan el comportamiento del sistema frente a los efectos del cambio climático y los distintos escenarios que se tendrían en el caso de éxito o fallo de los distintos niveles de protección, los cuales incluyen medidas estructurales y acciones de protección y rescate. El estudio concluye que las fortalezas asociadas a utilizar el árbol de decisiones están dadas por la capacidad de incluir los impactos y riesgos, así como de asistir en el manejo de las emergencias, pero quedan a su vez desafíos pendientes como la necesidad de contar con el personal capacitado y la vulnerabilidad de un sistema en continua evolución.

# Capítulo 3

## Metodología

### 3.1. Caracterización de la Zona de Estudio

En base al Estudio de disponibilidad de recursos hídricos y evaluación de riesgo hídrico, División El Teniente, realizado por Mendoza & McPhee (2011), se detallan a continuación las principales características de la zona de estudio, con foco en aquellas que serán más importantes para este trabajo.

La zona de interés se ubica en la sección nororiente de la cuenca del río Rapel y corresponde específicamente a la parte alta de los ríos Coya y Blanco, según se muestra en la Figura 3.1.



Figura 3.1: Área de Interés en la cuenca del río Rapel (Mendoza & McPhee, 2011)

Debido a sus características topográficas, esta zona presenta un riesgo de ocurrencia de flujos detríticos, lo cual se ve reflejado en los registros de eventos en los años 1993 y 2009. Además, existen en ella zonas de alta actividad minera, cuya infraestructura se vio dañada por dichos eventos (GOLDER, 2009).

El estudio de riesgo de aluviones de Mendoza & McPhee (2011), se centró en una cuenca piloto, elegida según parámetros de accesibilidad y disponibilidad. Para ello se llevaron a cabo una serie de visitas a terreno que permitieron la elección de la cuenca escogida. La ubicación de dicha cuenca se muestra en la Figura 3.2

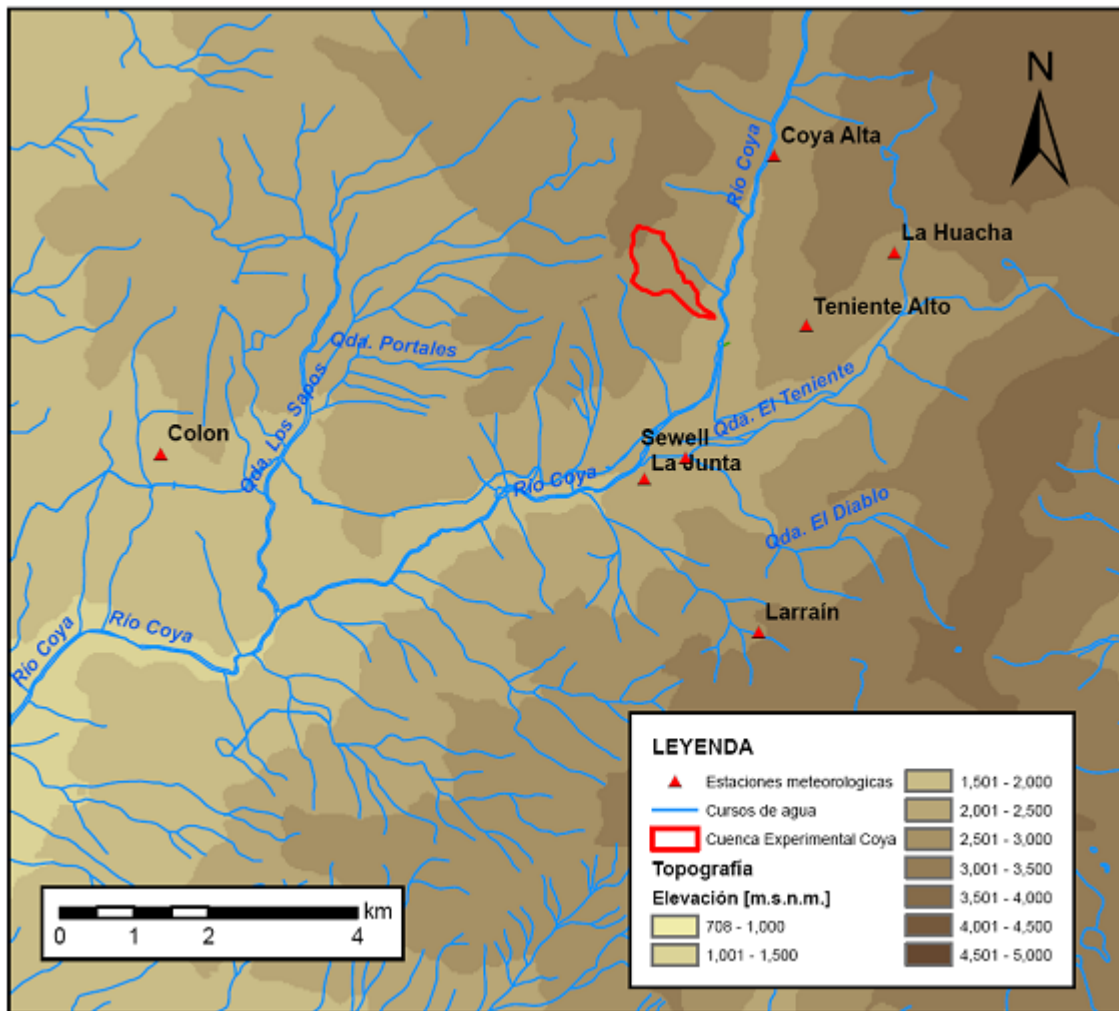


Figura 3.2: Ubicación de la cuenca experimental Coya 1, escogida para el estudio de riesgo de aluviones (Mendoza & McPhee, 2011)

### 3.1.1. Topografía

La información topográfica se obtiene a partir de un modelo de elevación digital (DEM), el cual contiene información para celdas cuadradas de dos metros. A partir de dicha información y utilizando el software TauDEM, bajo la plataforma de ArcGIS, se traza la red hidrográfica digital y se calculan las propiedades de cada cauce y subcuenca.

Dada la necesidad de generar un número razonable de unidades para la modelación (no superior a 10 debido al tamaño de la cuenca) se opta por seleccionar aquellos cauces con orden topológico de Strahler igual a 1. La división realizada se presenta en la Figura 3.3.

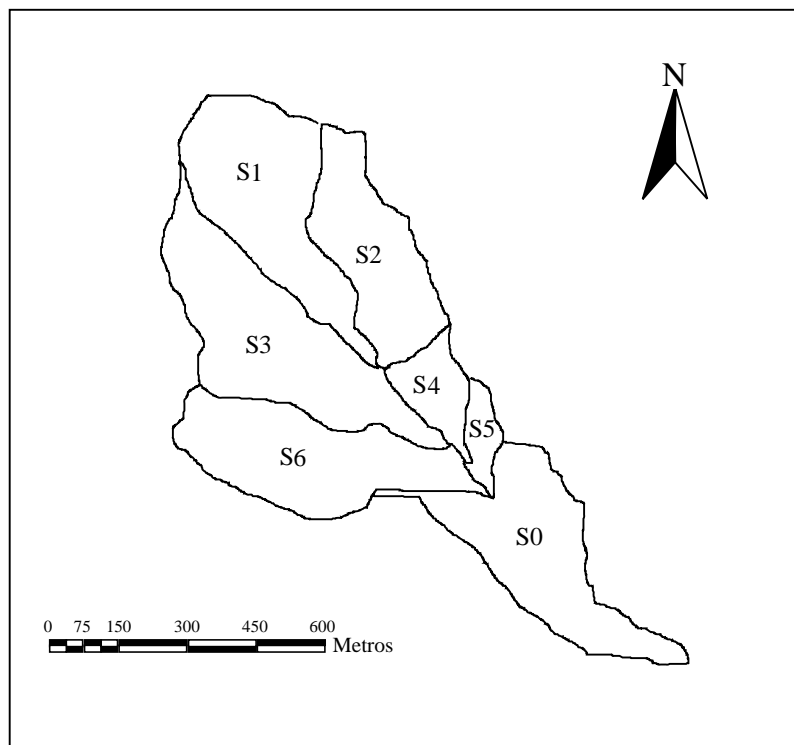


Figura 3.3: Trazado de subcuencas a partir de cauces con clasificación topológica de Strahler igual a 1 (Mendoza & McPhee, 2011)

Entre los parámetros obtenidos en el estudio se destacan los siguientes:

- Código identificador: cada cauce debe tener asociado un código de 8 dígitos
- Índice: número entero que va desde 0 hasta  $n_{rch} - 1$ , donde  $n_{rch}$  es el número total de cauces delineados
- Longitud del cauce
- Pendiente media del cauce
- Pendiente media de la respectiva subcuenca
- Orden según clasificación topológica de Strahler
- Área aportante al punto de salida del tramo
- Elevación media de la subcuenca asociada
- Área de la subcuenca
- Coordenadas geográficas y UTM del centro de gravedad de la subcuenca
- Elevación de los puntos de entrada y salida de la subcuenca
- Coordenadas geográficas y UTM de los puntos de entrada y salida
- Código identificador e índice del cauce ubicado aguas abajo del punto de salida de la subcuenca

- Código identificador e índice de los cauces ubicados aguas arriba del punto de entrada de la subcuenca

Además se determinan la elevación, el índice topográfico y la distancia al cauce más cercano, junto a sus correspondientes distribuciones de probabilidad, de acuerdo a lo requerido por el software TopNet que es utilizado en la modelación hidrológica. Se incluye en la Figura 3.4 el detalle del índice topográfico pues será uno de los parámetros a analizar más adelante. El índice topográfico en un punto se calcula como  $\ln(a/\tan(b))$ , donde  $a$  es el área de drenaje hacia ese punto de la cuenca y  $b$  es la pendiente del terreno, y corresponde a una indicación de la susceptibilidad de ciertos puntos de la cuenca a saturarse completamente (Buytaert *et al.*, 2013)

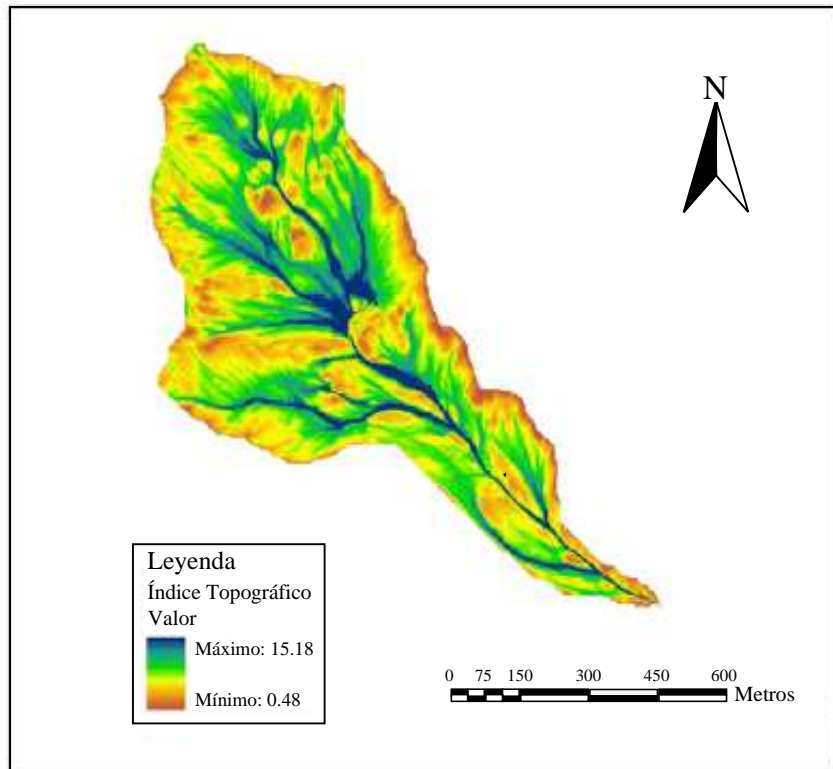


Figura 3.4: Distribución de valores del índice topográfico, cuenca experimental Coya 1 (Mendoza & McPhee, 2011)

### 3.1.2. Cobertura vegetal y suelos

Los parámetros de modelación asociados a la vegetación se obtienen utilizando imágenes satelitales proporcionadas por el software Google Earth. De esta forma se concluyó que el tipo de cobertura para toda la cuenca es de suelo desnudo. En la Tabla 3.1 se muestran los valores propuestos por Bandaragoda *et al.* (2004) para los parámetros capacidad de almacenamiento ( $C_c$ ), factor de corrección de la evapotranspiración ( $c_r$ ) y albedo ( $\alpha$ ).

Por su parte, la velocidad de escurrimiento es parametrizada para cada subcuenca, según

se indica en la ecuación 3.1, donde  $S$  es la pendiente del terreno en % y  $a$  es un parámetro que depende del tipo de cubierta, el cual para este caso es 0.305.

$$v = a\sqrt{S} \quad (3.1)$$

Tabla 3.1: Parámetros de vegetación para cobertura del tipo suelo desnudo (adaptado de Bandaragoda *et al.* (2004)

Tipo de cobertura	$C_c$ [m]	$c_r$	$\alpha$
Suelo desnudo	0.0010	1.00	0.30

El resto de información de suelo es extraída de un informe de APR (2008) y se resume en las Tablas 3.2 y 3.3. El suelo corresponde a material granular tipo grava areno limosa y arcillosa.

Tabla 3.2: Parámetros asociados a material granular tipo grava areno limosa y arcillosa o "derrame de cerro"(APR, 2008)

Símbolo	Parámetro	Unidad	Valor
$\phi$	Ángulo de fricción interna	°	40
$c$	Cohesión (por trabazón)	$kg/cm^2$	0.05
$\gamma_n$	Peso unitario húmedo	$t/m^3$	2.25
$w_{nat}$	Humedad natural	%	12
$\gamma_\sigma$	Peso unitario seco	$t/m^3$	2.01
$w_{sat}$	Humedad de saturación	%	13
$\gamma_{sat}$	Peso unitario saturado	$t/m^3$	2.27
G	Peso específico	-	2.72
$k_a$	Coficiente de empuje activo	-	0.22
$k_p$	Coficiente de empuje pasivo	-	4.6
$k_o$	Coficiente de empuje en reposo	-	0.36
K	Coficiente de balasto	$kgf/cm^3$	12

Debido a la falta de datos respecto al espesor de la columna de suelo D, se designó el mismo valor  $D = 4,6[m]$ , a partir de resultados previos.

Finalmente, el número de Manning y el ancho del cauce se estimaron a partir de mediciones realizadas en terreno.



Tabla 3.3: Parámetros de suelo obtenidos, utilizados en el modelo hidrológico (Mendoza & McPhee, 2011)

Símbolo	Parámetro	Unidad	Valor
$\theta_{fc}$	Capacidad de campo	%	11.9
$\theta_{wp}$	Punto de marchitez permanente	%	6.5
$\Delta\theta_1 = \theta_{dr}$	Humedad del suelo drenable por gravedad	%	1.1
$\Delta\theta_2 = \theta_{pa}$	Contenido de humedad aprovechable por las plantas	%	5.5
$\Phi_f$	Tensión de succión	m	0.3
$K_s$	Conductividad hidráulica saturada	$ms^{-1}$	0.01
$z_r$	Profundidad del suelo	m	0.01
c	Exponente de la función de percolación	-	4
$n = \theta_{sat}$	Humedad de saturación	%	13
f	Parámetro f de TOPMODEL	$m^{-1}$	12

### 3.1.3. Datos hidrometeorológicos

Los datos utilizados en el modelo original corresponden a registros de dos estaciones, Teniente Alto y Sewell, cuyas coordenadas se indican en la Tabla 3.4. El registro incluye datos de precipitaciones, temperatura y humedad relativa a intervalos de 30 minutos entre los años 2007 y 2010.

Tabla 3.4: Coordenadas estaciones meteorológicas, WGS84, huso 19 (Mendoza & McPhee (2011))

Nombre estación	Norte [m]	Este [m]	Elevación [m.s.n.m.]
Teniente Alto	374.309	6.229.463	2.992
Sewell	372.688	6.227.687	2.201

Junto a lo anterior, el presente trabajo utiliza datos de pronóstico meteorológico para las tres variables, obtenidos a partir del software Global Forecast System (GFS), adaptado para la zona de estudio, para el periodo agosto 2009 - marzo 2015 en el caso de las precipitaciones y agosto 2009 - diciembre 2013 en el caso de la temperatura y la humedad relativa. Se destaca además que el modelo utilizado no diferencia entre ambas estaciones para el caso del pronóstico de precipitaciones, sino que entrega un pronóstico global de la zona.

## 3.2. Árbol de Decisiones

Los modelos más simples de pronóstico de aluviones basan sus resultados en un análisis directo del pronóstico meteorológico y anuncian un evento dados ciertos parámetros, como

un mínimo de precipitaciones o una altura característica de la línea de nieves. Por otra parte, existen modelos más complejos que incluyen, además del uso del pronóstico meteorológico, un análisis de la estabilidad del suelo. Este es el caso del modelo utilizado en el presente trabajo.

Con el objetivo apoyar en la decisión de paralizar la faena minera frente a un pronóstico de aluvión, y a su vez de determinar el valor de la información entregada por el modelo de pronóstico de aluviones, al compararla con aquella entregada por un modelo simple de pronóstico, se ha construido un árbol de decisiones, cuya estructura se detalla en la Figura 3.5. Este árbol incluye una serie de nodos de decisión y nodos de incertidumbre de ocurrencia de los distintos escenarios.

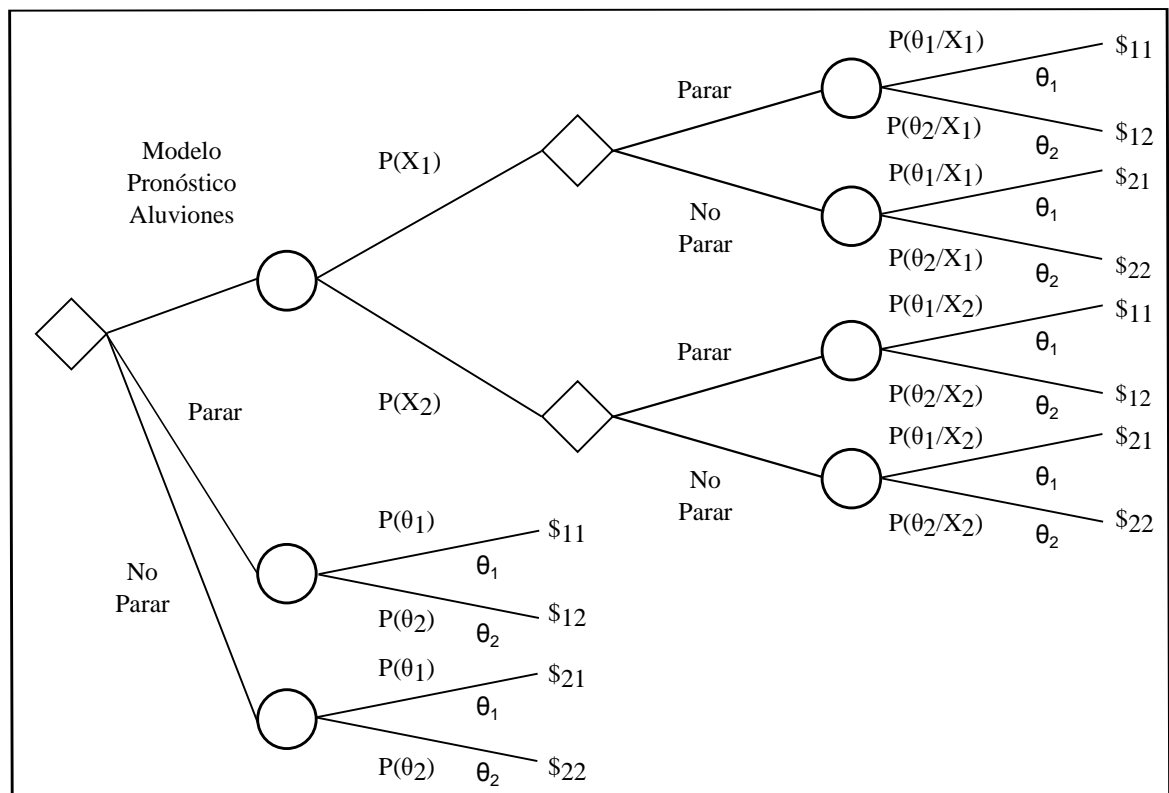


Figura 3.5: Esquema del árbol de decisiones

El primer nodo representa la decisión de utilizar la información entregada por el modelo hidrometeorológico, de continuar con la operación normal de la faena o de detenerla. Siguiendo la rama inferior, la decisión de no parar es tomada directamente por el operador, basándose en las características del pronóstico meteorológico de las tormentas analizadas, fundamentalmente en si la altura de la isoterma cero sobrepasa un determinado umbral. A continuación se tiene un nodo de probabilidad que simboliza la ocurrencia o no ocurrencia del aluvión, estados y probabilidades que están dadas por:

- $\theta_1, P(\theta_1)$ : Se produce un aluvión.
- $\theta_2, P(\theta_2)$ : No se produce un aluvión.

Al tomar la rama central, la decisión tomada por el operador es parar la faena. La rama continúa hacia nodos de probabilidad que representan la ocurrencia del evento, los cuales son exactamente iguales a los del caso anterior.

Siguiendo la rama superior, es decir, utilizando la información entregada por el modelo, el nodo de probabilidad presenta como opciones que el modelo pronostique el aluvión o que no lo haga. Los resultados del modelo y las probabilidades asociadas están simbolizados por:

- $X_1, P(X_1)$ : El modelo hidrometeorológico pronostica un aluvión.
- $X_2, P(X_2)$ : El modelo hidrometeorológico no pronostica un aluvión.

Una vez conocida la respuesta entregada por el modelo, la cual indica que ocurre o no ocurre el aluvión, el usuario debe elegir si parar o no parar la faena, lo cual se simboliza por los nuevos nodos de decisión. Finalmente queda el estado real de la naturaleza y la probabilidad asociada a él, que en este caso, a diferencia de lo que ocurre en las ramas inferiores, depende igualmente del resultado entregado por el modelo, quedando las probabilidades dadas por:

- $P(\theta_1/X_1)$ : El aluvión ocurre, dado que el modelo lo pronostica.
- $P(\theta_2/X_1)$ : El aluvión ocurre, dado que el modelo no lo pronostica.
- $P(\theta_1/X_2)$ : El aluvión no ocurre, dado que el modelo lo pronostica.
- $P(\theta_2/X_2)$ : El aluvión no ocurre, dado que el modelo no lo pronostica.

Cada rama del árbol finaliza en un costo, los cuales serán detallados en la Sección 3.4.

### 3.2.1. Probabilidades asociadas al estado de la naturaleza

Determinar las probabilidades asociadas al estado de la naturaleza requiere analizar el conjunto de resultados obtenidos, sin considerar los resultados entregados por modelo. Estas probabilidades se determinarán de forma simple, utilizando las ecuaciones 3.2 y 3.3.

$$P(\theta_1) = \frac{N^{\circ}CasosAluvión}{N^{\circ}CasosTotales} \quad (3.2)$$

$$P(\theta_2) = \frac{N^{\circ}CasosNoAluvión}{N^{\circ}CasosTotales} \quad (3.3)$$

Diferentes opciones para la temperatura umbral pueden ser consideradas para determinar la influencia de esta variable en la decisión final. Esto se ve reflejado directamente en  $P(\theta_1)$  y  $P(\theta_2)$ , pues supondrá que mientras mayor sea la altura de la línea de nieves, mayor será la probabilidad de ocurrencia del evento. Dado que el análisis sólo considera seis tormentas y en sólo dos casos la ocurrencia de un aluvión, un estudio posterior y más acabado es fuertemente recomendado en esta materia. Este estudio debería buscar establecer una relación

de probabilidad entre la altura de la línea de nieve, u otras variables meteorológicas, y la ocurrencia de aluviones, mediante el análisis de un número mayor de eventos. Establecer distintos valores umbrales para la línea de nieves según los cuales será más o menos probable la ocurrencia de un aluvión.

### 3.2.2. Probabilidades asociadas a los resultados del modelo

Determinar las probabilidades asociadas a los resultados del modelo implica determinar, dado un conjunto de resultados, todos aquellos en los cuales se obtiene el verdadero estado del sistema y aquellos en los que no.

En primer lugar se analizará el caso en que el modelo pronostique un aluvión. Dicha probabilidad se estimará utilizando el Teorema 2.2. De esta forma, y considerando que sólo existen dos posibles estados para el sistema, que ocurra o no el evento, la probabilidad de que el sistema pronostique un aluvión esta dada por:

$$P(X_1) = P(X_1/\theta_1)P(\theta_1) + P(X_1/\theta_2)P(\theta_2) \quad (3.4)$$

donde:

$P(X_1/\theta_1)$ : Probabilidad de que el modelo pronostique correctamente el aluvión.

$P(X_1/\theta_2)$ : Probabilidad de que el modelo entregue una falsa alarma.

Esta última probabilidad se puede obtener de:

$$P(X_1/\theta_2) = 1 - P(X_2/\theta_2) \quad (3.5)$$

Dados los resultados del modelo, se analizan los eventos 2 y 4, que corresponden a aquellos en los cuales el modelo pronosticó correctamente el aluvión para estimar la probabilidad  $P(X_1/\theta_1)$ .

Por otra parte, la probabilidad de que el sistema pronostique correctamente la no ocurrencia del aluvión está dada por:

$$P(X_2) = P(X_2/\theta_1)P(\theta_1) + P(X_2/\theta_2)P(\theta_2) \quad (3.6)$$

donde:

$P(X_2/\theta_2)$ : Probabilidad de que el modelo pronostique correctamente la no ocurrencia del aluvión.

$P(X_2/\theta_1)$ : Probabilidad de que el modelo falle al no pronosticar el aluvión y este si ocurra.

Esta última probabilidad se puede obtener de:

$$P(X_2/\theta_1) = 1 - P(X_1/\theta_1) \quad (3.7)$$

En este caso los eventos analizados son el 1 y el 5, para los cuales la respuesta del modelo de pronóstico de aluviones fue negativa, dado que no se produjo el aluvi3n. Adem3s, se considerarn los resultados de las tormentas 3 y 6 como se explicar3 m3s adelante.

Finalmente para estimar las probabilidades de los nodos finales del 3rbol de la rama superior se aplicar3 el Teorema 2.1, que corresponde al teorema de Bayes. De esta forma se obtienen las probabilidades seg3n se indica en las ecuaciones 3.8 a 3.11.

$$P(\theta_1/X_1) = \frac{P(X_1/\theta_1)P(\theta_1)}{P(X_1)} \quad (3.8)$$

$$P(\theta_2/X_1) = \frac{P(X_1/\theta_2)P(\theta_2)}{P(X_1)} \quad (3.9)$$

$$P(\theta_1/X_2) = \frac{P(X_2/\theta_1)P(\theta_1)}{P(X_2)} \quad (3.10)$$

$$P(\theta_2/X_2) = \frac{P(X_2/\theta_2)P(\theta_2)}{P(X_2)} \quad (3.11)$$

### 3.3. Fuentes de Incertidumbre y Muestreo

El modelo original de pron3stico de aluviones de Mendoza & McPhee (2011) trabaja con par3metros promedio al interior de cada subcuenca, as3 como con datos registrados para las variables meteorol3gicas, de acuerdo con la disponibilidad de informaci3n y la recolecci3n de datos hecha en terreno. En primer lugar, el c3lculo de la profundidad del nivel fre3tico se hace utilizando el programa Topnet, el cual requiere como variables de entrada los par3metros f3sicos de la cuenca y las variables meteorol3gicas. En segundo lugar, y utilizando el valor obtenido para dicha profundidad junto a caracter3sticas de la cuenca, se calcula el valor del factor de seguridad, utilizando el modelo de estabilidad de suelo. Es posible reconocer entonces m3ltiples fuentes de incertidumbre asociados a las distintas etapas del pron3stico del aluvi3n, entre ellas al pron3stico de variables meteorol3gicas y a los valores de pendiente, cohesi3n, 3ngulo de fricci3n interno y profundidad del suelo, entre otros par3metros f3sicos, para los cuales no se incluye la alta variabilidad que se puede presentar al interior de cada subcuenca.

De acuerdo a la disponibilidad de antecedentes se ha seleccionado para este estudio el an3lisis de dos fuentes de incertidumbre: la variaci3n de pendiente al interior de cada subcuenca y el pron3stico de precipitaciones, temperatura y humedad relativa. Dicho pron3stico se realiza a trav3s de un modelo, como se detallar3 a continuaci3n.

Se espera, de esta forma, determinar la influencia que tienen estas variables en el pron3stico del evento, al comparar los resultados reales con aquellos obtenidos de la modelaci3n. As3,

se estimarán las probabilidades mencionadas en el capítulo anterior, analizando los distintos casos, dado los diferentes escenarios seleccionados para las variables a estudiar.

### 3.3.1. Pendiente del terreno

La información disponible para la pendiente del terreno se obtuvo a partir de un modelo de elevación digital (DEM) de la hoya hidrográfica con celdas cuadradas de dos metros. A partir de ella se determinaron la pendiente media del cauce y de cada subcuenca, el índice topográfico en cada celda, un histograma de frecuencia y una función de frecuencia acumulada de dicha variable (Mendoza & McPhee, 2011).

La tabla 3.5 incluye los valores medios de pendiente ( $p$ ) por subcuenca, su desviación estándar y otros estadísticos de las series, mientras que las Figuras 3.6, 3.7 y 3.8 presentan la distribución de pendientes al interior de cada una de ellas, en forma de histogramas. Debido a que el tamaño de cada subcuenca es diferente, el número de píxeles con información varía para cada una de ellas.

Tabla 3.5: Estadísticos de series de pendientes en subcuencas

Subcuenca	$\bar{p}$ [%]	$\sigma_p$ [%]	mín <sub>p</sub> [%]	máx <sub>p</sub> [%]
0	67.8	2.7	23.8	177.4
1	49.4	4.4	2.4	154.3
2	53.9	4.3	1.8	162.5
3	53.2	4.0	3.6	135.1
4	61.4	4.7	6.1	195.6
5	73.0	4.7	18.4	171.1
6	49.7	3.7	5.6	110.0

La pendiente de cada subcuenca toma valores promedios iguales o superiores al 50 % para todos los casos. Debido a la forma que tiene el modelo de estabilidad de taludes, las fallas deberían tender a presentarse en aquellas subcuencas en las cuales la pendiente es mayor, mientras las otras variables sean constantes. Al analizar una a una las distribuciones de las Figuras 3.6 a la 3.8 es posible determinar que:

- La subcuenca cero es una de las cuales presenta la mayor pendiente promedio, con valores que van desde el 20 % al 180 %, concentrándose mayormente entre el 40 % y 90 %
- La subcuenca uno es aquella que presenta menor valor promedio y sus valores no sobrepasan el 160 %. El área cuya pendiente se concentra entre el 25 % y el 70 % corresponde a un 87 %
- La subcuenca dos es otra de aquellas con menor pendiente. El área cuya pendiente supera el 100 % es menor a un 4 %
- La subcuenca tres posee características similares a la pendiente dos, pero el valor máximo no supera el 140 %. En este caso, el área cuya pendiente supera el 100 % es menor

a un 2%

- La pendiente en ciertos puntos de la subcuenca cuatro alcanza los mayores valores (cerca de 200%) y es la tercera de mayor valor promedio. Sin embargo, al igual que en los dos casos anteriores, el porcentaje de la cuenca que presenta una pendiente superior al 100% no sobrepasa el 4%
- La pendiente promedio en la subcuenca cinco es la mayor de toda la cuenca, mientras que un 70% de ella tiene una pendiente entre el 50% y el 80%.
- La subcuenca seis presenta uno de los menores valores medios de pendiente, así como el menor valor para la pendiente máxima.

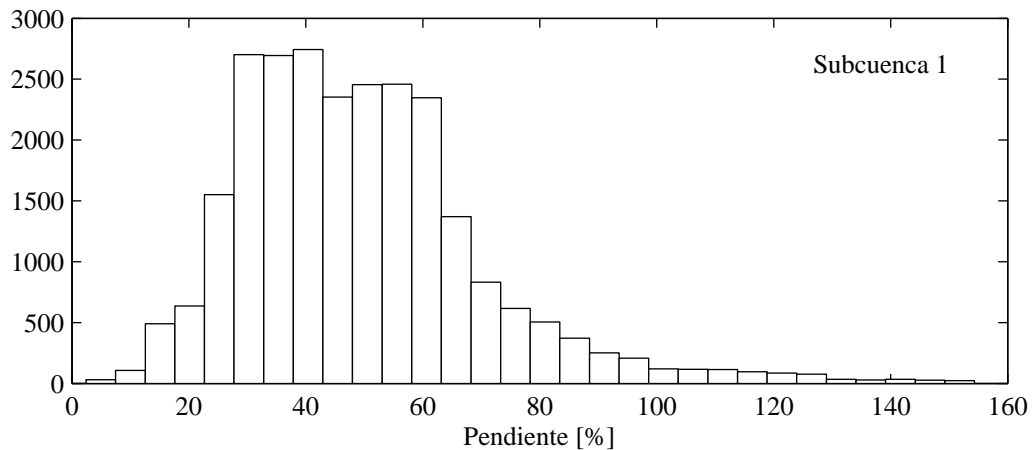
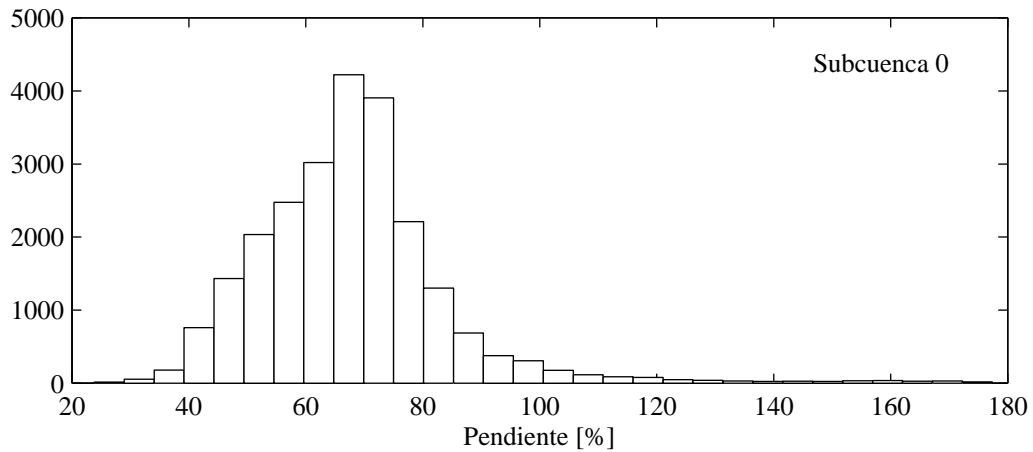


Figura 3.6: Histograma distribución pendientes, subcuencas 0 y 1

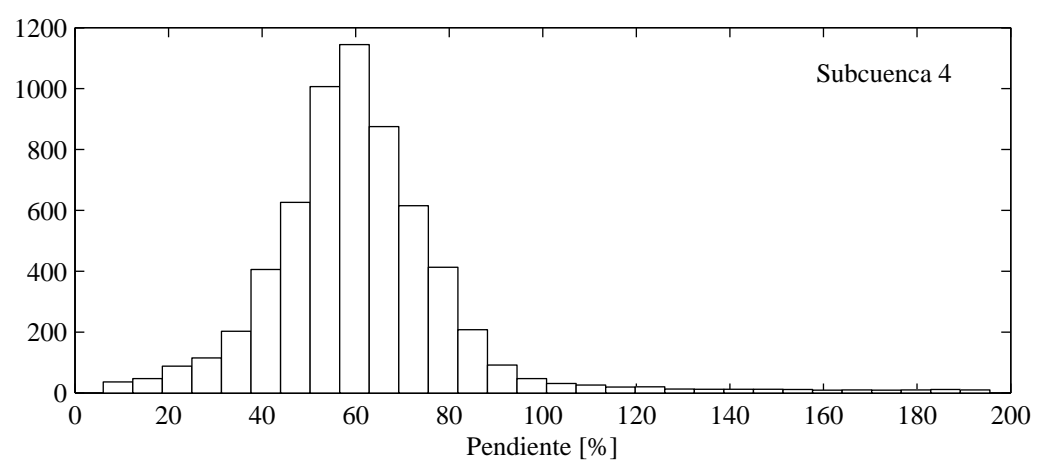
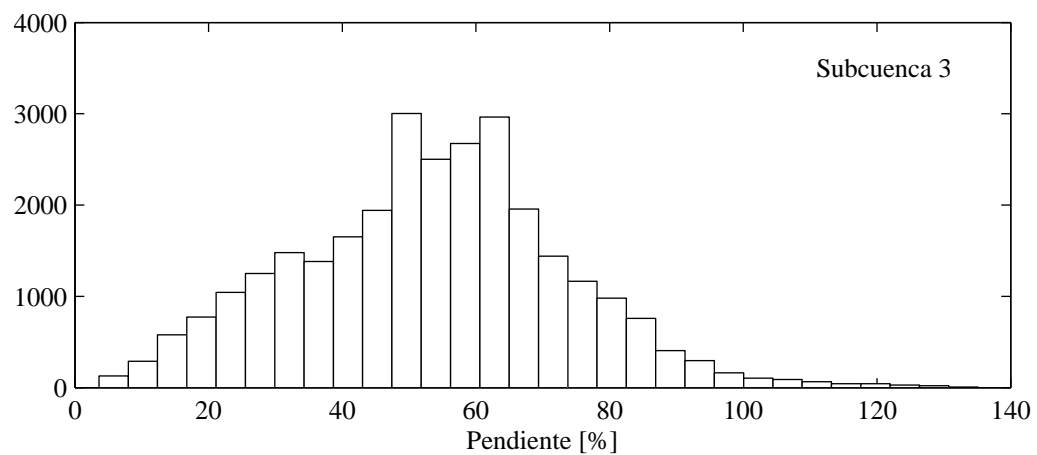
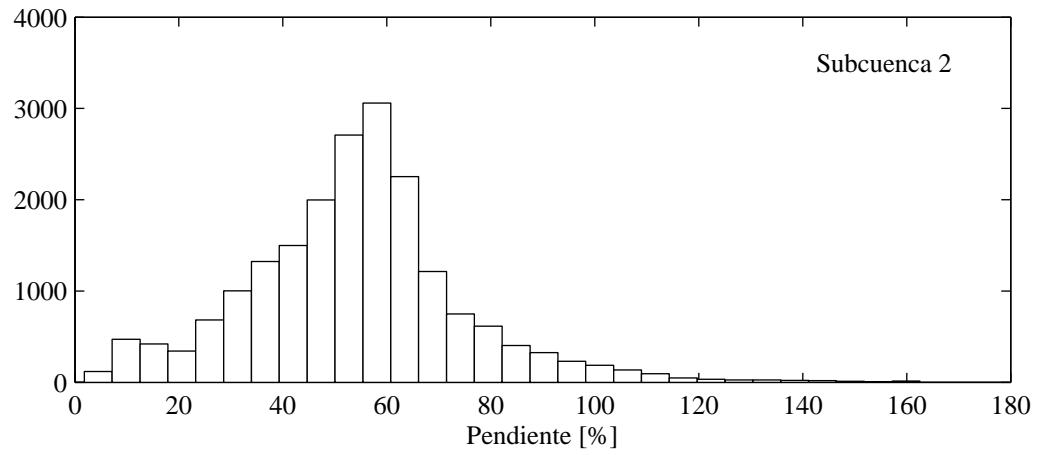


Figura 3.7: Histogramas distribución pendientes, subcuencas 2, 3 y 4



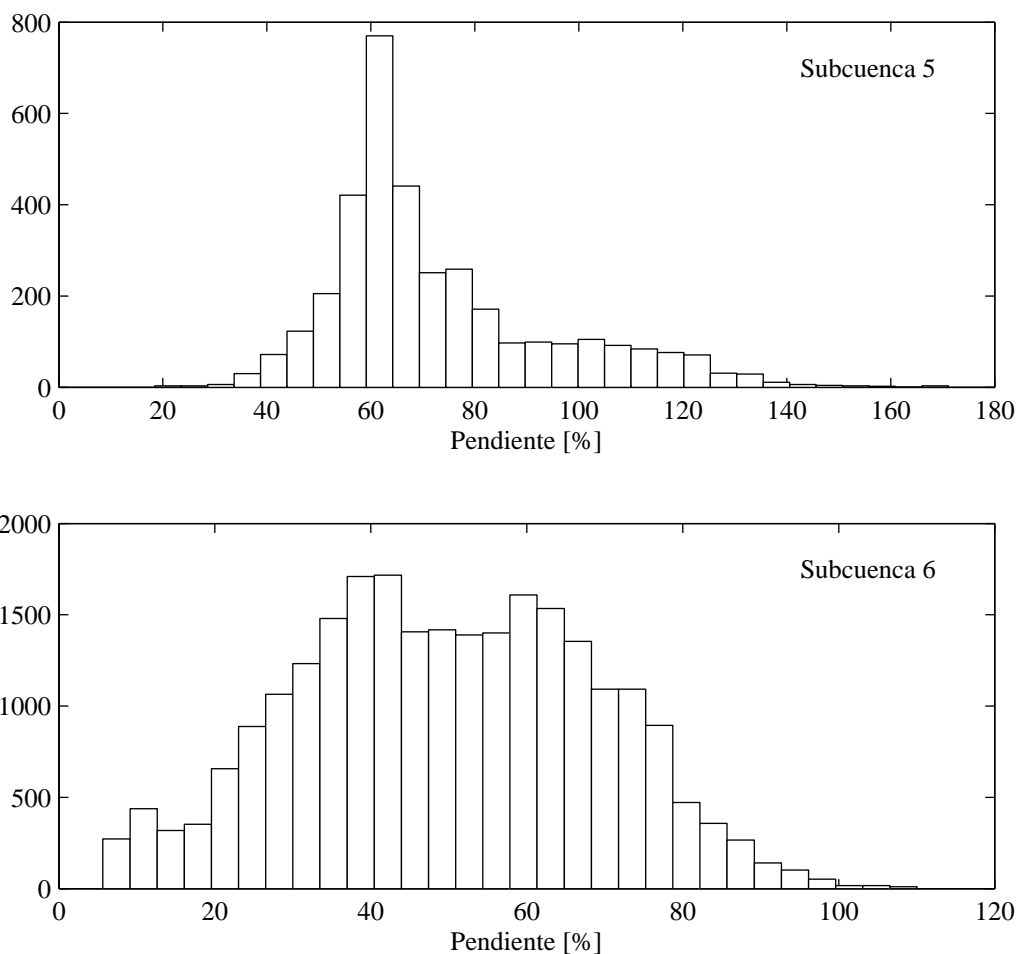


Figura 3.8: Histogramas distribución pendientes, subcuencas 5 y 6

El modelo hidrológico TopNet incorpora la variable pendiente de tres formas:

- Pendiente media del cauce
- Índice topográfico, incluyendo la distribución de frecuencia de esta variable
- Velocidad de almacenamiento superficial, u *overvel*, el cual se determina a través de la ecuación 3.1. El modelo original utiliza la pendiente media de cada subcuenca para dicho cálculo, lo cual es modificado para el presente estudio.

Por su parte, el modelo de estabilidad de suelo, de acuerdo a la ecuación 2.9, considera la pendiente media por subcuenca. Esto será igualmente modificado para el presente estudio, según la metodología que se explicará a continuación.

De forma de analizar el comportamiento probabilístico del modelo frente a la gran cantidad de datos disponibles (aproximadamente 130000 píxeles con información de pendiente), se utiliza el método de Montecarlo. Para ello es necesario ajustar a cada serie una densidad de probabilidades y una distribución de probabilidades acumulada, de manera de tener una

serie continua. Se realizan pruebas de bondad de ajuste para distintas distribuciones y se muestran, en las figuras 3.9 a la 3.15, aquellas que mejor se ajustan a las series de datos reales. Un detalle de las distribuciones utilizadas se incluye en el Anexo A.

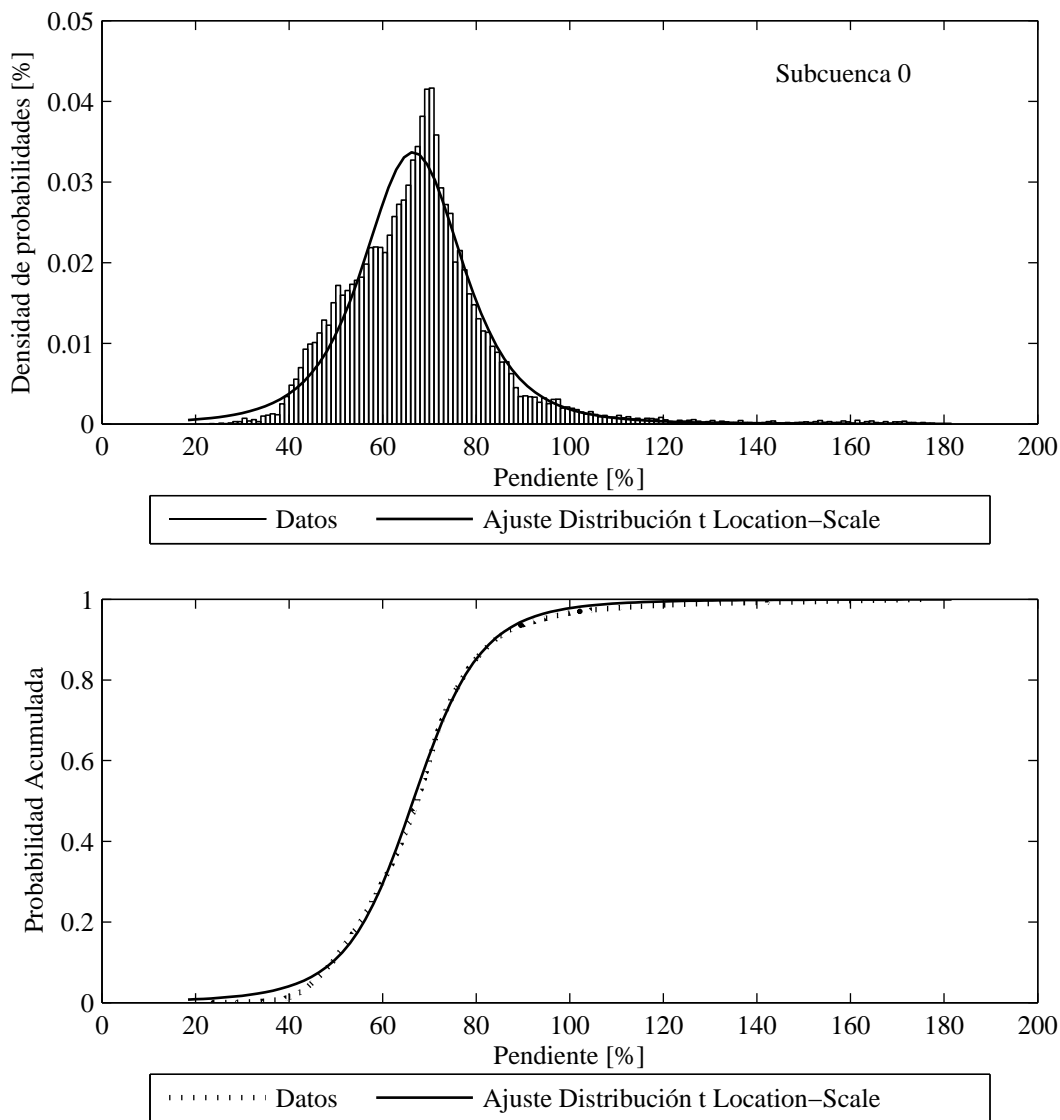


Figura 3.9: Ajuste densidad de probabilidades y función de distribución acumulada en subcuenca 0, correspondiente a una distribución t location-scale

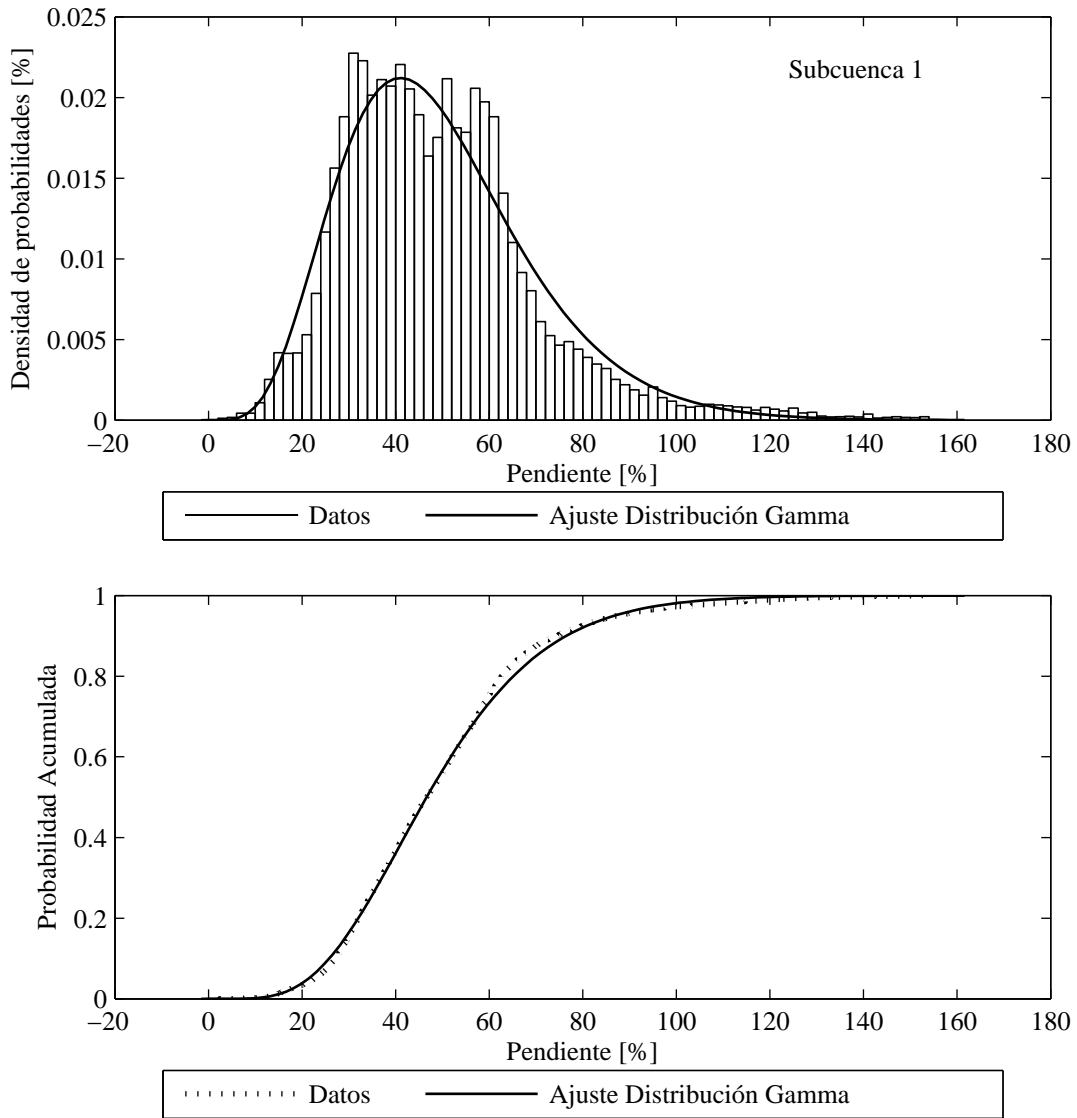


Figura 3.10: Ajuste densidad de probabilidades y función de distribución acumulada en subcuenca 1, correspondiente a una distribución gamma

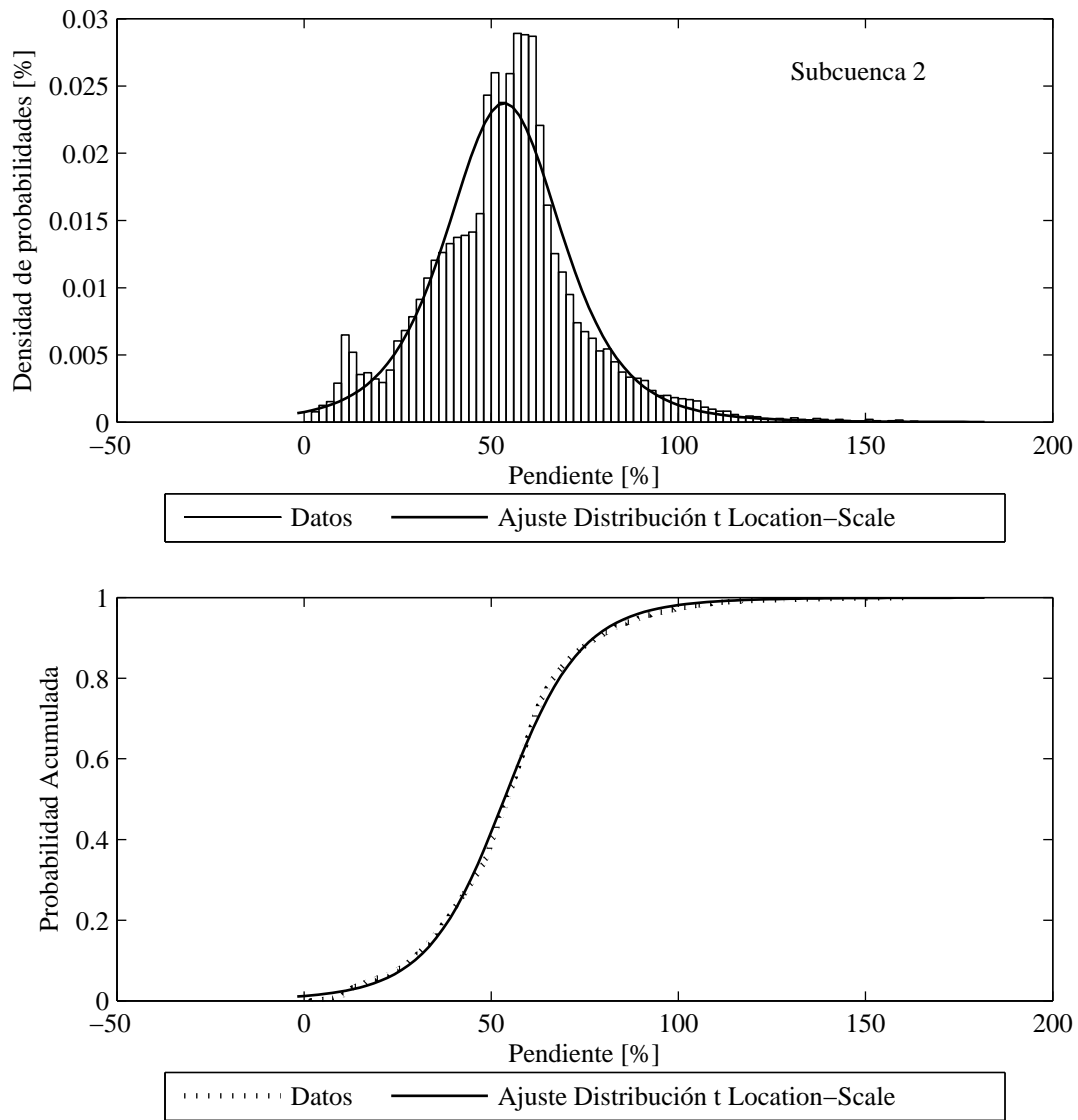


Figura 3.11: Ajuste densidad de probabilidades y función de distribución acumulada en subcuenca 2, correspondiente a una distribución t location-scale

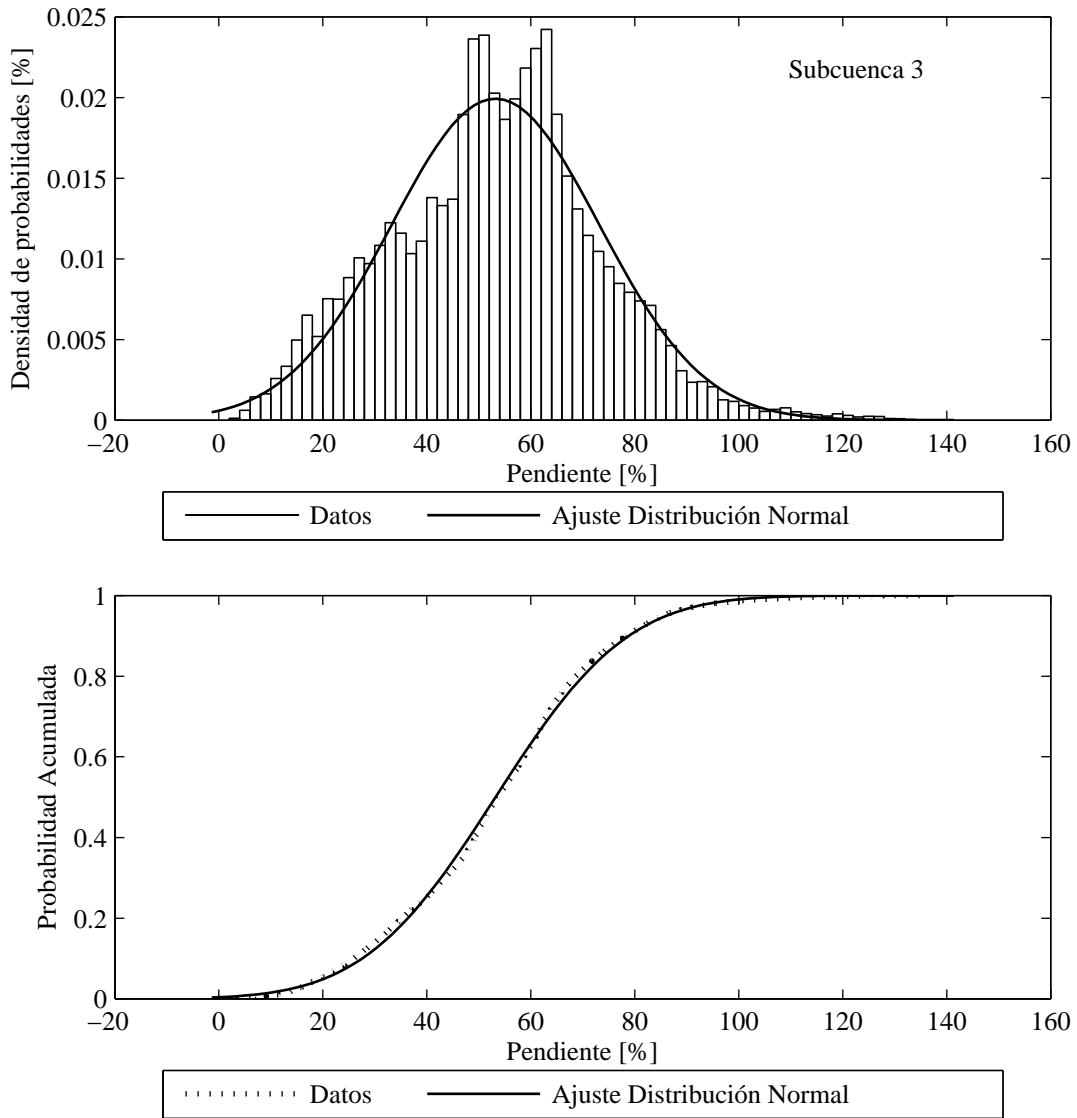


Figura 3.12: Ajuste densidad de probabilidades y función de distribución acumulada en subcuenca 3, correspondiente a una distribución normal

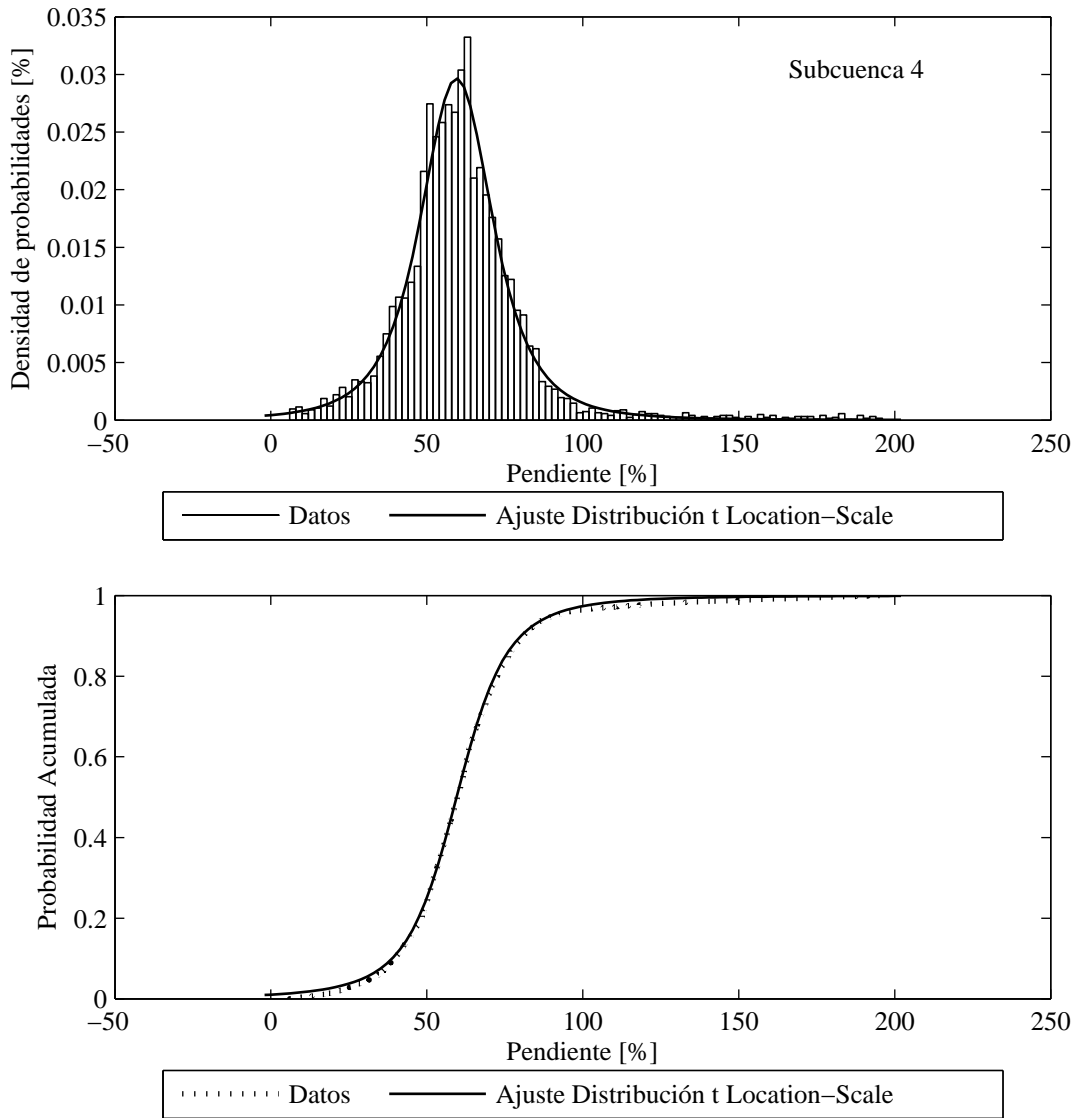


Figura 3.13: Ajuste densidad de probabilidades y función de distribución acumulada en subcuenca 4, correspondiente a una distribución t location-scale

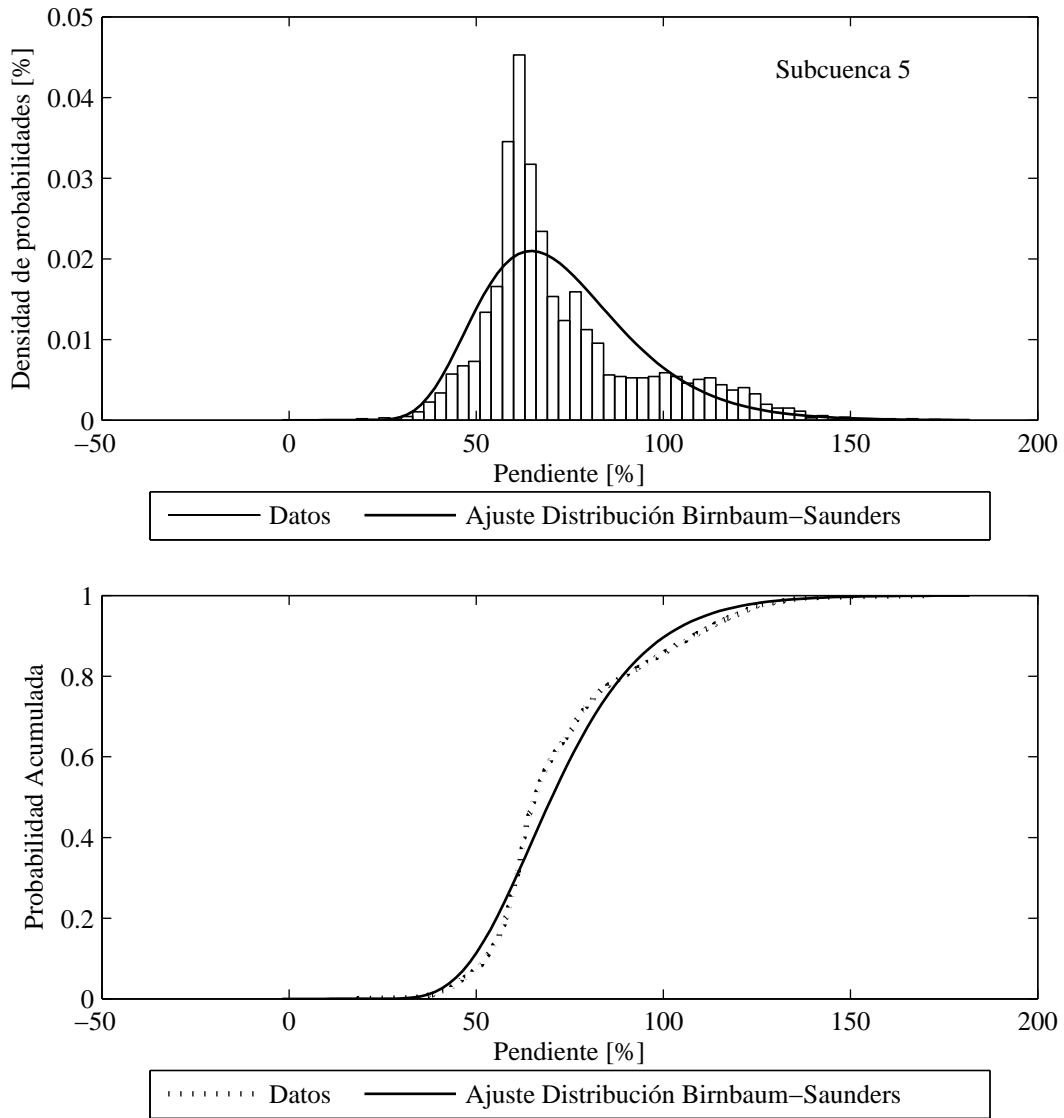


Figura 3.14: Ajuste densidad de probabilidades y función de distribución acumulada en subcuenca 5, correspondiente a una distribución Birnbaum-Saunders

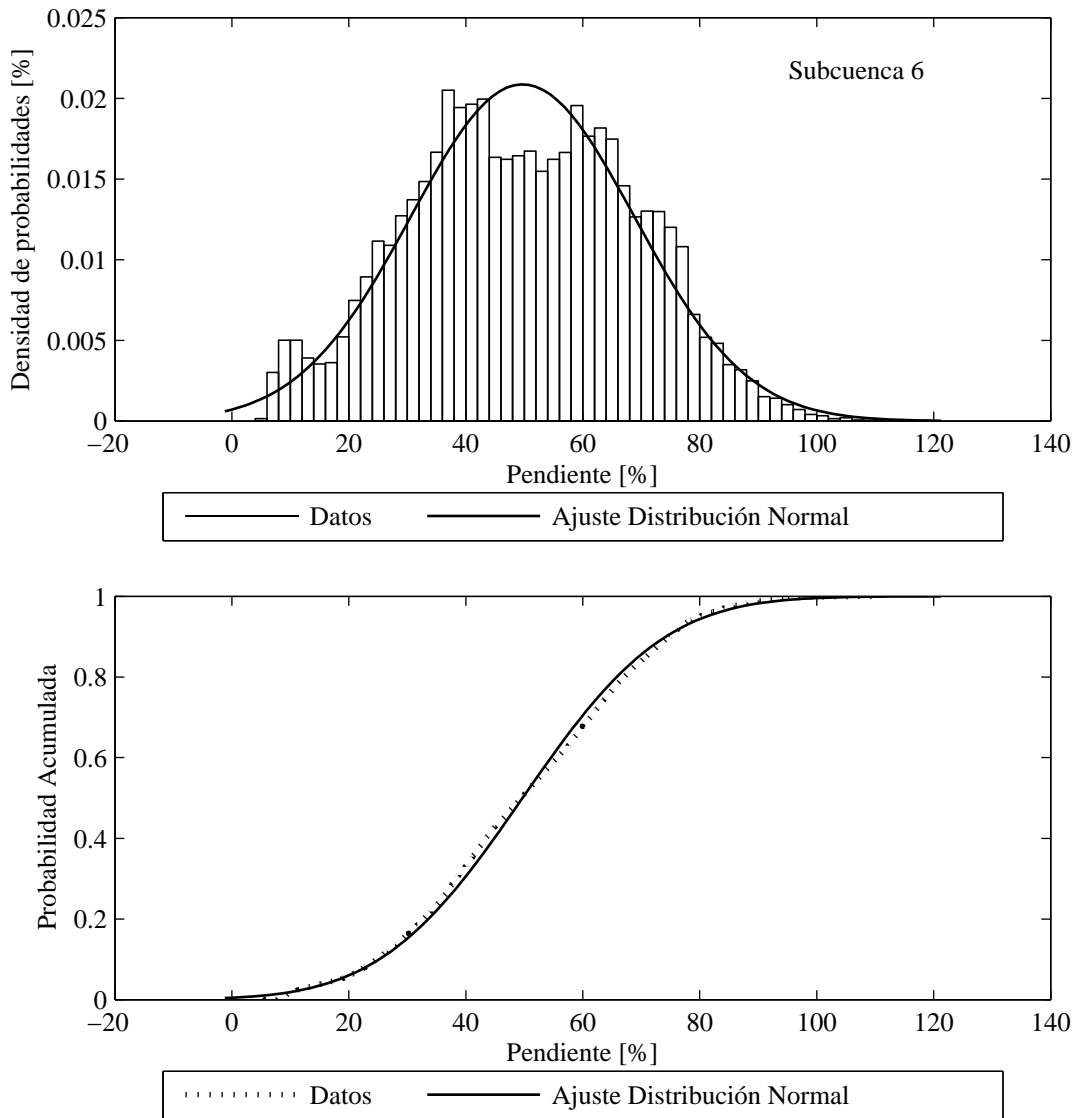


Figura 3.15: Ajuste densidad de probabilidades y función de distribución acumulada en subcuenca 6, correspondiente a una distribución normal

A continuación, y considerando que existen 7 variables, una para cada subcuenca, se utiliza el método del hipercubo latino para seleccionar escenarios representativos del total de casos posibles. Dado el tiempo de ejecución del modelo, el número de escenarios debe estar limitado, razón por la cual se decide optar por tres posibles casos para cada variable, lo que da un total de  $3^7$ , o 2187, escenarios totales. El método empleado para seleccionar los valores de pendiente de cada escenario es el siguiente:



- Dividir cada distribución de probabilidades, representativas de cada subcuenca, en tres intervalos equiprobables

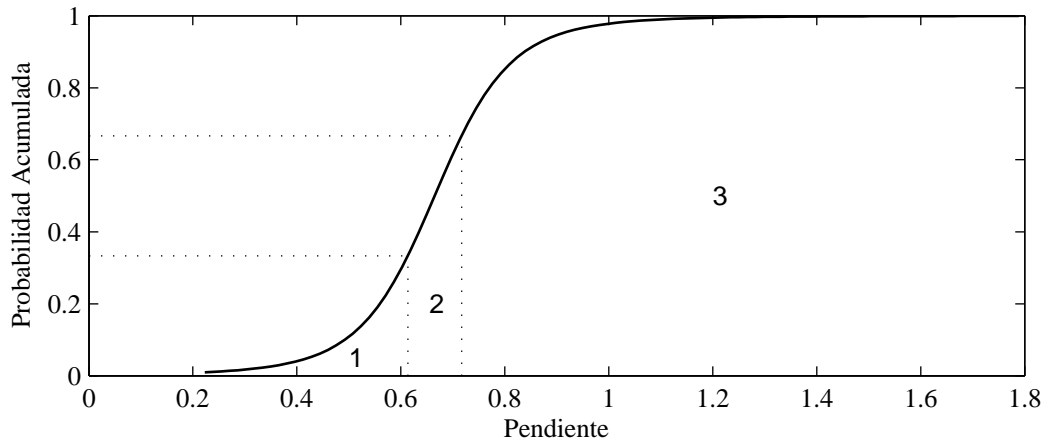


Figura 3.16: Ejemplo discretización en tres intervalos equiprobables, para selección de escenarios utilizando el método del hipercubo latino

- Generar 2187 escenarios que combinan los posibles intervalos (1, 2 o 3), considerando las divisiones equiprobables detalladas en el punto anterior, de forma de cubrir todos los casos posibles

		Subcuencas						
		Escenarios posibles = {1,2,3}						
		S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6
2187 Escenarios	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	2
	1	1	1	1	1	1	1	3
	1	1	1	1	1	1	2	1
	1	1	1	1	1	1	2	2
	...							
	...							
	...							
	3	3	3	3	3	3	3	1
	3	3	3	3	3	3	3	2
3	3	3	3	3	3	3	3	

Figura 3.17: Matriz de escenarios que contiene todas las combinaciones posibles para los intervalos 1, 2 y 3, al considerar las 7 subcuencas

- Generar 2187 combinaciones de números aleatorios entre  $(0,1/3]$ ,  $(1/3, 2/3)$  y  $[2/3,1]$ , de forma de cubrir todos los casos posibles

		Subcuencas						
		Numeros Aleatorios $\leftrightarrow$ Probabilidad Acumulada						
		S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6
2187 Escenarios	{	0.2325	0.2361	0.1443	0.2883	0.2203	0.0293	0.1421
		0.2171	0.2223	0.0826	0.2241	0.0229	0.2631	0.3364
		0.1456	0.3051	0.2202	0.0962	0.2395	0.0209	0.8489
		...						
		...						
		...						
		...						
		0.8154	0.8414	0.8695	0.8870	0.7549	0.8332	0.3066
		0.9195	0.7838	0.8561	0.8282	0.9295	0.8767	0.4852
		0.8038	0.6711	0.8357	0.7024	0.6787	0.6727	0.8231

Figura 3.18: Matriz de números aleatorios

- A partir de los números aleatorios generados, y utilizando la función de distribución de probabilidades acumulada inversa se obtienen los 2187 escenarios de pendientes

		Pendiente en cada Subcuenca						
		S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6
2187 Escenarios	{	0.5751	0.5789	0.3196	0.3653	0.4007	0.2096	0.2763
		0.5682	0.5736	0.2542	0.3330	0.0975	0.5064	0.4163
		0.5289	0.6043	0.3776	0.2553	0.4118	0.1492	0.6943
		...						
		...						
		...						
		...						
		0.7784	0.9023	0.7570	0.7460	0.6541	0.7373	0.4004
		0.8593	0.8382	0.7448	0.6776	0.8189	0.7760	0.4899
		0.7723	0.7561	0.7276	0.5785	0.6137	0.6568	0.6743

Figura 3.19: Matriz de escenarios de pendientes

- Se determina finalmente la probabilidad asociada a cada escenario, considerando la probabilidad individual asociada a cada pendiente seleccionada, y suponiendo que las pendientes son independientes entre las cuencas, de acuerdo a la ecuación 3.12.

$$P = \prod_1^7 (p_i) \quad (3.12)$$

### 3.3.2. Pronóstico meteorológico

La información base del modelo corresponde a los datos meteorológicos registrados entre enero de 2007 y julio de 2010. De forma de analizar como se comporta el modelo frente a distintos pronósticos, dada una serie de pronósticos para un evento en particular, se ejecuta TopNet para cada uno de ellos, inicializando la modelación con datos de un año previo al pronóstico, para evitar la dependencia de las condiciones iniciales, y se suma a ello el pronóstico para 7 días. Esto se implementa de manera conjunta para las variables de precipitaciones, temperatura y humedad relativa.

Los pronósticos se generan a partir de un modelo basado en el GDF, el cual utiliza los parámetros de la zona y entrega el pronóstico conjunto de las variables anteriores desde agosto de 2009. Considerando que sólo dos de las tormentas analizadas por el modelo original de pronóstico de aluviones de (Mendoza & McPhee, 2011) ocurren durante dicho periodo, se analiza en este caso ambas tormentas, y otras dos de menor magnitud. La idea es ver cómo se comporta el modelo y no necesariamente integrar estos resultados al análisis del sistema de soporte de decisiones, pues de trata se un pronóstico determinístico.

Las tormentas analizadas se detallan en la Tabla 3.6, y se considerará para cada una de ellas un periodo de 30 días, es decir, 30 pronósticos. Además, se destaca que debido a posibles errores en el modelo, algunos de dichos pronósticos entregaban pronósticos errados (no numéricos), los cuales no serán considerados. Por último, dada la forma en que se utiliza TopNet, el modelo debe ser ejecutado cada vez para cada nuevo pronóstico.

Tabla 3.6: Fechas tormentas analizadas dado pronóstico meteorológico

Tormenta	Periodo
Tormenta 5	12/08/2009 - 15/09/2009
Tormenta 6	13/05/2010 - 15/06/2010
Tormenta 7	17/01/2010 - 19/02/2010
Tormenta 8	30/03/2010 - 03/05/2010

## 3.4. Costos

De acuerdo con el árbol de decisiones propuesto en la Sección 3.2, es necesario estimar los costos de los cuatro escenarios posibles:

- i)  $\$_{11}$ : Costo de parar la faena y que se produzca el aluvión
- ii)  $\$_{12}$ : Costo de parar la faena y que el aluvión no se produzca
- iii)  $\$_{21}$ : Costo de no parar la faena y que se produzca el aluvión
- iv)  $\$_{22}$ : Costo de no parar la faena y que el aluvión no se produzca

De manera de representar dichos costos, y dada la escasez de información al respecto, se tomará como base la producción diaria de la faena Teniente, según lo informado por el la Corporación Chilena del Cobre (COCHILCO) en su anuario de 2012 (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2013). Los costos asociados al árbol de decisiones estarán asociados entonces a una pérdida debido a la detención de la producción, así como a posibles daños materiales como a las personas que trabajan en el lugar. Dicha pérdida se estimará a partir de valores de producción y al precio del mineral.

Los antecedentes recolectados indican:

- La producción de cobre comerciable de la División El Teniente fue de 417.2 (Miles de toneladas métricas de cobre fino) en 2012
- La producción de molibdeno comerciable de la División El Teniente fue de 6095 (Toneladas métricas de molibdeno fino) en 2012
- El precio promedio del cobre en 2012 fue de 360.593US\$/lb
- El precio promedio del molibdeno en 2012 fue de 12.741 US\$/lb
- El precio promedio del dolar en 2012 fue de \$448.2

De esta forma la producción de cobre de 2012 significó ingresos por 3.32 miles de millones de dólares, mientras que aquella que corresponde a molibdeno a 0.17 miles de millones de dólares. Esto da un total de 3.49 miles de millones de dólares, lo cual significa a nivel diario un total de 9.53 millones de dólares. A este costo se le denominará  $C_{base}$  para futuras referencias.

Para estimar los cuatro costos mencionados anteriormente se considerarán porcentajes referidos al total de pérdidas por producción y un posterior análisis de sensibilidad, dado que no se posee información que permita estimar de mejor manera los costos asociados a daños materiales producidos por un aluvión, asociados al reacondicionamiento de la faena, y aquellos que corresponden al daño a la salud de las personas.

En primer lugar, el costo de parar la faena y que se produzca el aluvión corresponderá al  $C_{base}$  más un porcentaje asociado al reacondicionamiento de daños que no pudieron prevenirse dada la alerta temprana.

En segundo lugar, el costo de para la faena y que no se produzca el aluvión corresponderá únicamente al  $C_{base}$ .

En tercer lugar, el costo de no parar la faena y que se produzca el aluvión será igual al primer costo mencionado, adicionándole un porcentaje debido a que el daño a la infraestructura en este caso podría ser muy superior y se podría incluir además daño directo a los trabajadores.

En cuarto lugar, el costo de no parar la faena y que no se produzca el aluvión será considerado igual a cero.

A todos estos costos debería agregarse el costo de implementación del sistema de monitoreo que funcionaría asociado al modelo de pronóstico de aluviones. Sin embargo, esto se verá reflejado o tendrá un máximo asociado al valor de la información entregado por el análisis global del problema.

De esta forma los costos quedarán dados por:

i)  $\$_{11} = C_{base}(1 + a_1)$

ii)  $\$_{12} = C_{base}$

iii)  $\$_{21} = C_{base}(1 + a_1 + a_2)$

iv)  $\$_{22} = 0$

Donde  $a_1$ , y  $a_2$  son los porcentajes asociados a los daños y que variarán de acuerdo a la importancia asignada a los costos.

# Capítulo 4

## Análisis de Resultados

### 4.1. Resultados del modelo, a partir de las simulaciones de monte carlo

Para comenzar, se analiza el comportamiento del pronóstico del modelo original frente a aquel resultante de la modelación incluida la incertidumbre ligada a la distribución de pendientes al interior de cada subcuenca, es decir, aquella que considera los escenarios correspondientes a la simulación de monte Carlo. La Tabla 4.1 muestra los límites del intervalo de confianza del 90 % (F10 y F90 son los factores de seguridad mínimos con un 10 % y un 90 % de probabilidad de no excedencia, respectivamente), junto al valor correspondiente al 50 % de probabilidad de excedencia y al valor obtenido del modelo original, asociado a la pendiente media de cada subcuenca. Estos resultados consideran el factor de seguridad mínimo obtenido entre las siete subcuencas para cada tormenta.

Tabla 4.1: Comparación pronóstico original y estocástico del factor de seguridad para cada tormenta

Evento	F10	F90	F*	F50
Tormenta 1	0.91	1.23	1.05	1.08
Tormenta 2	0.78	1.04	0.975	0.92
Tormenta 3	0.82	1.09	0.998	0.96
Tormenta 4	0.78	1.04	0.977	0.92
Tormenta 5	0.93	1.25	1.19	1.10
Tormenta 6	0.79	1.05	0.988	0.93

Las figuras 4.1 y 4.2, detallan los resultados obtenidos en la Tabla 4.1. Es posible observar que en los seis casos el valor de F\* está contenido dentro del intervalo de confianza del 90 %, lo cual validaría el uso de la metodología inicial. Sin embargo, el valor obtenido no coincide con el valor del F50, lo cual muestra que el factor de seguridad mínimo promedio no es igual al factor de seguridad mínimo obtenido para la pendiente media.

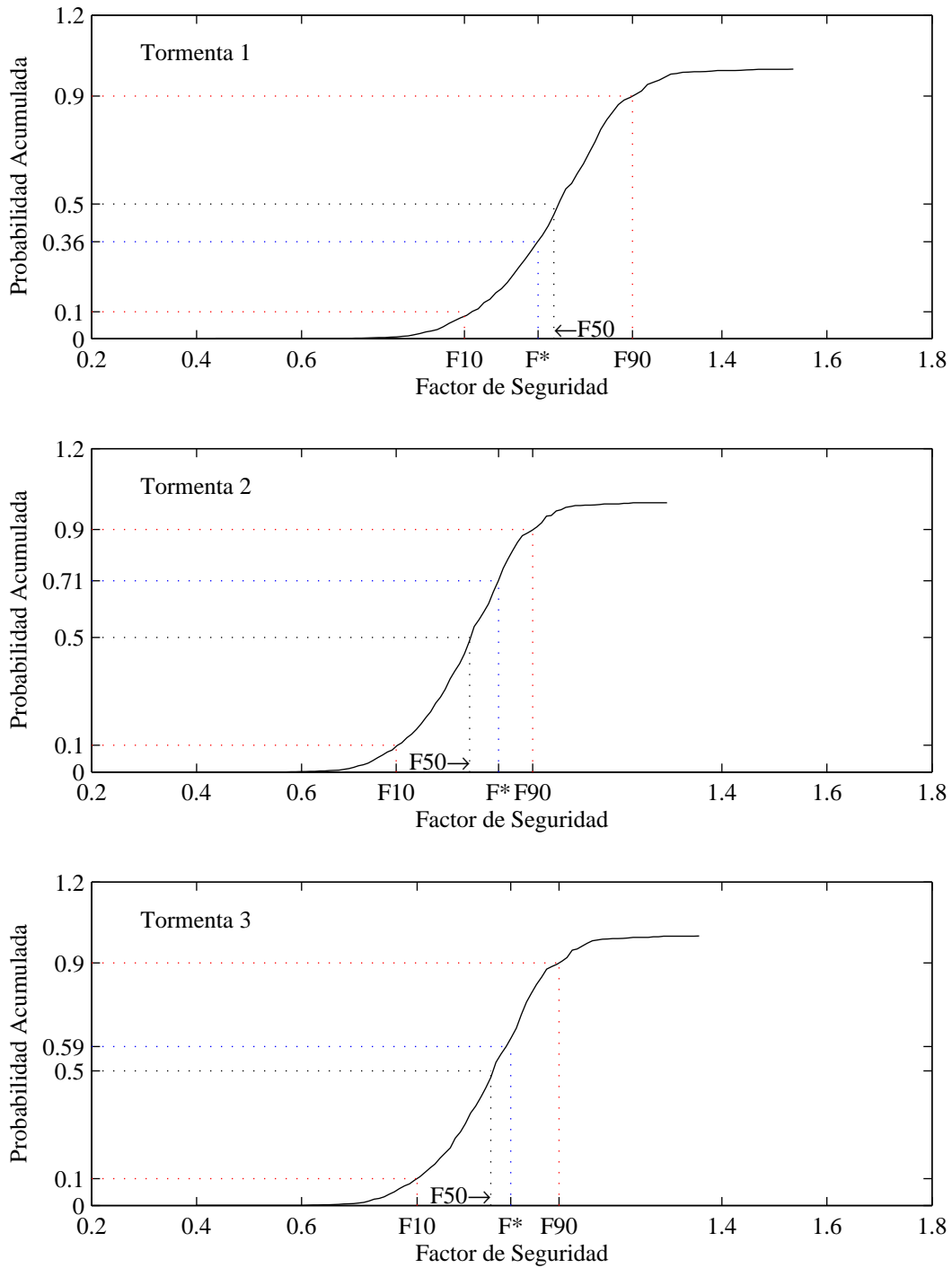


Figura 4.1: Distribución de factor de seguridad en tormentas 1, 2 y 3.  $F^*$  representa el F.S. mínimo obtenido para la pendiente media de una subcuena, mientras que  $F_{10}$  y  $F_{90}$  delimitan el intervalo de confianza del 90 %

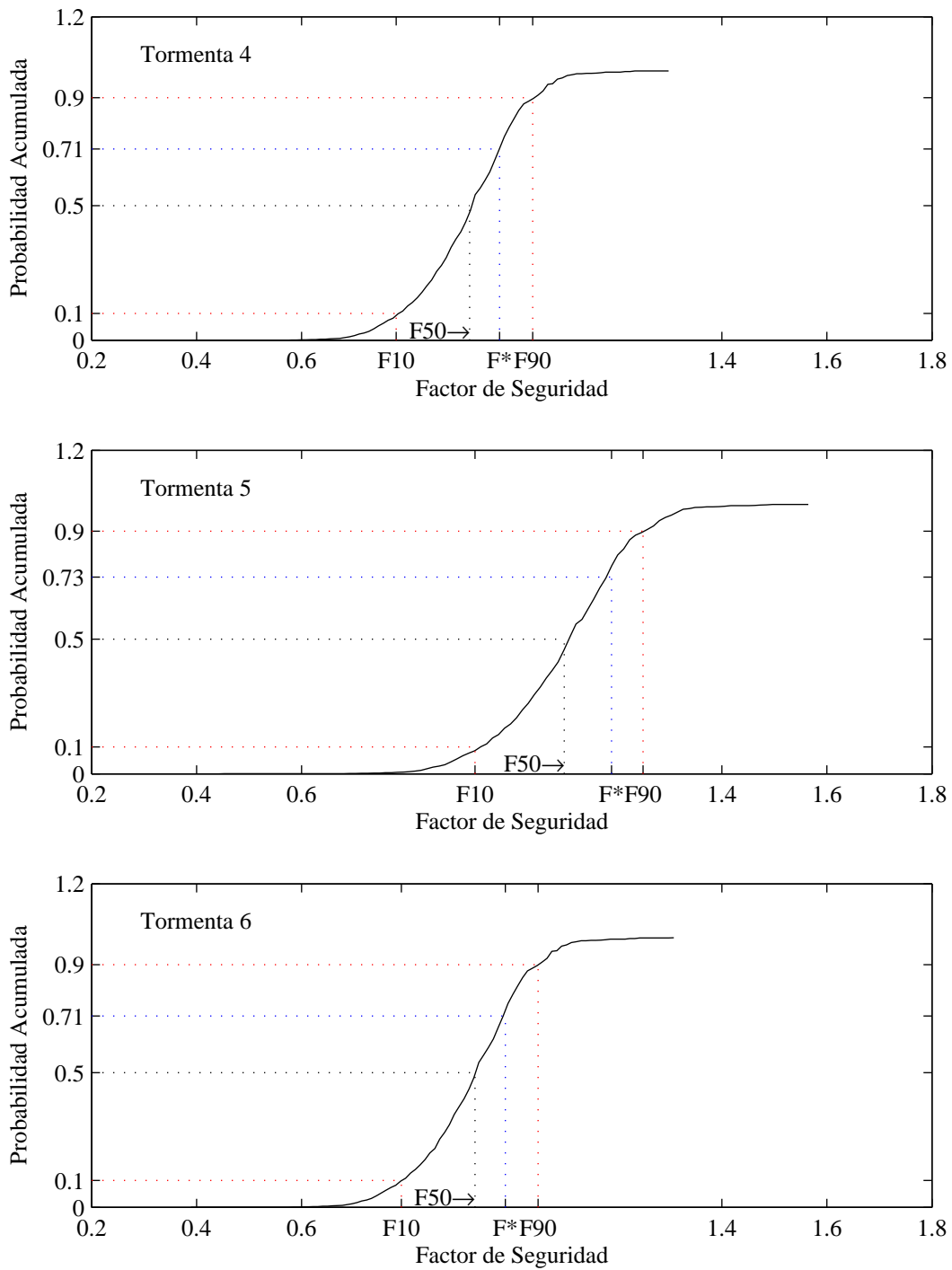


Figura 4.2: Distribución de factor de seguridad en tormentas 4, 5 y 6.  $F^*$  representa el F.S. mínimo obtenido para la pendiente media de una subcuenca, mientras que  $F_{10}$  y  $F_{90}$  delimitan el intervalo de confianza del 90 %



## 4.2. Análisis del valor de la información

A partir de las distribuciones de frecuencia acumuladas para el factor de seguridad en cada evento, se obtienen las probabilidades asociadas a los resultados del modelo, dado el estado real del sistema. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 4.2. Las figuras 4.3, 4.4 y ?? muestra dichas distribuciones e indican probabilidad de que el modelo pronostique el aluvión en cada evento. Estas probabilidades corresponden a  $P(X_1/\theta_i)$ , dentro del árbol de decisiones, donde  $\theta_i$  refleja el estado real del evento según se ha explicado anteriormente.

Para conocer la probabilidad final asociada a cada caso  $P(X_1/\theta_y)$ , y  $P(X_1/\theta_i)$  se utiliza la ecuación 4.1, donde  $p_{P_j}$  es la probabilidad de que ocurra la tormenta j. Dado que no existe mayor información, se considera que todas las tormentas son equiprobables.

$$P(X_1/\theta_i) = \sum_j P_j(X_1/\theta_i)p_{P_j} \quad (4.1)$$

Tabla 4.2: Probabilidades asociadas al árbol de decisiones, según tormenta

Evento	Modelo	Realidad	$P(X_1/\theta_1)$	$P(X_1/\theta_2)$	$P(X_2/\theta_1)$	$P(X_2/\theta_2)^a$
Tormenta 1	No	No	-	0.21	-	0.79
Tormenta 2	Si	Si	0.79	-	-	-
Tormenta 3	Si	No	-	0.62	-	0.38
Tormenta 4	Si	Si	0.79	-	-	-
Tormenta 5	No	No	-	0.18	-	0.82
Tormenta 6	Si	No	-	0.76	-	0.24

<sup>a</sup>Valores obtenidos de  $[1 - P]$  en los gráficos de las tormentas 1, 3, 5 y 6

Posteriormente, y utilizando las ecuaciones 3.5 y 3.7, se obtienen las probabilidades complementarias. Con esto se completan los cuatro casos para las probabilidades  $P(X_i/\theta_i)$ , cuyos valores se resumen en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Probabilidades finales asociadas a la respuesta del modelo, dado el estado del sistema

Probabilidad	Valor Final
$P(X_1/\theta_1)$	0.79
$P(X_1/\theta_2)$	0.44
$P(X_2/\theta_1)$	0.21
$P(X_2/\theta_2)$	0.56

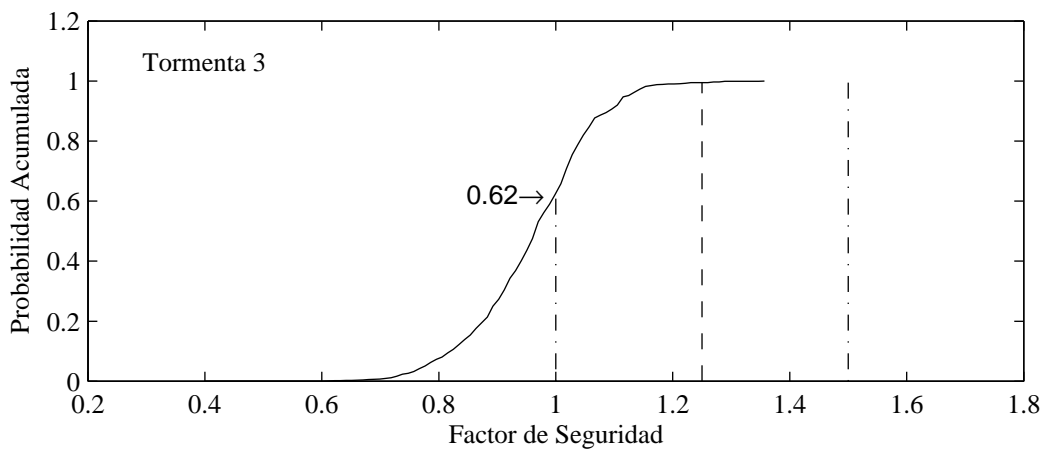
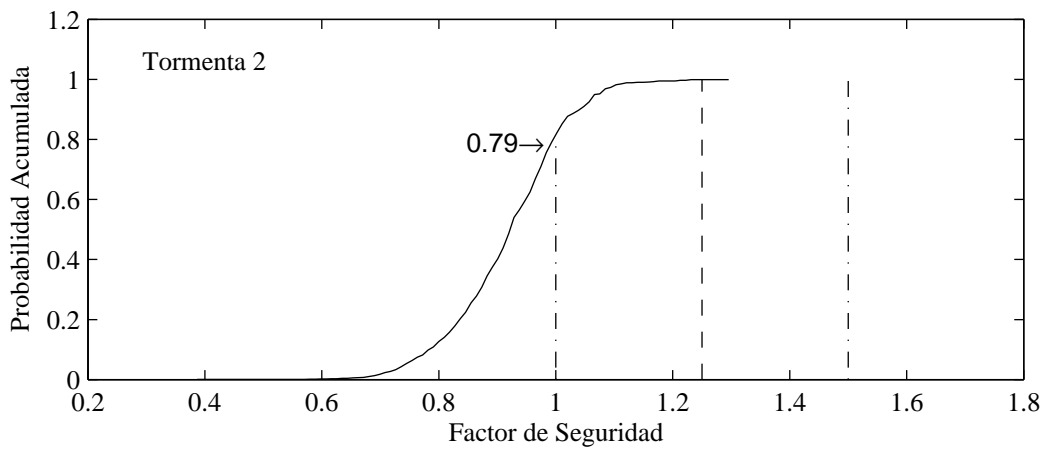
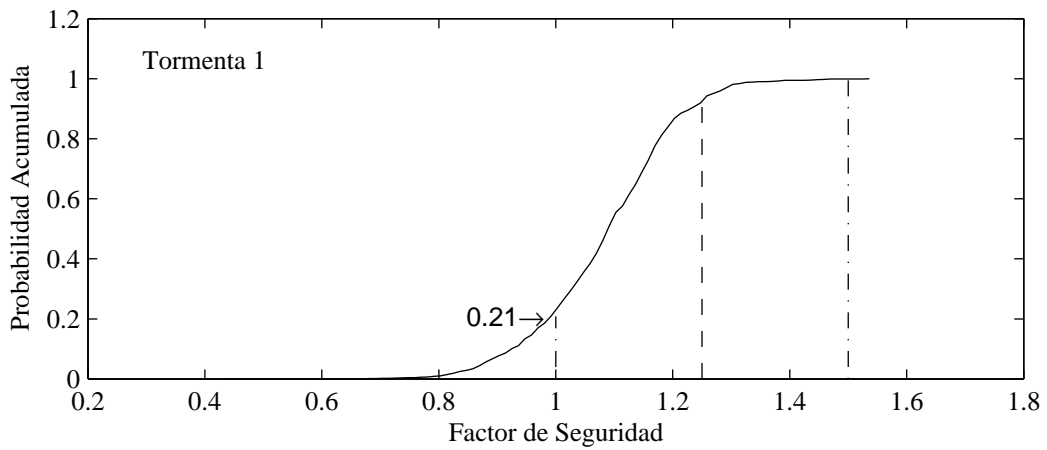


Figura 4.3: Probabilidad acumulada para factor de seguridad en tormentas 1, 2 y 3

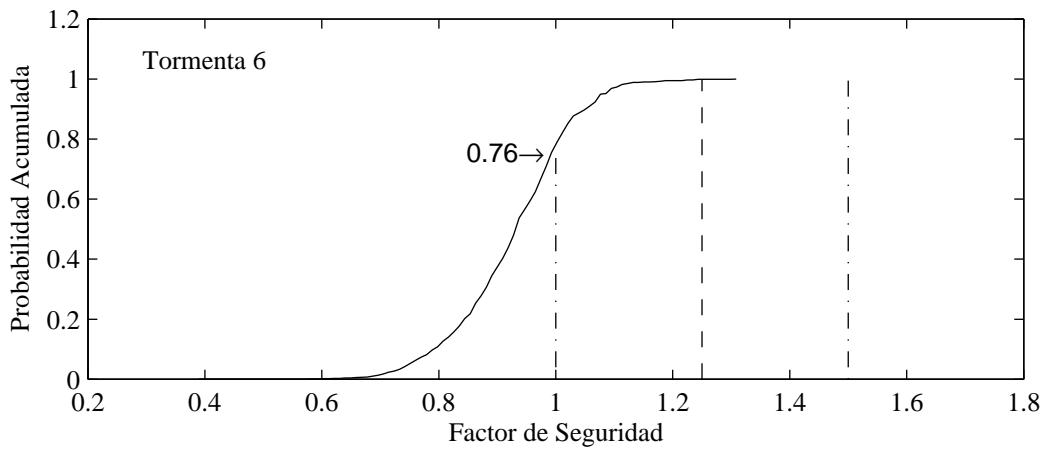
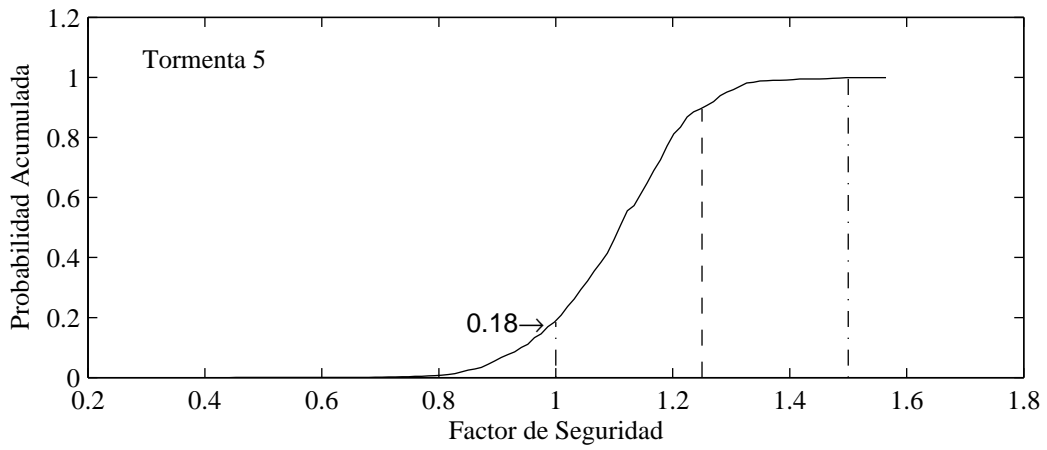
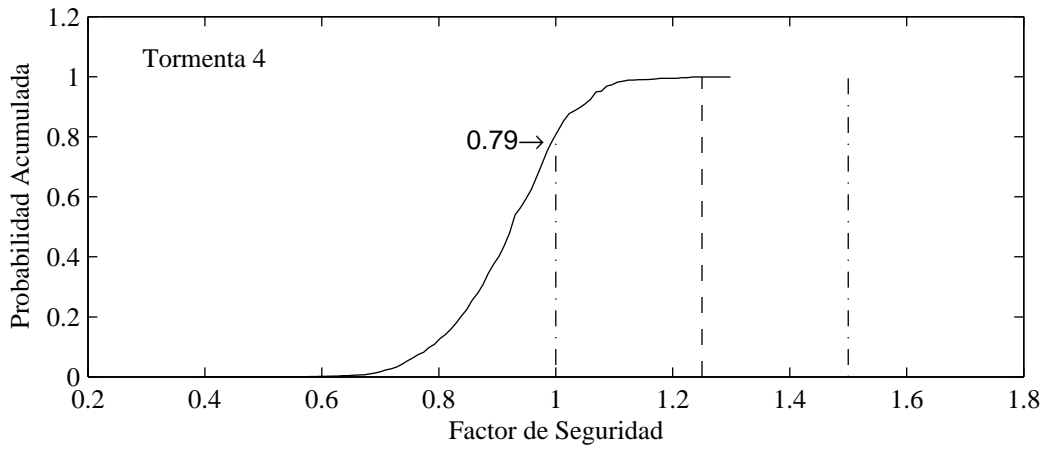


Figura 4.4: Probabilidad acumulada para factor de seguridad en tormentas 4, 5 y 6

Como se observa en las Figuras 4.3 y 4.4, para aquellos casos en los cuales el modelo pronostica un aluvión y este ocurre (tormentas 2 y 4), la probabilidad acumulada para el F.S.=1.0 es alta, mientras que para aquellos casos en que no ocurre (tormentas 3 y 6) es un poco menor. Por su parte, para los casos en que el modelo no pronostica el aluvión y este no ocurre (tormentas 1 y 5), el valor es mucho menor y cercano al 20 %. Esto muestra lo útil que es contar con el conjunto de resultados posibles, lo cual permite acceder a mayores informaciones sobre el funcionamiento del modelo.

En las Figuras 4.3 y 4.4 se incluyen además los límites para factores de seguridad 1.25 y 1.5, los cuales representan la diferencia entre un estado casi estable y moderadamente estable, y entre moderadamente estable y estable, respectivamente según lo incluido en la Tabla 2.1, de la sección 2.1. Esto permite ver que para todos los eventos el terreno presenta una probabilidad sobre 0.8 de tener el factor de seguridad en la categoría casi estable. Además, muestra que el modelo reacciona frente a todos los pronósticos de tormenta, lo que indica que este considera de forma correcta los antecedentes meteorológicos, pero puede llegar a sobredimensionar los efectos de la tormenta.

Por otra parte, se tienen los valores de  $P(\theta_1) = 0,33$  y  $P(\theta_2) = 0,67$  dados los seis eventos conocidos. Si bien el número de casos es bastante escaso para realizar este análisis, se complementará sensibilizando en torno a los valores originales. Un futuro análisis es recomendado para observar el tipo de situación que ocurre frente a distintos tipos de eventos de precipitaciones y temperatura.

Las probabilidades que corresponden a las respuestas del modelo se calculan utilizando las ecuaciones 3.4 y 3.6, obteniéndose  $P(X_1) = 0,56$  y  $P(X_2) = 0,44$ . Finalmente, utilizando las ecuaciones 3.8 a la 3.11, se obtienen las probabilidades  $P(\theta_i/X_i)$  y se completan los valores requeridos para el árbol de decisiones, con  $P(\theta_1/X_1) = 0,47$ ,  $P(\theta_2/X_1) = 0,53$ ,  $P(\theta_1/X_2) = 0,16$  y  $P(\theta_2/X_2) = 0,84$ .

La figura 4.5 muestra el árbol de decisiones con las probabilidades obtenidas y los costos, dejando como incógnitas los valores de  $a_1$  y  $a_2$ , los porcentajes asociados a las pérdidas debido a los daños provocados por la ocurrencia de un evento o por las falsas alarmas.

Para conocer el valor de la información asociada a utilizar la respuesta del modelo de pronóstico de aluviones se calcula el costo final que representa cada una de las decisiones iniciales, las cuales corresponden a tomar la respuesta del modelo hidrometeorológico, para la faena directamente o no hacerlo. Para ello se siguen los caminos en el árbol de decisión recordando que el caso de los nodos aleatorios el valor corresponde al promedio ponderado de las ramas según las probabilidades respectivas, mientras que en los nodos de decisión el valor corresponde al menor entre las ramas, dado que en este caso representa el costo menor.

La figura 4.6 muestra como se determina el costo asociado a cada decisión. Es importante notar que el valor de la rama superior va a depender del valor que tomen los coeficientes  $a_1$  y  $a_2$ , lo cual definirá la elección del mínimo entre  $10 + 4,7a_1$  y  $4,7(1 + a_1 + a_2)$ , y entre  $10 + 1,6a_1$  y  $1,6(1 + a_1 + a_2)$ .

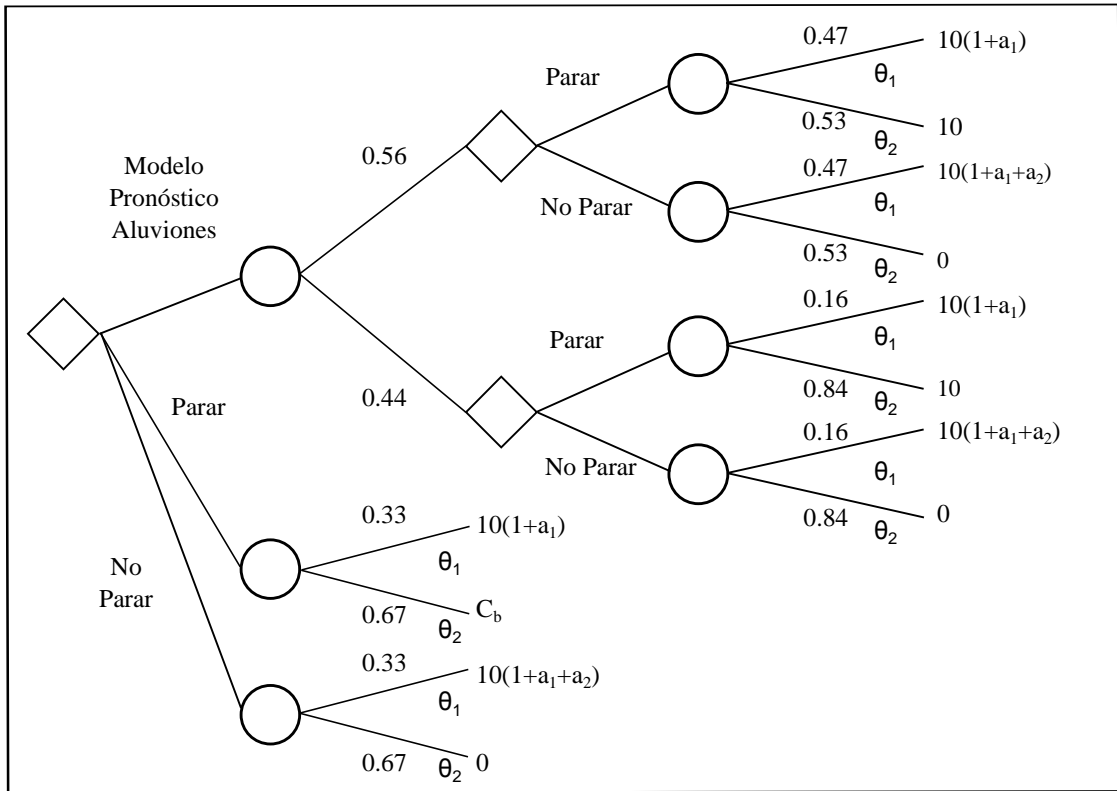


Figura 4.5: Árbol de decisiones incluyendo las probabilidades y costos estimados

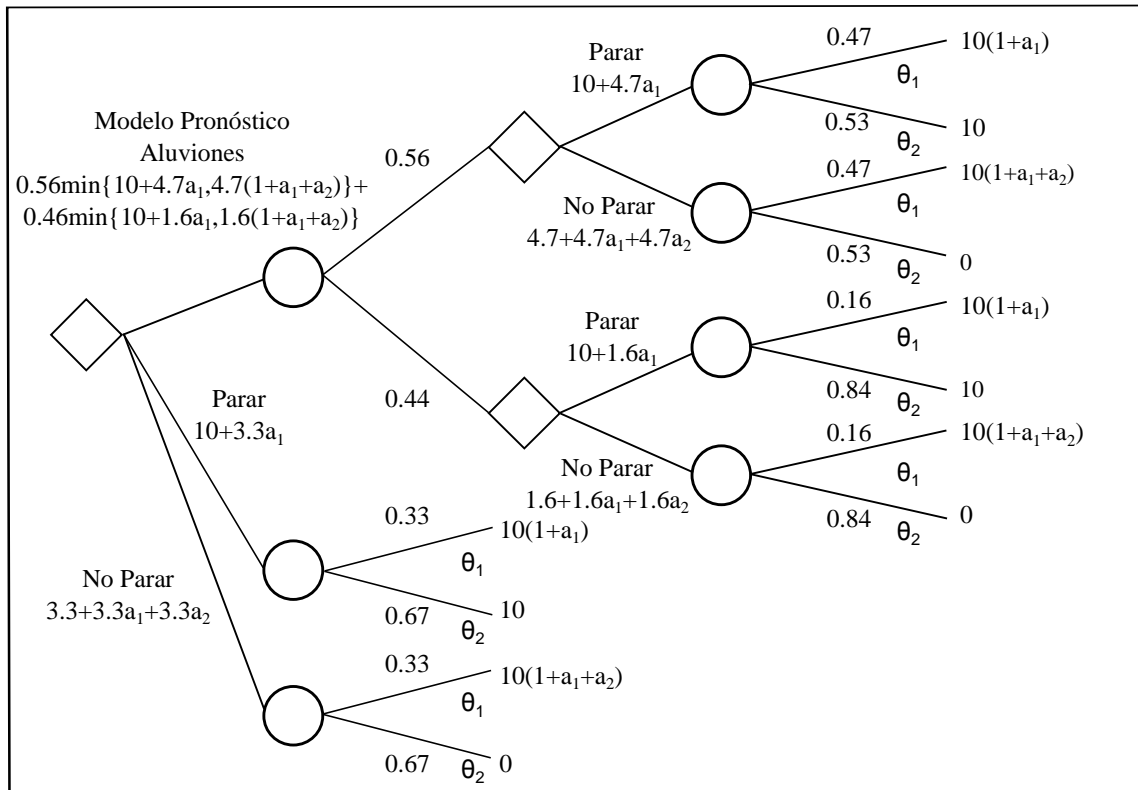


Figura 4.6: Árbol de decisiones incluyendo el procedimiento de decisión

Para entender de una mejor manera los resultados finales, se explica a continuación lo que ocurre en el caso de tomar  $a_1 = 10\%$  y  $a_2 = 40\%$ , según se muestra en la Figura 4.7:

1. Se calculan los costos asociados a las decisiones parar o no parar, al seguir por la rama superior
2. Se escoge la decisión que tiene el menor costo (no parar, en ambos casos)
3. Se calcula el costo asociado al modelo de pronóstico de aluviones
4. Se calcula el costo asociado a parar la faena directamente
5. Se calcula el costo asociado al modelo de pronóstico de aluviones

Por lo tanto, el costo de utilizar el modelo de pronóstico de aluviones es de 5 MillUS\$ (rama superior), el de parar la faena de 10.33 MillUS\$ (rama inferior) y el de no parar es de 4.95 MillUS\$ (rama central), razón por la cual la información entregada por el modelo no tiene ningún valor y la respuesta del operador sería no parar la faena durante el evento.

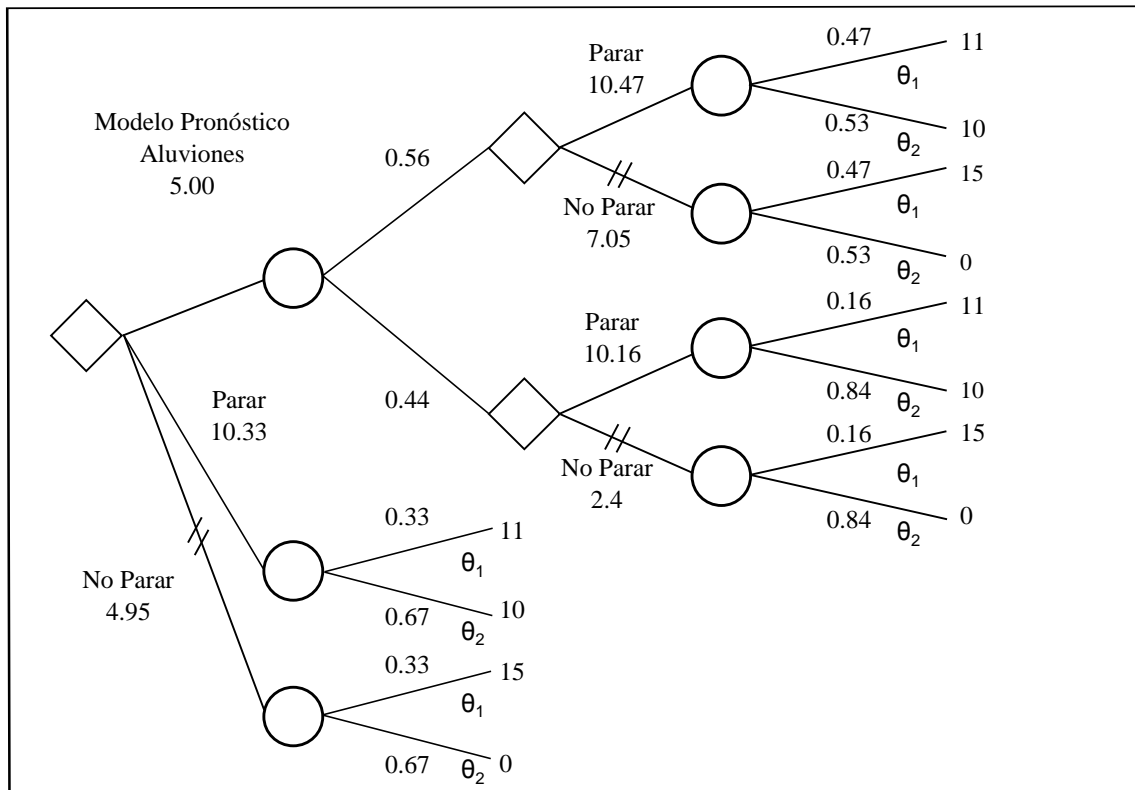


Figura 4.7: Árbol de decisiones, con resultados dados por  $a_1 = 10\%$  y  $a_2 = 40\%$

Para el análisis final se considera  $a_1 = 10\%$  y  $a_2 = \{ 20\%, 40\%, 60\%, 80\% \text{ y } 100\% \}$ . Recordar que estos porcentajes hacen referencia a que tan importantes son los costos materiales o de daño a las personas comparados con los costos dados por la pérdida de producción,

por lo que al no tener un valor claro se analizan distintos escenarios. Considerando dichos parámetros los costos asociados a cada decisión se presentan en la figura 4.8.

Los resultados muestran cómo para los valores utilizados los costos de utilizar el modelo hidrometeorológico y no parar directamente la faena son iguales, lo cual indica que el modelo no está entregando ningún valor adicional. En este caso, y para cualquier valor del coeficiente  $a_2$ , el modelo hidrometeorológico entrega como respuesta no parar la faena. Esto se explica en que la probabilidad de que ocurra un aluvión es baja, en comparación a que este no ocurra ( $P(\theta_1)$  vs.  $P(\theta_2)$ ) y además a que la probabilidad de dar una falsa alarma es muy elevada.

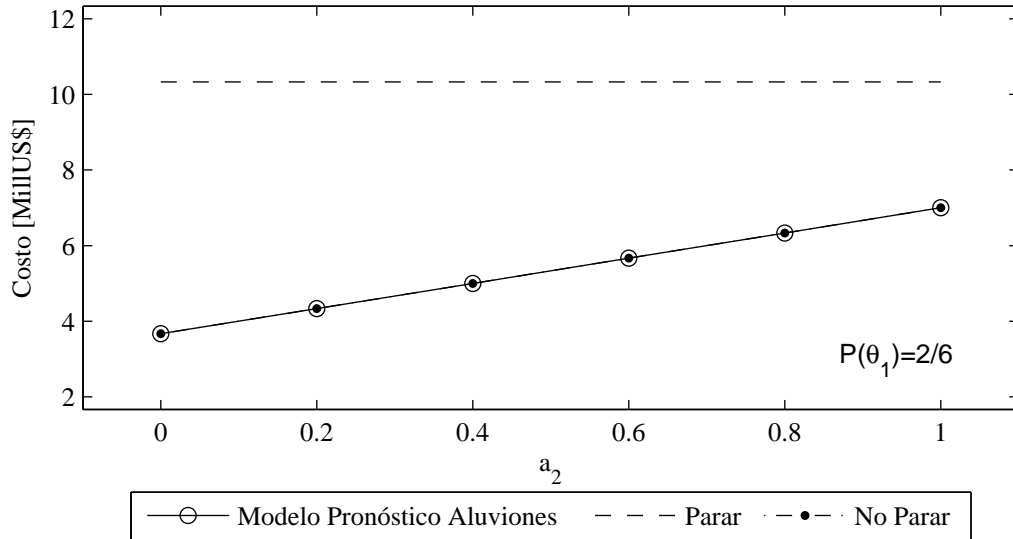


Figura 4.8: Costos de cada opción asociados a  $P(\theta_1) = 2/6$  y  $P(\theta_2) = 4/6$ , para los distintos valores del porcentaje asociado a los daños de no parar la faena cuando se produce un aluvión,  $a_2$

Debido a lo anterior, los resultados que se muestran en las Figuras 4.9 a la 4.11 incluyen un análisis considerando distintos valores para  $P(\theta_1)$  y  $P(\theta_2)$ , tomando en cuenta que la suma de ambas debe ser siempre igual a uno, pues ambos estados,  $\theta_1$  y  $\theta_2$ , son los únicos estados posibles del sistema. Lo anterior se debe a que basar todos los resultados en sólo los seis periodos analizados puede no ser representativo. Se requiere contar con un número mayor de eventos tener una mejor estimación de dichas probabilidades.

Dada la configuración escogida el costo de parar la faena será siempre el mismo, independiente de la probabilidad de ocurrencia del aluvión y del valor del coeficiente  $a_2$ . Las diferencias ocurren tanto en el costo asociado a parar la faena como a utilizar el modelo hidrometeorológico.

En función de los valores de  $P(\theta_1)$  y  $P(\theta_2)$  se incluyen en la Tabla 4.4 las probabilidades del árbol de decisiones para cada caso. A medida que aumenta la probabilidad de ocurrencia del aluvión, aumenta la probabilidad de que el modelo diga que ocurre y aumentan las probabilidades dadas por  $P(\theta_1/X_i)$ . Los resultados indican:

- En los casos 1 y dos, los cuales corresponden a  $P(\theta_1) = 1/6$  y  $2/6$ , el valor de la información entregada por el modelo es cero, y la decisión es siempre no parar la faena
- En el caso 3, con  $P(\theta_1) = 3/6$ , para valores del coeficiente  $a_2$  superiores al 40 %, el valor de la información es superior a cero, y supera el millón de dólares. La decisión para estos casos es parar la faena
- En el caso 4, para  $P(\theta_1) = 4/6$ , el valor de la información es superior a cero desde valores para  $a_2$  del 20 %. A diferencia del caso anterior, este valor es menor y se da por la diferencia entre tomar esta decisión y parar la faena directamente. El valor de no parar la faena se eleva en este caso por sobre el valor de pararla, dada la alta probabilidad de ocurrencia del evento
- Para el caso 5,  $P(\theta_1) = 5/6$ , el valor de la información disminuye al compararlo con el caso anterior y toma valores cero, pues la decisión en estos casos será parar la faena directamente

Tabla 4.4: Probabilidades finales del árbol de decisiones, asociadas a cada escenario de  $P(\theta_1)$  y  $P(\theta_2)$

Caso	$P(\theta_1)$	$P(\theta_2)$	$P(X_1)$	$P(X_2)$	$P(\theta_1/X_1)$	$P(\theta_2/X_1)$	$P(\theta_1/X_2)$	$P(\theta_2/X_2)$
Caso 1	0.17	0.83	0.50	0.50	0.26	0.74	0.07	0.93
Caso 2	0.33	0.67	0.56	0.44	0.47	0.53	0.16	0.84
Caso 3	0.50	0.50	0.62	0.38	0.64	0.36	0.27	0.73
Caso 4	0.67	0.33	0.67	0.33	0.78	0.22	0.43	0.57
Caso 5	0.83	0.17	0.73	0.27	0.90	0.10	0.65	0.35

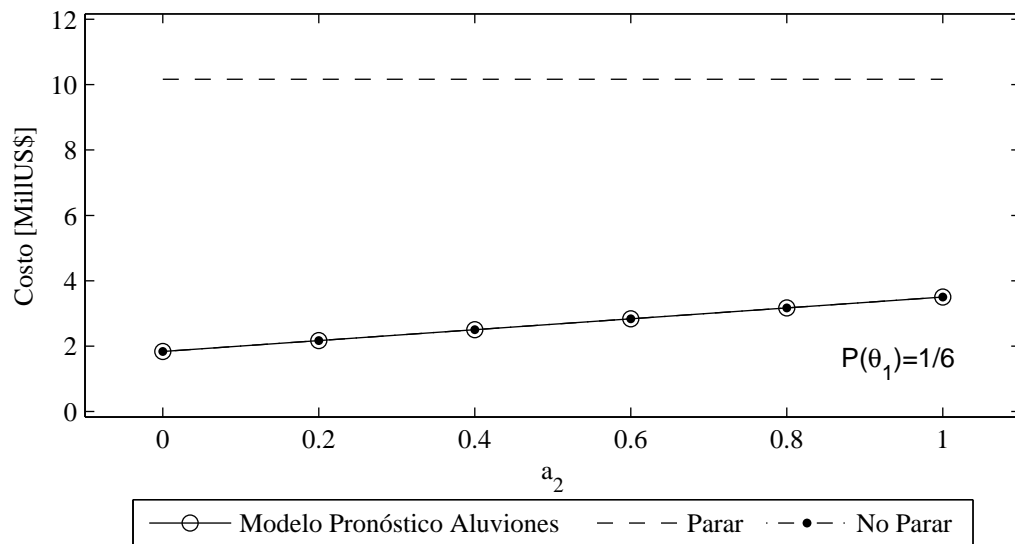


Figura 4.9: Costos de cada opción para los distintos valores del porcentaje asociado a los daños de no parar la faena cuando se produce un aluvión,  $a_2$ . Los valores consideran:  $P(\theta_1) = 1/6$



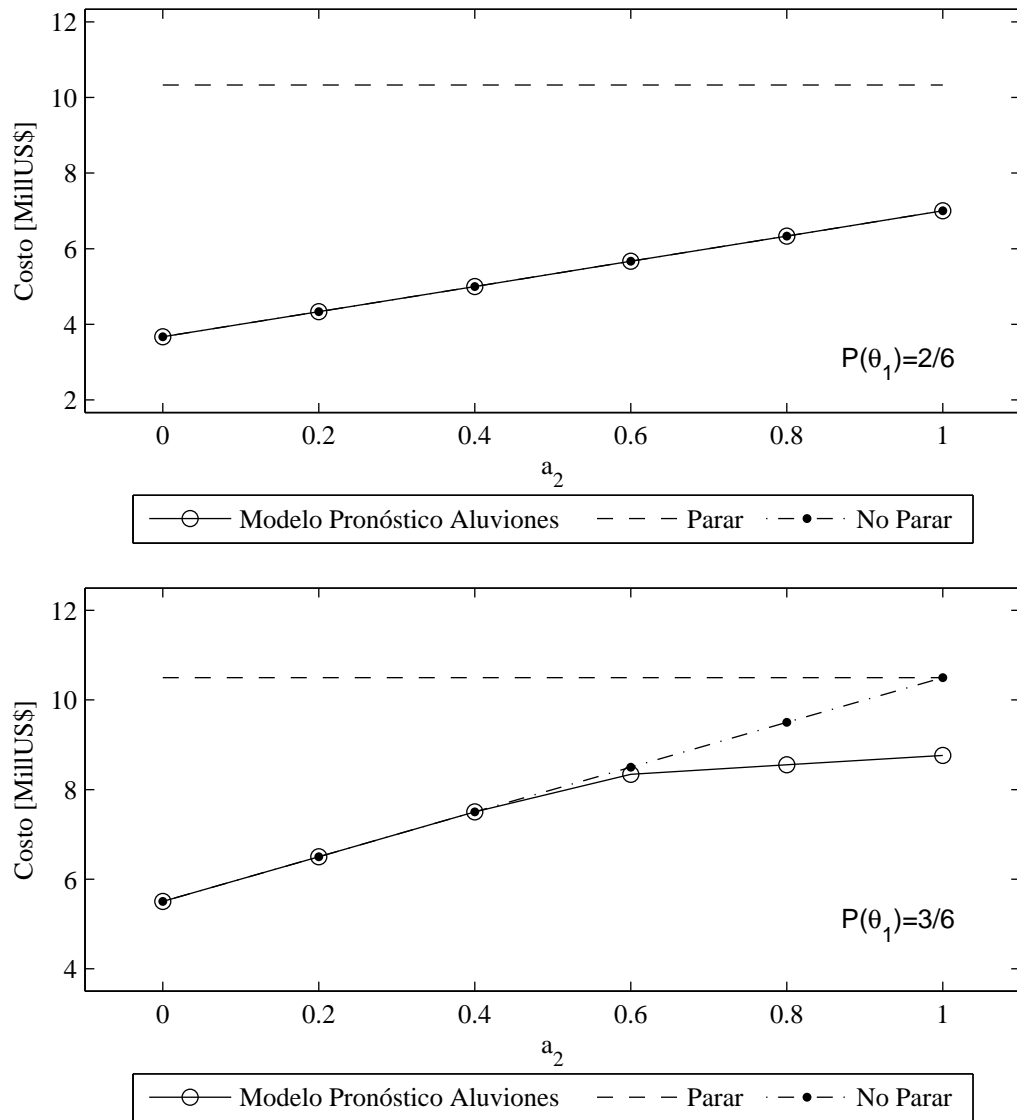


Figura 4.10: Costos de cada opción para los distintos valores del porcentaje asociado a los daños de no parar la faena cuando se produce un aluvión,  $a_2$ . Desde arriba, los valores consideran:  $P(\theta_1) = 2/6$  y  $P(\theta_1) = 3/6$

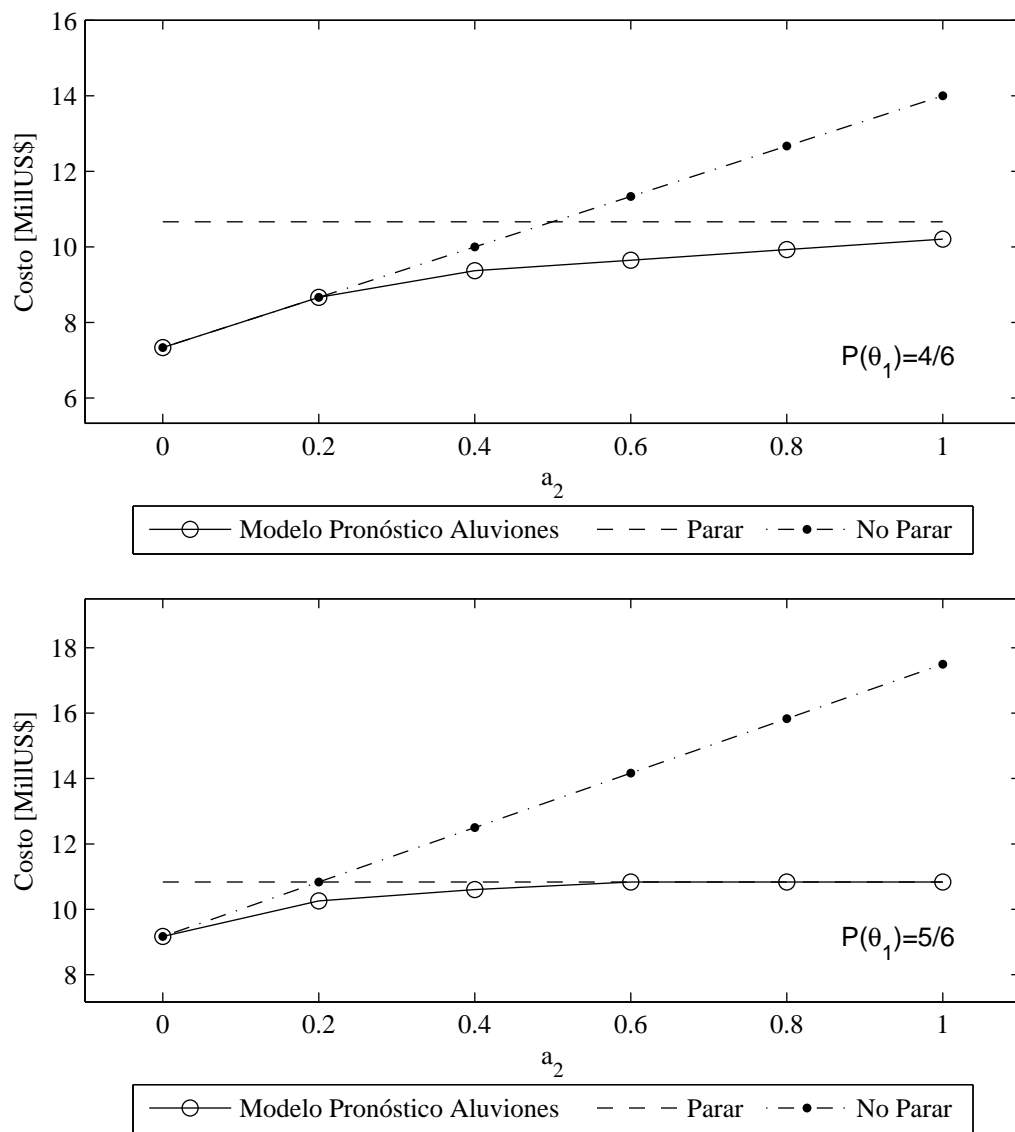


Figura 4.11: Costos de cada opción para los distintos valores del porcentaje asociado a los daños de no parar la faena cuando se produce un aluvión,  $a_2$ . Desde arriba, los valores consideran:  $P(\theta_1) = 4/6$  y  $P(\theta_1) = 5/6$

Se ve entonces como al aumentar la probabilidad de ocurrencia de un aluvión, la información entregada por el modelo es más valiosa, pues varían tanto las probabilidades asociadas a la respuesta del modelo,  $(P(X_i))$ , como aquellas obtenidas por Bayes,  $P(\theta_i/X_i)$ . Por su parte, mientras más importantes son considerados los daños provocados por el aluvión, la información del modelo adquiere mayor valor. Sin embargo, cuando la probabilidad es muy alta el valor del modelo frente a parar la faena disminuye hasta ser igual a cero y la relación dada por el costo de los daños es inversa.

### 4.3. Influencia pronóstico meteorológico

Finalmente se analiza que ocurre con el resultado del modelo al utilizar los pronósticos meteorológicos y se comparan con aquellos obtenidos utilizando únicamente datos registrados. Estos resultados se presentan de forma independiente, pues al tratarse de un pronóstico determinístico, sobre el cual no se conoce el error asociado, ni mayores detalles sobre el comportamiento del modelo, no es posible incluirlo en el análisis estocástico realizado en la sección anterior. Dada la disponibilidad de datos, desde agosto de 2009, se analizan únicamente las tormentas 5 y 6, y además se toman otros dos eventos para observar el comportamiento del sistema. En estos últimos casos no se registra aluvión y el modelo original tampoco lo pronostica.

El modelo hidrológico TopNet requiere de condiciones iniciales para la profundidad del nivel freático y la humedad, entre otras, las cuales no son necesariamente conocidas. Debido a esto, es necesario realizar la simulación desde un periodo anterior al de la tormenta, para independizar los efectos de la tormenta, de aquellas dadas por las condiciones iniciales. Para ello se toman los datos registrados de un año previo al evento y se combinan con los datos de cada pronóstico. Por la forma en que se utiliza TopNet, la simulación debe realizarse cada vez para cada pronóstico, pues no es simple registrar las condiciones del sistema en un punto intermedio para luego continuar la simulación. Para cada evento se selecciona un periodo de 30 días, lo que permite tener treinta simulaciones para cada uno. Los resultados a analizar son los de los últimos siete días, los cuales corresponden efectivamente al pronóstico. Se recuerda que a partir de estos datos lo que se obtiene es la profundidad del nivel freático, la cual es utilizada posteriormente en el modelo de estabilidad de taludes para calcular el factor de seguridad, y con ello el riesgo de aluvión. Este análisis tomará la pendiente media para cada subcuenca.

Para cada tormenta se presentan dos gráficos: el primero incluye todo el periodo simulado; y el segundo se restringe a los resultados dados por el pronóstico meteorológico, de precipitaciones, temperatura y humedad relativa, para los siete días. La línea punteada refleja los resultados del modelo original, los cuales fueron obtenidos a partir de los datos meteorológicos registrados.

Los resultados para los cuatro periodos se incluyen a continuación:

1. La tormenta 5, para lo cual se considera el periodo entre 12 de agosto de 2009 y el 15 de septiembre de 2009. Se recuerda que para esta tormenta no se produjo el aluvi3n, y adem3s que el resultado entregado por el modelo era el correcto.

La Figura 4.12, muestra c3mo para cada pron3stico se produce un descenso en el factor de seguridad, lo cual indica un correcto pron3stico de las condiciones meteorol3gicas y una buena respuesta, tanto del modelo hidrol3gico como del modelo de estabilidad de taludes. Se observa adem3s que en la mayor parte de los casos el pron3stico est3 por sobre el valor original entregado por el modelo, lo cual indica que el pron3stico est3 en realidad subestimando los resultados. S3lo en dos pron3sticos los resultados son levemente menores, pero esto no tiene mayor influencia pues en ning3n caso el factor de seguridad disminuye bajo 1. Adem3s, al observar la figura superior es posible notar que los resultados luego de 4 a 6 meses pueden considerarse independientes de las condiciones iniciales

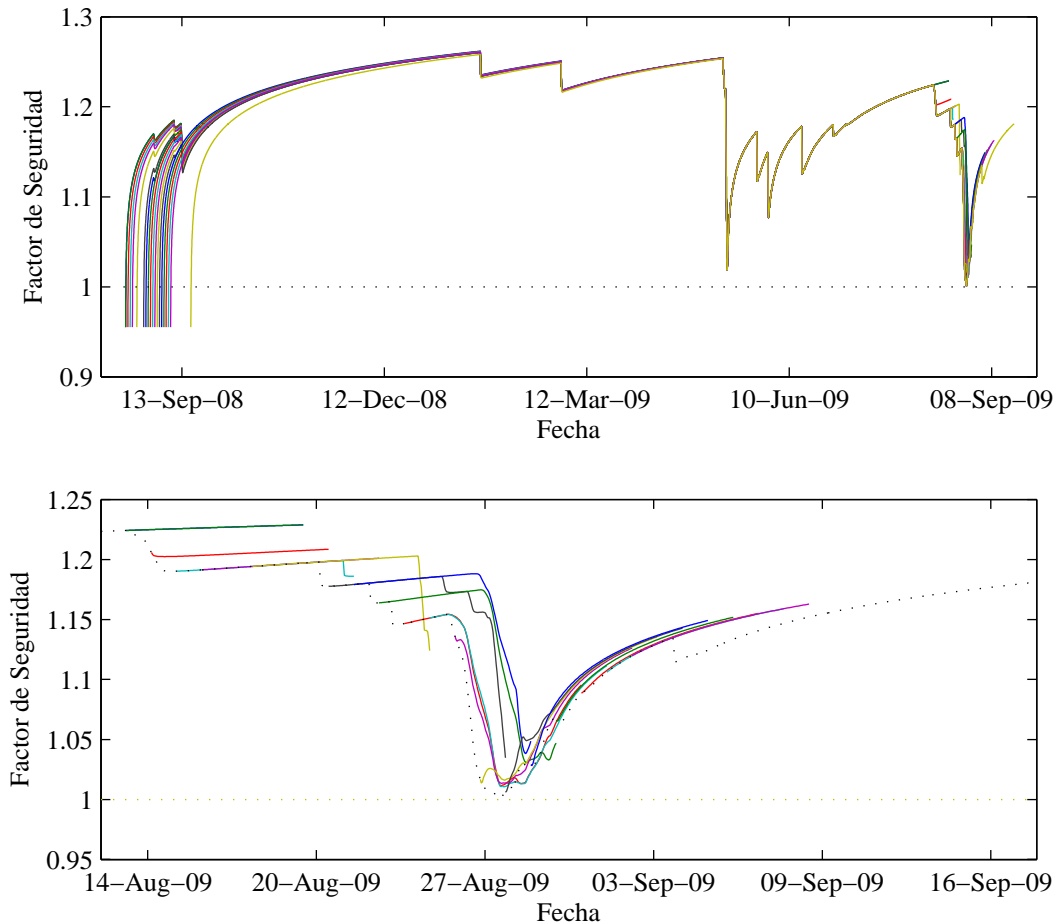


Figura 4.12: Factor de seguridad en tormenta 5 (agosto/septiembre 2009), para pron3sticos meteorol3gicos con alcance de 7 d3as

- La tormenta 6 considera un periodo entre el 13 de mayo de 2010 y el 15 de junio de 2010. En este caso el modelo original pronostica una falsa alarma de aluvi3n. La Figura 4.14 muestra c3mo evoluciona el factor de seguridad, tanto para el periodo estudiado, como para el anterior, cuyos resultados se incluyen para demostrar que estos no dependen de las condiciones iniciales impuestas.

Los resultados para este caso indican que el pron3stico meteorol3gico no fue acertado y debido a esto no se observan cambios en el factor de seguridad para ninguno de los pron3sticos. Esto muestra c3mo independiente de lo bueno o malo que pueda ser el modelo de aluviones, los errores pueden producirse debido a una falla en el pron3stico meteorol3gico y, adem3s, lo sensible que es el modelo a este tipo de variables.

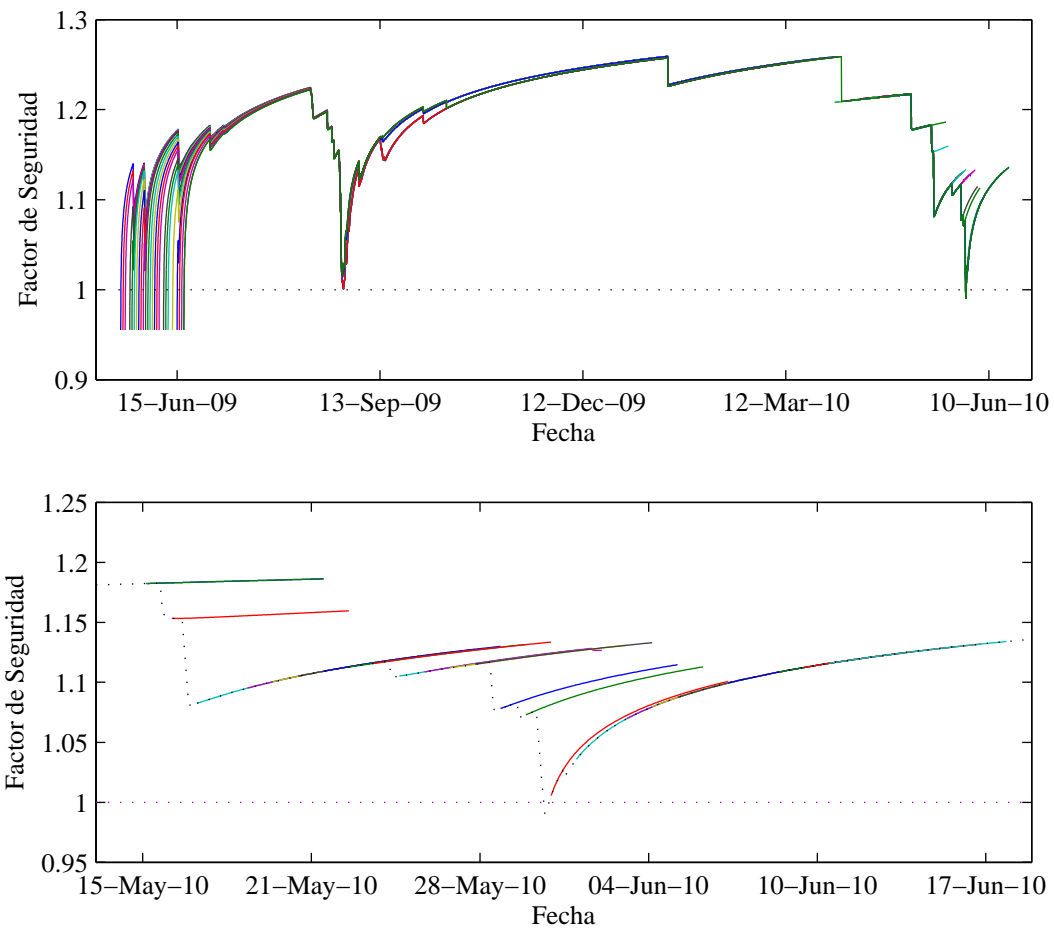


Figura 4.13: Factor de seguridad en tormenta 6 (mayo/junio 2010), para pron3sticos meteorol3gicos con alcance de 7 d3as

3. La tormenta 7 considera el periodo entre el 17 de enero de 2010 y el 19 de febrero de 2010. La Figura 4.14 muestra la evolución del pronóstico de seguridad para dicho periodo y ella puede verse como, a pesar del modelo no pronosticar una aluvión, existen algunos pronósticos para los cuales el descenso del factor de seguridad es considerable.

Este periodo fue seleccionado dado que a pesar de no registrarse actividad para el modelo original, los datos meteorológicos del pronóstico indicaban la ocurrencia de una tormenta con características importantes, en cuanto a las precipitaciones y a la altura de la línea de nieve.

Estos resultados muestran que en el caso de haber tenido pronósticos un poco más severos, el modelo podría haber entregado una falsa alarma. Al igual que en los casos anteriores, se observa claramente como los resultados son independientes de las condiciones iniciales, luego de un periodo de 4 o 5 meses.

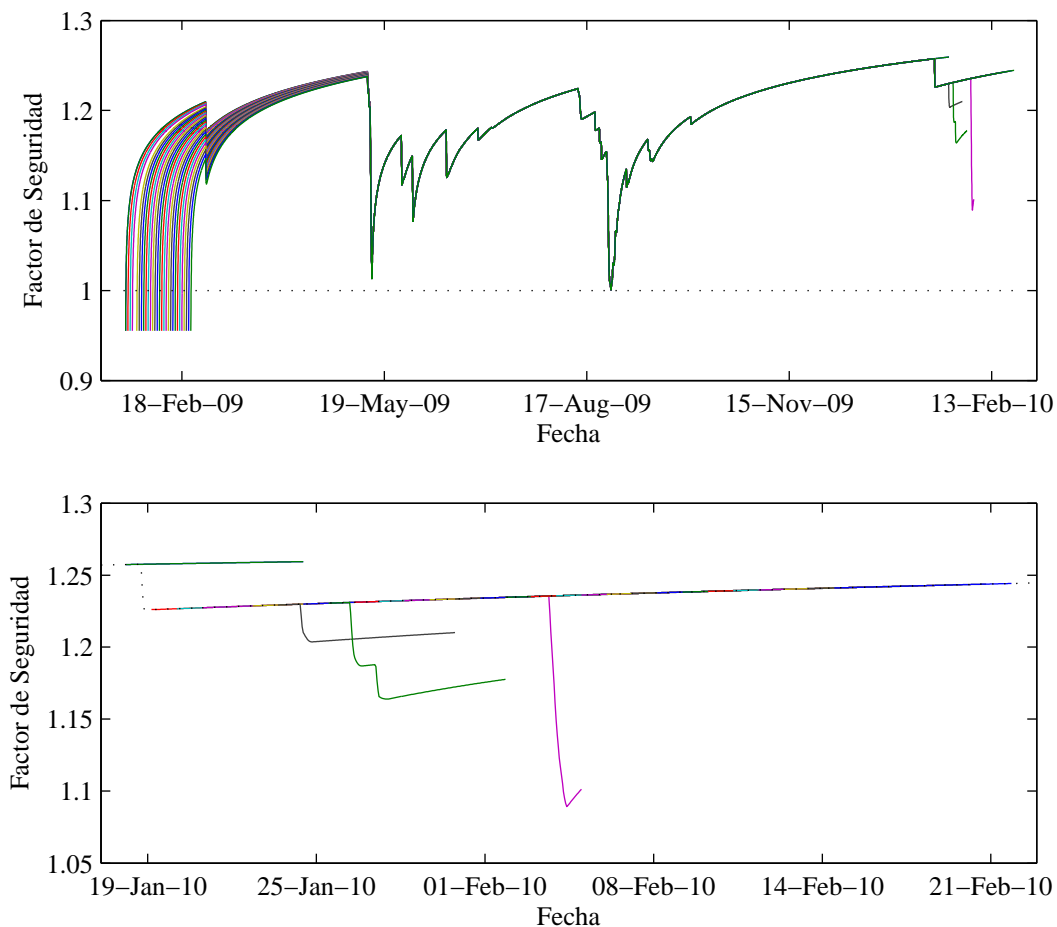


Figura 4.14: Factor de seguridad en tormenta 7 (enero/febrero 2010), para pronósticos meteorológicos con alcance de 7 días

4. La tormenta 8 considera, finalmente, el periodo entre el 30 de marzo de 2010 y el 03 de mayo de 2010. En este caso, la Figura 4.15 muestra una evolución del factor de seguridad similar a lo que ocurre para la tormenta anterior, pero menos acentuado. La disminución del factor de seguridad se da sólo en el caso de dos pronósticos y en el peor de los casos el factor de seguridad alcanza un valor de 1.15, lejos del valor de riesgo.

Durante este periodo se pronosticó igualmente una tormenta, la cual según los datos registrados no se produjo. Es por esto que el factor de seguridad se mantiene relativamente constante y va en aumento hacia una condición de mayor estabilidad.

Nuevamente, el resultado se independiza de las condiciones iniciales en un periodo similar a los anteriores.

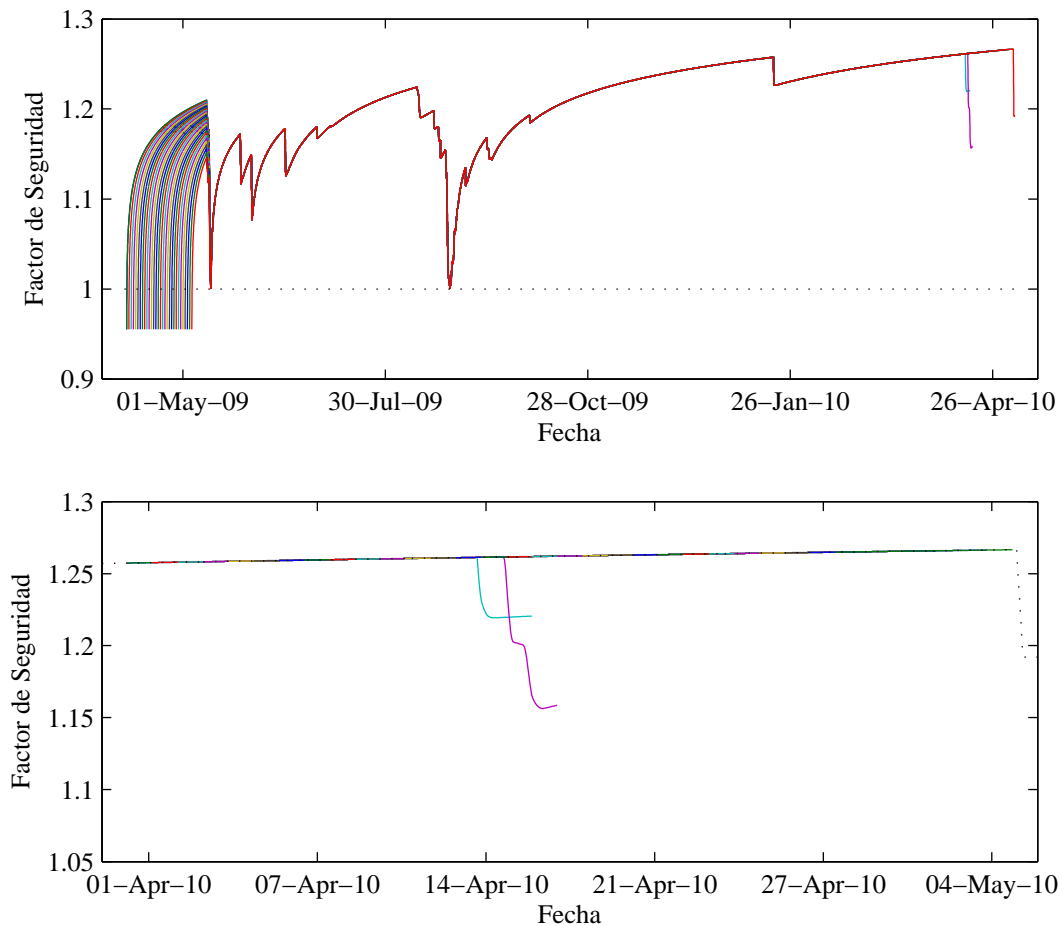


Figura 4.15: Factor de seguridad en tormenta 8 (marzo/abril 2010), para pronósticos meteorológicos con alcance de 7 días

# Capítulo 5

## Conclusión

Contar con un modelo de pronóstico de aluviones que integre un pronóstico meteorológico, un modelo hidrológico y un modelo de estabilidad de taludes es importante, dado los altos costos que representan este tipo de eventos al interior de la actividad minera. Estos costos se elevan dado el riesgo que se presenta en la mina El Teniente, debido a su ubicación en una zona montañosa y a la presencia del río Coya.

El modelo de pronóstico de aluviones propuesto responde frente a los tormentas que se producen, pero genera falsas alarmas que provocan grandes pérdidas para CODELCO. Estas pérdidas pueden estar asociadas a las pérdidas de productividad, que equivalen a 10 MillUS\$ diarios, a daños materiales o a daños a las personas. Estos últimos son los más difíciles de estimar, debido a que se trata de asignarle un valor a la vida. Al considerar una de las fuentes de incertidumbre, la pendiente, los resultados tienden a ser mejores. Se tiene que la respuesta del modelo dados parámetros promedio no corresponde necesariamente a la respuesta real del sistema, pues las variaciones de cada parámetro pueden ser importantes y provocar grandes cambios en dichos resultados. Esto se observa al revisar el el rango de valores que puede tomar el factor de seguridad al considerar distintos valores para la pendiente, y basta que el aluvión se inicie en un punto para luego continuar a través de la cuenca. A pesar de lo anterior, al realizar este análisis las falsas alarmas no disminuyen.

Es necesario contar con herramientas que faciliten el trabajo cuando el número de datos para una variable es muy grande. Una forma de trabajar con ellos es a través de métodos de muestreo estadísticos. En este caso el método de Monte Carlo, y en particular el del Hiper cubo Latino, permite seleccionar un número limitado de escenarios que son al mismo tiempo representativos del total de casos posibles. Para este caso los 2187 escenarios seleccionados fueron suficientes. Esto facilita el proceso de simulación, pues restringe el número de escenarios y disminuye el tiempo de ejecución correspondiente. En este caso, dado el periodo estudiado y el tamaño de la cuenca, lo cual implica un bajo número de unidades o subcuencas para la modelación, el tiempo de simulación es de tres a cuatro minutos, considerando los procesos del modelo hidrológico, el modelo de estabilidad de taludes y la determinación del valor de la información.

A través de un árbol de decisiones es posible conocer el valor de la información entregada



por el modelo de pronóstico. Esta varía en función de la probabilidad de ocurrencia de un aluvión, así como por la importancia asociada a los costos materiales y personales causados por el aluvión comparados con aquellos debidos a la pérdida de la producción. En el caso desarrollado inicialmente este valor mostró ser nulo, lo cual indica que utilizar el modelo no está aportando información adicional. Al modificar los parámetros dicha situación cambia, pero estas son situaciones basadas en supuestos. En general, para valores bajos de probabilidad de ocurrencia del evento el valor de la información del modelo es igual a cero, mientras que para valores medios alcanza su máximo valor, superando un millón de dólares. Luego, para valores altos de dicha probabilidad el valor de la información vuelve a disminuir hasta ser nuevamente nulo. Esta variación se produce porque en dicho escenario es mejor detener directamente la faena. El valor de la información hace referencia a cuanto más útil es utilizar la información entregada por el modelo de pronóstico, frente a un sistema de decisión directa.

La escasa disponibilidad de información sobre los costos asociados a este tipo de eventos, así como la dificultad para evaluar lo que representan los daños a las personas, que pueden ir desde simples lesiones a provocar incluso muertes, obliga a desarrollar un análisis que contenga distintas posibilidades. De esta forma, las personas a cargo de la decisión podrán optar por aquella que consideren adecuada de acuerdo a distintos criterios según su experiencia, como la magnitud del evento, el número de personas que trabajan en el lugar o el tiempo disponible para una evacuación.

Con todo esto, la información requerida para completar el árbol de decisiones corresponde a conocer el comportamiento de naturaleza, los resultados del pronóstico del modelo de aluviones y los costos asociados a los distintos escenarios.

Adicionalmente, es necesario realizar un análisis que permita relacionar las características de una tormenta con la generación de eventos. Esto permitiría determinar las probabilidades de ocurrencia de ellos para distintos casos, y utilizar de mejor manera los resultados obtenidos en este trabajo.

Se ha visto que es posible trabajar con el modelo de pronóstico de aluviones para una serie de pronósticos meteorológicos. Esto muestra que es posible actualizar directamente la información de alerta de aluviones y contar con un sistema continuo. La metodología desarrollada permite además acoplar a esto el sistema de soporte de decisiones, con lo que se podría conocer al mismo tiempo el valor de la información que está entregando el modelo para cada pronóstico.

Finalmente, es necesario conocer las condiciones antecedentes para cualquier simulación de un evento futuro. Es por ello que es necesario contar con un registro de datos meteorológicos y otros parámetros de la cuenca, pues a mayor precisión, mejores serán los resultados. En cuanto al registro de aluviones, mientras mayor sea el número de periodos analizados, ocurra o no un evento, mayores posibilidades habrán de poder mejorar el modelo de pronósticos y hacerlo más eficaz. Al mismo tiempo, es importante recordar la dependencia que se tiene del modelo hidrológico (TopNet), con lo que se necesita, a futuro, contar con un estudio que analice más a fondo la incertidumbre ligada al comportamiento de dicho modelo.

# Bibliografía

- Abebe, A., & Price, R. 2005. Decision support system for urban flood management. *Journal of Hydroinformatics*, **07.1**, 3–15.
- Alfredo, H., & Wilson, H. 1984. *Probability concepts in engineering planning and design*.
- AMS. 2002. Enhancing weather information with probability forecasts. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 450–452.
- APR. 2008. Informe Ingeniería Básica Div, Teniente (090908).
- Aziz, F., Tripathi, N., Ole, M., & Kusanagi, M. 1997. Development of flood warning system. 1–6.
- Bandaragoda, C., Tarboton, D., & Woods, R. 2004. Application of TOPNET in the distributed model intercomparison project. *Journal of Hydrology*, **298**(178-201).
- Beim, G., & Hobbs, B. 1997. Event tree analysis of lock closure risks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **123**, 169–178.
- Beven, K., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R., & Freer, J. 1995. TOPMODEL. *Chap. 18, pages 627–668 of: Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO.
- Biospherica Earth Vegetation. 2009. *NCEP Global Forecast System*.
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Deckers, J., & Wyseure, G. 2013. Modelando el comportamiento hidrológico de microcuencas de páramo en el Sur del Ecuador con TOP MODEL. *In: III Congreso Latinoamericano de manejo de cuencas hidrográficas, 8 - 13 Junio 2013, Arequipa, Perú*.
- Clark, M., Rupp, D., Woods, R., Zheng, X., Ibbitt, R., Slater, A., Schmidt, J., & Uddstrom, M. 2008. Hydrological data assimilation with the ensemble Kalman filter: Use of streamflow observations to update states in a distributed hydrological model. *Advances in water resources*, **31**, 1309–1324.
- DiBiagio, E., & Kjekstad, O. 2007. Early Warning, Instrumentation and Monitoring Landslides. *2nd Regional Training Course, RECLAIM II, 29th January - 3rd February 2007*.

- Environmental Modeling Center. 2003. The GFS Atmospheric Model, NCEP Office Note 442.
- Fukuoka, M. 1980. Landslides associated with rainfalls. *Geotech*, **11**, 1–29.
- GOLDER. 2009. Vulnerabilidad ante Riesgo de Aluviones en Sectores Adit 71 y Quebrada Los Sapos, Mina El Teniente, Chile. Informe Fase 3. 18 de Agosto de 2009, 099 215 2021 - IT002.
- Govi, M., Mortana, G., & Sorzana, P. 1984. Eventi idrologici e frane. *Geol. Appl. Idrogeol.*, **18**(3).
- Greco, R., Giorgio, M., Capparelli, G., & Versace, P. 2013. Early warning of rainfall-induced landslides based on empirical mobility function predictor. *Engineering Geology*, **153**, 68–79.
- Hobbs, B. Basic tools for risk analysis.
- Iida, T. 1999. A stochastic hydro-geomorphological model for shallow landsliding due to rainstorm. *Catena*, **34**, 293–313.
- Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., Fantì, R., & Casagli, N. 2012. Design and implementation of a landslide early warning system. *Engineering Geology*, **148**, 124–136.
- Iverson, R. 2000. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, **36**(7), 1897–1910.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., & Baker, W. 1990. Global Numerical Weather Prediction at the National Meteorological Center. *American Meteorological Society*, **71**(10), 1410–1428.
- Kayastha, P. 2006. *Slope stability analysis using GIS on a regional scale*. Ph.D. thesis, Master of Science in Physical Land Resources, Ghent University, Belgium.
- Lee, K., & Ho, J. 2009. Prediction of landslide occurrence based on slope instability analysis and hydrological model simulation. *Journal of Hydrology*, **375**, 489–497.
- Lehning, M., & Wilhelm, C. 2006. 13 Risk Management and Physical Modelling for Mountainous Natural Hazards.
- Lindley, D., & Bernardo, J. 1977. *Principios de la teoría de la decisión (Making Decisions)*.
- Linsley, R., & Franzini, J. 1992. *Water-Resources Engineering*. McGraw-Hill Series, London.
- Liu, Y., & Gupta, H. 2007. Uncertainty in hydrologic modelling: Toward an integrated data assimilation framework. *Water Resources Research*, **47**.
- Medina-Cedina, Z., & Nadim, F. 2008. Stochastic design of an early warning system. *Georisk: Assessment and Management of Engineered System and Geohazards*, **2**, 223–236.
- Mendoza, P., & McPhee, J. 2011. *Estudio de disponibilidad de recursos hídricos y evaluación del riesgo hídrico, división El Teniente - Desarrollo de un modelo preliminar para el*

*pronóstico de aluviones SA-INF-215-11.*

- Mendoza, P., McPhee, J., & Vargas, X. 2012. Uncertainty in flood forecasting: A distributed modeling approach in a sparse data catchment. *Water Resources Research*, **48**(9), 1–21.
- Morgan, M., & Small, M. 1992. *Uncertainty: a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis.*
- Morss, R., Demuth, J., & Lazo, J. 2008. Communicating Uncertainty in Weather Forecasts: A Survey of the U.S. Public. *American Meteorological Society*, **23**, 974–991.
- National Climatic Data Center. 2014. *Global Forecast System (GFS).*
- Onondera, T., Yoshinaka, R., & Kazama, H. 1974. Slope Failures Caused by Heavy Rainfall in Japan. *In: 2nd International Conference on IAEG.*
- Palmer, T., Shutts, G., Hagedorn, R., Jung, T., & Leutbecher, M. 2005. Representing Model Uncertainty in Weather and Climate Prediction. *Annu. Rev. Earth Planet*, **33**, 163–193.
- Qi, H., & Altinakar, M. 2011. A GIS-based decision support system for integrated flood management under uncertainty with two dimensional numerical simulations. *Environmental Modelling & Software*, **26**, 817–821.
- Rosqvist, T., Molarius, R., Virta, H., & Perrels, A. 2013. Event tree analysis for flood protection - An exploratory study in Finland. *Reliability Engineering & System Safety*, **112**(4), 1–7.
- Schaake, J., Hamill, T., Buizza, R., & Clark, M. 2007. HEPEX, The Hydrological Ensemble Prediction Experiment. *B. Am. Meteorol. Soc.*, **88**(10), 1541–1547.
- Schmidt, J., Turek, G., Clark, M., Uddstrom, M., & Dymond, J. 2008. Probabilistic forecasting of shallow , rainfall-triggered landslides using real-time numerical weather predictions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **8**, 349–357.
- Sepulveda, S., & Padilla, C. 2008. Rain-induced debris and mudflow triggering factors assessment in the Santiago cordilleran foothills, Central Chile. *Nat Hazards*, **47**, 201–215.
- Servicio Nacional de Geología y Minería. 2013. *Anuario de la Minería de Chile 2012.*
- Simmons, A., & Hollingsworth, A. 2002. Some aspects of the improvement in skill of numerical weather prediction. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **128**, 647–677.
- Simon, H. 1977. *The New Science of Management Decision.* Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall.
- Sirangelo, B., & Braca, G. 2004. Identification of hazard conditions for mudflow occurrence by hydrological model Application of FLAIIR model to Sarno warning system. *Engineering Geology*, **73**, 267–276.
- Sirangelo, B., & Versace, P. 1996. A Real Time Forecasting Model for Landslides Triggered

- by Rainfall. *Meccanica*, **31**, 73–85.
- Sunkpho, J., & Ootamakorn, C. 2011. Real-time flood monitoring and warning system. *Songklaounakarin Journal of Science and Technology*, **33**, 227–235.
- Toro, F. 2004. Sistemas de soporte de decisiones para la creación de modelos numéricos hidrodinámicos. *EIA*, **2**, 53–65.
- Turban, E., & Aronson, J. 2001. *Decision Support systems and Intelligent systems*. 6th edn. Prentice Hall.
- UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction). 2009. Terminology on Disaster Risk Reduction.

# Anexos

# Anexo A

## Distribuciones de Probabilidad

1. La función de densidad de probabilidades de la distribución t location-scale es:

$$f(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\sigma\sqrt{\nu\pi}\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} \left[ \frac{\nu + \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}{\nu} \right]^{-\left(\frac{\nu+1}{2}\right)} \quad (\text{A.1})$$

donde  $\mu$  es el parámetro de posición,  $\sigma > 0$  es el parámetro de escala,  $\nu > 0$  es el parámetro de forma y  $\Gamma$  es la función gamma ( $\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1}e^{-t}dt$ ).

2. La función de densidad de probabilidades de la distribución gamma, para parámetros  $\lambda$  y  $k$ , corresponde a:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \frac{(\lambda x)^{k-1}}{\Gamma(k)} \quad (\text{A.2})$$

donde  $\Gamma$  es la función gamma ( $\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1}e^{-t}dt$ ).

3. La función de densidad de probabilidades de la distribución normal corresponde a:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{A.3})$$

donde  $\mu$  es la media y  $\sigma$  es la desviación estándar.

4. La función de densidad de probabilidades de la distribución Birnbaum-Sauders corresponde a:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \exp \left[ -\frac{\left(\sqrt{\frac{x}{\beta}} - \sqrt{\frac{\beta}{x}}\right)^2}{2\gamma^2} \right] \left( \frac{\left(\sqrt{\frac{x}{\beta}} + \sqrt{\frac{\beta}{x}}\right)}{2\gamma x} \right) \quad (\text{A.4})$$

donde  $\beta > 0$  es el parámetro de escala y  $\gamma > 0$  es el parámetro de forma, para  $x > 0$ .