



UNA RED BAYESIANA COMO HERRAMIENTA PARA LA TOMA DE DECISIONES EN PUENTES VEHICULARES

Tesis que para
obtener el título de
Ingeniero Civil presenta:
Luis Horacio Martínez Martínez

Asesor de tesis:
Dr. David Joaquín Delgado Hernández

Toluca, Diciembre 2014

Agradecimientos

*A mi madre
por todo su amor, comprensión y apoyo*

*A José Guadalupe Rangel Ramírez
por todo el apoyo incondicional y oportuno*

*A mis hermanas y papá
por hacerme la vida más agradable*

*A mis sobrinos Ian y Monet
por brindarme su alegría*

*A mi abue Tere
por su comprensión y cariño*

*A mis abuelos Elvira y Ernesto
por sus cuidados y paciencia*

*Al resto de mi familia en Ixtlahuaca
por estar siempre cuando se les necesita*

*A Juan Carlos Arteaga Arcos
por su amistad y motivación para seguir adelante*

*Al COMECyT
por abrir posibilidades de crecimiento*

*A mis amigos Nayelli, Eric Neftali, Rogelio, Néstor, Edgar, Abraham, Omar y Jair
por su amistad y apoyo*

*Al Dr. Daniel Straub y su amistoso grupo de ingeniería de riesgo de la TUM
por recibirnos y permitirnos experimentar algo de investigación en Alemania*

*Al Dr. David Joaquín Delgado Hernández
por ampliar los horizontes y su invaluable apoyo*

*Al CONACYT a través del proyecto CB-158225 Un modelo para el análisis de riesgo
en puentes vehiculares: el caso del Estado de México*

Índice general

1. Introducción	11
1.1. Objetivos	13
1.2. Alcance y limitaciones	13
1.3. Impacto del trabajo	15
2. Redes Bayesianas y herramientas para su construcción	17
2.1. Simulación de Monte Carlo	17
2.2. Redes Bayesianas	20
2.3. Construcción de la red: parte cualitativa	25
2.3.1. Variables problema	25
2.3.2. Variables informativas	25
2.3.3. Variables intermedias	26
3. La acumulación de escombros y sus consecuencias	31
3.1. Introducción	31
3.2. Trabajos relacionados	31
3.3. Consecuencias para la estructura	33
3.4. Falla de puentes con presencia de acumulación	33
3.5. Modelado de la acumulación	35
4. Construcción del modelo: parte cuantitativa	37
4.1. Nodos	37
4.2. Número de Froude	38
4.2.1. Modelos Generalizados en Monte Carlo Cadenas de Markov	38
4.2.2. Discretización de una distribución conocida	40

4.3. Profundidad del río	43
4.4. Bloqueo-Acumulación	44
4.5. Socavación inducida	47
4.6. Fuerza de arrastre	52
4.7. Daño	60
4.7.1. Regla de Miner para evaluación del daño	63
4.8. Volteo	82
5. Caso de estudio: Puente vehicular del Estado de México	93
5.1. Puente San Felipe	93
6. Resultados	97
6.1. Resultados del caso de estudio	97
7. Conclusiones y Trabajo futuro	111
7.1. Conclusiones	111
7.2. Conclusiones particulares	112
7.3. Trabajo futuro	112
A. Conceptos básicos de la probabilidad	115
A.1. Introducción	115
A.1.1. Probabilidad condicional, teorema de probabilidad total y teorema de Bayes	115

Índice de figuras

1.1. Características de la pila estudiada	14
2.1. Representación gráfica de la simulacion de una variable	19
2.2. Gráfico acíclico	22
2.3. Conexión en serie	22
2.4. Conexión divergente	22
2.5. Conexión convergente	22
2.6. Manto de Markov para la variable X	23
2.7. Típica representación de una red probabilística (modificado de [12])	26
2.8. Diagrama de flujo para la selección del idioma (modificado de [21])	28
2.9. Modelo propuesto	29
3.1. Puente con acumulación de escombros en la subestructura	34
3.2. Representación del modelado de las geometrías en perfil	35
4.1. Función de densidad de probabilidad Profundidad del río	41
4.2. Función de densidad de probabilidad del Número de Froude	42
4.3. Geometrías típicas de la acumulación de escombros	56
4.4. Variación del coeficiente de arrastre	58
4.5. Curva típica S-N Esfuerzo-número de ciclos	62
4.6. Diagrama de flujo: programa de daño inicio y determinación de áreas simuladas de escombros	67
4.7. Diagrama de flujo: programa de daño determinación de los brazos y coeficientes de arrastre	69
4.8. Diagrama de flujo: programa de daño determinación de los momentos en la base de la pila	70
4.9. Esquema del modelo considerado y configuración del escombros	71
4.10. Modelo de la pila para cálculo del momento flexionante	71

4.11. Diagrama de flujo: programa de daño determinación del momento flexionante primera región	73
4.12. Diagrama de flujo: de daño estimación de momento flexionante zona final y cálculo de esfuerzos	74
4.13. Sección transversal en la base y corona dimensiones de la pila	75
4.14. Esquema representativo del resultado del programa para evaluar esfuerzos	76
4.15. Diagrama de flujo: programa de daño primeros parámetros	77
4.16. Diagrama de flujo programa de daño segunda parte: definición de las matrices de esfuerzo . .	80
4.17. Diagrama de flujo programa daño tercera parte: determinación de la probabilidad condicional	81
4.18. Distribución de las presiones del suelo debido a carga axial y momento	83
4.19. Convención de signos usado para el cálculo de la capacidad de carga	85
4.20. Posibles geometrias del área efectiva	86
5.1. Ubicación del puente caso de estudio	94
5.2. Puente San Felipe vista general	95
6.1. Probabilidades obtenidas de la compilación en hugin, nótese que las probabilidades estan expresadas como un porcentaje	100
6.2. Probabilidades actualizadas. Evidencia en Profundidad del río con un periodo de recurrencia 5 años, probabilidades en porcentaje	101
6.3. Probabilidades actualizadas evidencia en nodos padre, labor de pronóstico.	103
6.4. Propagación de evidencia en los descendientes, labor de pronóstico.	104
6.5. Propagación de evidencia en los padres, labor de diagnóstico.	106
6.6. Propagación de evidencia en los padres, labor de diagnóstico.	108
6.7. Actualización de las probabilidades al insertar evidencia en dos nodos.	109
6.8. Propagación de evidencia de dos nodos, probabilidades posteriores.	110
A.1. Teorema de la probabilidad total	116

Índice de tablas

4.1. Tabla de probabilidad condicional Nodo Número de Froude	44
4.2. Tabla de probabilidad marginal Nodo Profundidad del río	44
4.3. Tabla de probabilidad condicional Nodo Bloqueo-Acumulación	47
4.4. Tabla de probabilidad condicional Nodo Socavación Inducida	52
4.5. Envoltente de coeficientes de arrastre en pilas	57
4.6. Probabilidad condicional Fuerza de arrastre	59
4.7. Probabilidad condicional Nodo Daño	82
4.8. Probabilidad condicional Nodo Volteo	91

Capítulo 1

Introducción

En la búsqueda de invertir adecuadamente en labores de mantenimiento e inspección de puentes se han desarrollado modelos que simplifican y/o hacen mas adecuada una evaluación de las condiciones en las que se encuentran operando. Gran parte de estas formulaciones que dictan el como invertir los recursos destinados a infraestructura se basan en los métodos de confiabilidad o tienen aproximaciones probabilistas. Las redes bayesianas se cuentan entre una de ellas, por lo que este trabajo abordara temas relacionados a redes y su aplicacion en puentes vehiculares.

La importancia de un puente radica en que es un elemento de conexión que ayuda a fomentar los intercambios entre las poblaciones que conecta. La falla de estos elementos de la infaestructura de transporte representa la búsqueda de rutas alternas o el paro total de las actividades que facilitan.

Uno de los obstáculos que pueden librar son las corrientes naturales, lo que hace que parte de su subestructura este sujeta a las acciones derivadas de intervenir en el flujo. Por ello se tiene que realizar el diseño ingenieril, que determine las dimensiones adecuadas de los elementos estructurales expuestos a estas acciones, para que sean capaces de resistirlas y que cumplan su función, que en el caso de ser pilas ubicadas en la corriente además deben de cumplir con la tarea de transmitir las cargas de la superestructura hacia la cimentación.

Aunque es posible que las cargas consideradas por el flujo de agua de estos elementos, puedan verse incrementadas por la presencia de objetos atascados en estos elementos, estos son generalmente depositados en eventos de inundación y pueden ser de diversas características, aunque regularmente se trate de restos de árboles. Cuando se presentan los dos fenómenos simultáneamente se tienen incrementos en la fuerza de arrastre transferida al o los elementos expuestos y también uno de los problemas concernientes al cambio de las condiciones hidráulicas, es la socavación que se sabe puede provocar problemas de estabilidad estructural.

Si se tienen los tres eventos a la vez, el riesgo de que la estructura sufra un daño se ve incrementado. Este es un objetivo de este trabajo, cuantificar los problemas estructurales acarreados por el fenómeno de acumulación de escombros en pilas. La manera más natural de abordar el problema es a través de la confiabilidad estructural o temas que involucren la estimación de qué tan probable es la presencia de los tres eventos de manera simultánea. Las Redes Bayesianas surgen como una alternativa adecuada, por que mucho de su aspecto gráfico descansa en modelación de eventos causa-efecto de ahí que se lleguen a nombrar como redes causales. Estudios como los presentados en [16] y [28] demuestran el interés de la comunidad ingenieril acerca de este tema, ahora se busca trasladarlo al contexto de la práctica de ingeniería de puentes de México para que los trabajos en el área tengan mayor impacto y que se puedan traducir en recomendaciones para el diseño de pilas en el futuro. Este interés por trasladarlo al contexto nacional radica en la observación de este fenómeno, en puentes ubicados en el sur del Estado de México lo cual confirma la validez de aplicar los conceptos manejados por los dos autores mencionados para traducirlo en una herramienta de utilidad para ingenieros dedicados a la conservación de puentes. Sin embargo existen limitaciones de las que se pueden destacar, la de la poca información disponible referente a gastos, alturas de tirante de agua y planos estructurales de estructuras existentes, por lo cual se hacen las suposiciones que resulten más convenientes.

El rango de aplicación del modelo que se desea construir, debe tener límites por que este modelo no puede cubrir todos los temas y aristas del fenómeno estudiado. Así, el estudio se limita al análisis de pilas de mampostería de roca de sección variable como las presentadas en los puentes estudiados en esta investigación. Acerca de la acumulación de escombros, no incluirá los procesos iniciales de ingreso de escombros a la corriente y sólo se enfocará al proceso de que se atasquen los restos de árboles en la subestructura para a partir de allí poder evaluar las consecuencias que en términos estructurales se presentan sobre la pila.

Se tiene en cuenta que los efectos adversos se dan en la presencia simultánea de los tres eventos aquí estudiados: el aumento de las fuerzas transferidas al elemento estructural, que son de origen hidrodinámico, las da la presencia de corriente en el instante en que está presente la acumulación así como también la existencia de socavación inducida por el cambio de las condiciones hidráulicas y los efectos adversos que le provoquen al elemento estructural.

El elemento que más tendrá que ver con temas relacionados con las ciencias naturales, es el del proceso de acumulación de los elementos de escombros aunque [28] y [16] le dan un enfoque ingenieril a través de la hidráulica, y una aproximación probabilista que bien pudiera resultar más sencilla de trasladar al marco teórico de Redes Bayesianas. La siguiente parte ya corresponde a temas más propios de ingeniería por que se requiere de la estimación de las fuerzas que serán transferidas al elemento estructural y de los problemas, que en términos estructurales, inducirán la socavación. Mucho del proceso de transporte y depósito del escombros tiende a ser relacionado con las condiciones hidrológicas de la cuenca en que se hace el estudio, por lo que

se buscará la manera más sencilla de aplicarlo al caso analizado, puesto que no se cuenta con la información suficiente para realizar un estudio completo de hidrología que pueda ser relacionado con el fenómeno de interés, tal como se hace en [15].

1.1. Objetivos

El objetivo de este trabajo es la construcción de una red bayesiana que sirva como herramienta para tomar decisiones referentes a puentes vehiculares, ante efectos provocados por presencia de acumulaciones de restos de árboles (primordialmente) en su subestructura y su aplicación a un puente vehicular existente.

También se desea conocer que problemas le ocasiona el fenómeno de acumulación de escombros a la estructura y en especial a la pila.

Así mismo se pretende obtener las probabilidades de ocurrencia de las consecuencias que sufra el elemento estructural a través de la herramienta, así como también usar las capacidades que ofrece la herramienta, es decir insertar evidencia en el modelo y estimar las probabilidades posteriores de los elementos de la red

1.2. Alcance y limitaciones

La acumulación y transporte de escombros tiene muchas aristas por las que puede ser estudiado, por lo que un estudio completo implicaría tocar temas concernientes a ciencias naturales. Por ejemplo determinar el cómo y cuánto de una cantidad de árboles puede ser adicionada a la corriente de un río, las interacciones con la hidráulica e hidrología durante el transporte, y las consecuencias o cantidades depositadas en alguna parte de la propia corriente o en una estructura hidráulica con la que potencialmente este escombros llegue a bloquearse. Pero la motivación más clara de este trabajo es investigar que consecuencias se tienen en un elemento estructural por la presencia de ese escombros atorado en la pila, y que estén relacionadas con temas de ingeniería civil, ya que se ha demostrado que en ciertas estructuras que han experimentado el fenómeno se ha suscitado la falla [14].

Por lo tanto el trabajo estudia puentes expuestos a el fenómeno de acumulación de escombros en pilas. Adicionalmente hay otras restricciones que son: la geográfica por que se evalúa un caso de estudio, que está situado en la parte sur del Estado de México. La de las características de la cuenca en que se encuentra el canal estudiado, también las que derivan de la morfología estructural del puente, y de que esta construida la subestructura. La herramienta que se construye, es de Redes Bayesianas del tipo discreto, ya que son más sencillas de manipular y construir.

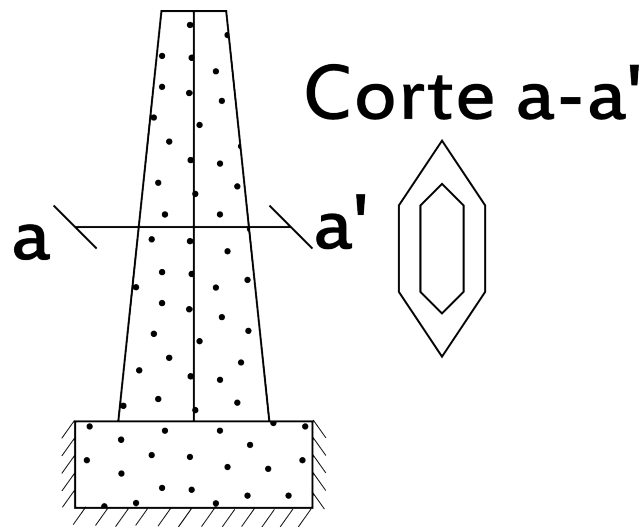


Figura 1.1: Características de la pila estudiada

Las pilas consideradas son de sección variable conforme se avanza en sentido ascendente, siendo de mampostería de roca (ver fig. 1.1).

El propósito es la evaluación de elementos individuales que son parte de la subestructura. En la creación del modelo se busca estudiar de una manera razonada como cuantificar las cantidades de escombros acumuladas, de manera que esta representación sea útil tanto para evaluar el aumento en las fuerzas de arrastre como también para la socavación inducida.

El desarrollo de un modelo que permita la evaluación del daño en la pila está incluido dentro de los propósitos de la red que se desea modelar, pero lo es para el caso en que se presente el análisis de fatiga del material, cualquier otro tipo de mecanismo de daño no se incluye en el modelo.

Respecto a las consideraciones hidráulicas, se basarán en la estadística proveída por el Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) para incluirlas dentro del entorno del modelo propuesto.

Los análisis del tipo probabilista tienden a tener como proceso final la estimación de las consecuencias de algún evento adverso que en nuestro caso serían las pérdidas originadas por la hipotética falla de uno de los elementos analizados, situación que frecuentemente es estimada en términos monetarios; todo este análisis no se efectuará puesto que el modelo se limita exclusivamente a la estimación de probabilidades y no involucra ningún análisis financiero.

1.3. Impacto del trabajo

El trabajo que aquí se desarrolla tiene repercusiones locales por que es de los primeros que aborda el tema de la acumulación de escombros dentro de la teoría de las Redes Bayesianas, el cual puede ser usado por las dependencias administradoras de puentes estatales o federales, que controlen recursos destinados a las estructuras con características similares del tipo de puente estudiado. Se espera que esta herramienta sea útil para los fines que se diseñó y que de la metodología desarrollada surjan herramientas para poder replicar su uso en otro tipo de estructuración y de materiales distintos a los aquí estudiados.

Se desea que represente un agente de cambio en las filosofías de la administración de puentes y que surja como una herramienta con la que se es capaz de tomar decisiones respecto del escombros, o que sirva como una herramienta de pronóstico para cuando se haga una evaluación de una pila propensa a presentar este fenómeno. Todo ello reduciendo los costos asociados a campañas de inspección y levantamiento de propiedades de las estructuras, con soporte en una base de datos que deben tener las dependencias administradoras correspondientes.

Se desconoce de la existencia de un modelo parecido al que se estudia aquí por lo cual, se cree firmemente que es el primero de su tipo usado en una estructura existente.

Capítulo 2

Redes Bayesianas y herramientas para su construcción

2.1. Simulación de Monte Carlo

Los métodos a los que se les denomina de Monte Carlo son basados en la posibilidad de producir de manera computacional flujos de variables aleatorias para distribuciones nuevas o conocidas. La generación de estos valores se basa en la producción de variables uniformes en el intervalo $[0,1]$, los valores de estas variables generadas son independientes. Hablando estrictamente en el método de Monte Carlo se generan los llamados números pseudoaleatorios por que no presentan características aleatorias. El método de Monte Carlo tiene su origen en temas computacionales, y tiene una gran amplitud de aplicaciones. Aquí será el método por el cual se obtenga la información disponible para incluirla en el marco teórico de Redes Bayesianas, cuando se tenga conocimiento de las distribuciones de probabilidad de las variables.

Su principio fundamental consiste en la generación de muestras de variables aleatorias a partir de distribuciones ya definidas. Para efectuar una simulación de este tipo, regularmente se recorren los siguientes pasos:

- Crear números aleatorios uniformes que surgen de:
 - Generador de números aleatorios que produce un número infinito de variables independientes e idénticamente distribuidas,
 - Iniciando con una distribución uniforme que requiere de un valor de inicio llamado semilla,

- Regresar una función $X = g(U_1, \dots, U_k)$ donde g es alguna función de $(0, 1)^k$ para R^d , y
- Hacer un análisis estadístico de los resultados.

En términos básicos, estos son los pasos que se recorren en una simulación típica. No obstante, existe una gran cantidad de literatura dedicada a este tema y las técnicas son especialmente válidas para problemas como los incluidos dentro de la teoría de confiabilidad estructural, y en especial en el tema de evaluación de los estados límite. Con la siguiente ecuación se puede dar una explicación acerca de esta aproximación

$$Pf = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[g(x) \leq 0] \quad (2.1)$$

Donde $g(x)$ es la llamada ecuación de estado límite que en su caso más básico es la resta entre la variable que representa la resistencia R y S la de las solicitaciones, $R - S$. Se generan muestras de las variables aleatorias básicas X o más propiamente dicho se simulan y para cada muestra x se verifica si el estado límite tomando x es positivo. Todas las simulaciones para los valores n_s en que no se cumple el valor positivo son contadas después de N simulaciones y la probabilidad de falla es simplemente:

$$Pf = n_s/N \quad (2.2)$$

La cual se considera como el valor esperado de la probabilidad. Mientras $N \rightarrow \infty$ se tendrá más precisión, si se desea evaluar esta función mediante simulación de Monte Carlo para obtener la probabilidad de falla de orden 10^{-6} deben efectuarse 10^8 simulaciones [7]. La simulación de los N valores muestreados consiste en dos pasos, que son la generación de un número llamado pseudo-aleatorio de valor entre el intervalo $[0,1]$ para cada uno de los componentes. La generación de este valor puede ser llevada a cabo a partir de funciones existentes en software de programación o en los que manipulan bases de datos; en un siguiente paso los resultados de los números pseudo-aleatorios n_{ji} son transformados en muestras r_{ji} por medio de:

$$r_{ji} = F_{R_i}^{-1}(n_{ji}) \quad (2.3)$$

Donde $F_{R_i}(\cdot)$ es la distribución acumulada de la variable aleatoria R_i . El proceso continua hasta que los componentes del vector r_j sean generados.

La figura 2.1 representa como es que se efectua la simulación de una variable aleatoria, el primer paso para ello es el conocimiento de la distribución de probabilidad acumulada de la variable y a través de una transformación que representa ir de los valores de probabilidad hacia los de la variable deseada, se obtiene una muestra r de la variable aleatoria.

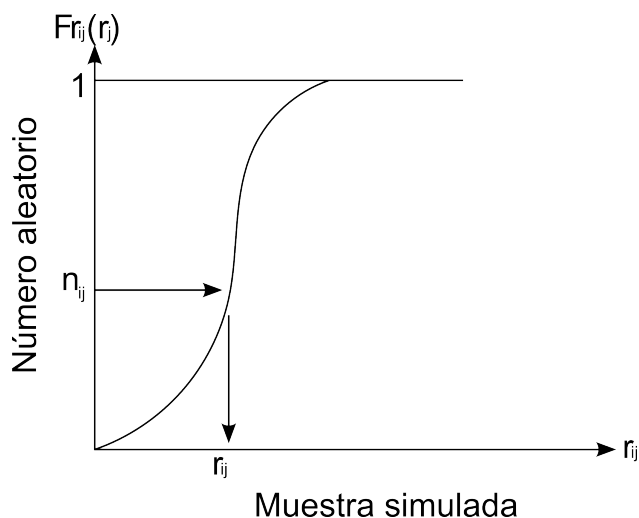


Figura 2.1: Representación gráfica de la simulación de una variable

La obtención de las muestras por medio de Monte Carlo es útil cuando la distribución acumulada se puede obtener fácilmente y cuando su función inversa tiene una forma parecida. Este es el proceso básico al que se le conoce con el nombre de simulación cruda de Monte Carlo y la figura 2.1 representa todo el proceso que se sigue para la obtención de las muestras de cualquier variable; también un aspecto importante en el uso de esta técnica es el conocimiento de sus posibilidades. Una de ellas es su utilización al momento de analizar funciones de variables aleatorias, que es utilizado extensivamente en el capítulo 4.

En resumen, se encarga de generar artificialmente muestras r_i de la distribución de la variable de entrada R y se evalúan las funciones $y = g(r_i)$ para cada valor de la muestra de r_i . Así, un conjunto de muestras y_i del valor de la función Y es generada y se le pueden aplicar técnicas estadísticas para evaluarla y tener una representación completa de la variable que a su vez también puede formar parte o ser usada en otras funciones. Esta técnica es útil cuando se requiere que la función $y = g(r_i)$ sea evaluada numéricamente y para cuando es difícil obtener la inversa de la función[29]. El significado de la función inversa es ir de los valores de probabilidad (aunque no son números completamente aleatorios) hacia los de la variable aleatoria, caso contrario a lo realizado si se manejan conceptos de probabilidad. Lo anterior explica el por qué la decisión de utilizar esta técnica, por que de algunos datos concernientes al puente estudiado (gastos, etc) es posible obtener la distribución de variables que estén en función de las variables simuladas en nuestro caso, variables relacionadas con el estado estructural del elemento estudiado o las consecuencias que se tienen por la presencia de acumulación de escombros (volteo, daño, socavación). Aunque hablando de distribuciones específicas el principio no es tan sencillo de aplicar, puesto que se tienen complicaciones acerca de la definición

de la función inversa de la distribución, para enfrentar este problema se han desarrollado todo un conjunto de métodos los que se les clasifica de indirectos, de los cuales destaca el de aceptación-rechazo que puede ser consultado en [4]. La aplicación de la simulación de Monte Carlo que se presenta a continuación esta concentrada en los gastos del río que libra la estructura analizada en esta investigación, aplicado una prueba de bondad de ajuste para saber que tipo de distribución se ajusta la estadística lo que resulta en una Gumbel con parámetros de posición $\beta = 206.28$ y escala de $\alpha = 74.24$. Ahora, como se sabe la distribución acumulada del tipo Gumbel es:

$$\begin{aligned} F(x) &= \int_{-\infty}^x \frac{1}{\beta} \exp\left(-\frac{t-\alpha}{\beta}\right) \exp(-e^{-(x-\alpha)/\beta}) dt \\ &= \exp(-e^{-(x-\alpha)/\beta}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Después de generado el número pseudo-aleatorio n , una muestra de r es obtenida por medio de:

$$r = F^{-1}(n) = \alpha - \beta \log(-\log n) \quad (2.5)$$

Esta aplicación ejemplifica el como se realizó la simulación de Monte Carlo, ahora estas muestras generadas pueden ser usadas para el cálculo de una función que involucre a la variable simulada y, a su vez, de este conjunto de resultados se le apliquen métodos de la estadística para conocer por ejemplo sus parámetros. Toda la simulación fue llevada a cabo dentro de un programa que esta diseñado para utilizar herramientas estadísticas sobre todo, llamado R y que es de libre acceso.

2.2. Redes Bayesianas

Las Redes Bayesianas son gráficos que consisten en un conjunto de variables conectadas entre si a través de arcos o flechas dirigidas, las variables aleatorias son representadas a través de nodos y si se trata de redes discretas cada variable tiene un conjunto de estados mutuamente excluyentes. En el lenguaje de las redes bayesianas un nodo que tiene conexión con otro, es llamado variable padre y la variable con la que está conectada se le conoce como variable hijo. Formalmente se trata de gráficos acíclicos dirigidos; es decir al seguir un camino a través de la red no se llega al mismo punto de inicio ver la figura 2.2 para un gráfico de este tipo. Una red se diseña con la intención de representar un problema explicado por la dependencia probabilística entre las variables del modelo [8]. Las redes en su forma gráfica tienen tres configuraciones básicas que pueden ser una conexión en serie, conexión divergente y conexión convergente. Estas nos dan la pauta para determinar las condiciones de independencia y también, en caso de tener evidencia, el flujo de información a través del modelo se ve interrumpido. Para ello se hace el estudio de las redes causales y las condiciones bajo las cuales la información no es intercambiada entre los nodos de la red. **Conexion en**

serie: La figura 2.3 muestra una red para la cual la variable x_1 tiene influencia tanto en la variable x_2 y en la x_3 . Si se tiene conocimiento o certeza del estado de la variable intermedia algún cambio extra en la probabilidad de la variable x_1 no tendrá ya influencia en la variable x_3 . Es decir que la evidencia a través de una conexión en serie puede ser transmitida si el estado de la variable intermedia no es conocido con certeza. **Conexión divergente:** De la figura 2.4 se aprecia que la variable x_1 es causa de las otras dos, si no se conoce con certeza el estado de la variable x_1 , la información pasa libremente o en otras palabras la evidencia puede transmitirse en una conexión divergente si el estado del padre en común no es conocido con certeza. **Conexión convergente:** En la figura 2.5 si no se tiene conocimiento del estado de la variable x_3 , el conocimiento de la variable x_2 no tiene ninguna influencia sobre la probabilidad de x_1 en pocas palabras se dice que la evidencia se transmite a través de una conexión convergente solamente si hay alguna evidencia en la variable común hijo o descendientes. En resumen se puede decir que dos variables A y B en una red causal esta d-separada si una variable intermedia D distinta de A y B si la conexión es en serie o divergente y D se conoce con certeza y ni la propia variable ni sus hijos han recibido evidencia. En Redes Bayesianas las conexiones representan dependencia estadística entre las variables. Si la parte gráfica de una red causal se mantiene para redes bayesianas entonces la d-separación corresponde a independencia estadística. Por lo tanto, si en una red bayesiana dos variables X_1 y X_2 están d-separadas dado un conjunto de evidencia e se dice que son estadísticamente independientes dada e , o en otros términos:

$$P(X_1|X_2, e) = P(X_1|e) \quad (2.6)$$

Para hacer mas clara esta propiedad, si la variable X_3 esta d-separada de X_1 como en el caso de la conexión en serie de 2.3 si sabemos con certeza el valor de X_2 entonces para esa red $p(X_3|X_2, X_1) = P(X_3|X_2)$ o que es lo mismo que una vez que conocemos X_2 ningun conocimiento adicional en la variable X_1 cambiará la probabilidad de X_3 . Existe una propiedad en Redes Bayesianas que es llamada el manto de Markov (Markov Blanket en inglés) que consiste en todos los padres y padres de los hijos de una variable X . Siguiendo las condiciones descritas previamente este nodo esta d-separado de las otras variables de la red, si todas las variables de este manto se conocen con certeza. Ver figura 2.6 para una mejor visualización.

Cada nodo representa una distribución de probabilidad y los arcos indican una dependencia probabilística. Esta dependencia es representada por medio de distribuciones de probabilidad condicional en caso de tener padre(s). Las Redes Bayesianas representan la probabilidad conjunta de las variables incluidas en el gráfico, aprovechando los principios de la independencia estadística, donde dos variables se dice que son independientes si su probabilidad condicional es igual a su marginal, entonces la probabilidad masa de una red es:

$$P(x) = \prod_{i=1}^n P(x_i|pa_i) \quad (2.7)$$

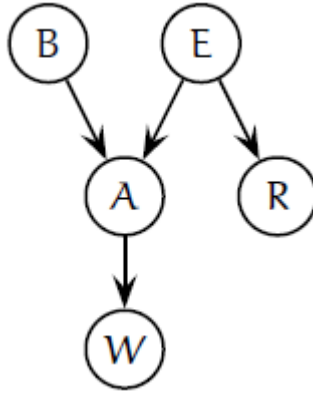


Figura 2.2: Gráfico acíclico

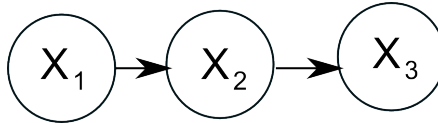


Figura 2.3: Conexión en serie

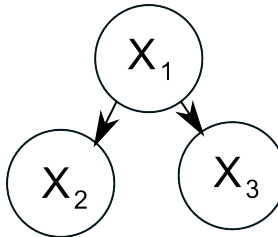


Figura 2.4: Conexión divergente

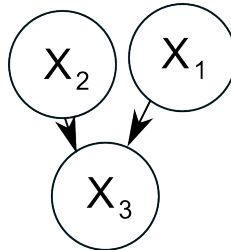


Figura 2.5: Conexión convergente

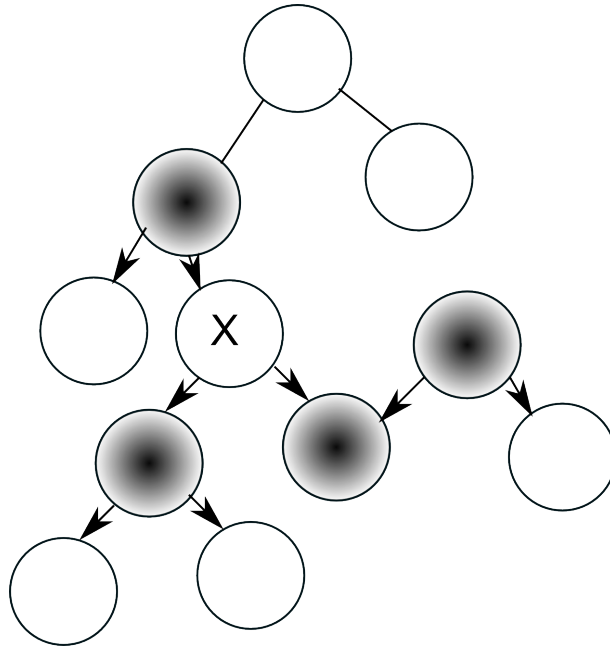


Figura 2.6: Manto de Markov para la variable X

donde pa_i es el conjunto de padres de X_i

Como ejemplo se estima la probabilidad conjunta de $X_2 \leftarrow X_1 \rightarrow X_3$ de esta manera:

$$P(x_1, x_2, x_3) = P(x_1)P(x_2|x_1)P(x_3|x_1) \quad (2.8)$$

Como se aprecia, estos modelos aprovechan las condiciones de independencia y las probabilidades condicionales para obtener la probabilidad conjunta, que a veces calcularla de manera analítica puede resultar muy difícil de determinar. Cabe agregar que a las probabilidades de un nodo que no cuente con padres, regularmente se les conoce como incondicionadas o marginales.

Estos modelos permiten la entrada de evidencia en cualquiera de sus componentes o lo que es lo mismo que cuando es conocido el valor de alguna variable permite la actualización de las probabilidades de las otras variables. Esta información se propaga a través de toda la red y en el ejemplo de tres nodos que se está considerando, se supone que se conoce evidencia en el nodo X_2 entonces las probabilidades de X_3 y X_1 cambiarán a las conjuntas posteriores a través de

$$\begin{aligned} P(x_1, x_3|e) &= P(x_1, e, x_3)/P(e) \\ &= P(x_1)P(e|x_1)P(x_3|x_1) / \sum P(x_1)P(e|x_1) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Que se hace apoyado en el teorema de Bayes y calcula las probabilidades marginales posteriores de X_1 y

X_3 , a esta tarea de actualizar otros nodos o parte de la red en base a insertar evidencia, se le conoce con el término de inferencia y existe una gran cantidad de algoritmos para calcular las probabilidades posteriores de una manera más eficiente en una red.

Estas herramientas son típicamente descritas por sus dos componentes: parte cualitativa y parte cuantitativa; la parte cualitativa se refiere al gráfico y su estructura, la parte cuantitativa es descrita por las probabilidades. Frecuentemente la parte cualitativa se construye sobre principios de causalidad aunque no necesariamente refleje un modelado causa-efecto. La parte gráfica de una red bayesiana posee características que la hacen muy atractiva para su uso, por que este componente con frecuencia se puede leer de una manera intuitiva y fácil. Usualmente la construcción de una red bayesiana se hace de una manera iterativa donde el conjunto de nodos, sus estados y conexiones se actualizan mientras se refina el modelo. Pero antes de cualquier aplicación o uso de estas herramientas computacionales, es necesario obtener distribuciones de probabilidad, de características similares a las de una variable aleatoria para nodos que no tengan ancestros y distribuciones de probabilidad condicional a los nodos padre, representadas por medio de tablas de probabilidad condicional.

Al compilar una red bayesiana se obtienen las probabilidades marginales a priori y después de adicionarle evidencia calculará las distribuciones posteriores en algún conjunto de variables, lo que da un indicio de la capacidad de efectuar tareas de diagnóstico que pueden ser de utilidad para determinar, por ejemplo, situaciones de búsqueda de posibles causas de falla de alguna obra de ingeniería.

Cabe mencionar que estos modelos se pueden extender a los llamados diagramas de influencia que básicamente son redes bayesianas aumentadas con nodos de decisión a los que frecuentemente se les asocian costos, lo que puede llevar al cálculo de conceptos como el riesgo. Una decisión representa un conjunto de acciones mutuamente excluyentes y exhaustivas que el tomador de decisiones tiene que efectuar [20] y en el contexto de estos modelos se les representa con el cálculo de probabilidades resultantes de que alguna acción que modifique al nodo al que apunta el nodo de decisión.

Cada nodo de una Red Bayesiana está asociado con una o mas distribuciones de probabilidad, si este nodo no tiene padres en el gráfico, está asociado con una distribución de probabilidad llamada a priori o marginal. En el caso contrario se dice que el nodo esta asociado con un conjunto de distribuciones de probabilidad que son llamadas condicionales locales. Si se trata de una distribución local, cada una de ellas corresponde a una combinación de los estados de los padres, es decir, para cada combinación de estos estados está asociada una distribución.

Por ejemplo, si un nodo tiene tres padres que se componen de dos estados cada uno habrá que estimar 8 distribuciones de probabilidad sobre los estados de la variable considerada [32]. Por el momento al término estado de una variable se le puede definir como una división de la distribución de probabilidad, en el capítulo

4 se abordará el tema con aplicaciones.

Uno de los usos de las redes es la estimación de probabilidades posteriores dada cierta evidencia en alguno de los nodos componentes del gráfico, todo ello por medio del teorema de Bayes. Ese es uno de los objetivos que motivaron la construcción del modelo presentado más adelante, el que se conozcan las probabilidades posteriores de ciertos eventos dado que se tiene evidencia en otros de los nodos.

Cuando se construyen redes bayesianas de manera manual generalmente se trabaja bajo decisiones de expertos en el tema, y frecuentemente es mas desafiante la tarea de determinar los parámetros de la red que la construcción del gráfico. Por tanto el objetivo de este trabajo es calcular unicamente los parámetros del modelo presentado, es decir, la construcción del gráfico y la estimación de las tablas de probabilidad condicional y distribuciones marginales resumidas en él. .

2.3. Construcción de la red: parte cualitativa

En esta fase de la construcción de la red se tienen que definir las variables y como están relacionadas entre si, para después cuantificarlas, lo primero que se tiene que hacer es observar que variables va a incluir el modelo que es una representación del problema en cuestion, de la acumulación de escombros en pilas de puentes, las implicaciones hidráulicas y geotécnicas que tiene, y los efectos estructurales que tendrá en el elemento traducido en fuerzas de arrastre impuestas y problemas de estabilidad ocasionados por la socavación. Para comenzar a representar este problema a través de Redes Bayesianas se requiere conocer que tipo de variables se incluyen en un modelo de este tipo.

2.3.1. Variables problema

Son las variables de interés, y para las cuales se desean obtener sus probabilidades posteriores dado el estado de las variables informativas. Regularmente el valor de ellas no se puede observar y son relacionadas con diagnósticos, predicciones, decisiones o clasificaciones. Aquí, son las variables daño en pila y volteo. Son las variables en las cuales se está interesado en conocer su probabilidad dado que se observaron otras de las variables que conforman la red.

2.3.2. Variables informativas

Son las variables para las que se tendrá la información disponible y servirán de base para resolver el problema. De esta clase de variables surgen dos clasificaciones: **Variables de ambiente o definición** Son el tipo de variables que estarán disponibles antes de la ocurrencia del problema y tienen un impacto causal en las variables problema y síntoma. En el modelo propuesto es la profundidad del río y el número de Froude.

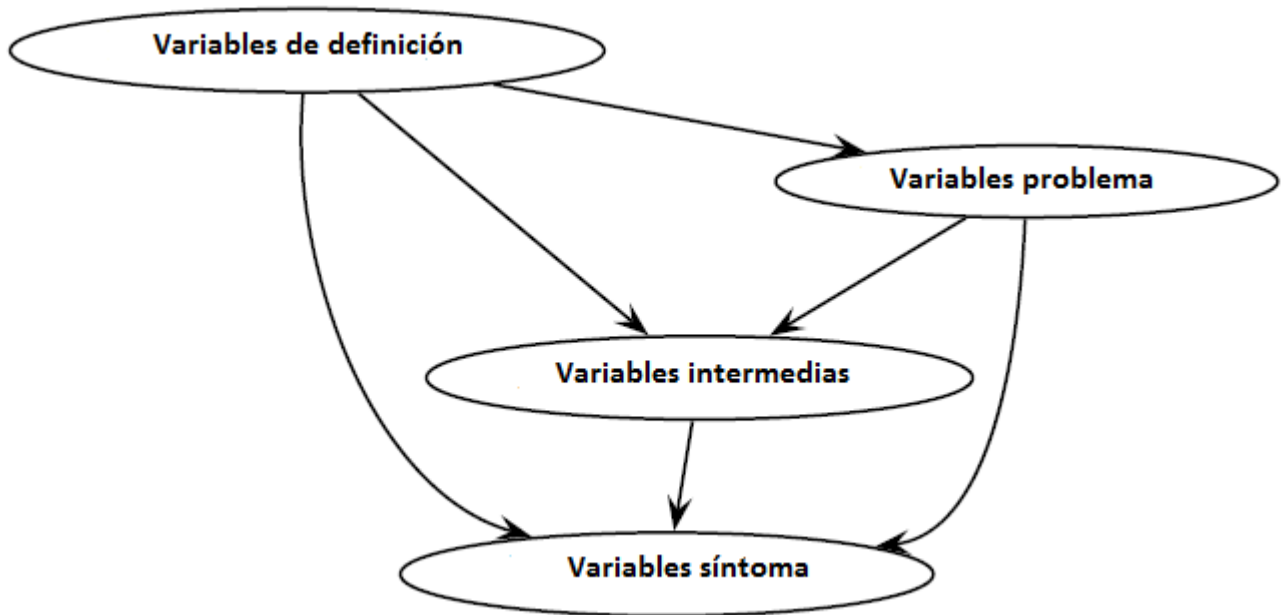


Figura 2.7: Típica representación de una red probabilística (modificado de [12])

Variables síntoma Son aquellas que se pueden presentar como consecuencia de la presencia del problema, frecuentemente son variables hijo de las variables ambiente o las variables problema, en el modelo construido son fuerza de arrastre y socavación.

2.3.3. Variables intermedias

Son aquellas variables para las cuales las probabilidades posteriores no son de interés inmediato, pero juegan un papel importante para determinar correctamente las dependencias e independencias, regularmente tienen como padres a las variables de definición y problema, y a las variable síntoma como hijos. Bloqueo-Acumulación es la más representativa del modelo.

Cuando se tienen definidas las variables el paso siguiente es proponer como es que estarán relacionadas, si se desea mantener un enfoque causal entonces se cumplirán las siguientes proposiciones: las variables de ambiente tienen una influencia en las variables problema y en las variables síntoma; las variables problema tienen impacto en las síntoma. En caso de existir las variables intermedias están mas influenciadas por variables problema y de ambiente, la figura 2.7 es la estructura típica de una red en función de sus variables y manteniendo el enfoque causal.

De acuerdo con [21] una buena aproximación sobre como crear la estructura de una red es basarse

en la descripción de 5 subestructuras a las que les denomina idiomas, que representan razonamiento bajo incertidumbre.

Idioma de definición o síntesis, Modela la combinación de ciertas variables en una a través de su definición o funcionalidad. Por ejemplo si la calidad de determinado producto esta en función de la experiencia del departamento de calidad y del cuidado con el que se hace; podría construirse una red que representase con los dos elementos que definen la variable como nodos padre y a la calidad como hijo.

Causa consecuencia, Modela mecanismos de causa efecto.

De medición Modela la incertidumbre asociada con cierta medición u observación. La diferencia que tiene con el primer idioma es que un nodo de la estructura es la estimación de otro en vez de representar a dos o mas nodos. Un ejemplo es una red con dos nodos padre llamados valor real del atributo, y precisión estimada convergentes a un nodo hijo denominado valor estimado del atributo; puesto que el valor real del atributo es medido por alguien o algún instrumento, con una precisión estimada determinada, el resultado de ello es un valor estimado del atributo.

Inducción, Modela observaciones basadas en un razonamiento inductivo para inferir información referente a variables que no han sido observadas. Ningún razonamiento de este idioma es causal.

Reconciliación, Consiste en reconciliar resultados que provienen de dos fuentes independientes de información, por ejemplo dos redes diferentes.

Resumiendo, el primer paso para la construcción de la componente cualitativa de una Red Bayesiana es la definición de las variables que se cree o que se ha comprobado son relevantes para definir el problema. Las cuales después de consultar la literatura que se dedica al fenómeno de acumulación de escombros en puentes como [16] se aprecia que una variable importante en la experimentación conducida en este es la profundidad del río. Del mismo trabajo se aprecia que el número de Froude resulta útil para caracterizar el flujo de la corriente y es un parámetro importante en la hidráulica de ríos por lo tanto se selecciona como otro componente del gráfico.

Las consecuencias de la acumulación de escombros se resumen en dos situaciones, una es el cambio de las condiciones hidráulicas y que resulta en un aumento en la fuerza de arrastre paralela al flujo que es transferida a los elementos, la segunda consecuencia es el que se retire suelo de la cimentación al que se le conoce en ingeniería de puentes como socavación; por tanto estas dos variables serán incluidas en el gráfico y por supuesto al hecho de que suceda el fenómeno también se representará como una variable en la construcción cualitativa y su significado es múltiple. Por último se deben evaluar las consecuencias de las dos situaciones que provoca el fenómeno, se representaron por lo pronto como la posibilidad de que el elemento tenga un vuelco y que en su comportamiento sufra un daño.

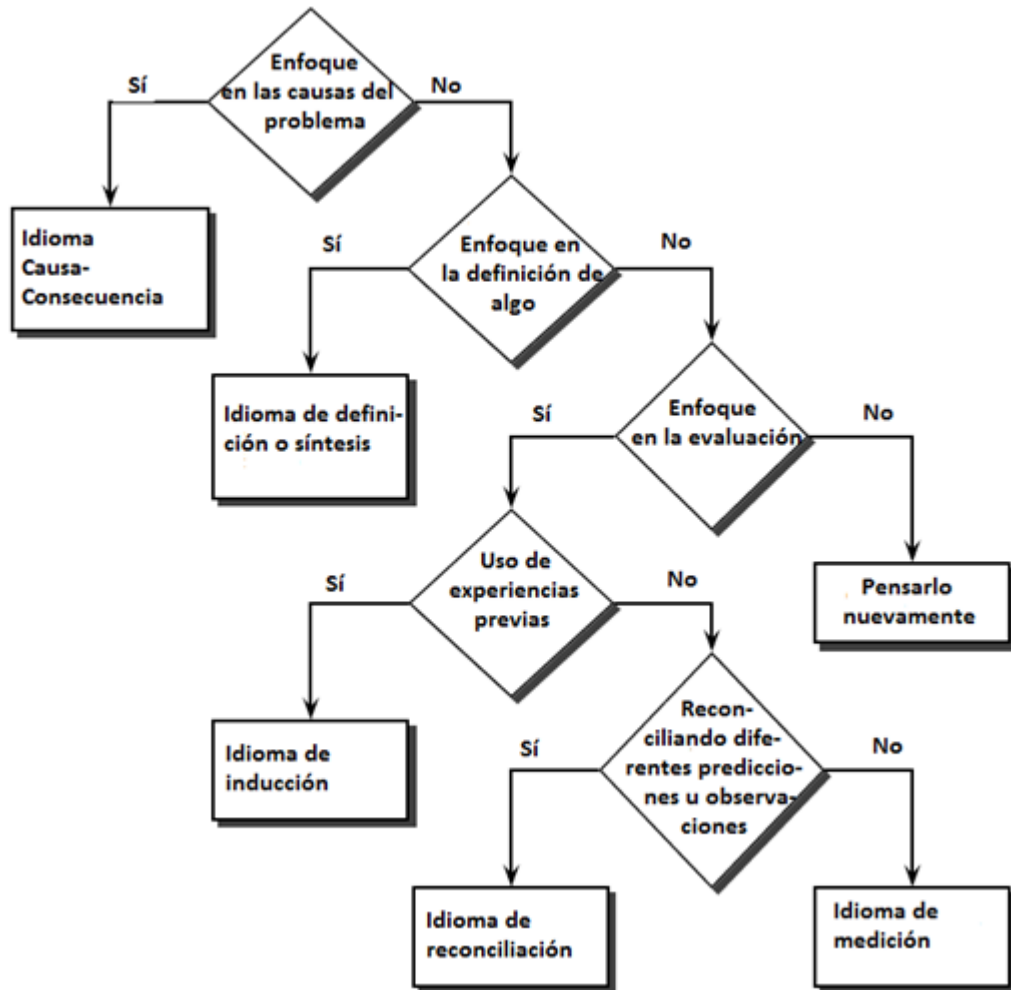


Figura 2.8: Diagrama de flujo para la selección del idioma (modificado de [21])

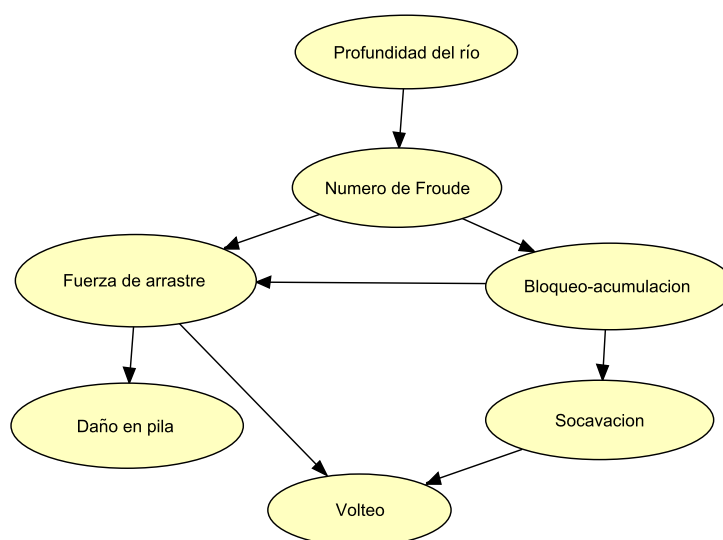


Figura 2.9: Modelo propuesto

Después se consideran las relaciones entre las variables o se determina cuales deben estar relacionadas, finalmente se escoge el idioma a través del cual se van a relacionar, para ello es recomendable seguir el diagrama de flujo mostrado en la figura 2.8.

Para analizar la red construida para este trabajo se definieron previamente las variables problema que son el objetivo del desarrollo del modelo: Daño en la pila, y volteo del elemento estructural, que son los estimados que brindan información útil si se desea utilizar el modelo para auxiliar en toma de decisiones (ver figura 2.9).

Si se desea desarrollar la construcción de la estructura del modelo en un enfoque causa-efecto, este idioma tendría que ser seleccionado. Si se desea averiguar bajo que circunstancias se presenta el bloqueo de restos de árboles en las pilas de los puentes se debe acudir al idioma causa-consecuencia. O en otro caso si se desea definir la variable bloqueo acumulación a través de otras, se estaría recurriendo al de definición o síntesis que en este caso se está representando con el hecho de que el nodo número de Froude es padre de Bloqueo-acumulación. La relación de la red que también se basa en el idioma de definición o síntesis, es la de fuerza de arrastre puesto que es definida por el área obstruida por los objetos (Bloqueo-acumulación) y la presencia del fluido representado por el número de Froude. También se manifiesta para definir la variable daño en la pila puesto que sin la presencia de elementos mecánicos (fuerzas) no se presenta ningún comportamiento mecánico en el elemento. Por último, el idioma causa-consecuencia es usado para las conexiones que van de bloqueo-acumulación a socavación y fuerza de arrastre, y a su vez la convergencia de estos dos al nodo volteo

por que tienen una influencia directa al ocasionar este mecanismo en el elemento. La conexión que va de profundidad del río a número de Froude, también sigue este idioma, así como también la conexión de Número de Froude a Bloqueo-acumulación. Dado que el número de Froude, representa la presencia del Fluido, ya sea de una inundación o del flujo habitual del río, y este es la causa de la acumulación del escombros.

Una vez presentadas, de manera general las propiedades de las Redes Bayesianas y los conceptos usados para la construcción del modelo representado en la figura 2.9, en el siguiente capítulo se discutirán conceptos concernientes al modelado de la acumulación de escombros y sus consecuencias.

Capítulo 3

La acumulación de escombros y sus consecuencias

3.1. Introducción

En su curso natural, los ríos además de transportar agua, en situaciones como eventos de inundación pueden llevar consigo otro tipo de materiales, pero comúnmente son restos de árboles que han caído en la corriente o que son puestos en ella como consecuencia de alguna actividad humana. El proceso por el cual pierden o se erosiona el suelo en el que están plantados y en el que se incorporan son temas que tienen más proximidad con un especialista en otras ramas diferentes a la ingeniería como las ciencias naturales. Por lo tanto el proceso de cómo se incorporan a la corriente y depositan los restos de árboles en algún lugar son situaciones que no se abordarán en este trabajo. Para más referencia ir a investigaciones como [18]. Es necesario reconocer que este fenómeno es de especial interés cuando afecta la infraestructura existente sobre una corriente que presenta estas características, puesto que se han registrado fallas en puentes atribuibles a las situaciones adversas que provoca el escombros en la subestructura.

3.2. Trabajos relacionados

Referente al tema de la acumulación de escombros en puentes, existen fuentes experimentales como [16] en el cual se ejecuta una serie de experimentos en modelos hidráulicos para determinar la probabilidad de que, bajo ciertas condiciones hidráulicas un grupo de tres tronquitos se quede atrapado cierto espacio de tiempo en el prototipo de una pila. También investiga el efecto de deflectores de escombros y de cuerpos que simulan

acumulaciones de arena presentes un río; al final se ubican dos puentes que se monitorean durante un tiempo determinado para encontrar tendencias de acumulación respecto de las lecturas de las variables hidráulicas registradas en estaciones de aforo cercanas. La principal conclusión obtenida en esta investigación es que la profundidad del agua es el factor determinante en que se presenten las acumulaciones en las pilas de puentes.

Existe una continuación de este trabajo [15] donde se visitan sitios en los que ha existido este fenómeno y se hace una clasificación de estos teniendo como referencia el volumen de escombros depositados en los sitios, y se elabora un reporte fotográfico extenso. También se reportan visitas a sitios que cuentan con acumulaciones, a los cuales se les asocia con el gasto diario en estaciones de aforo cercanas. De cada reporte se sabe como se fueron desarrollando las acumulaciones y su posible relación con las condiciones de gasto de las corrientes, todo esto en términos cualitativos. La última parte de la investigación es el monitoreo continuo de acumulaciones en tres sitios seleccionados; el primero para un periodo de 30 meses y los otros dos para 15, en donde se asocian eventos de acumulación de escombros con eventos de inundación. Así se determinan, por ejemplo, los picos del gasto y los eventos de transporte de escombros posteriores a ellos, detectando los tiempos de arribo y los cambios en las acumulaciones si es que ya están presentes.

Un trabajo más próximo a la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno es presentado en [28] donde a través de una serie de experimentos se determinan las probabilidades de que se presente la obstrucción para troncos y un conjunto de escombros idealizados, en tres tipos de puentes (sin pila en el cauce) para diferentes condiciones de flujo que representan inundaciones. De aquí la importancia de relacionar estos eventos con situaciones de inundación o gastos pico. Posteriormente, se obtienen las ecuaciones para determinar la probabilidad de bloqueo de acuerdo a las condiciones de flujo, y a las dimensiones del borde libre; todo ello con el objetivo de crear un modelo predictivo para priorizar puentes con características similares que estarán expuestos a estas situaciones. Como se logra deducir, este es un trabajo que bien puede representar el problema del cálculo de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno, sólo que la debilidad es que está hecho únicamente para puentes sin pila en el cauce, siendo que los puentes con pilas expuestas son el objetivo del presente trabajo.

Además de las investigaciones mencionadas, se localizaron otras referentes a como estimar las cantidades de escombros y la manera de incorporar geometrías típicas para calcular en que unidades se evalúa esta variable en el evento, se encontró con el trabajo pionero de Diehl, referente a la forma y las dimensiones de acumulaciones de escombros en puentes en los Estados Unidos que da ciertos lineamientos para definir la geometría del escombros para dar recomendaciones en el diseño de la subestructura [5]. El inconveniente es que sólo son recomendaciones para puentes de ese país por lo que su uso será limitado para aquí.

Finalmente se localizó un trabajo más general [14] en el que gracias a una extensa base de datos recogidos en campo, y a estudios de caso se pudieron clasificar las acumulaciones de escombros en puentes, en base a

geometrias idealizadas que representan las formas más típicas que suceden en puentes que tienen elementos de subestructura expuestos a la corriente de las cuales se hace uso de la información en los capitulos que siguen.

3.3. Consecuencias para la estructura

Ahora que ya se tiene una visión mas general de los fenómenos de la acumulación de escombros en las pilas de los puentes, es importante conocer los efectos adversos que representan para toda estructura que este en la corriente. Básicamente, son dos los puntos que hacen importante el tomar en consideración la presencia del escombros en la subestructura; el primero de ellos tiene que ver con el aumento de área expuesta a la corriente, lo que generalmente incrementa las fuerzas hidrodinámicas transferidas a la estructura, esto tiene cierta relación con los eventos de inundación por ello la literatura escrita sobre este tema relaciona eventos de inundaciones con transporte y depósito de escombros.

El segundo punto adverso para la subestructura es la reducción del área efectiva de flujo que tiene originalmente la estructura. Dado que el gasto que tiene que pasar es el mismo, no hay otro mecanismo más que el aumento de la velocidad, lo cual lleva a uno de los problemas más estudiados en la ingeniería de puentes: la socavación local. La socavación local provoca una reducción en el área en que esta soportada la cimentación de la estructura, lo que remite a fenómenos de inestabilidad o problemas geotécnicos como el asentamiento. Como se mencionó anteriormente, estas acumulaciones regularmente estan asociadas a eventos de inundación por lo que es probable que se presenten los tres eventos simultáneamente; acumulación de escombros, presencia de tirantes asociados a inundaciones y socavación local, lo cual revela la importancia en tener consideraciones respecto al escombros en el diseño, inspección y mantenimiento de puentes con subestructura sobre una corriente.

3.4. Falla de puentes con presencia de acumulación

Los reportes y estudios que se han efectuado acerca de falla de puentes [10], develan que un porcentaje del 29.3% son originados por causas naturales, y de ese porcentaje las inundaciones y la socavación cubren el 61%. Resaltando la importancia del estudio de estos peligros para tomar provisiones en cualquier etapa de la vida de la estructura.

Específicamente, las fallas que se han reportado por causa de la presencia de escombros son las del puente Perkins sobre el río Nonconnah en Memphis Tennessee [14]. Después de realizar una investigación forense, se encontró lo siguiente: presencia de escombros aguas arriba del puente, una pila fallada, pero aún en pie y las



Figura 3.1: Puente con acumulación de escombros en la subestructura

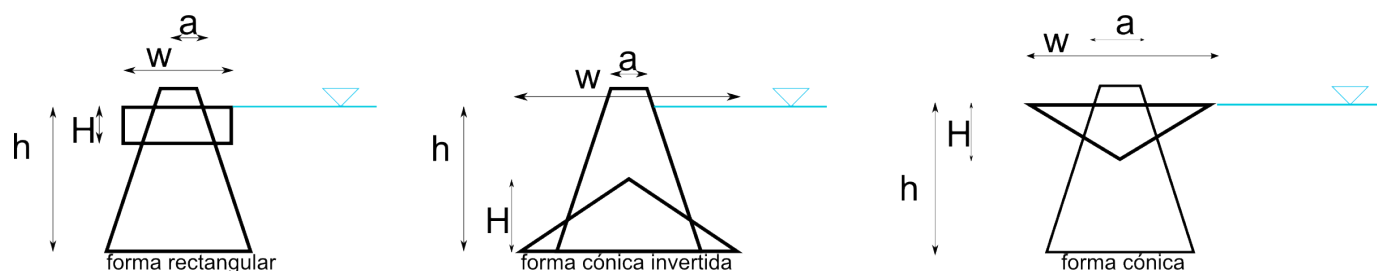


Figura 3.2: Representación del modelado de las geometrías en perfil

demás pilas totalmente perdidas. Se realizaron estudios hidrológicos, hidráulicos y de socavación detallados. También se efectuaron análisis geomorfológicos y de transporte de sedimentos para determinar socavación por contracción, erosión, socavación local y el impacto del escombros. Se llegó a la conclusión de que el incremento del área bloqueada (al hacer más ancha la pila) afectó radicalmente las condiciones de flujo que son requeridas para el uso de una ecuación para estimar la socavación, lo que provoca la necesidad de investigar más a fondo esta contribución. Existe también otro reporte [24] donde se menciona que las posibles causas de daño de dos puentes ubicados en el río Florida cerca de Skidmore Missouri, y el río Halfbreed cerca de Falls City, Nebraska fue la presencia de escombros y presumiblemente el aumento de las fuerzas transferidas a la estructura, para más detalle consultar [24]. Gracias a la consulta de estos trabajos, fue posible considerar el tema de la acumulación del escombros y sus consecuencias como válido, con el objetivo de tratarlos desde un punto de vista probabilista y tener una herramienta útil para labores de inspección y mantenimiento. En lo que respecta a la literatura nacional acerca de estos temas, sólo se recoge escasa información, aunque en las visitas a campo que se realizaron al sur del Estado de México, con la finalidad de conocer los puentes a estudiar, se detectó la presencia de este fenómeno en algunos de los puentes visitados, lo que confirmó que esta situación también ocurre en nuestra zona geográfica (ver la fig.3.1).

3.5. Modelado de la acumulación

Como las situaciones adversas en los puentes están relacionadas generalmente con la geometría de la acumulación es fundamental encontrar maneras de representarla. De ser posible, es necesario tener información de la región acerca de este fenómeno, pero como puede deducirse, lograr esta tarea implica el monitoreo y reporte de las acumulaciones, cuestión que es difícil lograr.

Las formas en que se acumula el escombros en las pilas son difíciles de estimar por lo que se hacen idealizaciones como las presentadas en [5]. Como el objetivo es la estimación de las fuerzas y la socavación inducida, es fundamental el conocimiento de las dimensiones de la acumulación. Por ello se requiere el

conocimiento de la forma básica de estas, y que también se ajusten lo más posible a la realidad. Un trabajo que contiene la mayor información y tres geometrías básicas de acumulación es el presentado en [14] donde se hace una recopilación extensa de un archivo fotográfico de puentes que tienen la acumulación de escombros, y a través de ella, se llega a tres geometrías idealizadas del escombros que es como se ocuparán en este trabajo. Estas figuras constan de las configuraciones en planta de forma triangular y rectangular, en perfil están la del tipo cónica (aunque se asume más adecuada como una forma triangular en los cálculos), rectangular y cónica invertida (ver figura 3.2 para más detalle). La sección que interesa más en el cálculo de la fuerza es la de perfil, pues se pone especial atención en la determinación del área transversal, puesto que la fuerza que se transfiere al elemento se calcula con esta área.

Para la socavación inducida sólo se toman en cuenta dos de las configuraciones en perfil, que son la rectangular y la triangular. Estas afectan un parámetro para el cálculo de la socavación inducida, por lo cual el modelado se hace para planta en primer término, y para perfil en el segundo: triangular-cónica (que en el caso de los cálculos tanto en socavación como fuerza de arrastre se asume como triangular) rectangular-rectangular, rectangular-cónica y rectangular-cónica invertida (que también se toma como triangular).

De este mismo trabajo se usan los valores para cada una de las proporciones entre las variables que representan cada una de las longitudes de las formas seleccionadas, en este caso para determinar las longitudes, como W y H (ver figura 3.2), pero como puede notarse es necesario conocer el ancho de la pila y la profundidad del río. Para lograr la finalidad de definir estas dos variables, que son usadas a partir del cálculo de los descendientes de la variable Bloqueo-Acumulación, se recurre a la simulación de las proporciones W/a y H/h , asumiendo que siguen una distribución uniforme, que en el caso de la configuración triangular dentro del intervalo (5.2-43) para W/a y (0.33-1) para H/h . En el caso de la configuración rectangular sus parámetros se simulan en los intervalos (2-5.45) y (0.33-0.4) respectivamente, de acuerdo a lo reportado en [14] para el caso triangular, y calibrando las del caso rectangular con base en los resultados de correr el programa correspondiente al nodo daño y ver los efectos para la estimación de los componentes de este.

La representación del escombros resulta fundamental para la estimación de la socavación inducida y del incremento de la fuerza de arrastre, pero aún es necesario aplicar estos conceptos en el entorno de Redes Bayesianas, por lo cual el capítulo siguiente se enfoca en la evaluación de los nodos de la herramienta construida y los parámetros de la herramienta construida.

Capítulo 4

Construcción del modelo: parte cuantitativa

4.1. Nodos

La parte correspondiente a la evaluación de la parte cuantitativa de la red se centra en el cálculo de los siete nodos descritos en el segundo capítulo. La forma en que ha sido estructurada la red, ha dependido de la estimación de las distribuciones de probabilidad. Si el nodo no tiene ancestros, se debe evaluar una distribución de probabilidad marginal o no condicionada. Aquí, es el nodo que representa a la variable profundidad del río. En caso de que el nodo cuente con un padre, se determinan distribuciones de probabilidad condicionales a él sobre todos los posibles estados del nodo en cuestión. Los estados pueden entenderse como divisiones de la distribución de probabilidad en ciertos intervalos que puede tomar la variable. Formalmente a este proceso se le conoce como discretización.

Los nodos número de Froude, Bloqueo-acumulación y Daño son de este tipo; entonces, por ejemplo, si profundidad del río es discretizado en 5 estados, para el nodo número de Froude se requieren calcular cinco distribuciones de probabilidad condicional sobre los estados de esta variable. Cuando un nodo cuente con dos o más padres, se estarán calculando tablas de probabilidad condicional en las que cada columna represente una combinación de los estados de los padres, y estas representen una distribución sobre todos los estados del hijo. Este es un requisito para poder comenzar a utilizar las funcionalidades de una Red Bayesiana.

4.2. Número de Froude

El número de Froude es un parámetro que resulta de dividir las fuerzas inerciales entre las gravitacionales, de flujos en canales abiertos, o en corrientes en las que su flujo se conduce de manera natural por gravedad. Es expresado como:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (4.1)$$

Donde V representa la velocidad del fluido, g la aceleración de la gravedad y h la profundidad del canal. Se escogió este parámetro por que es frecuente utilizarlo para hacer similitud hidráulica, dado que los resultados de las investigaciones encontradas que tratan el fenómeno de acumulación de escombros, se hacen en prototipos y para trasladarlo al contexto de canales existentes, es uno de los parámetros fundamentales. También se buscó que la aplicación de la herramienta no sólo pudiera hacerse en ese traslado de un prototipo a la realidad, sino a otro tipo de corrientes. Todo esto a través de una normalización, lograda al momento de obtener todos los valores simulados de esta variable y dividirlos entre el valor más grande.

El punto de partida fue la distribución de valores extremos del tipo Gumbel que se ajustó con la prueba de Kolmogorov-Smirnov para la estadística de los valores correspondiente al río, dentro de la base de datos BANDAS. De esta, se efectuó una simulación de Monte Carlo para la variable gasto, y cada valor simulado es sustituido en un modelo generalizado que relaciona el gasto con la profundidad, para hallar así el estimado de la variable profundidad, que es una componente de la ecuación para el cálculo del número de Froude, a su vez, el mismo número simulado en el paso anterior se dividió entre el área de la sección transversal del río para estimar la velocidad.

Después de realizar el cálculo del número de Froude se normalizó con respecto del número máximo estimado con la finalidad de lograr un número de Froude adimensional con posibilidad de escalamiento a otros canales. Ahora, como la finalidad es llegar a la estimación de la tabla de probabilidad condicional al nodo padre que es profundidad del río, lo que se desea es el cálculo de distribuciones locales condicionales a los estados del nodo padre, es decir, a cada estado del nodo padre le corresponde una distribución de probabilidad sobre los estados del hijo. El primer paso es decidir como es que se discretizará la variable. Pero antes de ello es importante describir el modelo generalizado que se usa para la estimación de la variable profundidad.

4.2.1. Modelos Generalizados en Monte Carlo Cadenas de Markov

Un modelo habitual de regresión se conforma de tres componentes básicos: la variable de respuesta Y , las variables descriptivas X_1, X_2, \dots, X_p y un mecanismo que las conecta, pero como se desea una con

características especiales, se investigó que los modelos que cumplían con este requisito son los modelos Bayesianos de regresión [22].

La variable de respuesta Y representa la parte probabilística del problema. La inferencia en este tipo de modelos consiste en la definición del tipo (negativa, positiva) y la magnitud del efecto de cada X_i en la variable de respuesta Y . Otra manera de representar esta relación entre los componentes de un modelo de este tipo, es definir a la distribución de la variable de respuesta condicional a las observaciones de las variables explicativas:

$$Y|X_1, \dots, X_p \sim D(\theta(\beta, \phi, x_1, \dots, x_p)) \quad (4.2)$$

Donde el vector de parámetros θ es expresado como una función de las variables explicativas y dos parámetros nuevos (β, ϕ) que sustituyen a los originales, todo ello en términos de estimación e inferencia; β resume la asociación entre las variables explicativas y la variable de respuesta; mientras que ϕ puede referirse a otras características de la distribución, como por ejemplo el parámetro de forma o posición si se habla de una distribución del tipo de valores extremos.

A partir de la lectura de los trabajos de investigación [16], se empezó a notar la necesidad de contar con información estadística referente a dos variables hidráulicas del río que son el gasto y la altura, a partir de las cuales se pudiera definir el número de Froude.

La función que sirve para conectar la parte probabilística y determinística del modelo regularmente se le conoce como "función de conexión generalizada". Para entender mejor este concepto se hace referencia al caso más simple, que consiste en manejar como función de conexión generalizada una que exprese la media de la variable de respuesta como una combinación lineal de las variables explicativas de la siguiente forma:

$$M(Y|X_1, X_2, \dots, X_p) = \mu(\beta, X_1, \dots, X_p) = g^{-1}\left(\beta_0 + \sum_{j=1}^b \beta_j x_j\right) \quad (4.3)$$

Esta combinación lineal es utilizada para pronosticar el valor de la media de la variable de respuesta. Como es sabido, existe una gran variedad de distribuciones de probabilidad para las cuales se podría buscar un modelo como este, por simplicidad se usa un modelo de regresión del tipo normal, entonces la variable H que se refiere a profundidad del río es la variable de respuesta. La razón por la cual se escogió desarrollar un modelo normal es la tendencia lineal que tiene la información, puesto que no se trata de alturas con algún efecto de oleaje, entonces se puede considerar del tipo normal. Como se menciono la variable Y de respuesta tiene características aleatorias y puede ser representada por una distribución de probabilidad con vector de parámetros $D(\theta)$ que pueden ser la media y la varianza en el caso de una distribución normal.

En el anexo se aprecian las definiciones bayesiana y el teorema de Bayes, del cual se derivan esta clase de modelos. Uno de sus objetivos es la búsqueda de la distribución posterior $P(B | A)$, que es difícil de estimar

con precisión. Por ello muchos de estos modelos son desarrollados a través de programas de computación sofisticados, donde se recurre por ejemplo a los métodos de simulación.

Un método usado para este propósito es el método de Monte Carlo Cadenas de Markov, a través del cual se muestrea sucesivamente a partir de una distribución objetivo, donde cada uno de los muestreos depende del inmediato anterior. Monte Carlo interviene en el cálculo de un valor esperado, promediando las muestras obtenidas de las cadenas de Markov. Nuevamente, se hizo uso de la información referente a las condiciones hidráulicas del río objeto de estudio. Teniendo estos datos se aplicaron los principios del Modelo generalizado; se determinó un modelo estadístico que relacionara las variables de interés. Así, efectuando una simulación de Monte Carlo de una de las dos variables la otra se obtiene por medio de la sustitución de los valores simulados de:

$$H = 1.01 + 0.006782Q \quad (4.4)$$

Donde: H altura de la corriente Q: Gasto

De los valores obtenidos de la simulación de la distribución de Gumbel, cada valor de gasto se sustituye en este modelo y se llega a la distribución de la variable profundidad del río; de la simulación de estos valores también se pueden definir valores simulados para la velocidad, haciendo uso de la ecuación de continuidad $Q = VxA$. Se hace uso de ella como una aproximación puesto que se utiliza para flujos que son del tipo laminar. A partir de esta se obtienen los valores de la variable velocidad, y finalmente se tienen todos los componentes necesarios para calcular el número de Froude.

4.2.2. Discretización de una distribución conocida

Al momento de trabajar con Redes Bayesianas una decisión es importante decidir si se aplica un algoritmo de discretización de un espacio continuo a uno discreto, todo ello con la finalidad de hacer menos demandante el trabajo computacional interno al momento de ejecutar la red y sus principios. Se conocen dos maneras de discretizar un conjunto de datos: el primero es conocido como discretización univariable que como su nombre indica; cada variable del conjunto de datos es dividida individualmente, y la segunda es llamada discretización multivariada y consiste en la categorización de varias dimensiones simultáneamente.

Al momento de saber la forma de una función de densidad de probabilidad (FDP) y al querer efectuar una discretización de ella, la primera situación a la que se enfrenta el analista es la del manejo de las colas, si el estudio está centrado en la parte densa de FDP el truncar las colas no representa ninguna dificultad. Pero en este caso el origen de las distribuciones es una del tipo de valores extremos, en la que interesa sobre todo en esta parte de la distribución[8]. Así, uno de los objetivos de la ingeniería de riesgo es el manejo de estas zonas que debe hacerse con cuidado. Aquí se optó por una discretización univariada para la variable

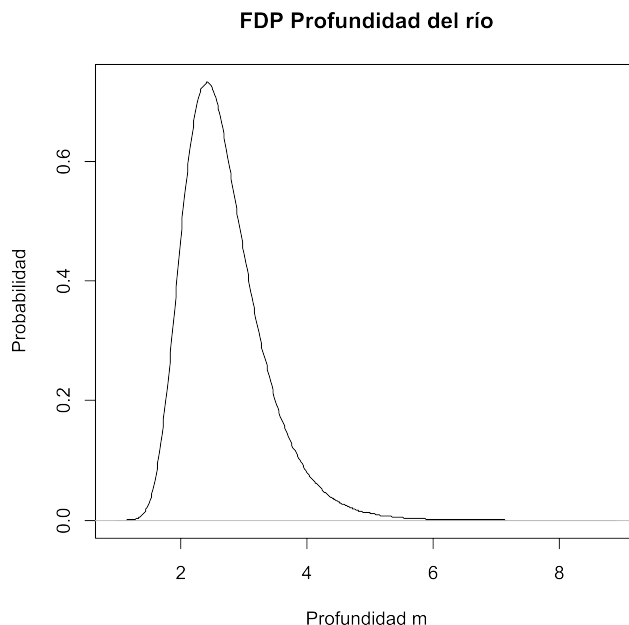


Figura 4.1: Función de densidad de probabilidad Profundidad del río

altura del río, y por motivos prácticos se seleccionaron 5 intervalos, si se desea consultar un método más estructurado consultar literatura como [8]. Teniendo en cuenta que dentro de los intervalos debía de entrar toda la información de la variable.

Considerando que la mayoría de los cálculos hidráulicos para una estructura de este tipo se realiza generalmente para un periodo de recurrencia de 100 años, este fue el intervalo superior, así como también para 5, 10, 25 y 50.

De la fig. 4.1 se aprecia que la cola de la zona izquierda contiene una gran parte de la información y el último intervalo supera los ocho metros; así los valores de esta variable correspondientes a cada periodo de recurrencia fueron respectivamente: 3.32, 3.79, 4.39, 4.84, 5.28 en metros.

De la red propuesta en el segundo capítulo, se aprecia que el nodo número de Froude tiene como padre al nodo Profundidad del río, por lo tanto se deben estimar cinco distribuciones de probabilidad condicional sobre todos los estados en que se discretizó el número de Froude. Entonces, la primera tarea es dividir la distribución de la variable Froude, que como se explicó anteriormente se dividió entre el máximo número de Froude con el objetivo de escalar cualquier tipo de corriente, todo ello con la intención de evitar conflictos en la búsqueda de información y para el uso en otras estructuras. De la fig. 4.2 se aprecia que la mayor cantidad de información se concentra a partir del valor de 0.8, lo que resultará en una discretización fina para este intervalo y una más dispersa para los valores menores.

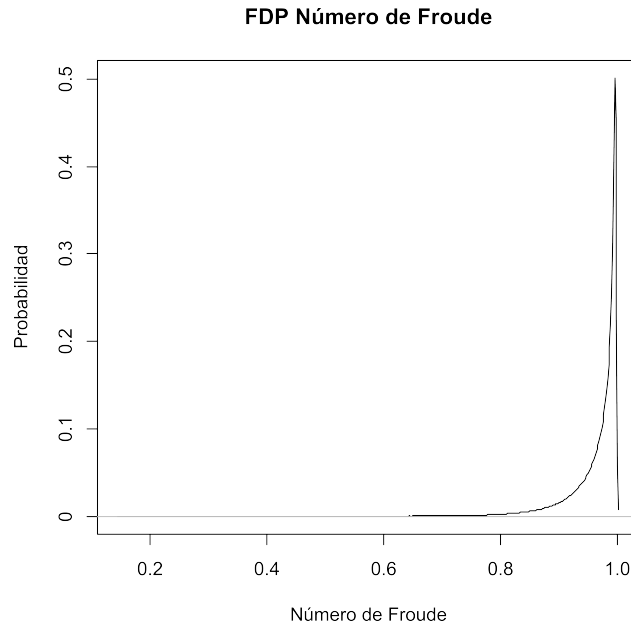


Figura 4.2: Función de densidad de probabilidad del Número de Froude

Nuevamente con la intención de efectuar una discretización practica para los fines de este trabajo se escogieron como puntos de división los siguientes: 0.0, 0.7447, 0.851, 0.9787, 1.2766. Con la intención de que el intervalo superior excediera la unidad, evitando tener pérdida de información, en caso de presentarse.

El paso siguiente es el cálculo de las probabilidades condicionales, que en el caso de ser una red discreta se representa como una tabla de probabilidad condicional (CPT por sus siglas en inglés). Para tener más claridad en el manejo de ellas, se colocan en la parte superior los intervalos de la variable padre (profundidad del ro h) y a cada columna se le asignan los intervalos en los que se discretizó; en la zona horizontal que se refiere a los renglones se colocan la categorización de la variable hijo (Número de Froude) y a cada renglón igualmente se le asigna el valor de los intervalos en que se discretizó. Por consecuencia, cada columna debe representar una distribución de probabilidad condicional es decir al sumar todas los elementos de una columna deben sumar la unidad. Ver tabla 4.1.

Se hace uso de uno de los conceptos fundamentales de la teoría de probabilidad, que es la de probabilidad condicional la cual se define como:

$$Pr(A|B) = Pr(AB)/Pr(B) \quad (4.5)$$

$$Pr(F|h) = Pr(Fh)/Pr(h) \quad (4.6)$$

Donde:

$Pr(A|B)$ = probabilidad condicional del evento A dado que sucedio el evento B.

$Pr(AB)$ = probabilidad de la intersección de los dos eventos.

$Pr(B)$ = probabilidad del evento B.

En la última ecuación se presenta la aplicación de este concepto para el caso estudiado. La obtención de las probabilidades del numerador y del denominador, en el caso hipotético de que la información fuera extraída de una base de datos, consistiría simplemente en contar para cada caso el número de eventos correspondientes y dividirlos entre el número total de datos. Puesto que aquí toda la información surge de una simulación de Monte Carlo, la estimación de todas las probabilidades continuará por ese rumbo solo que ahora se dividira entre el número de simulaciones efectuadas. Entonces:.

$$Pr(Fi|hi) = Pr(Fihi)/Pr(hi) \quad (4.7)$$

$$Pr(Fihi) = \sum (Fi \cap hi)/n \quad (4.8)$$

$$Pr(hi) = \sum (hi)/n \quad (4.9)$$

Donde:

$Pr(Fihi)$ = probabilidad de que se de la intersección del evento Fi con el hi.

$Pr(hi)$ = probabilidad de que suceda el evento hi.

n = número de simulaciones.

Para hacer más claro este procedimiento se va ejemplificar el cálculo de la probabilidad condicional de que se encuentre en los dos primeros intervalos de las dos variables. Cabe mencionar que para realizar estos cálculos se desarrollo un algoritmo computacional que tuviera la capacidad para clasificar y contar la información. Lo primero que se tiene que hacer es contar cuantos casos caen dentro de los dos primeros intervalos simultáneamente (es decir, que las dos variables esten ,tanto en el primer intervalo de profundidad como en el primero de número de Froude), se divide entre el número de simulaciones y se llega a la probabilidad $Pr(F1h1)$, después para el denominador se cuentan todos los casos en los cuales la información cae en el primer intervalo de la variable profundidad y a su vez se divide entre la cantidad de simulaciones entonces se llega al denominador $Pr(h1)$.

4.3. Profundidad del río

Este nodo es el más sencillo de parametrizar y evaluar ya que no cuenta con ningun nodo que funcione como su padre. Como ya se explicó se ajustó una distribución del tipo Gumbel a la estadística encontrada del río objeto de estudio. Se efectuo una simulación de Monte Carlo con los parámetros que se han mencionado anteriormente y con la ayuda del modelo generalizado en MCCM (Monte Carlo Cadenas de Markov) se

Tabla 4.1: Tabla de probabilidad condicional Nodo Número de Froude

Número de Froude	h5	h10	h25	h50	h100
0-0.7447	0.005240226	0	0	0	0
0.7447-0.851	0.030734809	0	0	0	0
0.851-0.9787	0.411328309	0.1384615	1	1	1
0.9787-1.2766	0.552696656	0.8615385	0	0	0

Tabla 4.2: Tabla de probabilidad marginal Nodo Profundidad del río

Profundidad del río	Probabilidad
5 años	0.8528
10 años	0.08715
25 años	0.040275
50 años	0.011325
100 años	.00845

introdujó el flujo de los gastos simulados al modelo y así se llegó a la distribución de esta variable, a la cual se le llama distribución marginal o no condicionada. El trabajo restante fue el de discretizar este modelo, lo cual dió como resultado 5 intervalos correspondientes al periodo de recurrencia de 5, 10, 25, 50 y 100 años. El concepto de periodo de recurrencia es un concepto que viene de la definición de probabilidad de ocurrencia, y no debe confundirse con el concepto de probabilidad de excedencia, donde esta probabilidad resulta del dividir $1/\text{periodo de retorno}$. La que se calcula aquí depende de el escenario inmediato inferior y el inmediato superior. Por ejemplo, asumiendo el periodo de recurrencia de 25 años está entre el de 10 y el de 50 entonces se calcula como $(1/10) - (1/50) = 0.08$.

4.4. Bloqueo-Acumulación

Referente al tema de puentes que cruzan ríos, en los cuales las pilas estan expuestas al cauce, y por consiguiente a la posibilidad de que distintos escombros (regularmente restos de arboles), se acumulen en sus pilas, existen trabajos que han investigado el fenómeno; de hecho ha resultado que algunas de las fallas de puentes vehiculares, relacionadas con temas de hidráulica, se debieron primordialmente a la presencia

simultánea de acumulación y algún evento hidrológico (llámese inundación) adverso para las condiciones de diseño del puente. Como en este trabajo se están investigando los dos procesos adversos, este nodo requiere que se parametrize adecuadamente la manera en que se da este bloqueo y la geometría de la acumulación, por que el aumento en el área transversal de la pila es una de las razones por las cuales aumenta la fuerza de arrastre transferida a la pila.

Como se aprecia en el capítulo dos, este nodo es hijo de la variable número de Froude y padre de los dos efectos adversos que tienen hacia las estructuras: la fuerza de arrastre y la socavación inducida. Esto nos indica que para cada estado de la variable padre existe una distribución de probabilidad para todos los estados del hijo.

Para conseguir una aproximación adecuada de como parametrizar esta variable se busco literatura relacionada a cuestiones probabilísticas acerca del tema de acumulación de escombros en puentes. Una de ellas [16] consiste en una investigación experimental y de campo para tener una comprensión más adecuada del fenómeno tanto en puentes existentes, así como en modelos hidráulicos. Sólo que para los objetivos de este estudio y poderlo adaptar a la modalidad de Redes Bayesianas se tendrían ciertas complicaciones si se creaba un nodo que explícitamente (o por medio de algún tratamiento compatible con Redes Bayesianas) únicamente la presencia del fenómeno de bloqueo, por que es insuficiente para las dos consecuencias que tiene (que naturalmente serían nodos hijos de esta variable). Lo anterior, por que el aumento en la fuerza de arrastre es altamente dependiente de la geometría de la acumulación en la zona frontal de la pila. Existe una continuación de este estudio donde los autores del estudio se encargan de monitorear y clasificar sitios donde se presenta o ha presentado la acumulación de escombros [15] que es más cercano a la situación que se desea. Sin embargo, por la premura y las dificultades de transformar la información contenida en este reporte a un nodo de la red se optó por hacerlo de otra manera.

La forma a la que se llegó, fue por medio de un nodo que mantuviera las dos componentes fundamentales del fenómeno: el que realmente se tuvieran atascados los restos de árboles y que diera indicios de las geometrías de estas acumulaciones, para resolver su nodo hijo que es fuerza de arrastre (en el que el área vista en perfil es el parámetro más importante para el cálculo de ella). Del primer trabajo que se han mencionado anteriormente [16] se detecto que la información que brinda sólo concierne al proceso de bloqueo de escombros en pilas. Se ubico otro estudio [28] experimental con características similares, sólo que enfocado a puentes sin pila en el cauce. En el se calculan las probabilidades de bloqueo para la cubierta de un puente, con el inconveniente, otra vez, de que es aplicado a prototipos de puentes sin pila en el cauce (ver [28] para mas detalle).

Afortunadamente, se localizó un reporte [14] en el cual se hace investigación referente a caracterización de las acumulaciones de escombros en pilas de puentes en ciertas geometrías recurrentes o típicas. Esta

información ayudo a llegar directamente a la tabla de probabilidad condicional de este nodo. Así, se usó la información de ese estudio donde se encargo a agencias estatales estadounidenses que administran los puentes a crear una base de datos (de fotografías, geometrías) las cuales se usaron para el presente trabajo. A este nodo se le llama bloqueo-acumulación y como es hijo del que se denomina número de Froude, se requiere del cálculo de distribuciones condicionales para cada estado del padre, lo que resulta en que para cada intervalo de números de Froude del padre debe existir una distribución de probabilidad condicional.

La primera tarea para el desarrollo completo del nodo es la forma en como se parametrizo. Como se mencionó anteriormente, se usaron como base las geometrías reportadas en [14], las cuales son en planta: triangulares o rectangulares, y combinaciones de ellas en sección de corte como cónica, rectangular, o cónica invertida. Por lo tanto, este nodo esta parametrizado para cuatro combinaciones que son las siguientes: triangular en planta-cónica en perfil, rectangular en planta-rectangular en perfil, rectangular-cónica y rectangular-cónica invertida. La búsqueda de la información necesaria para la construcción de este nodo fue obtenida de datos directamente, buscando los puentes donde se reportaban las configuraciones, todo ello descrito en [14].

El resultado es que está discretizado en cuatro estados, después se calculó el número de Froude para cada tipo de acumulación, para que después se estimen las probabilidades. Para este cálculo se hicieron las siguientes suposiciones: todos los ríos tienen una forma trapezoidal, por la razón de que es una suposición más realista, que asumir los ríos de forma rectangular.

Con ayuda de los datos contenidos en el USGS (acrónimo de U.S. Geological Survey) y del National Streamflow Information Program (NSIP), se ubico cada río en el que se habían detectado acumulaciones y se cálculo el número de Froude apoyado en los registros históricos de cada estación de registro de la corriente y un estimado de la base mayor y la menor del canal apoyados en datos que se pudieron extraer de la versión de sistema de información geográfica disponible en su página de internet. Una vez calculados los números de Froude se normalizan dividiendo cada uno entre el máximo obtenido y a partir de ahí se calculan los casos que cayeron en cada intervalo en el que esta dividido el número de Froude y finalmente se dividen entre los totales para cada caso y se tienen las probabilidades condicionales presentadas en la tabla 4.3 Como se aprecia algunas distribuciones de probabilidad condicional no se encontraron valores, esto debido a la escasez de resultados dentro de ese intervalo del número de Froude, o a la incertidumbre en las medidas del sistema de información geográfica. Se puede decir que esta tabla de probabilidad condicional fue construida a partir de estadística generada de las fuentes mencionadas y equivale a construir un nodo a partir de una base de datos con la variable que se desea obtener con observaciones de sus valores.

Tabla 4.3: Tabla de probabilidad condicional Nodo Bloqueo-Acumulación

Nodo	Bloqueo-Acumulación	F1-F2	F2-F3	F3-F4	F4-F5
Triangular	Cónica	0.3214286	0	0	0
Rectangular	Rectangular	0.464286	0	0	0
Rectangular	Cónica	0.0357143	0	0	0
Rectangular	Cónica invertida	0.178571	0	0	1

4.5. Socavación inducida

En estructuras que esten localizadas en el curso de una corriente de agua, suceden fenómenos que pueden conducir a alguna afectación en el desempeño de estas, sobre todo al modificar las características de sus elementos de cimentación, conocidos bajo el nombre genérico de socavación. Socavación puede entenderse como el retiro de material donde está la cimentación por el hecho de que el flujo de agua se modifica al ubicar un objeto dentro de él.

La socavación total en una estructura que tenga elementos en la corriente se compone de tres elementos:

- La degradación a largo plazo de la cama del río por el paso natural del flujo,
- La socavación por contracción en la estructura o elemento y
- La socavación local en los elementos, (al tratarse de un puente es la presentada en estribos y pilas)

Por supuesto que existen otros tipos de socavación que suceden en situaciones específicas de las corrientes. La primera de ellas se refiere al fenómeno derivado de los cambios morfológicos de la cama del río, ya sea transportando y depositando material o degradando el que esté presente en la superficie del mismo. La socavación por contracción es resultado de la contracción del flujo que resulta en una remoción de material del fondo del río, y sucede regularmente cerca de donde empieza la contracción de la corriente. La socavación local involucra la remoción de material alrededor del obstáculo, resultado del cambio de las condiciones hidráulicas, traducido en una aceleración del flujo y resultado de la acción de vórtices originados por la obstrucción al flujo.

La socavación a evaluar aquí, es la ocurrida localmente en el elemento, puesto que puede incrementarse de manera rápida ante una situación de avenidas propias de los periodos de lluvia, por lo que es necesario contar con herramientas para estimar su magnitud antes de la ocurrencia de un evento. El mecanismo básico que causa la socavación local es la formación de vórtices en la base del elemento, la acción de estos remueve

el material del fondo; la razón de transporte de sedimentos de fuera de la base es mayor que la razón de transporte en la base y por consecuencia un agujero de socavación se desarrolla.

Adicionales a los vórtices verticales que están actuando en la base de la pila hay otros llamados vórtices débiles, los cuales reducen su intensidad a medida que se avanza aguas abajo de la pila, regularmente al terminar la pila e inmediatamente aguas abajo se presenta depósito del material. En pocas palabras la socavación local es la pérdida de material de soporte (suelo) para la cimentación del elemento.

Como puede notarse, el evaluar la pérdida de este soporte puede extenderse a la estimación topográfica del fondo del río una vez presentado el fenómeno, cuestión que puede resultar en una tarea difícil si no se cuenta con la información necesaria para ello. A partir de esta dificultad han surgido estudios que se encargan de evaluar una o dos dimensiones del agujero socavado, basado en su importancia cuando se evalúan las consecuencias al elemento expuesto.

Como ya se ha mencionado, al presentarse cierta acumulación de escombros en un elemento estructural hace que también su ancho y forma, factores que son determinantes en la modelación y el cálculo de la profundidad de socavación local. Se debe recordar que este efecto adverso no afecta únicamente a la socavación local, también tiene influencia en la socavación por contracción; sin embargo, para el cálculo de este nodo se atendió únicamente a la socavación local de la pila, considerando que su efecto es mayor, al evaluar las condiciones geotécnicas de la cimentación.

Se requiere investigar la manera en que se evalúa el proceso de pérdida de suelo de soporte para la subestructura, determinando que es un tema abundante y que aún sigue estudiándose ya sea en modelos hidráulicos de laboratorio o aplicaciones como la llamada dinámica de fluidos computacional CFD (computational fluid dynamics) que se relacionan con modelos desarrollados para casos de estudio, y que tiene aún muy poca investigación aplicada en campo como mediciones directas o modelos físicos. Todo ello por la complejidad del fenómeno y los costos asociados a la instrumentación de los elementos estructurales afectados (pilas y estribos) y visto desde la perspectiva probabilista, todas las incertidumbres involucradas en ese proceso.

Aunado a lo anterior, el fenómeno de la socavación involucra aspectos relacionados con la mecánica del suelo en el que este desplanta la estructura, aspectos que sumados al tema dominante de la mecánica de fluidos permiten visualizar la complejidad y alcances que puede tener el tema. De toda la literatura consultada se aprecia que una gran cantidad de ella se encarga del modelado y análisis de este fenómeno por medio de experimentación en modelos hidráulicos, aunque existe una tendencia reciente a aplicar herramientas computacionales como la CFD por el ahorro que se tiene en costos relacionados al diseño de los experimentos y los materiales utilizados; no obstante, como ya se aclaró, la búsqueda de un modelo adecuado para los propósitos de la red construida debe de regirse por la sencillez y facilidad de aplicación. Puesto que estas investigaciones están centradas en la obtención de socavaciones, se buscó la manera más sencilla de evaluarla,

y se seleccionó la profundidad de socavación medida en la dirección del eje de la altura de la pila.

Existe una gran cantidad de modelos que predicen la profundidad de socavación esperada, aunque son considerados como conservadores, puesto que las estimaciones de la profundidad de socavación suelen exagerarse por motivos referentes a la seguridad de las estructuras. Sin embargo estas ecuaciones existentes coinciden en que la profundidad de la socavación local depende de la forma de la pila, las condiciones hidráulicas a las que esta expuesto el elemento estructural tales como el ángulo de ataque del fluido respecto de un eje vertical y las que se han mencionado en capítulos anteriores como la velocidad y el tirante de agua.

Se encontró una ecuación que cumpliera con el requisito de no ser conservadora por que regularmente las ecuaciones existentes para evaluar la profundidad de socavación evalúan la última que se puede esperar para ciertas condiciones de diseño. Y se olvida de estimar de una manera mas aproximada a la realidad; además de que también, se adaptase al tipo de socavación tan especial que es la inducida por la presencia de escombros. También, para reconocer el modelo que mas se ajuste a los requerimientos de la red construida es necesario que la mayoría de sus componentes sean de naturaleza probabilista exceptuando por supuesto aquellos factores, parámetros o variables que se sepan con certeza. La naturaleza probabilista implica que las variables o elementos que componen al modelo estén asociados con una distribución de probabilidad.

Como se ha desarrollado en los nodos anteriores, no es un requisito necesario que de cada elemento que compone al modelo que representa la variable y su significado, se conozca su distribución de probabilidad, por que las propiedades de las variables en las que se tengan modelos (ecuaciones, leyes físicas o funciones) que estimen una relación entre ellas se pueden usar para inferir las de las demás apoyado en la simulación de Monte Carlo. Sin embargo, es deseable que si un modelo se usa para alimentar el nodo de la Red Bayesiana contenga la mayor cantidad de variables de forma probabilista, puesto que es como se realiza en los análisis de riesgo y confiabilidad en ingeniería.

En el presente trabajo de investigación se analizaron algunos modelos que calculan la profundidad de socavación local y también se investigó si existía un modelo que calculara especialmente la socavación producto de la acumulación de escombros o que en su defecto resultara en alguna modificación de un modelo más general y se encontró la siguiente ecuación [11]:

$$D_s = k_1 k_2 2.02 h (beq/h)^{0.98} Fr^{0.21} \sigma^{-0.24} \quad (4.10)$$

D_s = profundidad de socavación

k_1 = factor de forma

k_2 = factor de ángulo de ataque

h = profundidad del río

beq = ancho equivalente de la pila

Fr = número de Froude

σ = factor relacionado a la granulometría

Este modelo cumple con los requisitos de ser menos conservador y de la fuente que se extrajo [11] también se lograron determinar los parámetros de la distribución lognormal del factor relacionado con la granulometría del suelo, que es una de las variables de las que se carece de información del sitio que se presentará en el capítulo siguiente. La obtención de la profundidad y el número de Froude se hace a través de las ecuaciones que relacionan estas dos variables con la variable gasto por medio de la simulación de Monte Carlo.

Esta ecuación junto con sus exponentes, fueron calibradas de acuerdo a los datos reportados en [11] y son el resultado de experimentación en modelos hidráulicos idealizados. Hay que notar que para este modelo de socavación están incluidas dos variables que tienen que ver con dos de los factores que la presencia de escombros afecta que son: la forma y el ancho equivalente. Como se explicó en el capítulo anterior es difícil determinar una geometría del escombros que se aproxime a la realidad por lo cual las mismas suposiciones que se hicieron en el nodo bloqueo-acumulación se seguirán para este mismo, aunque con ciertas consideraciones, esto es que las tres geometrías determinadas en perfil aplican para este mismo modelo siendo ellas: la triangular, la cónica invertida (que en realidad se considera también triangular), y la rectangular.

Entonces queda pendiente averiguar cuál es el efecto que estas geometrías tienen en la socavación estimada, haciendo la aclaración que si se es riguroso al evaluar la socavación inducida por la presencia de escombros se tendrían que evaluar dos tipos de ella que son: socavación local y socavación por contracción, pero por motivos técnicos (medición de velocidades) y de disponibilidad de literatura se evalúa únicamente la socavación local. Los motivos técnicos se refieren a que este modelo estima únicamente un tipo de socavación y la socavación por contracción se calcula tomando en cuenta las velocidades de todo el perfil del río, derivado de la escasez de estudios el sitio o información a la que no se puede tener acceso debido a que los diseños del puente son difíciles de rastrear.

Cabe aclarar que existen otros modelos más recientes para estimar esta variable pero todos ellos tienen la característica de que son muy parecidos, sólo que calibrados con estudios experimentales que tienen relación con formas de pilas especiales, por ejemplo; o consideraciones del suelo y como ya se explicó la practicidad es uno de los criterios que más se tomaron en cuenta para la selección de este modelo. Además de que el trabajo de donde se obtuvo resalta como una de sus virtudes que no es un modelo conservador como el desarrollado en la Universidad de Colorado y en versiones recientes mejor conocido como HEC-18, y del cual se calcularon algunos estimados determinísticos que confirmaron que este modelo sobrestima la profundidad de socavación todo ello por que esta destinado a ser un auxiliar en la fase de diseño.

Es preciso también mencionar, que de la búsqueda de literatura se localizó el que tiene que ver con el fenómeno estudiado [14], el cual hace una serie de experimentos que determinan la socavación que es inducida

por la presencia de una acumulación de escombros idealizada en dos formas básicas que son la rectangular y la triangular. Donde se llega a una ecuación para el diseño que determina un ancho equivalente para el cálculo de la profundidad de socavación en cualquier otro modelo de predicción, que es la forma en que se utiliza, es decir, usar los coeficientes calculados en este estudio dentro del modelo de [11].

En el nodo pasado ya se habló de la manera de parametrizar la forma de las acumulaciones, asunto que es tratado de igual manera para este nodo. La forma que interesa es la que tenga la acumulación en perfil y sólo se localizó que este factor es exclusivo para dos únicas formas: la rectangular y la triangular [14], lo que deja a la sección cónica invertida fuera de esta caracterización. El factor para la forma rectangular es de 0.79 debido a que la forma rectangular representa más área bloqueada y de 0.21 para la forma triangular gracias a que es menor. Por simplicidad, a la forma cónica invertida se le asignó el factor de la triangular, lo que revela que ahora dos distribuciones de probabilidad condicional se repetirán para completar la tabla.

El cálculo de las probabilidades condicionales para este nodo se remite a la estimación de la profundidad de socavación con el modelo explicado anteriormente y a su discretización, por que el nodo padre está parametrizado como una forma. La variable ancho equivalente se toma como el promedio de los dos anchos, el de la base de la pila y el que resulta hasta la distancia en que llega la altura simulada h gracias a la expresión $2 * (0.55 - 0.05 * (h - 9.12))$ que es la ecuación de la recta de los anchos de la pila en función de la altura simulada. El ángulo de ataque se supone de 0 grados dado que no se cuentan con datos en campo sobre este dato.

Entonces, como se explicó previamente la forma cónica en perfil va a ser substituida por la triangular; la programación que se realizó para la obtención de las distribuciones condicionales de este nodo es parecida a la de nodos previos, comenzando con la simulación de la variable gasto. A su vez estos valores son substituidos en el modelo generalizado para la obtención de la variable profundidad, así como también son substituidos en la ecuación de continuidad $V = Q/A$ con el área del canal. Se hace uso de esta expresión por razones exploratorias, ya que en un estudio más adecuado se buscaría la distribución independiente, con sus parámetros. Posteriormente se determinan los parámetros para simular el factor que tiene que ver con la granulometría, que resulta en una distribución lognormal con parámetros $exp(\mu=1.097843, \sigma=0.03922)$. Después de ello se determinan los anchos equivalentes de la pila relacionados con la altura del tirante de agua simulado, se determina el factor k_2 y el k_1 según sea el caso (rectangular o triangular), para posteriormente substituirlos en la ecuación de socavación presentada.

Ahora, como ya se tiene una distribución de probabilidad de la profundidad de socavación, se procede a discretizarla. La forma en que se hace depende de la cantidad de valores simulados ya que se programaron comandos para que el primer intervalo de esta distribución fuera de 0 a el valor mínimo que se encontrará en toda la simulación, el segundo intervalo va de este valor al de el valor mínimo mas una desviación de los

Tabla 4.4: Tabla de probabilidad condicional Nodo Socavación Inducida

Socavación inducida	Triangular-cónica	Rectangular-cónica invertida	Rectangular-cónica	Rectangular-rectangular
0-min	0.000002	0.000002	0.000002	0.000002
min - min+desv	0	0	0	0
min+desv - min+2desv	0.00005	0.00005	0.00005	0.000008
min+2desv-((min+2desv)+100desv)	0.999944	0.999944	0.999944	0.99999

valores simulados, el tercero tiene como límite superior el mismo valor más dos desviaciones, el cuarto el valor mínimo más tres desviaciones y el quinto tiene como límite superior el valor mínimo más cien desviaciones, todo ello con la finalidad de que se considere toda la información. La tabla de probabilidad condicional es la mostrada en 4.4. Esta tabla esta construida para el caso cuando se simulan 500,000 valores.

4.6. Fuerza de arrastre

La pila o pilas de un puente que cruza un cauce y que se encuentran expuestas al flujo de una corriente natural o artificial tienen que ser diseñadas para resistir un sistema de fuerzas hidrodinámicas producto del paso del fluido y fuerzas hidrostáticas debido a la presencia del mismo. Aunado a ello existen, situaciones de inundación en las corrientes naturales que hacen que aumenten este tipo de fuerzas, además de transportar escombros que potencialmente puede quedar atascado en la subestructura y en ocasiones alcanzar la superestructura. Al momento en que se logra formar una acumulación de escombros en la subestructura una variedad de fenómenos adversos a la misma ocurren, uno de ellos es el aumento en las fuerzas hidrodinámicas transferidas al elemento que es el significado de este nodo.

Como se describió, un cuerpo expuesto a una corriente de flujo de agua está sujeto a fuerzas hidrodinámicas y de impacto por el escombros que lleve el agua en caso de ocurrir un evento de inundación. El sistema total de fuerzas excluyendo el impacto, consta de estas componentes: hidrodinámicas de arrastre, hidrostáticas y de flotabilidad. Se ha encontrado que algunas fallas de puentes relacionadas a la acumulación de escombros posiblemente se deban al aumento de este sistema de fuerzas y sobre todo la de arrastre, a la cual se pondrá toda la atención [25]. Puede notarse que este nodo tiene dos padres por lo que ahora el cálculo de sus probabilidades condicionales será para todas las combinaciones de los estados de los dos padres que son número de Froude y Bloqueo-acumulación. Esto nos da el indicio que el cálculo de probabilidades condicionales crece exponencialmente de acuerdo al número de padres de un hijo. La razón física por la cual este nodo tiene dos padres en vez de uno, obedece a la combinación de la presencia simultánea del fluido y del bloqueo, siendo que si ninguno de los dos está presente básicamente la fuerza no se presenta.

El flujo al encontrar el objeto (pila de puente) en su camino, será desviado de su ruta original y tales deflexiones llevan a cambios en la velocidad del fluido. Asumiendo que la fuerza F es la estudiada o alguno de sus componentes, y cuando el cuerpo está inmerso en el fluido, esta depende de las siguientes propiedades: la densidad del fluido ρ , viscosidad cinemática del fluido ν , velocidad de la corriente V y la elasticidad de masa del fluido K [9].

La fuerza y el momento también dependerán de la forma y el tamaño del cuerpo y de su orientación respecto a la corriente. Si la atención se centra en cuerpos que son geoméricamente similares, los efectos de forma se eliminarán y el tamaño del cuerpo se representa por una sola dimensión típica, por ejemplo el diámetro de una esfera, o el tramo del ala de un aeroplano, denominado ϕ . Por tanto, la fuerza F está en función de:

$$F = f(V, \phi, \rho, \nu, K) \quad (4.11)$$

$$= \sum CV^a \phi^b \rho^c \nu^d K^e \quad (4.12)$$

Que en su forma dimensional, se traduce a:

$$\left[\frac{ML}{T^2}\right] = \left[\left(\frac{L}{T}\right)^a (L)^b \left(\frac{M}{L^3}\right)^c \left(\frac{L^2}{T}\right)^d \left(\frac{M}{LT^2}\right)^e\right] \quad (4.13)$$

Separando por el tipo de unidades de masa, longitud y tiempo, se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} 1 &= c + eM \\ 1 &= a + b - 3c + 2d - eL \\ -2 &= -a - d - 2eT \end{aligned} \quad (4.14)$$

Que es un sistema de ecuaciones con cinco incógnitas, por lo que es necesario dejar algunas de ellas indeterminadas en este caso d y e . Las variables cuyos índices son resueltos representan las características más importantes, del cuerpo (la dimensión representativa), del fluido (la densidad) y la velocidad. Así, las ecuaciones pueden ser resueltas para a , b y c , en función de las restantes:

$$\begin{aligned} a &= 2 - d - 2e \\ b &= 2 - d \\ c &= 1 - e \end{aligned} \quad (4.15)$$

Sustituyendo estas ecuaciones en la ecuación 4.12

$$\begin{aligned} F &= V^{2-d-2e} \phi^{2-d} \rho^{1-e} \nu^d K^e \\ &= \rho V^2 \phi^2 \left(\frac{\nu}{V\phi}\right)^d \left(\frac{K}{\rho V^2}\right)^e \end{aligned} \quad (4.16)$$

Como se está tratando el tema en aerodinámica, la velocidad del sonido se encuentra definida por $a^2 = \frac{\gamma p}{\rho} = \frac{K}{\rho}$; en la cual la propagación de las ondas de sonido envuelve la alternancia de compresión y expansión del medio. Donde a es la velocidad del sonido, K la elasticidad volumétrica, ρ la densidad del fluido, γ el coeficiente de calor específico y p es la presión [9]. Por lo tanto, la propagación del sonido en un gas perfecto es considerado como un proceso isentrópico, lo que significa que la entropía del fluido permanece constante. Por lo tanto:

$$\frac{K}{\rho V^2} = \frac{\rho a^2}{\rho V^2} = \left(\frac{a}{V}\right)^2 \quad (4.17)$$

donde $\frac{V}{a}$ es el número de Mach, de la corriente por lo que la ecuación puede ser escrita como:

$$F = \rho V^2 \phi^2 g\left(\frac{V\phi}{\nu}\right) h(M) \quad (4.18)$$

Donde $g\left(\frac{V\phi}{\nu}\right)$ y $h(M)$ son funciones indeterminadas de las variables del fluido. Por lo tanto las fuerzas aerodinámicas, actuando en una familia de cuerpos geoméricamente similares (la similitud incluye la orientación a la corriente) obedecen a la ley:

$$\frac{F}{\rho V^2 \phi^2} = \text{Función}\left\{\frac{V\phi}{\nu}; M\right\} \quad (4.19)$$

Esta relación es conocida como la ecuación de Rayleigh. El término $\frac{V\phi}{\nu}$ puede ser escrito desde la definición de ν como $\frac{\rho V\phi}{\mu_u}$; donde μ es la viscosidad dinámica. Este es un parámetro importante en el flujo de fluidos, y es denominado como el número de Reynolds Re .

Considerando cualquier parámetro que represente la geometría del flujo alrededor del cuerpo, en cualquier punto relativo a él; si se expresa de manera adimensional, entonces puede demostrarse por medio de un análisis dimensional que este parámetro es una función única del número de Reynolds y de Mach. Todo lo anterior obedece a la ecuación con la cual se define la fuerza de arrastre. Si Re y M son lo mismo para un número de fluidos alrededor de cuerpos geoméricamente similares, se deduce que todos los flujos son geoméricamente similares en todos los aspectos, siendo diferentes en la escala geométrica y/o velocidad.

La cantidad adimensional $\frac{F}{(\rho V^2 S)}$, donde F es una fuerza aerodinámica y S es un área, pero en lugar de ρV^2 , es conveniente para fluidos incompresibles utilizar $\frac{1}{2}\rho V^2$, que es la presión dinámica del flujo de corriente libre. Por lo tanto, el coeficiente de fuerza aerodinámica es presentado en la siguiente ecuación,

donde; C_f es el coeficiente de fuerza aerodinámica, F es la fuerza aerodinámica, ρ es la densidad del fluido, V es la velocidad del fluido y S es el área física del objeto:

$$C_f = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (4.20)$$

Todo objeto sumergido en un fluido en movimiento está sujeto a una resultante de fuerza y momento; las componentes de la fuerza son:

- De elevación: es el componente de la fuerza que actúa hacia arriba,
- De arrastre: es la componente de la fuerza que actúa en la dirección del flujo y en la que se tiene interés.
- Fuerza del eje: mutuamente perpendicular a las dos componentes mencionadas.

Los coeficientes de fuerza más importantes son los de elevación y arrastre, dado que son los que posiblemente afectan a un elemento que esté sobre la corriente de un fluido; en el caso de la subestructura la que tiene más efecto es la de arrastre y la de elevación es relevante para el análisis de la superestructura. Entonces:

$$C_E = \frac{Elevación}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad C_F = \frac{Arrastre}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (4.21)$$

Por tanto la ecuación que define el comportamiento de este nodo está expresada en unidades de fuerza, que en el presente estudio es el Newton [25]:

$$F_D = C_D \rho A_r (V_r)^2 / 2 \quad (4.22)$$

Donde: C_D = coeficiente de arrastre, ρ = densidad del fluido [kg/m^3], A_r = área de referencia [m^2], V_r = velocidad de referencia [m/s].

El área de referencia es la que es perpendicular a la dirección del flujo, referente a la velocidad de referencia, generalmente conocida como la velocidad sin que se vea afectada por la presencia del escombros. Un aspecto importante de esta ecuación es el conocimiento del coeficiente de arrastre y que viene de la experimentación reportada en [25] y el área de referencia. Esta fue obtenida tomando las consideraciones de [14] donde se tienen combinaciones para geometrías en planta y en perfil, pero como el área de referencia es la de perfil se obtendrán distribuciones de probabilidad condicional repetidas puesto que la geometría que interesa es la de perfil y en algunas de las combinaciones se repite el área transversal, tal y como lo señala la variable padre Bloqueo-acumulación. Las tres geometrías que se evaluarán para considerar la ecuación anterior en el cálculo de esta variable son cónica, rectangular y cónica invertida.

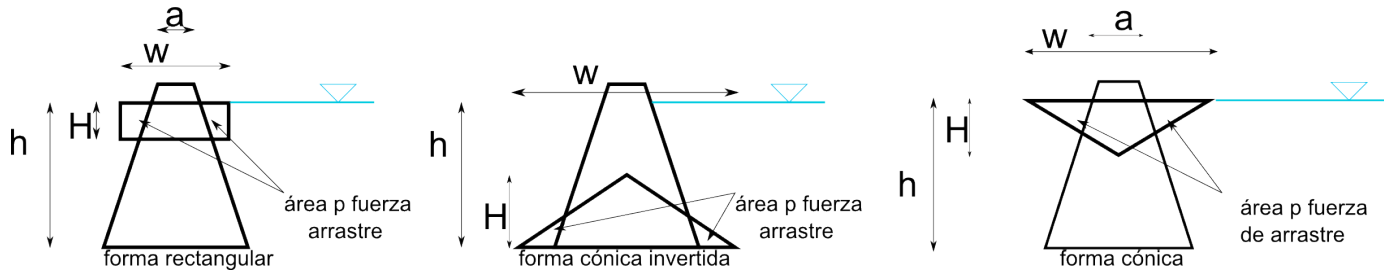


Figura 4.3: Geometrias típicas de la acumulación de escombros

Lo primero que se tiene que conocer es la geometría de las acumulaciones, las que se obtuvieron de acuerdo a [14]. Básicamente este estudio presenta la relación que guarda el ancho de la pila a la altura del espejo del agua respecto del ancho de la acumulación en cualquiera de sus tres formas y otra relación que es referente a la altura de la acumulación del escombros respecto de la profundidad del tirante de agua. Estas dos variables se supuso que se ajustan a distribuciones uniformes y se simulan bajo los mismo principios descritos en la sección 2.1, por lo tanto se simulan las relaciones W/a y H/h para obtener la geometría del escombros (ver figura 4.3 para mayor claridad).

Es necesario mencionar que el área que será tomada para el cálculo de la expresión de fuerza de arrastre es la representada en la figura 4.3 para no sobrestimar la fuerza, y sólo tomar en cuenta la inducida por el escombros ya que la ejercida en el área de la pila está considerada en el diseño y pues no aporta mayor información estimarla, puesto que el tema de interés es el aumento en la fuerza de arrastre producto del escombros acumulado. Después de determinar esta área se calcula la siguiente relación:

$$B = A_b / (A_b + A_c) \quad (4.23)$$

Donde: A_b =Área bloqueada por el escombros [m^2] A_c =Área hidráulica de la sección [m^2] B Determina una relación del área bloqueada, con el área adicional se estima una nueva altura del tirante con la finalidad de estimar un número de Froude corregido, todo ello para la estimación del coeficiente de arrastre. Este surge de una serie de experimentos reportados en [25]. Donde bajo ciertas condiciones de la variable B y el número de Froude corregido se puede conocer el valor de este coeficiente para pilas de puentes, la diferencia es que en la presente investigación se hizo para una velocidad sin corregir todo ello derivado de la escasa información referente a esta variable. Una vez seleccionado el coeficiente de arrastre adecuado se procede con la estimación de la variable, posteriormente se determina cual es la forma de su función de densidad de probabilidad, para tener una idea y certeza de que valores se pueden considerar para la definición de los intervalos de los estados de la variable. Se discretiza esta distribución en cuatro intervalos con la información calculada y se aplican los mismo principios del nodo número de Froude, con la peculiaridad de que las

Tabla 4.5: Envoltente de coeficientes de arrastre en pilas

Rango B	Rango Froudecor	Cd
$B < 0.36$	$Fr < 0.4$	1.8
$B < 0.36$	$0.4 < Fr < 0.8$	Cd= 2.6 - 2.0Fr
$0.36 < B < 0.77$	$Fr < 1$	Cd= 3.1 - 3.6B
$B > 0.77$	$Fr < 1$	Cd= 1.4 - 1.4B

tablas obtenidas son para todas las posibles combinaciones de los nodos padre. Por lo tanto, se calculan 16 distribuciones de probabilidad locales dado que los dos padres tienen similar número de estados (cuatro cada uno). Es importante mencionar que este coeficiente de arrastre también se ve afectado si la pila estudiada se encuentra sobre una superficie que está socavada, por lo cual es adecuado hacer esta consideración al momento de calcular la fuerza de arrastre inducida al elemento. En particular se presenta un cambio en el patrón de presiones.

Para hacer posible esta consideración se buscaron trabajos en los que se efectuaran experimentos o modelos de este tipo de fuerzas bajo condiciones de socavación. El resultado de la búsqueda fue el trabajo [31] en el cual se realiza experimentación referente a las tendencias que siguen el diagrama de presiones y el coeficiente de arrastre en pilas circulares con diversas profundidades de socavación. Los resultados de ese trabajo se adaptarán al caso en estudio, puesto que de esta experimentación se obtuvieron resultados para relaciones entre las geometrías de la pila y de la socavación. Gracias a ello se pudo programar la serie de condiciones obtenidas del trabajo mencionado y al momento de realizar la simulación de las variables que dan como resultado las geometrías para el cálculo de esta variable y de la profundidad de socavación, para después evaluar las condiciones programadas para la obtención del coeficiente de arrastre, ya sea con las condiciones presentadas en la tabla 4.5 o las del trabajo relacionado a la socavación.

En la gráfica presentada (figura 4.4) se aprecia, el cambio del coeficiente de arrastre, respecto de una relación entre el tirante de agua (Z) y el diámetro de la pila (D). Aquí, esta longitud varía conforme se avanza en sentido vertical, por lo cual se decidió tomar esta longitud como un promedio de anchos de la pila, relacionando el tirante con cada uno de estos anchos. Así con base en los resultados de esta experimentación se obtiene el coeficiente de arrastre de acuerdo a las condiciones que presente la pila ya sea la presencia de escombros o la de socavación. Para empezar con este nodo se realiza una simulación de Monte Carlo para la variable gasto, de ahí se obtienen variables aleatorias para la variable profundidad; de esta variable se calculan los anchos en la parte baja y hasta donde llega el tirante de agua en la pila necesarios para la relación Z/D de

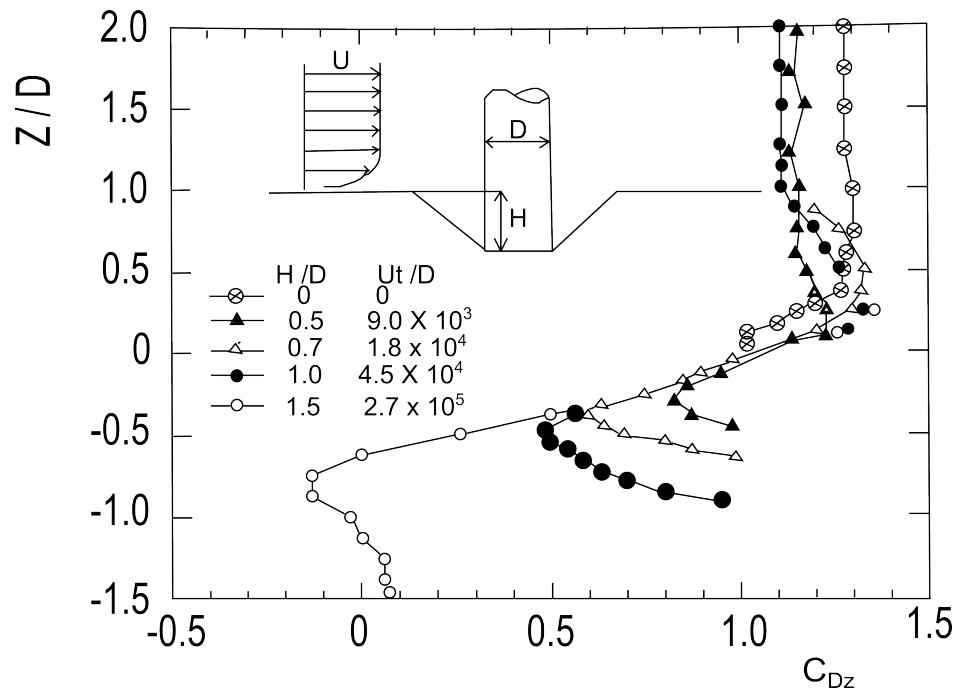


Figura 4.4: Variación del coeficiente de arrastre

la gráfica. De los valores simulados de la variable gasto también se obtienen los correspondientes a la velocidad que es el componente fundamental para la estimación de una profundidad de socavación, necesarios en el uso de la gráfica mostrada anteriormente puesto que cada curva es para una relación profundidad de socavación (H) entre diámetro de la pila (D). Estas restricciones se programaron y se efectuó una interpolación lineal, para los casos en que H/D resultara diferente de los valores mostrados en la gráfica.

Es necesario mencionar que las consideraciones del coeficiente de arrastre resultado de condiciones de socavación para la estimación de esta variable, fue tomada en cuenta en los nodos daño y volteo; la condición explicada acerca de la modificación del coeficiente de arrastre gracias a la presencia de escombros fue la que se utilizó en la generación de las tablas de probabilidad condicional para este nodo.

Tabla 4.6: Probabilidad condicional Fuerza de arrastre

Fuerza de	Triangular cónica				Rectangular rectangular				Rectangular cónica				Rectangular cónica invertida			
	F1-F2	F2-F3	F3-F4	F4-F5	F1-F2	F2-F3	F3-F4	F4-F5	F1-F2	F2-F3	F3-F4	F4-F5	F1-F2	F2-F3	F3-F4	F4-F5
0-1*desvest	0.987053571	0.8596446524	0.71253461	0.6353829	0.813750251	0.45258962	0.27522565	0.21021727	0.970089054	0.73032324	0.522741369	0.40974533	0.970089054	0.73032324	0.522741369	0.40974533
desvest-2*desvest	0.006858766	0.1158933494	0.25779933	0.3485996	0.164722389	0.41411487	0.44502837	0.42725743	0.012579370	0.19680124	0.388028294	0.49362342	0.012579370	0.19680124	0.388028294	0.49362342
2*desvest-3*desvest	0.005073052	0.0240604755	0.02966606	0.0160175	0.008177992	0.08342913	0.22448770	0.32151479	0.008346312	0.05485078	0.085243215	0.09663126	0.008346312	0.05485078	0.085243215	0.09663126
3*desvest-8*desvest	0.001014610	0.0004015227	0.00000000	0.0000000	0.013349369	0.04986638	0.05525828	0.04101051	0.008985264	0.01802474	0.003987123	0.00000000	0.008985264	0.01802474	0.003987123	0.00000000

4.7. Daño

La evaluación de la variable daño en términos estructurales, se resume en la estimación de la reducción de la capacidad de la estructura o el elemento, producto de la exposición a cargas externas. Un acercamiento al desarrollo de técnicas para la evaluación de este proceso es el surgimiento de disciplinas como la mecánica del daño continuo o CDM por sus siglas en inglés. Bajo esta aproximación el daño estructural se da en términos de la microestructura y relaciona la variable daño a las condiciones macroscópicas. La acumulación del daño es un proceso que se disipa y esta gobernado por las leyes de la termodinámica. Así, existe un desarrollo de modelos que describen este proceso, pero mucha de esta literatura esta enfocada a modelos de la microestructura del material y aún se estan desarrollando investigaciones que relacionen las variables microscópicas con las habituales de análisis estructural como rigidez o resistencia de la estructura o elemento.

Para el caso analizado en este trabajo, se busca un modelo que permita la estimación del estado del elemento analizado, es decir, la pila de mampostería de roca expuesta a la variación del tirante de agua y el incremento de la fuerza de arrastre derivado de la presencia de escombros, y también la interacción con la socavación inducida, ya que provoca un cambio en la estimación del coeficiente de arrastre. Este fenómeno puede ser visto como un elemento estructural sujeto a una variedad de condiciones de carga, o cargas que fluctúan, y posiblemente existan condiciones que se repiten en el intervalo de tiempo en el que se evalúa el elemento. Al desarrollar este concepto puede vislumbrarse una de las maneras en que se puede evaluar la condición de daño; pues al estar sometido a una condición de esfuerzos que pueden repetirse remite al daño por fatiga.

Las aproximaciones clásicas para el tratamiento de este mecanismo de falla en los materiales, involucran la caracterización de la vida total de fatiga, en términos del rango cíclico de esfuerzos (con las llamadas curvas Esfuerzo-Número de ciclos). En estos métodos el número de esfuerzos o deformaciones cíclicas necesarios para inducir falla por fatiga, en un espécimen no dañado, se estima bajo condiciones controladas de la amplitud de las deformaciones o los esfuerzos cíclicos [30]. Como el interés que se tiene es en la definición de una variable que estime en el ambiente probabilista el daño provocado por la presencia e incremento de la fuerza de arrastre ejercida sobre el elemento, se decide que esta aproximación será la seleccionada para la evaluación de este nodo. Al elegir esta aproximación (vida total de fatiga) una tarea que se debe de cumplir antes de efectuar los primeros cálculos, es investigar trabajos experimentales donde se realicen pruebas de fatiga en el material que compone el elemento analizado. Existe una gran cantidad de literatura dedicada a la fatiga de materiales metálicos y compuestos, pero en el caso de materiales heterogéneos como la mampostería de roca no reforzada la búsqueda genera pocos resultados.

En [2] se efectúan una serie de pruebas a especímenes cuadrados de mampostería ante cargas cíclicas de compresión y se determinan expresiones matemáticas para estimar curvas esfuerzo-deformación. Estas

expresiones son útiles en presencia de experimentación suficiente, lo cual en este caso no es posible por que lo que se busca es una formulación basada en la vida total del elemento. Estudios acerca de la evaluación del comportamiento de elementos de mampostería en puentes sugieren que cargas menores al 50 por ciento de la de falla última del material no involucran daño que perdure en el elemento. Sin embargo, en [19] se efectúan pruebas de especímenes ante cargas cíclicas que indican que el mecanismo de daño por fatiga puede ser mucho menor del 50 % que la carga de colapso. Por esta razón, es importante el conocimiento de esta variable, sin embargo, es necesario mencionar que existen dos tipos de cargas por fatiga, dado que la experimentación que se está examinando tiene que clasificarse para que resulte útil a los propósitos de este nodo. Estos dos tipos de cargas son: fatiga de bajo ciclado y fatiga de alto ciclado. La primera significa que la carga es aplicada en altos niveles de esfuerzo para un número relativamente bajo de ciclos. En contraste la segunda se refiere a un gran número de ciclos con bajos niveles de esfuerzo.

En otro estudio [27] se efectúan una serie de experimentos de fatiga en especímenes de mampostería de tabique con el objetivo de investigar niveles límite de servicio para puentes de arco. Estas pruebas se realizaron en tres tipos de especímenes y bajo varias condiciones de saturación del material. Los especímenes se probaron arriba de un límite de siete millones de ciclos bajo un rango de $5Hz$ y para las condiciones mencionadas, además de una variación en el mortero y la excentricidad de la carga. Gracias a esta campaña experimental se llega a un límite inferior de la resistencia a la fatiga:

$$F(S) = \frac{(\Delta S S_{max})^{0.5}}{S_u} = 0.7 - 0.05 \log N \quad (4.24)$$

Donde: $F(S)$ = función del esfuerzo inducido, ΔS = el rango de esfuerzos, S_{max} = esfuerzo máximo, S_u = el esfuerzo a la compresión casi estático y N = número de ciclos de carga

Después de encontrar esta información que resulta valiosa, es adecuado mencionar que en una habitual experimentación de resistencia de materiales se mide la variación en los esfuerzos para un número dado de ciclos (uno); mientras que en los estudios de fatiga se mide la variación en ciclos de un esfuerzo dado. Es claro que no todos los estudios de fatiga implican que se tengan esfuerzos alternantes, es decir, que se tengan esfuerzos de compresión y tensión en el mismo programa. Esto no es razonable para la mampostería ya que se asume que no tiene resistencia a la tensión y así lo confirman los estudios analizados previamente, puesto que lo hacen para compresión únicamente.

Un tipo de estudios de fatiga habitual es aquel que cuenta con un esfuerzo principal σ_m en el cual un ciclo senoidal es superpuesto. Una cantidad importante de pruebas son requeridas para obtener las curvas S-N (Esfuerzo-Número de ciclos). Estas curvas relacionan el rango de esfuerzos y el número de ciclos para alcanzar la falla, ambas variables son regularmente graficadas en escala logarítmica (ver figura 4.5). Existen trabajos que han desarrollado maneras de expresar las leyes bajo las cuales se generan las curvas S-N. Gracias a la gran diversidad de curvas S-N para distintos materiales, es difícil establecer una expresión unificada para

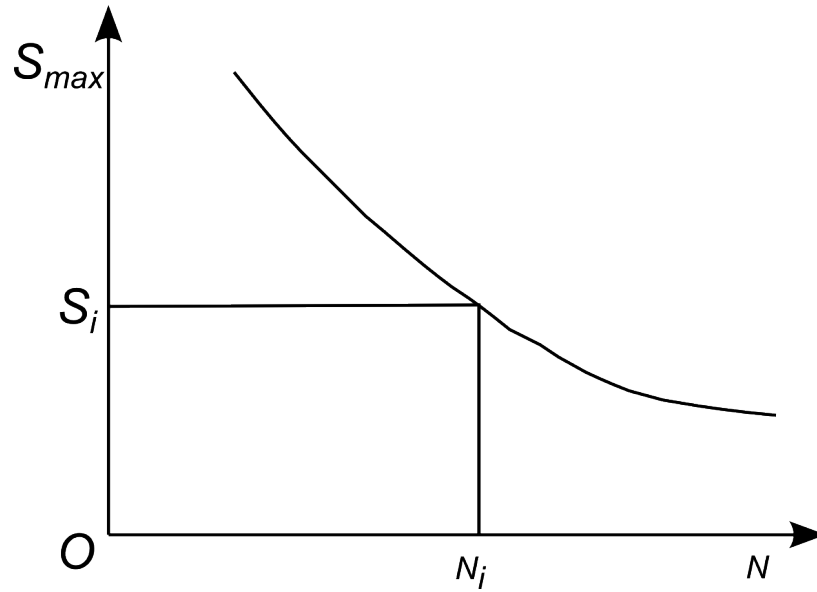


Figura 4.5: Curva típica S-N Esfuerzo-número de ciclos

estas curvas, aunque las formas más usuales se basan en cuatro formas empíricas.

Función de una potencia

$$S_a^m N = C \quad (4.25)$$

Donde m y C son constantes del material asociadas con la configuración del espécimen, propiedades del material, modo de carga, etc. Esta ecuación muestra la relación de una función de una potencia entre la amplitud de esfuerzos S_a y la vida N del material, y también es aplicada para expresar la relación entre los esfuerzos máximos S_{max} y N como:

$$S_{max}^m N = C \quad (4.26)$$

Expresión para la función de un exponente

$$e^{mS_{max}} N = C \quad (4.27)$$

Donde e es la base del logaritmo natural, m y C son las constantes del material obtenidas de pruebas experimentales. Esta ecuación relaciona a través de una función exponencial al esfuerzo máximo S_{max} y la vida N .

Función de una potencia de tres parámetros

$$(S_{max} - S_0)^m N = C \quad (4.28)$$

o en otra forma:

$$S_{max} = S_{\infty} \left(1 + \frac{A}{N^{\infty}}\right) \quad (4.29)$$

Donde S_0 , m , C , A , ∞ y S_{∞} son las constantes del material y $C = (AS_{\infty})^{\frac{1}{\infty}}$ $m = \frac{1}{1^{\infty}}$ $S_0 = S_{\infty} \cdot S_0$ y S_{∞} son la resistencia a la fatiga. S_{max} en caso de que $N \rightarrow \infty$ se aproxima al límite de fatiga.

Función de potencia de cuatro parámetros

$$\frac{S_u - S_0}{S - S_0} = 10^{C(\log N)^m} \quad (4.30)$$

Donde S_0 , m , C , y S_u son las constantes del material, m es el parámetro de forma, S_0 es el límite ajustado de fatiga, S_u el límite ajustado de deformación plástica. Esta ecuación tiene algunos elementos físicos, en caso de que $N = 1$ entonces $S = S_u$; en el caso en que $N = \infty$ entonces $S = S_0$. La vida de fatiga N cambia de acuerdo con el esfuerzo de fatiga S , es decir, para valores grandes de S , se observan valores pequeños de N y cuando se tienen valores pequeños del esfuerzo se tienen valores grandes de la vida N .

4.7.1. Regla de Miner para evaluación del daño

Hasta ahora se han mencionado los métodos para generar las curvas S-N para cualquier material y se ha revisado la literatura correspondiente a fatiga en mampostería, pero aún no se ha definido la forma en que se parametrizará este nodo y la manera en que se obtendrán las tablas de probabilidad condicional. Puesto que este es el propósito de esta sección, para lograr este objetivo es necesario definir una expresión o formulación teórica que defina el daño por fatiga para la pila considerada. Una de las formulaciones más sencillas para la evaluación del daño, es la llamada regla de daño acumulado de Palmgren-Miner. Representando la vida total del elemento analizado en N_i ciclos a un nivel de esfuerzos σ_i y otro número de ciclos a otro nivel de esfuerzos N_2 y σ_2 . Por lo tanto, la fracción de la vida consumida es n_1/N_1 , donde n_1 representa el número de ciclos acumulados al esfuerzo σ_1 . Para determinar cuantos ciclos adicionales soportará el espécimen a un determinado esfuerzo σ_2 una fracción adicional similar a la previa se formula, la suma de estas dos fracciones determinará la totalidad de ciclos soportada bajo ciertas condiciones de esfuerzo:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1 \quad (4.31)$$

La generalización de esta aproximación proporciona una medida del daño y es la regla mencionada:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = D \quad (4.32)$$

Donde: n_i = número de ciclos acumulados al esfuerzo σ_i , D = es la fracción de vida consumida por la exposición a ciclos de diferente nivel de esfuerzos. De acuerdo con esta formulación, la fracción del daño a cualquier nivel de esfuerzos S_i es linealmente proporcional a la división entre el número de ciclos de operación sobre el número total de ciclos que produce la falla a ese nivel de esfuerzos. El evento de falla por este mecanismo se alcanza cuando $D \geq 1$. Algunas de las limitaciones de esta regla son: se asume que los ciclos de una magnitud determinada producen el mismo daño ya sea que ocurran en una etapa temprana o tardía en la vida del espécimen, asume que la presencia de los esfuerzos $\sigma_2 \dots \sigma_n$ no afecta al daño causado por el esfuerzo σ_1 y se asume que la regla que determina el daño es la misma para el esfuerzo σ_i que para cualquier otro esfuerzo.

Apoyado en los dos conceptos mencionados se llega a una formulación que permita estimar la variable deseada, iniciando con el límite definido en [27] que representa una parte de la curva S-N de la mampostería, y combinando con la relación lineal previamente descrita se llega a una representación de la variable daño en el contexto probabilístico que se desea. Como se ha definido anteriormente una curva del tipo S-N puede ser definida por una función de una potencia:

$$N(s) = K s^{-m} \quad (4.33)$$

Donde: N = número de ciclos para la falla por fatiga, s = rango de esfuerzos, K = parámetro del material Usando esta representación de la curva S-N y aplicandola a la regla de Palmgren-Miner se llega a:

$$D = \sum_i D_i = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = \sum_i \frac{n_i}{K s_i^{-m}} \quad (4.34)$$

introduciendo el valor $n_t = \sum_i n_i$

$$D = \sum_i \frac{n_i n_t}{K s_i^{-m} n_t} = \frac{n_t}{K} \sum_i f_{\Delta\sigma} s^m \quad (4.35)$$

Donde: n_t es el número total de ciclos, $f_{\Delta\sigma}$ es la función de densidad de probabilidad del rango de los esfuerzos. Del límite de [27] se separa la variable rango de esfuerzos puesto que es de utilidad para la formulación que se ha desarrollado:

$$\Delta S = \frac{S_u^2}{S_{max}} (0.7 - 0.05 \log N)^2 \quad (4.36)$$

De ambas formulaciones se deduce una aproximación para evaluar el daño:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i n_t}{C(A - B \log N)^2 n_t} \quad (4.37)$$

$$C = \frac{S_u^2}{S_{max}} \quad (4.38)$$

$$D = n_t \sum_{i=1}^n \frac{f_{\Delta\sigma}}{C(A - B \log N)^2} \quad (4.39)$$

Una aproximación probabilista en la que se basa esta formulación puede encontrarse en [26]. Los valores de los parámetros A y B son calibrados puesto que con los propuestos no se obtienen resultados adecuados del daño, siendo estos 0.79 y 0.06 respectivamente. La tarea que resta por concluir es la búsqueda de los demás parámetros para esta formulación. El parámetro n_t es la cantidad total de ciclos soportados por el material, al tratarse de experimentación de este material ante cargas cíclicas la atención es centrada en la determinación de la resistencia, la rigidez y el como se degradan estas propiedades. Existe un trabajo en donde se desarrollan esta serie de pruebas [23] pero requiere una cantidad importante de tratamiento teórico antes de poder utilizar sus resultados, y lo que se busca es sencillez. Siguiendo esta premisa se decidió ocupar experimentación efectuada en el principal componente del material estudiado: la roca, ya que de este tipo de trabajos se cuenta con una cantidad superior a la del material como un compuesto. Este parámetro se obtuvo de [3] donde se define una cantidad de ciclos que soporta la roca para una resistencia a la fatiga del 70 % de 10^6 ciclos. El parámetro C resulta de la evaluación de la división entre los esfuerzos máximos simulados y la resistencia a la compresión simple máxima del material. Este último elemento se extrajo de una campaña experimental que resultó de la colaboración con el laboratorio de materiales de la UMSNH (Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo) donde se extrajeron especímenes de roca que componen las pilas de los puentes de estudio y se les probó su valor a la compresión simple; el valor utilizado es el mayor que se obtuvo de la resistencia de la experimentación antes mencionada $112822000 N/m^2$. El valor del esfuerzo máximo es el obtenido de la simulación del esfuerzo y en cuantas secciones se divide el modelo de la pila, que se considero como una viga en voladizo.

Puesto que la formulación de daño, es del tipo no determinístico, se requieren programar todos los elementos necesarios para esta formulación (determinación de los esfuerzos en la pila) para repetirse una cantidad determinada de veces. Para ello se construyó un programa que ejecute todas estas tareas, por ello es importante describirlo. Nuevamente se utilizo el programa gratuito denominado R disponible en [1]. El inicio de este programa consiste en limpiar todo el historial de variables, posteriormente se convoca la librería que permite el manejo de las distribuciones del tipo Gumbel, se selecciona el número de intervalos en que se desean dividir dos secciones; la primera consiste en la parte donde no se tiene escombros y se denomina con la variable n, para el programa que se corrió se escogieron tres divisiones.

También se selecciona la cantidad de divisiones que se quieren para la zona con el escombros; en el programa que se utilizo se escogieron tres, esta variable se denomina m. La corrida del programa que se ocupo fue para el caso en el que se tiene escombros de forma rectangular puesto que es la configuración que tiene más influencia en la estimación de la fuerza de arrastre y la socavación. En esta misma zona se determina el número de secciones en las que se divide el la viga, concepto ocupado en la estimación de el momento flexionante, el nombre de esta variable es numx. Se define el número de simulaciones que

efectuará el programa *n.sim*, que en este caso es 20000, se simula la variable gasto como una distribución Gumbel con los parámetros mencionados anteriormente. Se define la profundidad h como una función de la variable gasto. Se corren todas las condiciones para el cálculo del coeficiente de arrastre producto de la presencia de socavación, como ya se explicó esta programación se realizó en base a una interpolación lineal bajo las condiciones de flujo y de las pilas. Una vez concluidos estos cálculos se estiman las profundidades de socavación con la metodología expuesta en el nodo socavación inducida, considerando las condiciones de escombros para la forma rectangular, dado que resulta en mayor profundidad de socavación y cambio en la fuerza de arrastre. Como no se cuenta con datos que determinen la profundidad de la cimentación del elemento estudiado se deben hacer suposiciones, una de ellas es asignarle 3 metros de cimentación, a ese se le restan las profundidades de socavación y se obtiene la variable denominada D . Se estima el valor del ancho de la pila en función de la profundidad simulada h y D como $2.02 - (0.1 \times (h + D))$.

Se simulan las variables que relacionan el ancho de la geometría del escombros con el de la pila definida en el programa como *wena*, por medio de una distribución uniforme en el intervalo (2.0 – 5.45), esta siendo la proporción w/a (ver figura 3.2), y la que relaciona la altura del escombros con la altura simulada del tirante de agua *alenh* en el intervalo (0.33 – 0.4). Posteriormente se calculan el ancho y el alto del escombros multiplicando estas variables simuladas por el ancho de la pila y la profundidad del río simulada.

Se define la altura a la cual comienza el escombros $Y_c = h - H$ donde H es la altura del escombros. Al contar con estas variables se definen los anchos para las dos zonas, es decir se determinan secciones de igual tamaño nombrados $\text{delta2} = (Y_c - D)/n$ para la zona sin escombros y $\text{delta3} = ((h + D) - Y_c)/m$ para la segunda. Una vez efectuadas estas asignaciones se crean dos matrices en las que se alojarán distancias verticales a las que esta dividida la primera zona de dimensiones $(n.\text{sim} \times n + 1)$ y otra que alojará las áreas determinadas con dimensiones $(n.\text{sim} \times n)$. El llenado de la primera matriz se hace con un loop doble que va de uno a *n.sim* y el interno de uno hasta $n + 1$ con la siguiente asignación $Y_i[i, j] = D[i] + (\text{delta2}[i] * (j - 1))$, así el llenado de la otra matriz se hace con un ciclo doble de uno hasta *n.sim* y de uno hasta n , asignándole una ecuación que determina el área de los trapecios resultantes de la división.

Al terminar de definir estas dos matrices se definen las correspondientes a la segunda región que indica la posición y las áreas en que esta dividido el escombros. La primera es nombrada *yid* con dimensiones $(n.\text{sim} \times m + 1)$ cuyas asignaciones son $Y_{id}[i, j] = Y_c[i] + (\text{delta3} \times (j - 1))$ para un loop doble de uno hasta *n.sim*, y de uno hasta $m + 1$. También se llena la matriz de áreas de los rectángulos en que se divide esta zona con un loop doble que va de uno hasta *n.sim* y de uno hasta m (ver diagrama 4.6).

Se definen dos vectores para los brazos de palanca de las fuerzas que son ejercidas en el centroide de cada una de las áreas en que se dividen las dos zonas con nombres *brazo1* y dimensiones $(n.\text{sim} \times n)$, así como también *brazo2* con dimensiones $(n.\text{sim} \times m)$. Con un loop doble se llena la primera matriz con la siguiente

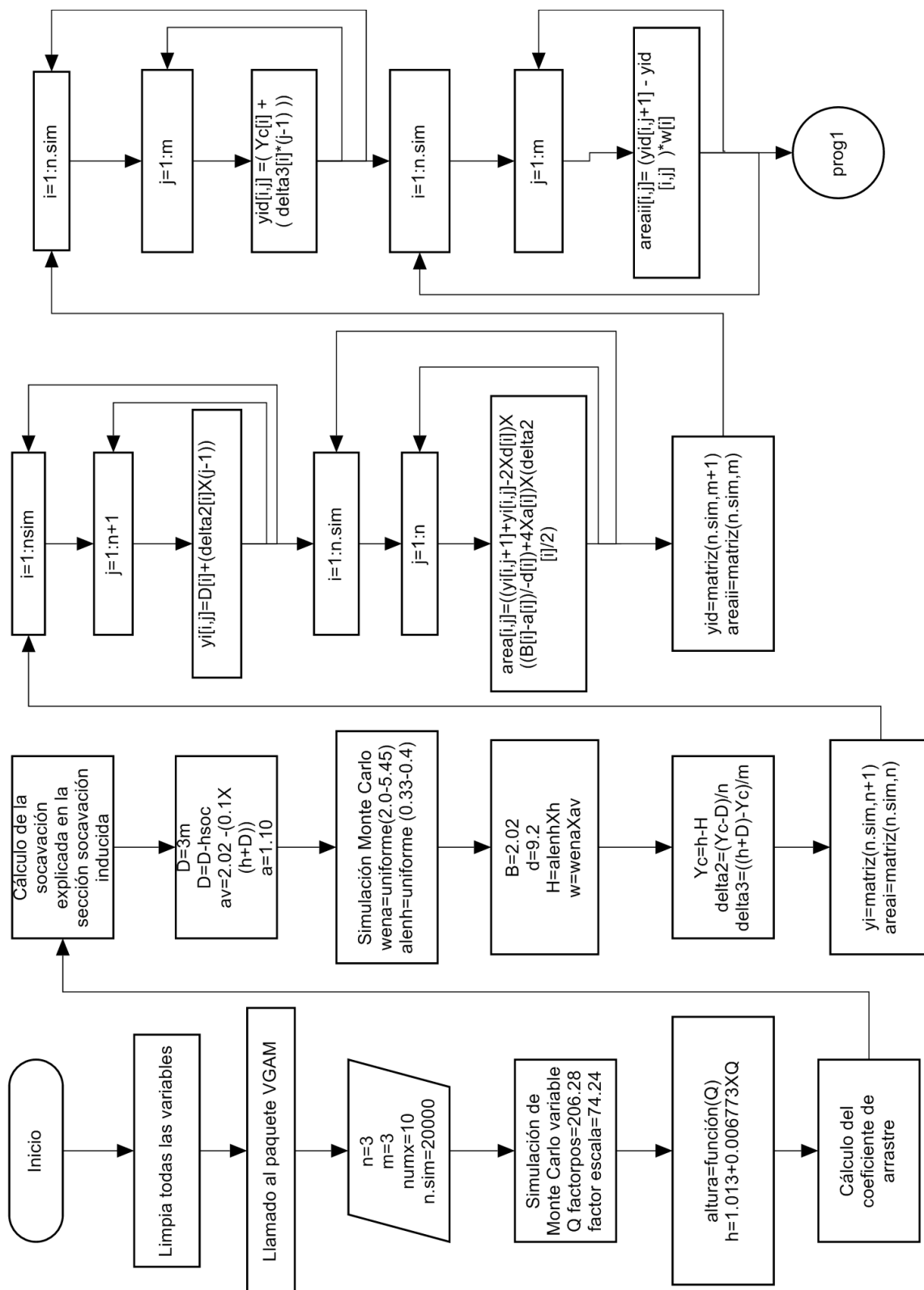


Figura 4.6: Diagrama de flujo: programa de daño inicio y determinación de áreas simuladas de escombros

asignación $brazo1[i, j] = D[i] + (\text{delta}2[i] \times (j - 1)) + di[i, j]$ y para la segunda matriz se llena con la siguiente expresión $brazo2[i, j] = Y_c[i] + (\text{delta}3[i] \times (j - 1)) + dei[i, j]$. Se define el coeficiente de arrastre de la primera región como una función de las variables mencionadas en el nodo socavación inducida. También se calcula el coeficiente de arrastre para la zona de escombros con las mismas restricciones que se efectuaron en el nodo fuerza de arrastre. Se define una variable nombrada Dei que contiene el valor de la densidad del agua. Ver figura 4.9

Se define una matriz nombrada $fuerza$ de dimensiones $(n.sim \times n)$ que es llenada con un loop doble con la siguiente asignación $fuerza[i, j] = CD[i, j]Dei[i] \times \text{areai}[j] \times (V[i]/2)^2$ que es la expresión para el cálculo de la fuerza de arrastre en la primera región. Se realizan los mismos pasos para la zona de escombros llenando una matriz

nombrada $fuerzados$ de dimensiones $(n.sim \times m)$ que se llena con un loop o ciclo doble con la siguiente formulación $fuerzados[i, j] = CD2[i, j]Dei[i] \times \text{areai}[j] \times (V[i]/2)^2$. Ahora ya se tienen dos elementos que representan la fuerza de arrastre a lo largo de todo el elemento considerando el caso en que se tiene socavación y las modificaciones hidráulicas resultado de la presencia de escombros. Aún resta desarrollar el programa que llegue a la estimación de los esfuerzos necesarios para el subprograma que estima las probabilidades condicionales correspondientes a este nodo. Una vez definidos estos dos elementos se define un vector denominado $Mxapoyo$ de dimensiones $(1 \times n.sim)$ y llenado con un loop doble, el externo va de uno hasta $n.sim$. Después se evalúa una variable nombrada $Mx = 0$ y se abre el otro ciclo que va de uno hasta n y asigna la siguiente expresión $Mx = Mx + fuerza[i, j] \times (D[i] + (\text{delta}2[i] \times (j - 1)) + di[i, j])$ y al cerrar el ciclo interno $Mxapoyo[i] = Mx$ este vector representa el momento aplicado en la base de la pila. Para la segunda sección se definen dos elementos denominados Mxd y $Mxapoyod$, al primero se le asigna el valor 0 y el segundo tiene dimensiones $(1 \times n.sim)$. Para su llenado se corre un loop doble, el ciclo externo va de uno hasta $n.sim$ y en él se asigna el valor 0 a Mxd , se continúa con el interno que va de uno hasta m . Es en este donde se ejecuta la siguiente operación $Mxd = Mx + fuerzados[i, j] \times (Y_c[i] + (\text{delta}3[i] \times (j - 1)) + dei[i, j])$, se cierra ese ciclo y en el restante se hace la asignación $Mxapoyod = Mxd$. Ver figura 4.8 para más detalle de esta parte descrita.

Continuando con el programa, se desea el cálculo del momento flexionante y para ello se requiere de la evaluación del momento en la base y de fuerzas equivalentes a lo largo del modelo que es considerado como una viga en voladizo. Por lo tanto, se crea un vector de $(1 \times n.sim)$ llamado Mb al que se le asignen los momentos calculados recientemente, esto se realiza con la corrida de un ciclo sencillo que va de uno hasta $n.sim$ asignándole al nuevo vector los valores $Mb[i] = Mxapoyo[i] + Mxapoyod[i]$ para una mayor comprensión revisar figura 4.8

Para el cálculo del momento flexionante se requiere de la reacción en el empotramiento por lo cual se

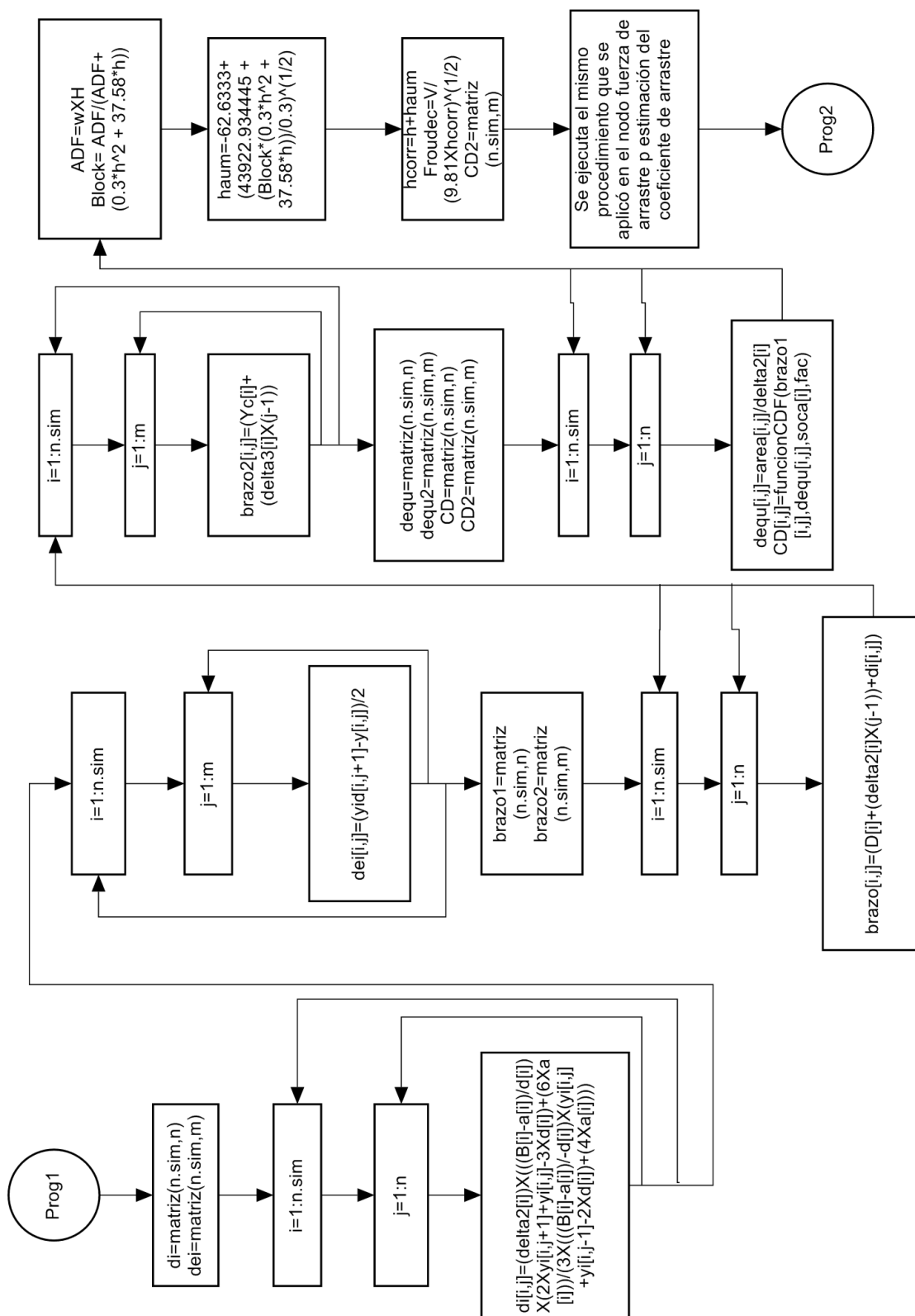


Figura 4.7: Diagrama de flujo: programa de daño determinación de los brazos y coeficientes de arrastre

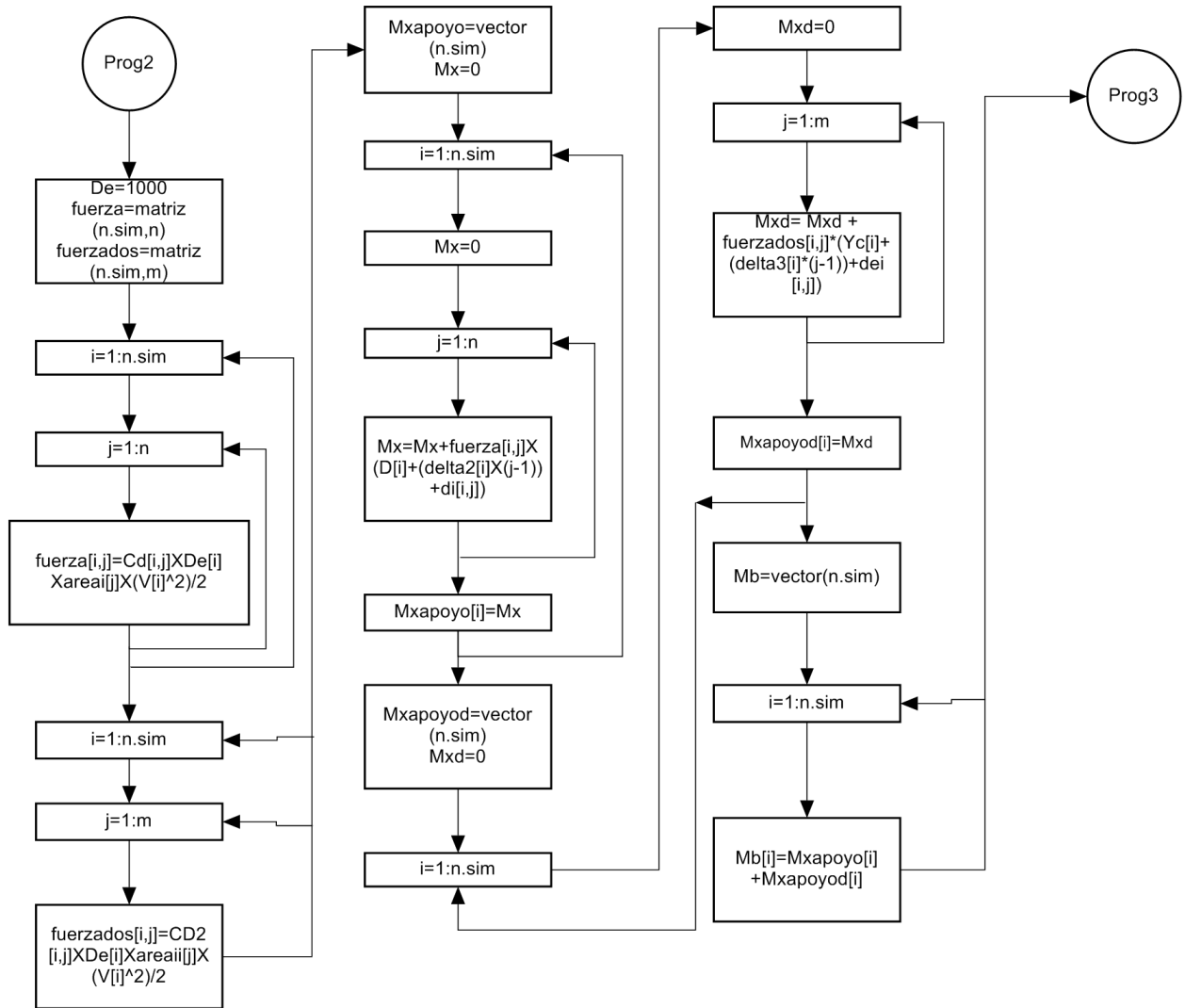


Figura 4.8: Diagrama de flujo: programa de daño determinación de los momentos en la base de la pila

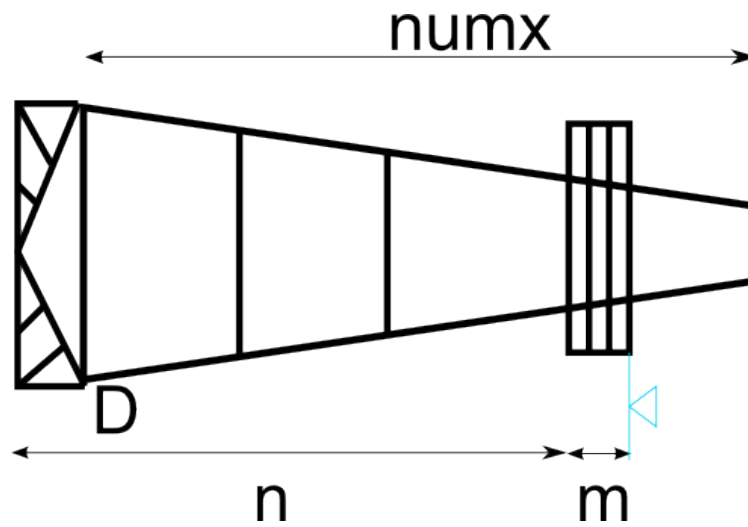


Figura 4.9: Esquema del modelo considerado y configuración del escombro

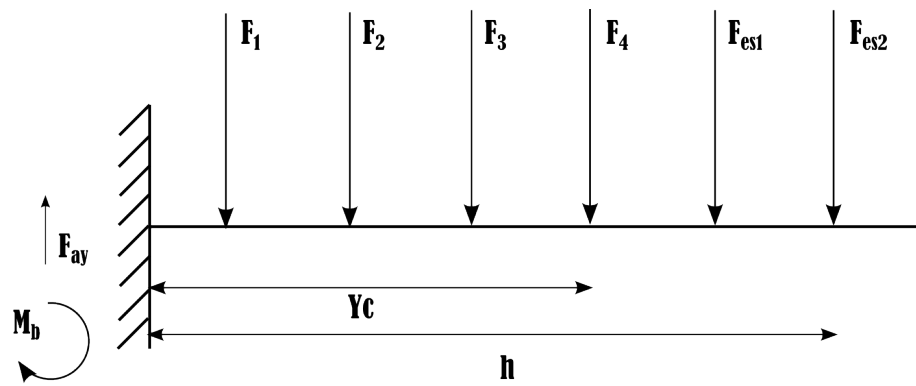


Figura 4.10: Modelo de la pila para cálculo del momento flexionante

crea un vector de dimensiones $(1 \times n.sim)$ llamado *Fay*, que cumplirá con este requisito y su llenado se realiza a través de loop sencillo que va de uno hasta *n.sim* donde se ejecuta el siguiente nombramiento $Fay[i] = suma(fuerza[i, 1 : n]) + suma(fuerzados[i, 1 : m])$ lo que significa que se efectuará una suma de renglones de cada matriz. Ahora ya se tienen todos los elementos necesarios para el cálculo del momento flexionante por lo tanto se define una función de las variables x que determinará la posición a lo largo de la viga, *Mb* que es el momento en la base, *Fay* que es la reacción en el empotramiento, las matrices *fuerza* y *fuerzados*, los anchos *delta2* y *delta3*, las distancias *di* y *dei* y dos contadores *nn* y *mm*.

Como se sabe, para conocer el diagrama de momento flexionante para cualquier tipo de viga se requiere buscar una función que recorra el elemento y para el que se cumpla el equilibrio interno (ver figura 4.10). Primero se define un vector que es resultado de la ecuación del momento en una region $Mom = -Mb[i] + Fay[i] * x$, después se corre una condición para ubicar la región en la que se localiza la variable x que es $x \geq 0$ y $x \leq D[i] + di[i, 1]$ si se cumple, entonces el momento $Momento = Mom$, si no se cumple esa condición entonces se propone otra condición $x > D[i] + di[i, 1]$ y $x \leq (Yc[i] + dei[i, mm])$. En caso de que se cumpla, se crea otra variable *Mom2* a la que se le asigna el valor 0, también otra variable llamada *counter* se le asigna el valor 0. Se inicia un loop de la variable k con valor de uno hasta *nn*, se coloca otra restricción si $k < nn$ al entrar en esta condición se llega a otra $(x \geq D[i] + delta2[k] \times (k - 1) + di[i, k])$ y $x \leq D[i] + delta2[k + 1] \times ((k + 1) - 1) + di[i, k + 1]$ y si se cumple a la variable *counter* se le asigna el valor k . Si no se cumple con esta, se llega a otra la que es $k = n$ y *counter* = 0 que si se cumple a la variable *counter* se le asigna el valor *nn*.

Continua con un loop sencillo para k de uno hasta *counter* donde se hace la siguiente asignación $Mom2 = Mom2 - fuerza[i, k] \times (x - (D[i] + (delta2[i] \times (k - 1)) + di[i, k]))$ donde se aprecia un momento para cuando x no llega a la zona de escombros, se cierra este loop y se continua con una asignación $Momento = Mom + Mom2$. Ver figura 4.11.

Se regresa a una condición para la cual $(x > (Yc[i] + dei[i, mm]))$ y $x \leq (h[i] + D[i])$, si se cumple esta aseveración entonces a las variables *Mom2* y *counter* se les asigna el valor 0. Se corre un loop sencillo para k de uno hasta *mm* donde se pone la siguiente condición $(x \geq (Yc[i] + delta3[k] \times (k - 1) + dei[i, k]))$ y $x \leq (Yc[i] + delta3[k + 1] \times ((k + 1) - 1) + dei[i, k + 1])$, que si se cumple, se asigna a la variable *counter* el valor k , en caso contrario si se cumple que $k = mm$ y *counter* = 0 entonces a la variable *counter* se le asigna el valor *mm*.

Se corre un ciclo sencillo para k que va de uno a *counter* donde se hace la siguiente asignación $Mom3 = Mom3 - fuerzados[i, k] \times (x - (Yc[i] + (delta3[i] \times (k - 1)) + dei[i, k]))$ y al término de este el momento toma el valor $Momento = Mom + Mom2 + Mom3$. Después se define otra condición que estipula que $x > h[i] + D[i]$, que es una zona que está fuera de las dos definidas. Entonces si se cumple $Momento = 0$. Al pasar por

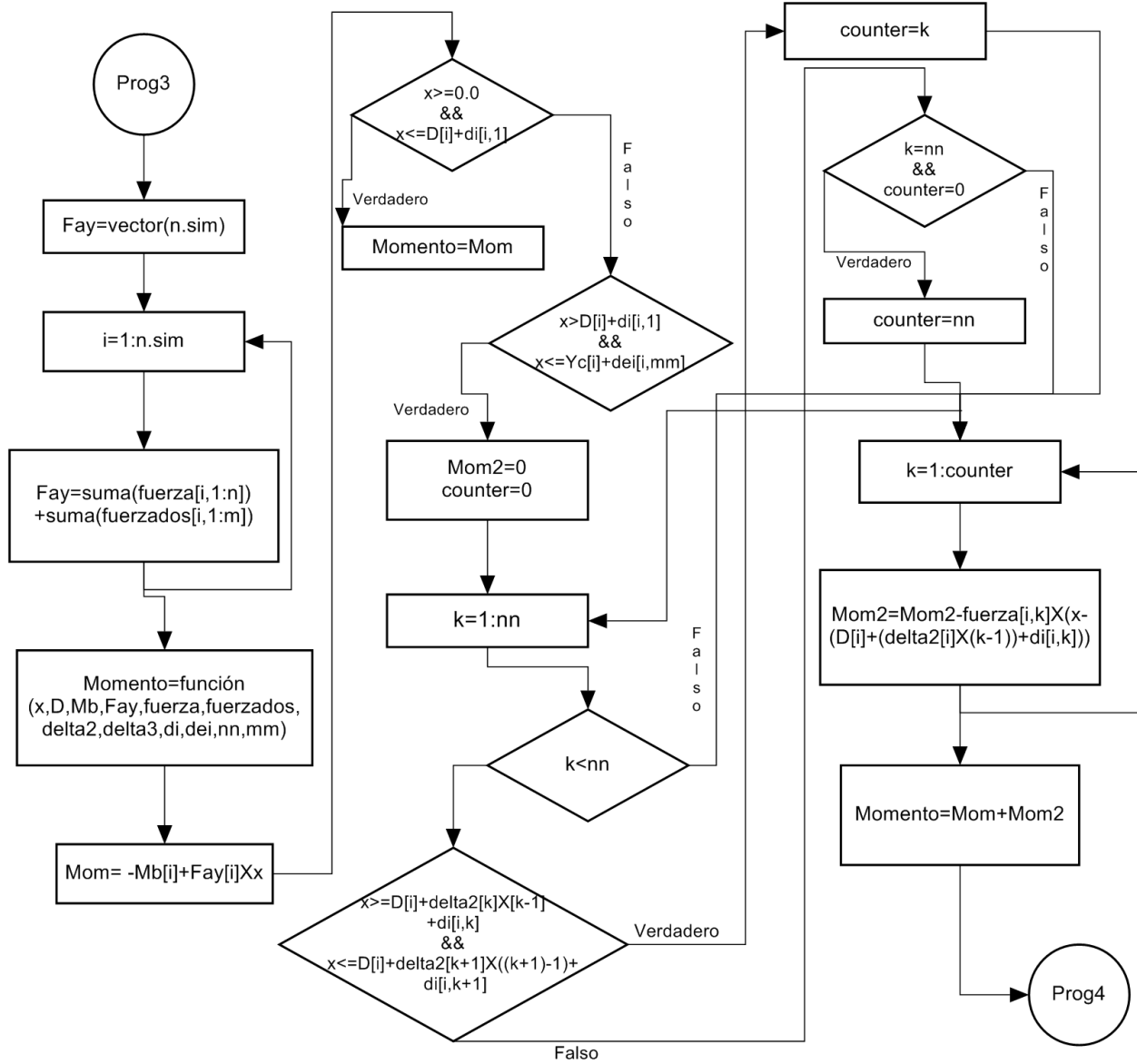


Figura 4.11: Diagrama de flujo: programa de daño determinación del momento flexionante primera región

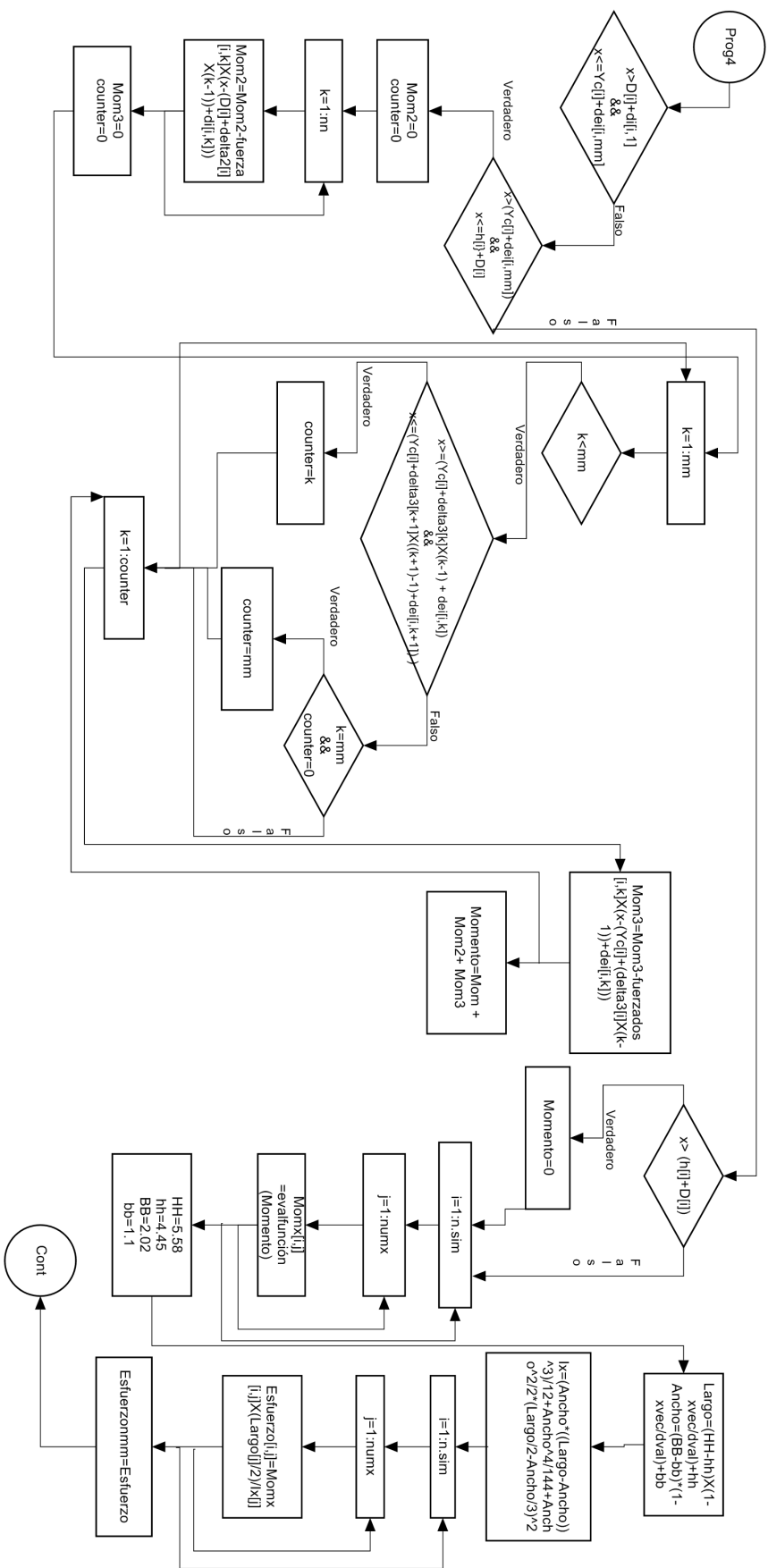


Figura 4.12: Diagrama de flujo: de daño estimación de momento flexionante zona final y cálculo de esfuerzos

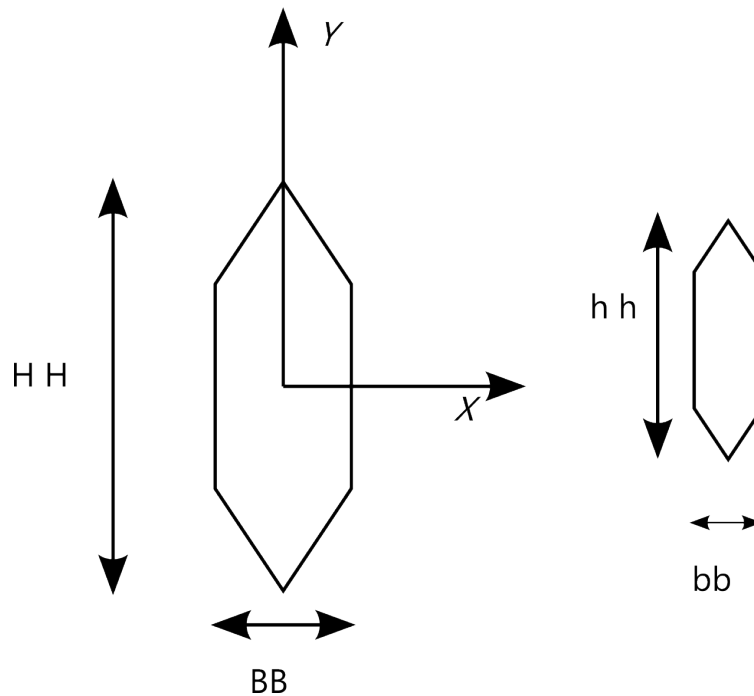


Figura 4.13: Sección transversal en la base y corona dimensiones de la pila

estas líneas programadas, ya se tienen todos los elementos para el cálculo del momento flexionante, ahora lo que se tiene que hacer es aplicarlo para las condiciones de la pila en estudio. Para ello se define una matriz nombrada $Momx$ con dimensiones $(n.sim \times numx)$ y el vector $xvec$ que es una secuencia de números que va de 0 a 9.2 m que es la longitud de la pila, con $numx$ divisiones. Por lo tanto se ejecuta un loop doble para i y j que va de uno hasta $n.sim$ y de uno hasta $numx$ respectivamente donde la matriz $Momx$ se llena con la evaluación de la función Momento con los parámetros $xvec[j]$, D , i , Yc , Mb , Fay , $fuerza$, $fuerzados$, $delta2$, $delta3$, di , dei , n , m y j . Ahora ya se tienen todos los elementos para llegar a la estimación del esfuerzo, para lo cual se definen valores del largo y ancho de la sección transversal de la pila en función del tirante del agua. Se definen cuatro vectores que contienen el valor de estas dos variables en los extremos de la pila y los cuales fueron tomados en la campaña experimental. Estos tienen dimension $(1 \times numx)$ y valores 5.58, 2.02 metros, para la base; 4.45, 1.1 metros para la corona y son nombrados HH, BB para la base y hh, bb para la corona. Con ellos se obtienen dos expresiones para la determinación del largo y ancho respectivos $Largo = (HH - hh) \times (1 - xvec/dval) + hh$ donde $xvec$ es la secuencia de valores y $Ancho = (BB - bb) \times (1 - xvec/dval) + bb$. Posteriormente se calcula el momento de inercia alrededor del eje (x) (ver figura 4.16) definiendo primero esta variable con un vector de dimensiones $(1 \times numx)$ a la que se le asigna los valores de

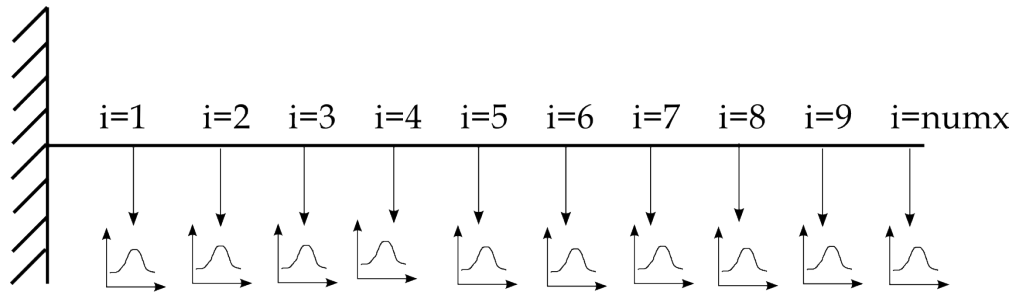


Figura 4.14: Esquema representativo del resultado del programa para evaluar esfuerzos

esta ecuación $Ix = (Ancho \times ((Largo - Ancho)^3)/12 + Ancho^4/144 + (Ancho^2/2) \times (Largo/2 - Ancho/3)^2$.

Finalmente se define una matriz denominada *Esfuerzo* de dimensiones $(n.sim \times numx)$ y con un loop doble para i de uno hasta $n.sim$ y j de uno hasta $numx$ con la siguiente expresión de mecánica de materiales $Esfuerzo[i, j] = (Momx[i, j] \times (Largo[j]/2))/Ix[j]$. Al cumplirse estas líneas se llega a una distribución de probabilidad de esfuerzos para cada punto en que se divide la pila. En este caso se tienen 10 distribuciones (ver figura 4.14).

La finalidad del programa descrito, es la estimación de la tabla de probabilidad condicional, por lo cual es necesario calcular la variable daño como se ha definido y después aplicar los conceptos de probabilidad condicional. Se define un vector de dimensiones $(1 \times numx)$ donde $numx$ es la cantidad de divisiones en que el modelo de la viga se divide. Este vector contendrá el concepto de la variable daño descrito en la ecuación 4.39 y se tendrán cuatro de ellos puesto que es la cantidad de intervalos en los que se discretiza el nodo que funciona como su ancestro. Se inicia un ciclo o loop que va desde 1 hasta $numx$ dentro de este, se definen los parámetros A, B con los valores descritos previamente, se designa el vector bb con el operador `hist` de R que ejecuta un histograma para los valores de la matriz esfuerzo que consta de dimensiones $n.sim$ (número de simulaciones) y $numx$ (número de divisiones de la pila). Con esto se determinan $numx$ distribuciones de probabilidad de los esfuerzos calculados y que en el programa se denominan *Esfuerzonmm*.

Se define el vector bbc que es la suma de toda la frecuencias de cada distribución (para correr este programa se utilizaron 10 divisiones de la pila y 20000 valores de simulación), se define el vector $bbsf$ que es el valor de la frecuencia de los valores medios en la distribución. Después se define un vector nombrado bbv que cuenta la frecuencia de valores de esfuerzo, se crea un nuevo vector $bbvnn$ que es el equivalente del vector pasado y también una nueva variable nombrada bbv como la división de bbv/bbc que es la equivalencia a una función de densidad de probabilidad puesto que esta dividiendo cada valor de frecuencia entre los totales. Se define un vector denominado bbl que es igual a la longitud al vector bbv . Se crea el valor $Dda = 0$, después de esto se inicia otro ciclo o loop que va desde 1 hasta bbl . Dentro de este ciclo se crea la variable C explicada

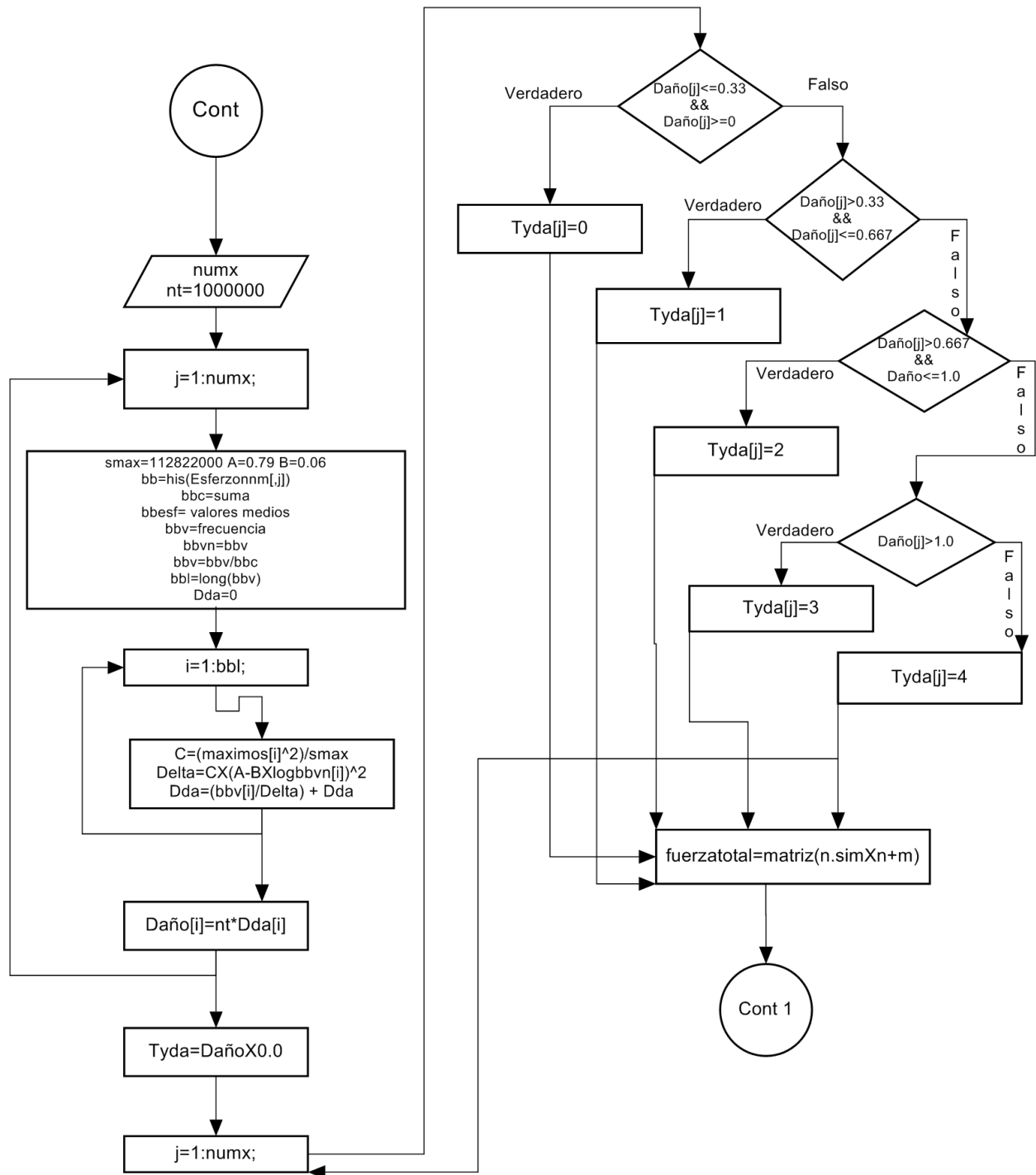


Figura 4.15: Diagrama de flujo: programa de daño primeros parámetros

anteriormente, también dentro de este ciclo se crea la variable delta que es $C(A - B \log b b v n n)^2$. Se llena el vector $Dda = (bbv/delta) + Dda$ donde bbv equivale a la función de densidad de probabilidad descrita en la formulación de este nodo. El vector daño[j] se llena con los valores $n_t \times Dda$ posteriormente se cierra el ciclo. Se define la variable Tyda con las mismas dimensiones del daño. Se empieza un loop que va de 1 hasta $numx$, en el cual se determinan si las condiciones del vector daño para los casos en que caiga en los intervalos $0 - 0.33, 0.33 - 0.6667, 0.6667 - 1, > 1$ asignandoles valores a Tyda de 0 a 4 siendo 0 para el primer intervalo, 1 para el segundo intervalo y así sucesivamente hasta cuatro (ver figura 4.15).

Para determinar las probabilidades condicionales se llega a una aproximación similar a la desarrollada en el nodo número de Froude, para ello se requiere que el nodo padre Fuerza de arrastre se encuentre simulada y este representada por una distribución de probabilidad, y como se dividió el modelo del elemento en dos regiones es necesario realizar un procedimiento para tener esta variable con las dimensiones $n.sim$. Por consecuencia se define la matriz *fuerzatotal* de dimensiones $(n + m \times n.sim)$ donde n es el número en que esta dividida la region hasta el punto donde sobresale el escombros y m el número de divisiones en que se parte la región donde esta alojada el escombros. Se ejecuta un loop doble el primero va desde 1 hasta el número de simulaciones $n.sim$, el interno desde uno hasta n y dentro de él, a la matriz *fuerzatotal*[i, j] se le asigna el valor de la variable *fuerza*[i, j], esta matriz contiene valores del resultado del cálculo de la fuerza de arrastre en la primera zona (ver figura 4.16), se abre otro ciclo o loop que va de $n + 1$ hasta $m + n$ donde la matriz *fuerzatotal* es llenada con los valores de *fuerzados*[$i, j - n$] que consiste en el cálculo de la fuerza de arrastre para la segunda zona que empieza a partir del punto donde el escombros se presenta.

Posterior a esto se define un vector denominado *fuerzasim* con dimensiones $(1 \times n.sim)$, se llega a este vector con un ciclo o loop que va de $i = 1$ hasta $n.sim$ donde se asigna $fuerzasim = suma(fuerzatotal[i,])$ lo que resulta en una suma de la matriz llamada *fuerzatotal* en sus elementos i , es decir suma todo un renglón i de la matriz *fuerzatotal*, esto equivale a que se tenga un total de la fuerza de arrastre para cada elemento i que es el renglón de la matriz y se suman los elementos de las columnas j que en el caso analizado es de 10 elementos (ver figura 4.16 para hacer más clara esta explicación).

Se continua con la definicion de cuatro matrices llamadas *Esfint1, Esfint2, Esfint3y Esfint4*, de tamaño $(n.sim \times numx)$ las cuales se llenan de acuerdo a que lugar ocupen en el intervalo de la variable *fuerzasim* (que es el nombre del nodo padre), pero antes se necesita la definición de los cuatro estados de esta variable que son los mismos que se ocuparon para discretizar el nodo fuerza de arrastre; es decir el primer intervalo va de 0 a una desviación estandar de los propia estadística de la distribución de esta variable, el segundo va de una desviación estandar a 2 veces la desviación.

Se crea un loop sencillo que va de $i=1$ hasta $n.sim$ donde se colocan condiciones que evaluen que cada i elemento de *fuerzasim* se localize dentro de estos intervalos. Por ejemplo, si el elemento i cae en el primer

intervalo (de 0 a una desviación) conduce a que se abra otro ciclo que va de $j=1$ hasta $numx$ y dentro de el se hace la asignación $Esfint1[i, j] = Esfuerzonmm[i, j]$. En caso de no cumplir se evalúa la siguiente condición (que se localice en el segundo intervalo) y si esta se cumple se inicia el loop $j=1$ hasta $numx$ para realizar la asignación $Esfint2[i, j] = Esfuerzonmm[i, j]$, se repiten los mismos pasos para los demás intervalos. Estas cuatro matrices servirán para el cálculo del daño en los otros intervalos, es decir, estas nuevas matrices $Esfint1 - Esfint4$ cumplirán con el papel que cumple $Esfuerzonmm[i, j]$ en la parte del programa representado en el diagrama de flujo de la figura 4.15.

Se ejecuta otro ciclo o loop desde uno hasta $numx$, se define nuevamente el esfuerzo a la compresión máximo, se determinan los parámetros A y B. Se define el vector bb que ejecuta un histograma para los esfuerzos que están en el intervalo 1 es decir se ejecuta el histograma para las $numx$ distribuciones que están en el primer intervalo. Se define el vector bbc que es la suma de todos los elementos de la distribución, a su vez se define el vector $bbsf$ que determina los valores medios de frecuencia de las distribuciones. El vector bbv se define y representa la cantidad de datos de la distribución. Se repite el mismo procedimiento que está representado en el diagrama de la figura 4.15, solo que se sustituye $Esfuerzonmm$ por $Esfuerzoint1 - Esfuerzoint4$. Se define el vector $Tyda1$ con dimensiones $1 \times numx$, después se ejecuta un ciclo o loop de $i=1$ hasta $numx$ donde se definen condiciones para el vector $dañoint1$ este dentro de los intervalos $0 - 0.333, 0.333 - 0.667, 0.667 - 1, > 1$ que determinaran el valor de los componentes del vector $Tyda$ siendo uno si $dañoint1$ cae dentro del primer intervalo. Este proceso es similar al de determinar la probabilidad de que se encuentre dentro de un intervalo definido por la $fuerzasim$ y el daño en cualquiera de sus intervalos o, en otras palabras, la intersección que indica el numerador de la probabilidad condicional. Sólo resta la división entre la probabilidad de que estén en cualquiera de los intervalos de la fuerza de arrastre para tener completa esta definición. Esto es definido con el parámetro $Pardaint1 = suma(Tydaint1)/3numx$, que es la suma del vector $Tydaint1$ entre el total posible lo que nos indica que es una probabilidad, en este caso la probabilidad que va en el numerador del concepto de probabilidad condicional. Para el siguiente intervalo se crea el vector $dañoint2$ y se siguen los mismos pasos hasta llegar al parámetro de daño del intervalo 2 que es $Pardaint2 = suma(Tydaint2)/3numx$. Se repiten los mismos pasos para los intervalos tres y cuatro.

Se define un vector de cuatro elementos denominado $vecproba$ a los que se les asigna los valores de los cuatro parámetros de daño. Finalmente se calcula la probabilidad condicional dividiendo cada uno de los parámetros entre la suma de los cuatro; esto equivale al cálculo del denominador de la ecuación de probabilidad condicional ver la figura 4.17.

Como se parametriza el daño en la forma más sencilla, en dos estados si y no, estas probabilidades están calculadas para el estado de daño, es decir si, las del otro estado simplemente resultan de restar 1 menos las obtenidas.

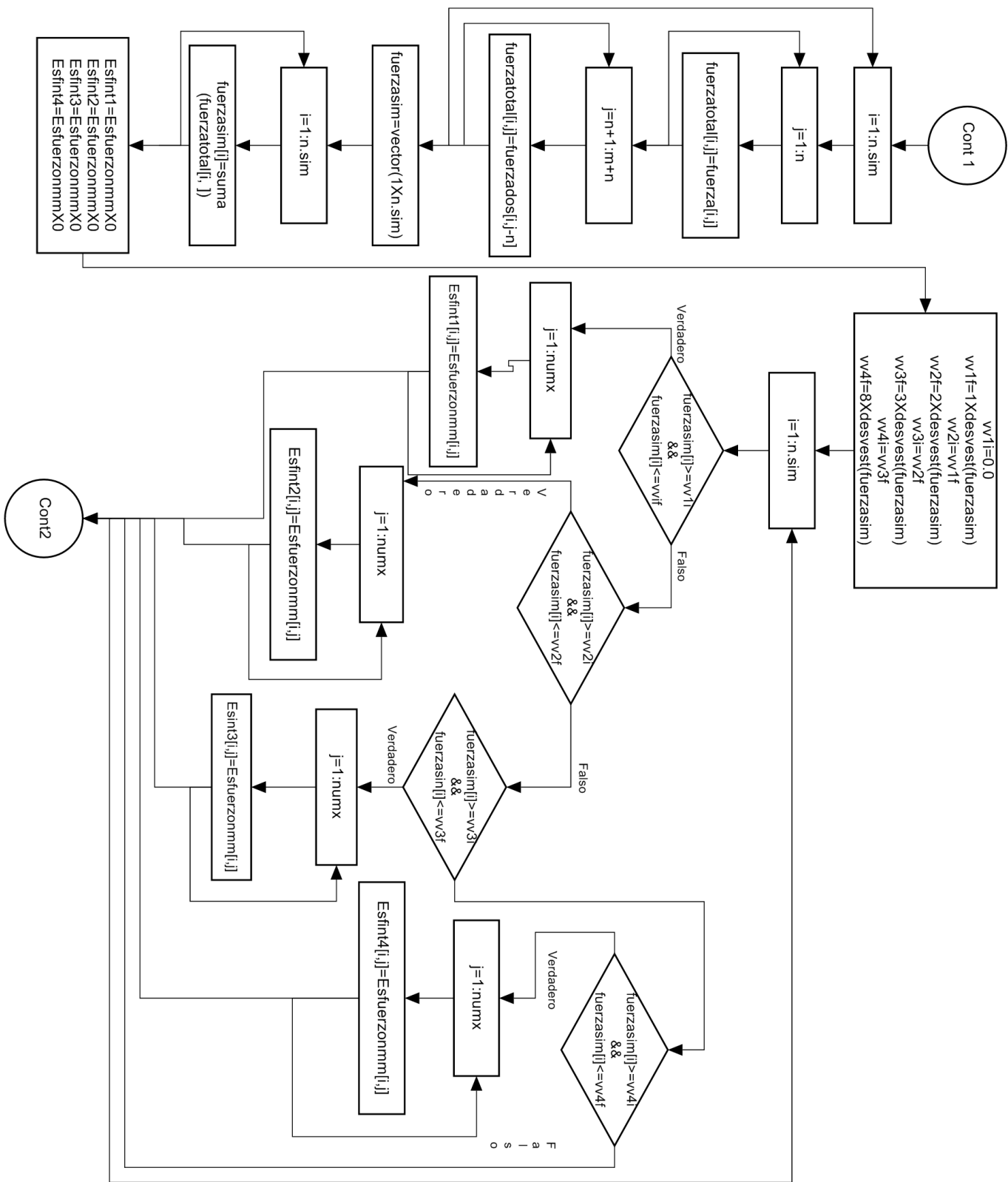


Figura 4.16: Diagrama de flujo programa de daño segunda parte: definición de las matrices de esfuerzo

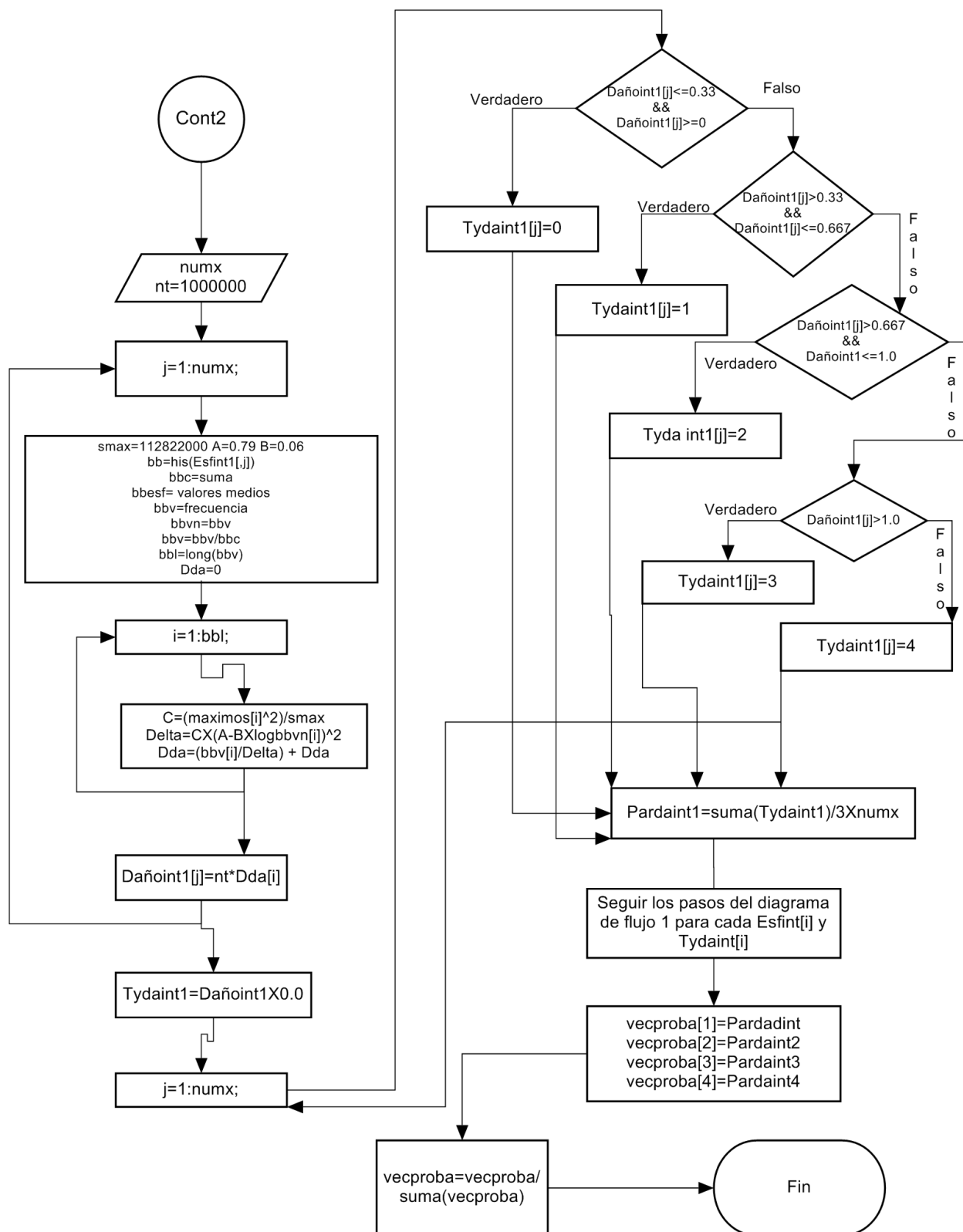


Figura 4.17: Diagrama de flujo programa daño tercera parte: determinación de la probabilidad condicional

Tabla 4.7: Probabilidad condicional Nodo Daño

Daño	0-desvest	desvest-2desvest	2desvest-3desvest	3desvest-8desvest
Sí	0.02857143	0.22857143	0.08571429	0.65714286
No	0.97142857	0.77142857	0.91428571	0.34285714

4.8. Volteo

La manera en que se propone evaluar las condiciones adversas que sufrirán las pilas es a través de dos mecanismos; uno esta relacionado a los efectos adversos presentados en el material constituyente de la pila (mampostería de roca) que fue definido en la sección previamente descrita como el daño por fatiga; el otro resulta de la existencia simultánea de las dos condiciones resultantes de la presencia de escombros (aumento de la fuerza de arrastre y socavación) y la posibilidad que el elemento tenga problemas de estabilidad traducidos en un estimado que se denomina volteo. Para llegar a este estimado que represente la posibilidad de que el elemento tienda a volcarse, es necesario tener en consideración las condiciones y elementos requeridos para esta variable, haciendo simplificaciones que pueden ser derivadas de la escasez o poca certeza de información referente al caso de estudio. De la campaña realizada con la UMSNH se extrajeron los especímenes de roca del mismo tipo del que están constituidos las pilas estudiadas, pero ninguna de las propiedades relacionadas a la cimentación fueron determinadas, por lo cual en el caso de efectuar el cálculo de la variable volteo involucrando aspectos geotécnicos, se deben realizar ciertas suposiciones que siendo estrictos pueden ser inadecuadas o escasamente realistas, pero que por otro lado permiten continuar con los objetivos de este trabajo. Cumpliendo con ellos lo importante resulta en la metodología que está evaluando este trabajo puesto que es una aproximación nueva con posibilidades de mejora en precisión en caso de tener más certeza de las condiciones poco o escasamente conocidas.

Para evaluar el volteo, primeramente se propone que este estado sucederá si las condiciones geotécnicas de la cimentación no son suficientes para que el elemento se mantenga cumpliendo con la función para la que fue diseñada. Para ello como se acaba de describir, es necesario hacer suposiciones y la primera será el considerar la cimentación de la pila con una forma rectangular con dimensiones de largo 5.75 m y ancho 2.0 m, basado en la geometría en la base de la pila, ya que no se cuentan con información sobre estas características. En cuanto a las condiciones a las que está sometida la cimentación, se determina que está sujeta a la carga axial más dos momentos uno originado por la presencia de los vehículos en la dirección del eje de referencia (ver figura 4.13) y la suma de dos momentos: uno alrededor del eje x resultado del paso de vehículos el segundo que es propiciado por la presencia del escombros y del fluido que previamente se denominó Mb. Las propiedades

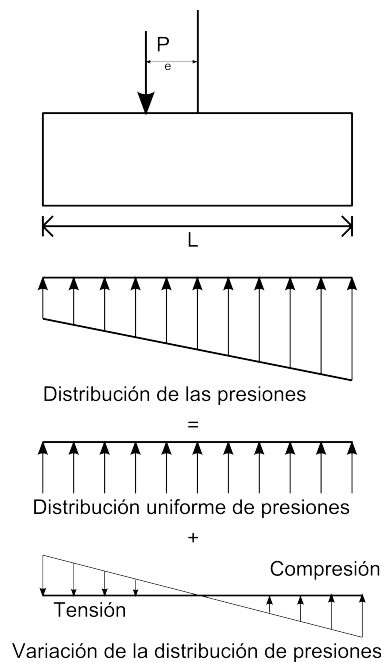


Figura 4.18: Distribución de las presiones del suelo debido a carga axial y momento

de los momentos originados por la presencia de los vehiculos se obtuvieron de un programa desarrollado en la tesis de licenciatura de Omar Jiménez Miranda titulada **Red bayesiana para la evaluación de la probabilidad de falla por socavación de un puente en el Estado de México**(en proceso de titulación) de la cual se determinaron los parámetros de estos para así poder simularlos y usarlos en la determinación del volteo. El momento alrededor del eje y se simuló con una distribución normal al igual que los originados por la presencia de los vehiculos alrededor del eje x.

La carga axial a la que esta sometida la cimentación se obtuvo de la determinación de los volúmenes de los materiales que componen las pilas (sobretudo), cubierta y superficie de rodamiento, y se simuló como una distribución de probabilidad de tipo normal con parámetros designados de acuerdo a lo determinado en el estudio [6].

Cuando una cimentación se encuentra sometida a momentos M , lo que habitualmente se hace es reemplazarlos por una carga P actuando a una excentricidad denominada $e = M/P$, todo ello por que en la intención de llegar a evaluar la condición geotécnica que resulte como resistente del suelo, es necesario evaluar las reacciones del suelo puesto que el uso de ellas es importante para varios pasos que se siguen hasta la determinación de esta. Como ocurre con la evaluación de los nodos pasados es necesario efectuar tareas de programación para el manejo de los datos ya que se tratan de condiciones no determinísticas. Para comenzar

con la búsqueda de la variable geotécnica se inicia en el punto en que se simulan la componente axial y los momentos, cuestión que fue explicada recientemente. Después se determinan los componentes de la ecuación de esfuerzo para condiciones axiales y de flexión

$$q = P/A + M_y x / I_{yy} + M_x y / I_{xx} \quad (4.40)$$

(Ver figura 4.18 como ayuda en esta explicación). Después de generadas las componentes de esta ecuación, se procede con el cálculo de las excentricidades en las dos direcciones, el signo de cada una de ellas determina cuando los componentes por flexión se suman o restan, condición que fue programada. En el caso específico de la cimentación se hace uso de la ecuación de esfuerzo para determinar la presión en cada una de las esquinas a las que se les ha asignado un número con la finalidad de que los componentes tengan asignado el signo correcto. Por ejemplo, cuando las dos excentricidades son positivas en la esquina número 1 (esquina superior derecha) las componentes de flexión se suman para ella, a la esquina 2 (numerandolas siguiendo un sentido horario) el componente $M_y x / I_{yy}$ es restado, para la esquina 3 ambas componentes se restan y finalmente para la esquina 4 el elemento $M_x y / I_{xx}$ se resta mientras que el otro se suma. Las posibles 4 opciones de signo de las excentricidades se programaron para el cálculo de estas presiones, la cual se utilizará en la determinación del estimado resistente del suelo que es la capacidad de carga. Para que una cimentación cumpla con el objetivo de transmitir las cargas al suelo, estas no deben exceder un límite, este valor es conocido como la capacidad de carga del suelo q . Existen varias teorías propuestas para el cálculo de este indicador, y en este caso se utilizara la propuesta por Terzaghi y modificada por Meyerhof a través del método del área efectiva con el cual se requieren seguir los siguientes pasos:

- Determinar las dimensiones efectivas de la cimentación L' y B'
- Uso de la ecuación $q_u = cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B' N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$, Para el evaluar $F_{cs} F_{qs}$ y $F_{\gamma s}$ se hace uso de las ecuaciones que a continuación se muestran pero con la particularidad de que en estas expresiones se hace uso del ancho y largo efectivo B' , L' en vez de L y B . Para determinar $F_{cd} F_{qd}$ y $F_{\gamma d}$ se usan las expresiones mostradas a continuación y haciendo uso del ancho de la cimentación B
- La carga que la cimentación puede soportar es $Q_{ult} = q_u B' L'$

Para cumplir con el primer paso se requiere un programa en el que se determinen los cambios de signo entre los vértices de la cimentación y al marcarlos, se utilice esta información para determinar todos los posibles casos de estados de esfuerzo a los que puede estar sometido el elemento considerando que el suelo no puede soportar esfuerzos de tensión. Así, se puede llegar al área efectiva que significa el área de la cimentación

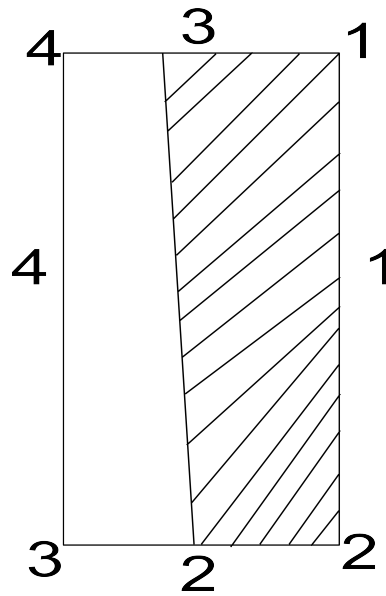


Figura 4.19: Convención de signos usado para el cálculo de la capacidad de carga

que esta únicamente sometido a esfuerzos de compresión. Esta programación es necesaria por que se estan manejando variables no determinísticas y se requiere el cálculo de la variable resistente representada ya sea por medio de su función de densidad de probabilidad o su acumulada.

Como se esta interesado primero en los cambios de signo, se empleo en la programación de estos indicadores con dos ciclos o loops: uno (el interno) para entrar a cada lado de la cimentación y el externo para evaluar las condiciones de cambio de signo entre las esquinas y se creo una convención para las 4 posibles situaciones que se tienen asignandole el valor 1 para cuando los esfuerzos de un lado son positivos, el valor de 2 para cuando hay un cambio de positivo a negativo entre las esquinas, el número 3 para cuando hay un cambio de negativo a positivo y finalmente el número 4 cuando se tienen las dos esquinas con signo negativo (ver figura 4.19 para una mejor idea). Después de que se establece el número de la convención de signos empleada se determinan cuales son los posibles casos que representen de manera correcta las posibilidades de áreas efectivas. Se encontró que existen 13 geometrias posibles(ver figura 4.20). Para el cálculo de las dimensiones requeridas en la ecuación de la capacidad de carga, se recurrio a proporciones que involucran la presión en cada esquina y las longitudes entre ellas. Así como también para determinar el área efectiva que puede resultar basicamente en tres geometrias: rectángulo, trapecio o triángulo. De la ecuación general de capacidad de carga los siguientes factores son presentados para cada miembro y el como se consideraron para este nodo. El término c se refiere a la cohesión del suelo que en este caso se considero un suelo del tipo friccionante con cohesión 0. El parámetro q es el resultado de multiplicar el peso volumétrico del material

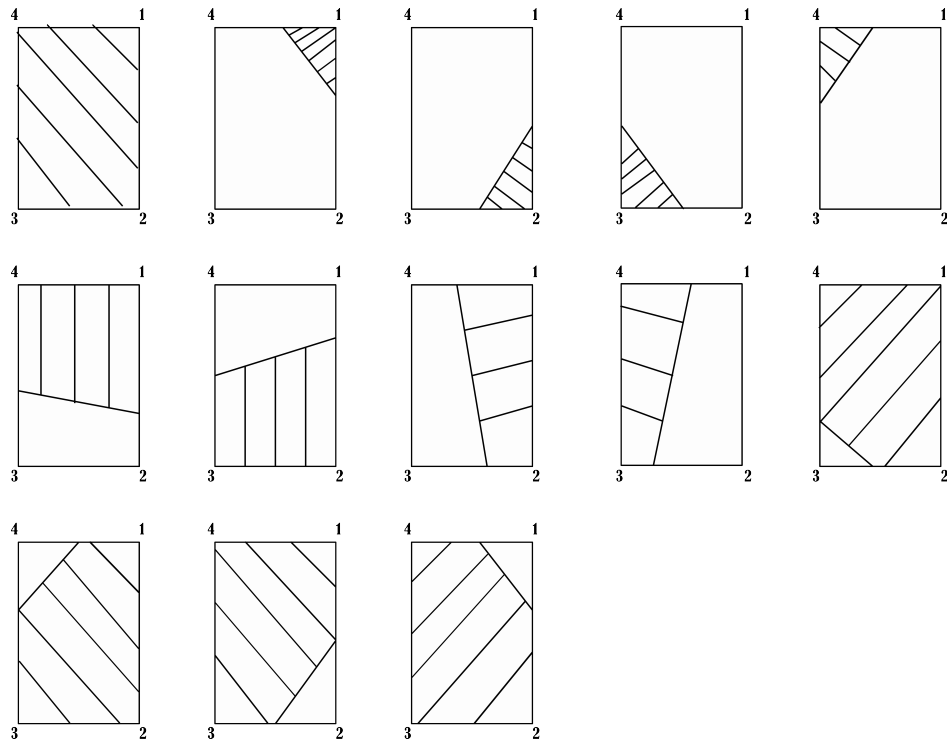


Figura 4.20: Posibles geometrias del área efectiva

por la profundidad de desplante que en este caso se supuso de 3 m y el peso volumétrico fue simulado como una variable con distribución normal con parámetros, media $\mu = 16KN/m^3$ y un coeficiente de variación 0.07, con base en [17] ya que es de gran relevancia este factor, al tratarse de un análisis de confiabilidad de muros de retención con contrafuertes. Por esta razón se optó por simularlo con los mismos parámetros.

$$N_q = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)e^{\pi \tan \phi} \quad (4.41)$$

Donde ϕ es el ángulo de fricción interna que es simulado con una distribución normal con media 30grados y desviación estándar 3 extraído de la misma fuente. Para este factor el ángulo se considera en radianes.

$$N_c = (N_q - 1)\cot \phi \quad (4.42)$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan \phi \quad (4.43)$$

Los factores de forma:

$$F_{cs} = 1 + ((B'N_q)/L'N_c) \quad (4.44)$$

$$F_{qs} = 1 + \left(\frac{B'}{L'\tan \phi}\right) \quad (4.45)$$

$$F_{\gamma s} = 1 - \left(0.4\frac{B'}{L'}\right) \quad (4.46)$$

Recordando que en estos se sustituye el ancho y el largo efectivo determinados anteriormente. Los factores de profundidad donde si se cumple que la relación entre el desplante y el ancho D/B es menor o igual a la unidad se tiene que:

$$F_{cd} = 1 + (0.40(D/B)) \quad (4.47)$$

$$F_{qd} = 1 + (2\tan(\phi)((1 - \sin(\phi))^2)(D/B)) \quad (4.48)$$

$$F_{\gamma d} = 1.0 \quad (4.49)$$

En caso contrario:

$$F_{cd} = 1 + (0.4(1/\tan(D/B))) \quad (4.50)$$

$$F_{qd} = 1 + (2\tan(\phi)((1 - \sin(\phi))^2)(1/\tan(D/B))) \quad (4.51)$$

$$F_{\gamma d} = 1.0 \quad (4.52)$$

Los demás factores que corresponden a la inclinación de la cimentación son:

$$F_{ci} = (1 - (\beta/90))^2 \quad (4.53)$$

$$F_{qi} = (1 - (\beta/90))^2 \quad (4.54)$$

$$F_{\gamma i} = (1 - (\beta/\phi))^2 \quad (4.55)$$

Donde β es el ángulo de inclinación de la cimentación que en este caso se considero nulo.

Finalmente se llega al estimado geotécnico que se deseaba, al tener este caracterizado, ahora se formula la función de estado límite para establecer la condición física que determine si el elemento se voltea o no, siendo el valor encontrado Q_{ult} como el elemento resistente de la formulación más sencilla $M = R - S$. La sollicitación será la variable *fuerzasim* que ya se explico en el programa descrito en la variable daño y representa la variable fuerza de arrastre simulada, y el elemento resistente que es la variable recién explicada Q_{ult} . Basado en las corridas continuas de los programas escritos y en los resultados que generan, se determinan los valores en que esta variable se discretizó procurando que cubran la totalidad de la distribución de la variable y teniendo cuidado en conservar las unidades en las que se calculan las variables involucradas que resultaron en KN. Otro resultado importante que se aprecia de estas corridas fue que esta variable denominada Margen, nunca tenia valores menores a 0 representando un estado seguro, a pesar de modificar el número de simulaciones limitado por las capacidades del equipo de cómputo usado.

Como este nodo tiene dos padres es necesario llegar a una formulación que determine la probabilidad condicional a dos variables, se puede notar que en el modelo evaluado se tiene otro nodo con estas características solo que fuerza de arrastre se simplifico por la manera en que esta parametrizado el padre bloqueo-acumulación. Por ello es necesario revisar conceptos donde se involucre la probabilidad condicional dadas dos variable dependientes. La probabilidad condicional a dos o más eventos puede deducirse de probabilidad de intersección de tres variables:

$$P(A \cap B \cap C) = P(A)P(B|A)P(C|A, B) \quad (4.56)$$

Al desarrollar esta expresión, es necesario trasladarla al contexto del estimado que se desea en este nodo, como la probabilidad de volteo (V) dado que sucedieron eventos para las variables fuerza de arrastre (D) y socavación (S). De acuerdo a la última ecuación desarrollada se puede tener la probabilidad de intersección de los tres posibles eventos es:

$$P(V \cap S \cap D) = P(S)P(D|S)P(V|S, D) \quad (4.57)$$

El último elemento de la ecuación es el elemento buscado, despejando y sustituyendo la probabilidad condi-

cional $P(S|D)$ se llega a la ecuación deseada

$$P(V|S, D) = \frac{P(V, S, D)}{P(S, D)} \quad (4.58)$$

Esta ecuación luce sencilla para su aplicación, pero requiere que sea programada después de las líneas que ejecutan las tres variables de interés. Siguiendo el mismo método con el cual se obtuvieron las probabilidades condicionales sencillas se requieren programar condiciones anidadas para localizar las variables en los intervalos en que están discretizadas las variables. Esto a través del manejo de la información resultante de las tres variables, siguiendo los pasos que se han descrito en cada uno de los nodos involucrados hasta el punto previo de la evaluación de las probabilidades condicionales.

Se requiere entonces de un objeto programado que contenga el conteo de los posibles situaciones en las que se encuentren las tres variables involucradas, dados sus intervalos en que se están discretizando cada una de ellas; para la variable volteo se optó por dividir su distribución en cuatro estados.

Este objeto es una matriz de cuatro dimensiones; una de tamaño cuatro correspondiente a socavación, la otra de tamaño cuatro correspondiente a fuerza de arrastre, otra con tamaño n.sim que es la cantidad de simulaciones y la otra dimensión de tamaño cuatro correspondiente a volteo. Este objeto es definido así para que el cálculo de la probabilidad condicional deseada y los componentes de esta formulación se remita a la manipulación de los renglones, columnas o elementos de esta entidad. Al crearse esta entidad primero sus elementos se llenan con ceros, y al efectuar la programación se determina en que lugar de este elemento se alojarán un número.

Se trata de correr un ciclo o loop simple que va desde uno hasta la cantidad de valores simulados (de las tres variables). Donde estan establecidas condiciones que se pueden cumplir para que el elemento (i) de las variables esten dentro de sus intervalos definidos, por ejemplo si el valor (i) de la variable socavación esta dentro de su primer intervalo y a su vez el valor de la variable fuerza de arrastre se encuentra en el primer intervalo de esta variable y simultáneamente la variable volteo esta localizado en el primer intervalo, entonces se hace una asignación al elemento de la matriz mencionada (i,1,1,1) siendo i el índice del loop o ciclo sencillo.

Como puede notarse, requiere de condiciones programadas en forma anidada al cumplimiento de cada una de las combinaciones existentes de cada variable, es decir si el valor de la variable i está dentro de un intervalo, existe la posibilidad de que la otra variable (en el caso programado socavación y después fuerza de arrastre) este en uno de los cuatro intervalos y al cumplirse esta condición se entra en una nueva correspondiente a la de la variable Volteo. Esta programación excede los límites del programa R por lo que se necesito de configurarlas de una manera en que no se tuvieran más de 40 condiciones continuas que es el límite del programa, por ello se utilizó una programación que mandará el flujo de trabajo a otros subprogramas que contienen las condiciones anidadas correspondientes a uno de los cuatro intervalos de la variable socavación.

Cada uno de estos programas se escribieron como una función, para hacer que la consola del programa los registre como una función nueva dentro de su repertorio y que estas rutinas sean enviadas al programa principal que como ya se explico recorre la programación que, define las tres variables involucradas y tiene el loop dentro del cual van estos subprogramas. Después de tener llena la matriz de cuatro dimensiones con unos en la posición a la que corresponde cada caso que se evaluó se procede ahora sí a determinar los componentes de la ecuación de probabilidad condicional a dos variables, con ayuda de las funciones operadoras con las que cuenta el programa referentes al manejo de vectores y matrices multidimensionales. La tabla construida (ver tabla 4.8) es similar a la construida para el nodo Número de Froude. Se ha mencionado que el elemento analizado es de una pila constituida de mampostería de roca, y se han dado datos y suposiciones acerca de los elementos analizados, por lo que en el siguiente capítulo se describe el caso de estudio.

Tabla 4.8: Probabilidad condicional Nodo Volteo

Volteo	0-min				min-min+desv				min+desv-min+2desv				min+2desv-((min+2desv)+100desv)			
KN	0-desvest	desvest-2desvest	2desvest-3desvest	3desvest-8desvest	0-desvest	desvest-2desvest	2desvest-3desvest	3desvest-8desvest	0-desvest	desvest-2desvest	2desvest-3desvest	3desvest-8desvest	0-desvest	desvest-2desvest	2desvest-3desvest	3desvest-8desvest
0-2000	0	0	0	0.0097	0	0	0	0.0038	0	0	0.0007	0.0021	0	0.000071	0.0004	0.0012
2000-4000	0	0	0	0.1456	0	0.0632	0.0581	0.1253	0.0038	0.0294	0.0591	0.1116	0.0066	0.03168	0.0597	0.0918
4000-5000	0.0833	0	0	0.1942	0.0103	0.0421	0.0968	0.1601	0.0209	0.0792	0.1101	0.1401	0.0235	0.07236	0.1071	0.1321
5000-100000	0.9167	1	1	0.6505	0.9897	0.8947	0.8452	0.7108	0.9753	0.8914	0.8302	0.7462	0.9699	0.89588	0.8328	0.7749

Capítulo 5

Caso de estudio: Puente vehicular del Estado de México

5.1. Puente San Felipe

En los capítulos previos se han mencionado las características necesarias en la modelación de los elementos del elemento propuesto, lo que da un panorama de las características de la pila y cimentación analizados del caso de estudio. Uno de los primeros criterios para la selección de la estructura a estudiar, fue resultado de visitas de campo a puentes existentes en el sur del Estado de México, apreciando que las obras que cumplieran con la propiedad primaria de librar una corriente de agua, compartían además morfologías de carácter estructural. Estas particularidades se resumen en que los elementos de la subestructura fueron construidos a base de mampostería de roca, la cubierta y corona de las pilas de concreto y la geometría de las pilas de tipo tajamar con sección variable, teniendo en su base la mayor dimensión y conforme se avanza en la dirección vertical del elemento se hacen más pequeñas.

Al final, el factor que determinó la elección de la estructura a analizar, fue el de la importancia de la obra, y pese a que en la figura 3.1 se aprecia la evidencia del fenómeno de la acumulación de escombros se presenta en una estructura diferente a la seleccionada; esta estructura forma parte de una conexión entre poblados del municipio de Bejucos en el cual se apreció una escasa cantidad de flujo vehicular. Por otro lado, la estructura seleccionada es de una importancia mayor ya que es parte del sistema de comunicación entre los municipios de Tejupilco y Amatepec, localizado en las coordenadas latitud norte $18^{\circ}47'57.38''$ y longitud oeste $100^{\circ}9'50.73''$ cerca de la zona arqueológica de San Miguel Ixtapan perteneciente al municipio de Tejupilco. (Ver figura 5.1)

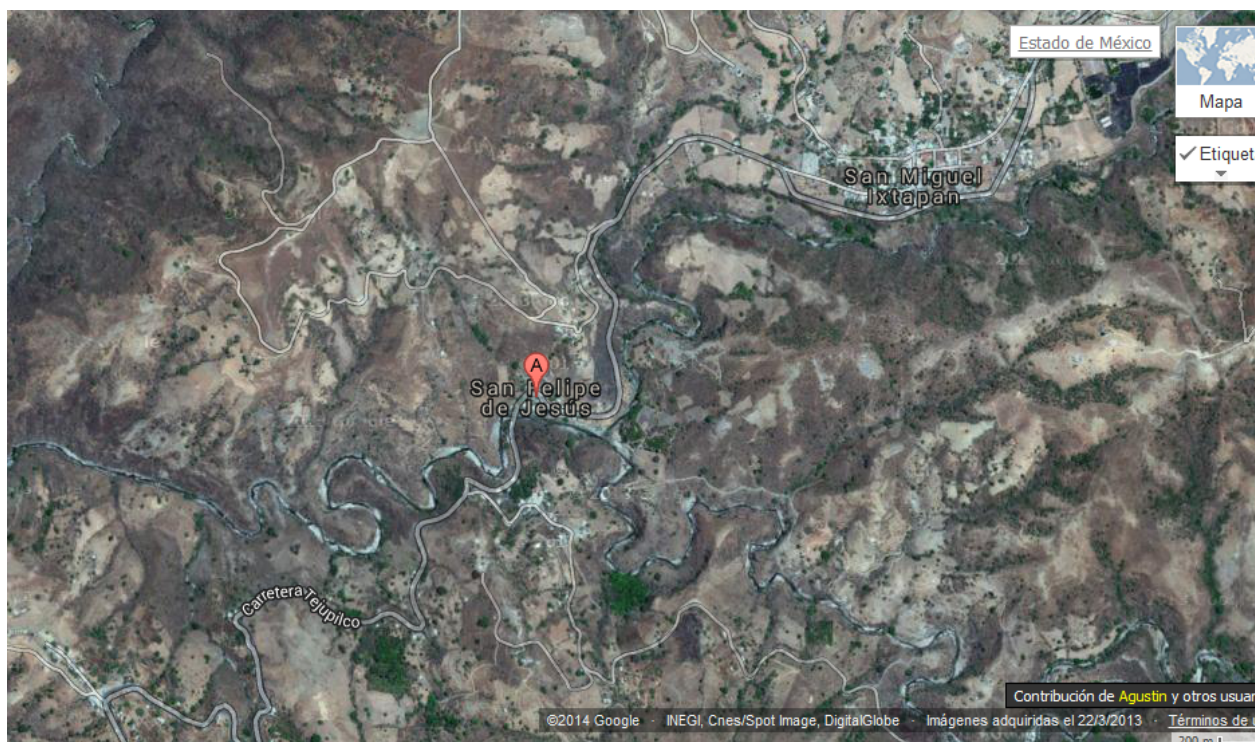


Figura 5.1: Ubicación del puente caso de estudio



Figura 5.2: Puente San Felipe vista general

Este puente está constituido por dos estribos en los extremos y tres pilas en el cauce (ver figura 5.2), todos ellos construidos de mampostería de roca y cubierta de concreto cada claro entre pilas libra un promedio de 9 metros. La longitud total de la estructura es de 43.7 m, repartido en cuatro claros. Las dimensiones del elemento que se analiza son los considerados en la figura 4.13 para la base $HH = 5.58m$ $BB = 2.02m$ y para la parte más alta $hh = 4.45m$ $bb = 1.1m$. La altura del elemento es 9.2 m, en cuanto a las propiedades de la cimentación se supuso que esta consistía en una rectangular de largo 5.75 m y de ancho 2.0 m desplantado con una profundidad de 3 m.

Los valores que toman las variables y sus respectivos estados, son producto de la forma de la distribución de probabilidad y los datos base a los que se realizó la prueba de bondad de ajuste. Así, resultó para la variable profundidad del río que los valores de los intervalos de los estados que puede tomar la variable son $(0 - 3.32412)$, $(3.32412 - 3.798)$, $(3.798 - 4.397)$, $(4.397 - 4.841)$, $(4.841 - 5.283)$. Para la variable número de Froude se mantienen los intervalos descritos en la sección dedicada a esta variable. Los estados de la variable Fuerza de arrastre están definidos en los siguientes intervalos que tienen como unidad de medida el Newton $(0 - 200)$, $(200 - 500)$, $(500 - 1000)$, $(1000 - 5000)$. Para la variable Bloqueo-Acumulación los estados se mantienen dado que las probabilidades condicionales se obtuvieron a partir de datos y no fueron producto de programas donde se simulan las variables. Los estados de la variable daño se remiten a dos posibilidades sí y no. Los estados de la variable socavación son producto básicamente del número de simulaciones, el significado del límite min es el del valor mínimo de toda la distribución una vez simulados, el valor desv es el de la desviación estándar de la propia distribución y varía en función del número de simulaciones. Para este caso los intervalos quedaron de la siguiente manera: $(0 - 0.319)$, $(0.319 - 0.343)$, $(0.343 - 0.367)$, $(0.367 - 2.815)$. Finalmente, para la variable que define el fenómeno de volteo, se mantienen los valores de la tabla de probabilidad condicional (ver tabla 4.8). Así, queda listo el modelo para aprovecharlo e insertarle evidencia y apreciar como se ven afectadas las demás variables, si se cuenta con información detallada de alguna de ellas y del puente objeto de estudio. Al observar sus capacidades como auxiliar en la asignación de recursos para mantener el propósito de la estructura.

Capítulo 6

Resultados

6.1. Resultados del caso de estudio

Para comenzar a notar las capacidades del modelo construido, se debe recurrir a programas que manejen este tipo de modelos; una búsqueda en internet revela una cantidad importante de ellos, algunos de paga con versiones de prueba como hugin, netica y otros para propósitos académicos como openbugs y genie. Se escogió hugin dado que ya se contaba con cierta experiencia en el manejo de ese programa.

Antes de emprender cualquier tarea con las Redes Bayesianas, es necesario definir las variables con sus estados, el gráfico y su estructura, por último, es necesario llenar las tablas de probabilidad condicional obtenidas. Después se efectúa una tarea a la que se denomina compilar el modelo, en la cual se determinan distribuciones de probabilidad para cada variable. Para ilustrar el proceso realizado por el programa se ejemplifican los cálculos a continuación. Es importante mencionar que este tipo de modelos permiten dos tipos de tareas, ambas útiles para tomar de decisiones. Pronóstico: al insertar evidencia se puede predecir el cambio de las variables hijo, internamente las redes lo hacen aplicando el teorema de la probabilidad total (que regularmente sigue un camino en la dirección que indica el modelo). Diagnóstico: al insertar evidencia en los nodos de los que se desea saber su probabilidad, se determinan las causas más probables de que estas variables estén en ciertos estados. Las redes efectúan esta tarea con base en el teorema de Bayes (es ir en dirección contraria de como indican las flechas del gráfico).

A la acción de insertar evidencia, es referida regularmente a concentrar toda la probabilidad en un estado de cierta variable, es decir, se asume que se tiene certeza en que el valor de la variable se encuentra en uno de sus estados. A continuación también se ejemplifica el proceso que sigue una red cuando se inserta evidencia en alguno de sus nodos.

Al tener definidas la probabilidad marginal del nodo Profundidad del río, y llenas las tablas de probabilidad de los nodos restantes, se compila el modelo, esto significa que se obtienen distribuciones de probabilidad para cada variable. Esta tarea tiene que seguir el orden de los nodos estructurado en el gráfico, para la variable profundidad del río no se tiene que realizar ninguna operación matemática. Por el orden que se representa en el gráfico, la variable que se evalúa después de profundidad es Número de Froude, se está yendo en el orden que indican las flechas, entonces se aplica el teorema de la probabilidad total, como una convención a cada estado de la variable en estudio se le asignará solo un número, por ejemplo para calcular el primer estado de la variable Número de Froude se representa como F1 entonces:

$$\begin{aligned}
 P(F1) &= P(F1/P1)P(P1) + P(F1/P2)P(P2) + P(F1/P3)P(P3) + P(F1/P4)P(P4) \\
 &+ P(F1/P5)P(P5) \\
 &= 0.0045 + 0 + 0 + 0 = 0.0045
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

Esta es la probabilidad del primer estado del nodo Número de Froude, se realiza apoyado en la tabla de probabilidad marginal de Profundidad del río (tabla 4.1) y la tabla de probabilidad condicional de Número de Froude (tabla 4.3), se realizan las mismas operaciones para los demás estados. Una vez calculada esta distribución, se procede con el nodo Bloqueo-acumulación, con base en la tabla de probabilidad condicional (tabla 4.3) y la distribución del nodo número de Froude obtenido con el procedimiento descrito. Por ejemplo para definir el valor de la probabilidad del estado triangular-cónica (TC), se calculan las siguientes probabilidades:

$$\begin{aligned}
 P(TC) &= P(TC/F1)P(F1) + P(TC/F2)P(F2) + P(TC/F3)P(F3) + P(TC/F4)P(F4) \\
 &= (0.3214)(0.0045) + 0 + 0 + 0 = 0.0014
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

Después se sigue con el nodo Fuerza de Arrastre, aquí los cálculos implican el uso de la tabla de probabilidad condicional (tabla 4.6) y las dos distribuciones que se han obtenido. Para el cálculo de la probabilidad del

primer estado del nodo Fuerza de Arrastre, se realizan las siguientes operaciones:

$$\begin{aligned}
 P(FA1) = & \hspace{20em} (6.3) \\
 & (A1/F1, TC)P(F1)P(TC) + P(FA1/F1, RR)P(F1)P(RR) + P(FA1/F1, RC)P(F1)P(RC) \\
 & + P(FA1/F1, RCI)P(F1)P(RCI) + P(FA1/F2, TC)P(F2)P(TC) + P(FA1/F2, RR)P(F2)P(RR) \\
 & + P(FA1/F2, RC)P(F2)P(RC) + P(FA1/F2, RCI)P(F2)P(RCI) + P(FA1/F3, TC)P(F3)P(TC) \\
 & + P(FA1/F3, RR)P(F3)P(RR) + P(FA1/F3, RC)P(F3)P(RC) + P(FA1/F3, RCI)P(F3)P(RCI) \\
 & P(FA1/F4, TC)P(F4)P(TC) + P(FA1/F4, RR)P(F4)P(RR) + P(FA1/F4, RC)P(F4)P(RC) \\
 & + P(FA1/F4, RCI)P(F4)P(RCI) \\
 = & 0.3562
 \end{aligned}$$

Así, se calculan los demás nodos, hasta llegar a tener una distribución siguiendo el orden indicado en el gráfico. Se aprecian algunos puntos que es importante mencionar: la probabilidad de que la profundidad de socavación este dentro del cuarto intervalo es cercana a la totalidad de la distribución. La probabilidad de que la forma de la acumulación sea del tipo rectangular-cónica invertida es cercana al 55 % y de que su configuración sea del tipo rectangular-rectangular es del 45 %. La distribución de la variable Volteo esta en el intervalo que se encuentra más alejado de la posibilidad de que el elemento tenga este comportamiento. Para la variable profundidad del río, la distribución está concentrada en los dos primeros intervalos, lo cual se aproxima a la realidad ya que se trata de un río intermitente. La probabilidad que tiene el estado no de la variable daño es cercana al 86 %. Para la variable fuerza de arrastre la distribución esta concentrada en los primeros tres intervalos (ver figura 6.1). Ahora, se investiga que sucede con las probabilidades de los nodos al insertar evidencia y utilizar la herramienta en labores de pronóstico. Las variables en las que se esta interesado son daño y volteo, por la forma en que se propaga la evidencia a los demás nodos es ejemplificada a continuación. Se introduce evidencia en el nodo profundidad del río, en el estado que corresponde al periodo de recurrencia de 5 años. Lo que sucede con el nodo Número de Froude es que ahora se van a ocupar los valores de la columna de la tabla de probabilidad condicional correspondiente a este estado (5 años), para el cálculo de los valores de la probabilidad, para cada estado de Número de Froude, se recurre al mismo teorema, por ejemplo:

$$P(F1, e = P1) = P(F1/P1)P(P1) = (0.00524)(1) = 0.00524 \quad (6.4)$$

Se actualiza esta variable y se calculan las probabilidades de los nodos que sean sus hijos de esta. De igual manera que al compilar la red (ver figura 6.2). En el caso de estudio, los organismos administradores de estas estructuras cuentan con la información hidrológica de las cuencas en las que se encuentran las obras de este

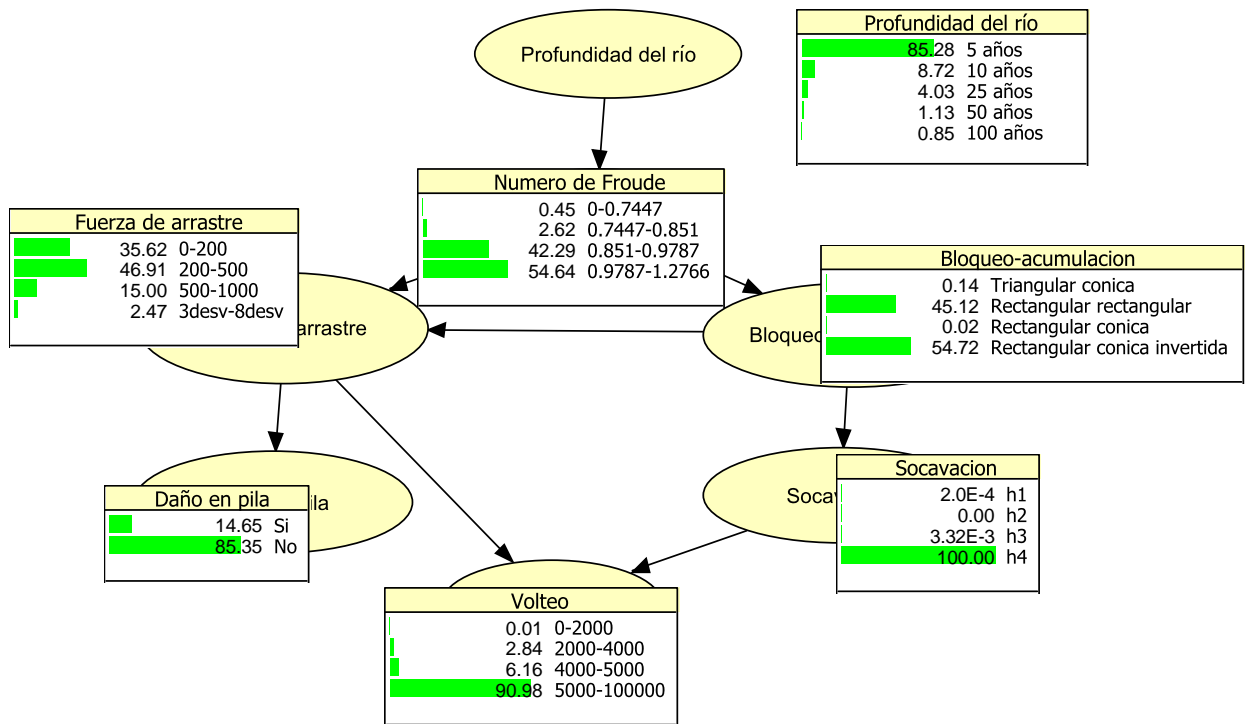


Figura 6.1: Probabilidades obtenidas de la compilación en hugin, nótese que las probabilidades estan expresadas como un porcentaje

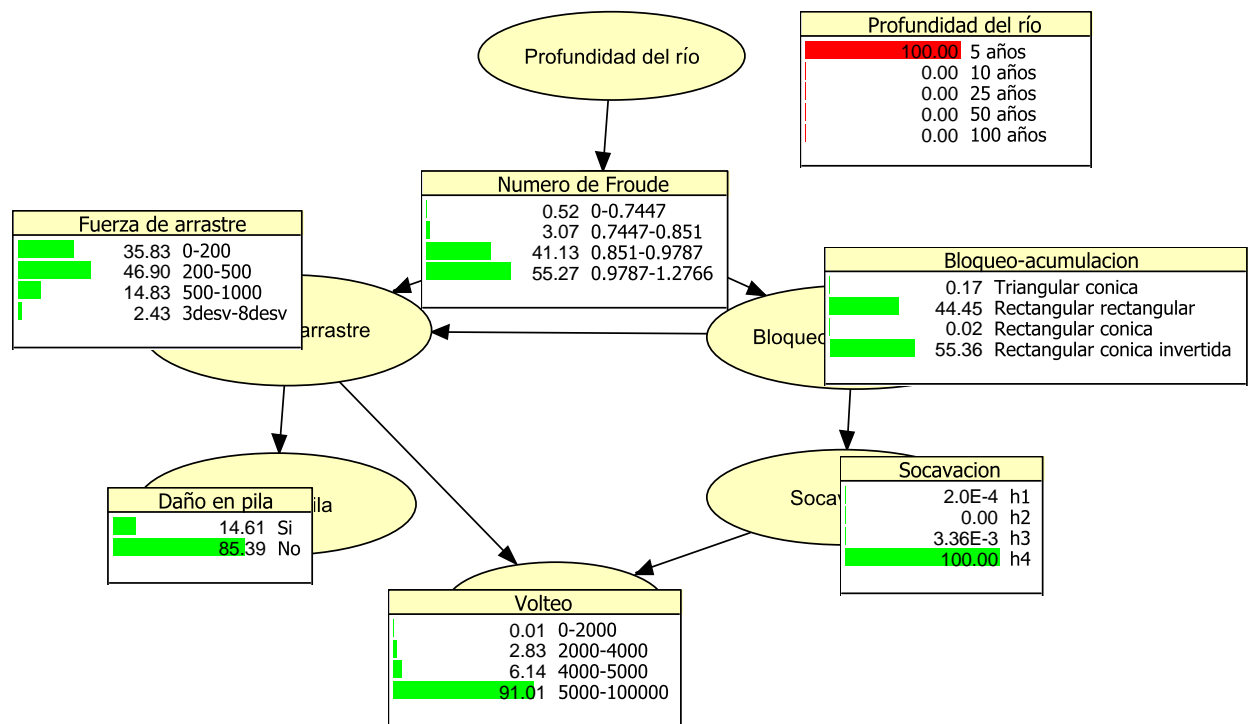


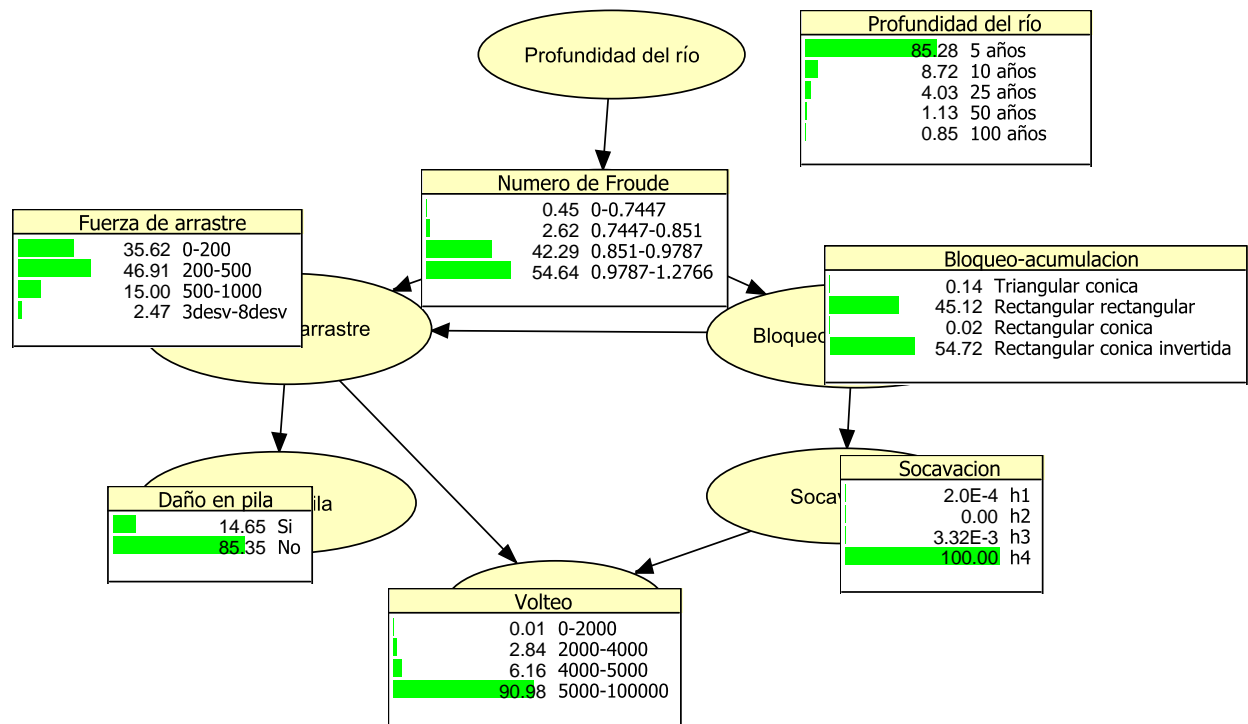
Figura 6.2: Probabilidades actualizadas. Evidencia en Profundidad del río con un periodo de recurrencia 5 años, probabilidades en porcentaje

tipo, además de datos de precipitación o gasto en un determinado periodo. Toda esta información sirve como base para el cálculo de alturas de tirante de agua para un determinado periodo de recurrencia, que para el caso de una estructura nueva regularmente es de 50 años. Con ayuda de un cálculo de este tipo se llega a una altura determinada la cual esta dentro de los intervalos establecidos. Resta efectuar la propagación a todo el modelo. Como un caso ilustrativo se considera que la profundidad generada por esta metodología es de un periodo de recurrencia de 25 años.

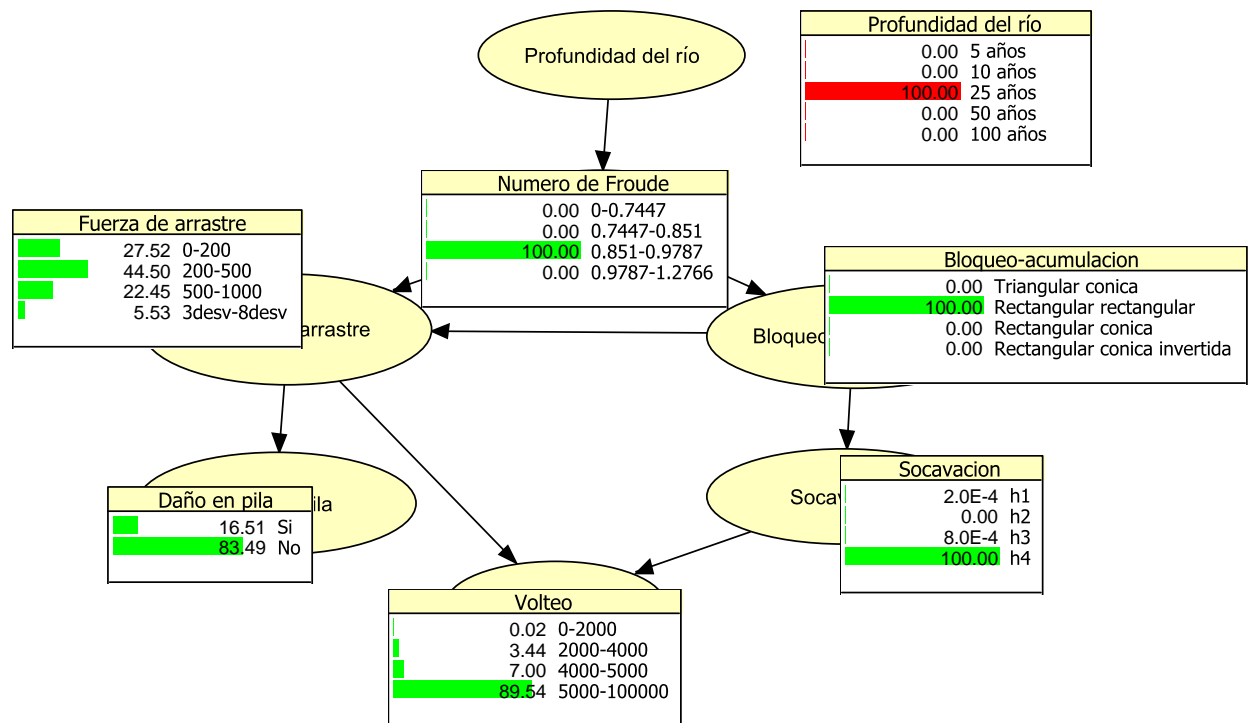
Se aprecia que en los nodos volteo y daño hay un aumento en las probabilidades de que estas variables presenten estados favorables al volteo y daño por fatiga, presentándose en la variable volteo un incremento del 100 % en el intervalo que representa la condición cercana al vuelco. Para el caso de la segunda variable, el incremento es de alrededor del 20 %. Se puede notar también que al efectuar esta entrada de evidencia el nodo Bloqueo-acumulación concentra su probabilidad en la forma rectangular-rectangular. En lo que respecta a la Fuerza de arrastre se aprecia un aumento en las probabilidades de los intervalos de mayor magnitud. La socavación se mantuvo con pocas modificaciones en su distribución y el número de Froude se concentró en el tercer intervalo (ver figura 6.3). Esto nos lleva al razonamiento de que bajo un evento con conocida probabilidad existe un aumento en las posibilidades de volteo y daño además de que es altamente probable que la configuración del escombros atrapado sea de forma rectangular y la socavación presente su mayor magnitud. Entonces, si se usa un modelo de pronóstico de profundidad de la corriente y se conoce la profundidad en m de la evidencia insertada, se pueden establecer acciones para mitigar las consecuencias en caso de presentarse determinada profundidad; actuando en la socavación o en la fuerza de arrastre, o en acciones que disminuyan la probabilidad de volteo y daño.

En cambio, si se cuenta con información suficiente para poder calcular el número de Froude normalizado, también se pueden apreciar las consecuencias en las variables que describen los mecanismos adversos que sufre el elemento. Si se determina que el número de Froude normalizado esta dentro del intervalo final, la probabilidad de que el elemento este cercano a volcarse disminuye y lo mismo sucede con la variable daño. La socavación sigue conservando la misma tendencia que el original sin evidencia. Al determinar que el valor de esta variable en el cuarto intervalo es favorable para conservar la funcionalidad del elemento, resulta conveniente la instalación o toma de previsiones para que el número de Froude se mantenga en este intervalo, recordando que este número depende de la velocidad y la profundidad. Estas variables pueden controlarse con previsiones o estructuras hidráulicas (ver figura 6.4).

Para todas las variables se efectuaron este tipo de ejercicios (insertar evidencia) y se aprecian los cambios en las variables restantes, para así determinar que variables tienen mayor efecto en las demás. Aunque se puede notar que existen casos en que no es significativo el cambio, en la definición de los estados, pero en las probabilidades es donde se aprecian los movimientos.

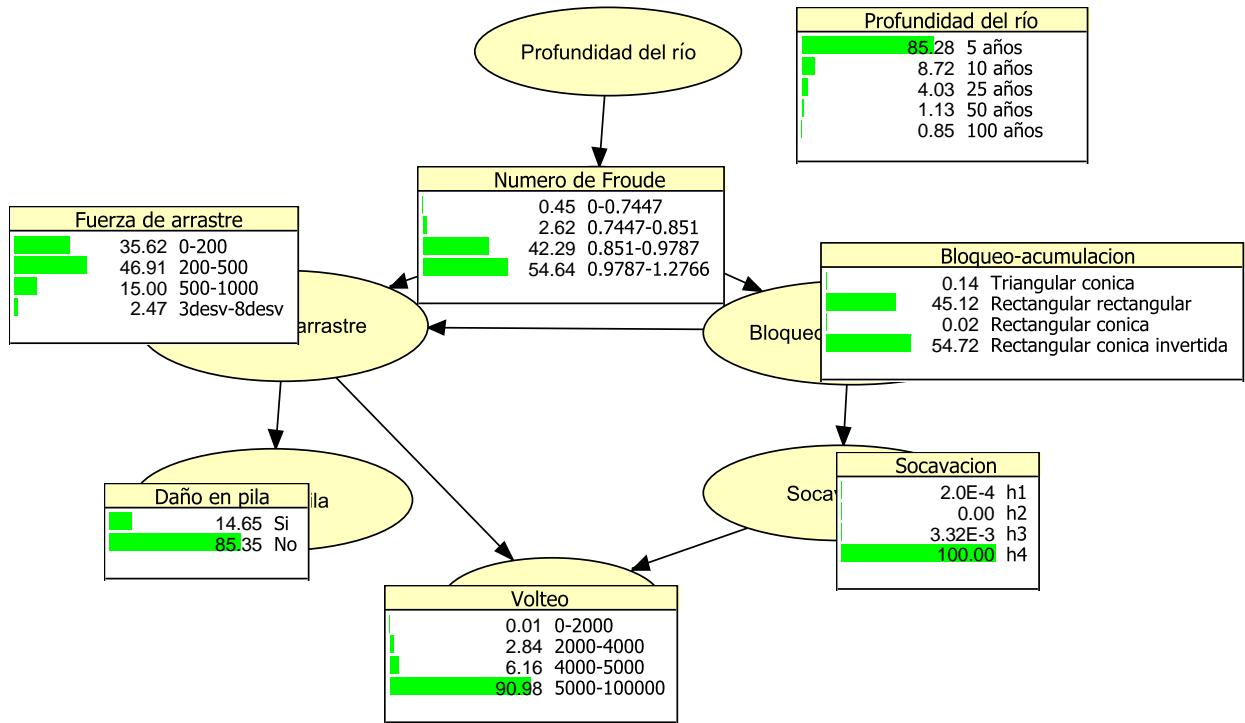


(a) Compilación de la red, probabilidades en porcentaje.

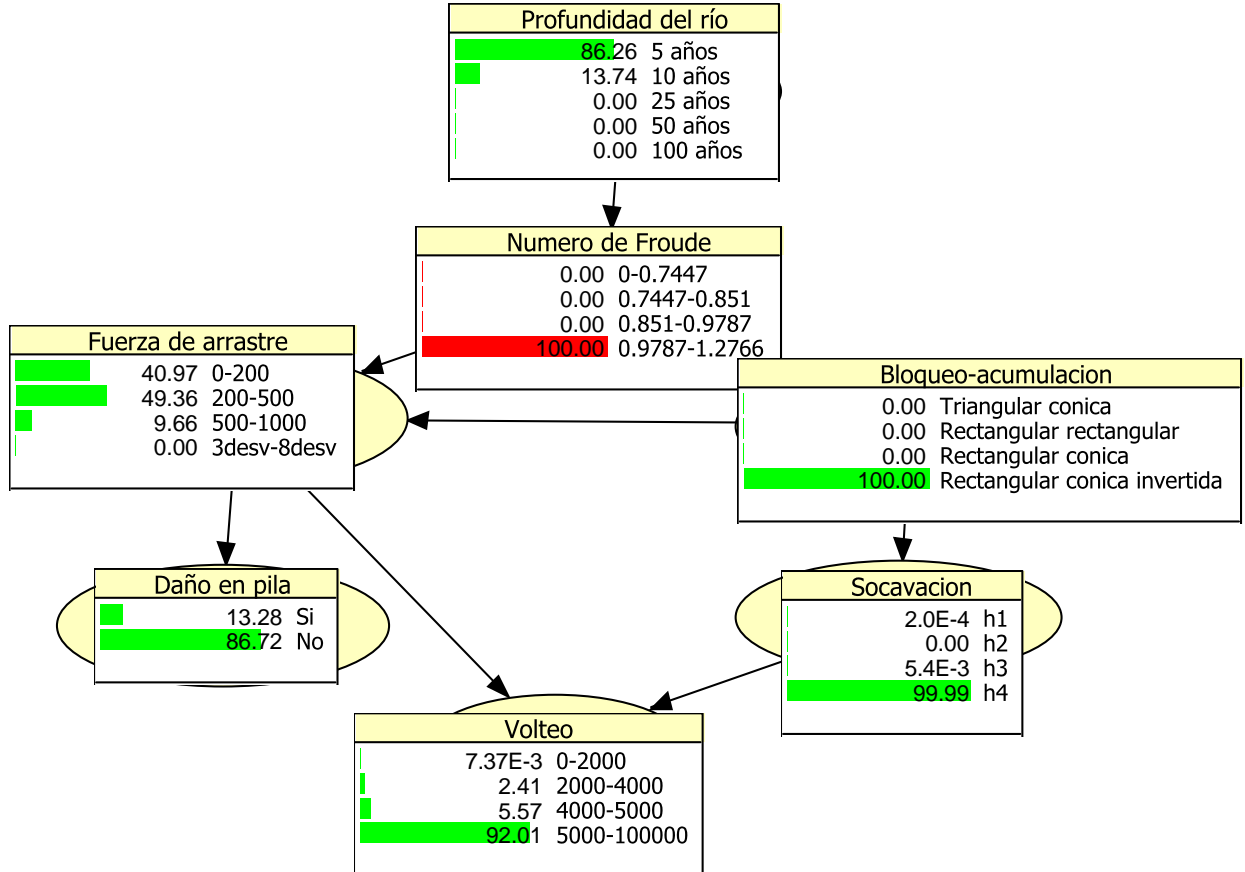


(b) Probabilidades actualizadas evidencia en profundidad del río periodo de recurrencia de 25 años.

Figura 6.3: Probabilidades actualizadas evidencia en nodos padre, labor de pronóstico.



(a) Compilación de la red, probabilidades en porcentaje.



(b) Probabilidades actualizadas evidencia en el último estado nodo Número de Froude, probabilidades en porcentaje.

Figura 6.4: Propagación de evidencia en los descendientes, labor de pronóstico.

Como se ha mencionado el modelo también sirve para labores de diagnóstico, por ejemplo determinar cual es la causa más probable de que se presente volteo y daño en el elemento, y la que merece la atención en caso de tener recursos destinados a labores preventivas o correctivas. En caso de tener un evento de falla en alguna estructura, al introducir evidencia en las variables que representan los mecanismos que se presentaron se puede determinar cual o cuales fueron las causas de ello. Para ejemplificar como se efectúan estas tareas en la herramienta, es necesario presentar como se actualizan los nodos. Se recuerda que al momento de ir en dirección contraria a las flechas del gráfico, se aplica el teorema de Bayes. En este ejemplo se representan los cálculos para el nodo volteo, introduciendo evidencia en este y propagandola a los nodos que son sus padres. Se introduce evidencia en el primer estado de la variable, lo que significa volteo del elemento; por tanto se buscan las causas más probables. Para ello se requiere del conocimiento de la probabilidad condicional $P(V1/h1)$ siendo $V1$ el estado uno del nodo volteo y $h1$ el estado uno de la socavación inducida:

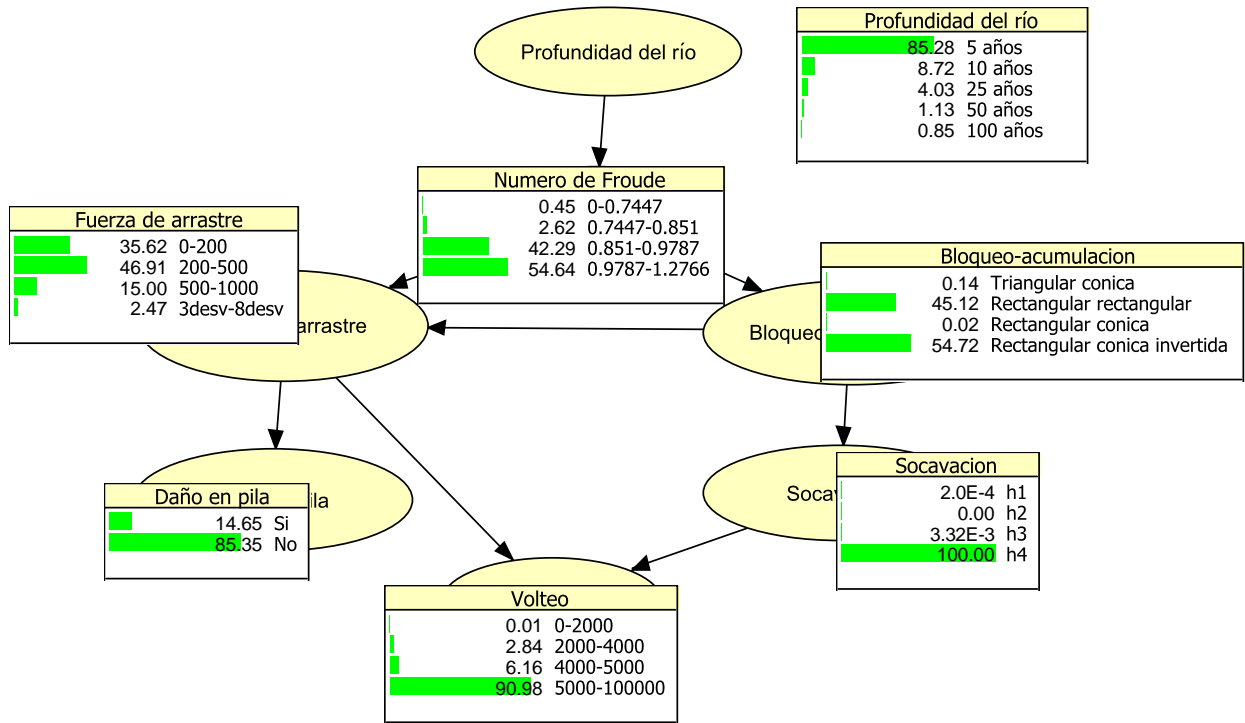
$$\begin{aligned} P(V1/h1) &= P(V1/h1, FA1)P(FA1) + P(V1/h1, FA2)P(FA2) \\ &+ P(V1/h1, FA3)P(FA3) + P(V1/h1, FA4)P(FA4) \\ &= 0 + 0 + 0 + (0.0097)(0.0247) = 0.000239 \end{aligned} \quad (6.5)$$

Estos cálculos se hacen apoyados en la tabla de probabilidad condicional de Volteo (tabla 4.8). Es necesario mencionar que esta probabilidad también es equivalente a la introducción de evidencia en el nodo padre socavación inducida (en el estado 1, $h1$), de una conexión convergente, y así se calcula la probabilidad del primer estado de Volteo. Se estima esta probabilidad por que es un elemento de la ecuación del teorema de Bayes, puesto que la probabilidad de interés es $P(h/V)$ y en específico $P(h1/V1)$. Por lo tanto, la probabilidad buscada es:

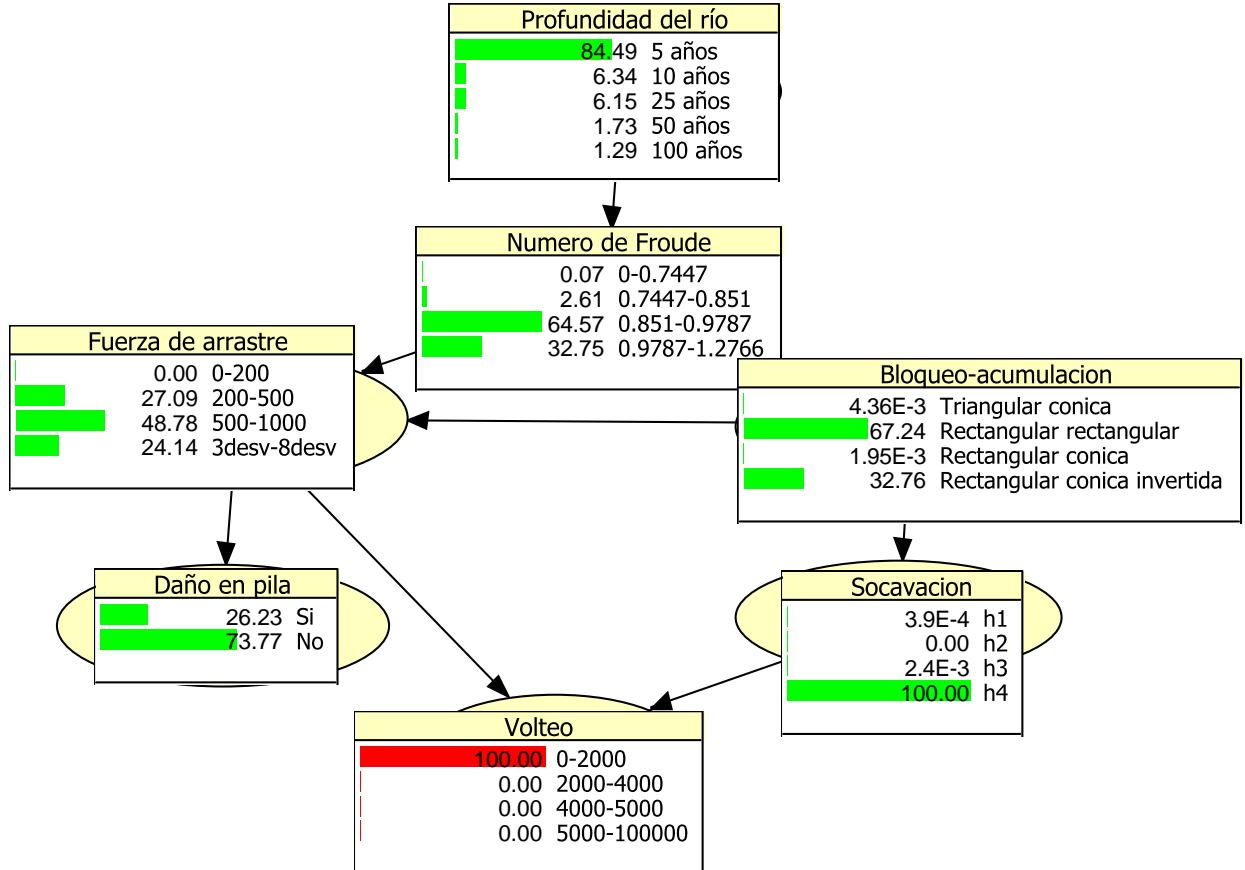
$$\begin{aligned} P(h1/V1) &= \frac{P(V1/h1)P(h1)}{P(V1)} \\ &= \frac{(0.000239)(0.000002)}{0.000123} = 0.0000039 \end{aligned} \quad (6.6)$$

De esta manera se actualizan los nodos que son más ancestrales al analizado. Por ejemplo, al introducir evidencia de que el elemento se encuentre en el primer intervalo de volteo, lo que significa vuelco del mismo, se pueden buscar las razones de este comportamiento. De la figura 6.5 se aprecia que las probabilidades de la altura del río en los últimos tres estados aumentan, lo

que indica que la profundidad del río presentada es producto de un periodo de recurrencia mayor a 25 años, lo cual es lógico. También, para la fuerza de arrastre aumentan las posibilidades de que la causa se localice en los tres últimos intervalos, siendo el más probable el tercero con cerca del 49%. La configuración que es más probable que cause este mecanismo, es la rectangular-rectangular. El número de Froude que es más probable que produzca este evento, es el ubicado en el tercer intervalo. Pero la causa más probable es



(a) Compilación de la red, probabilidades en porcentaje.



(b) Probabilidades de las causas del volteo.

Figura 6.5: Propagación de evidencia en los padres, labor de diagnóstico.

la profundidad de socavación, ubicada en el último intervalo. Por lo tanto, las variables por atender serían las de las posibilidades más altas.

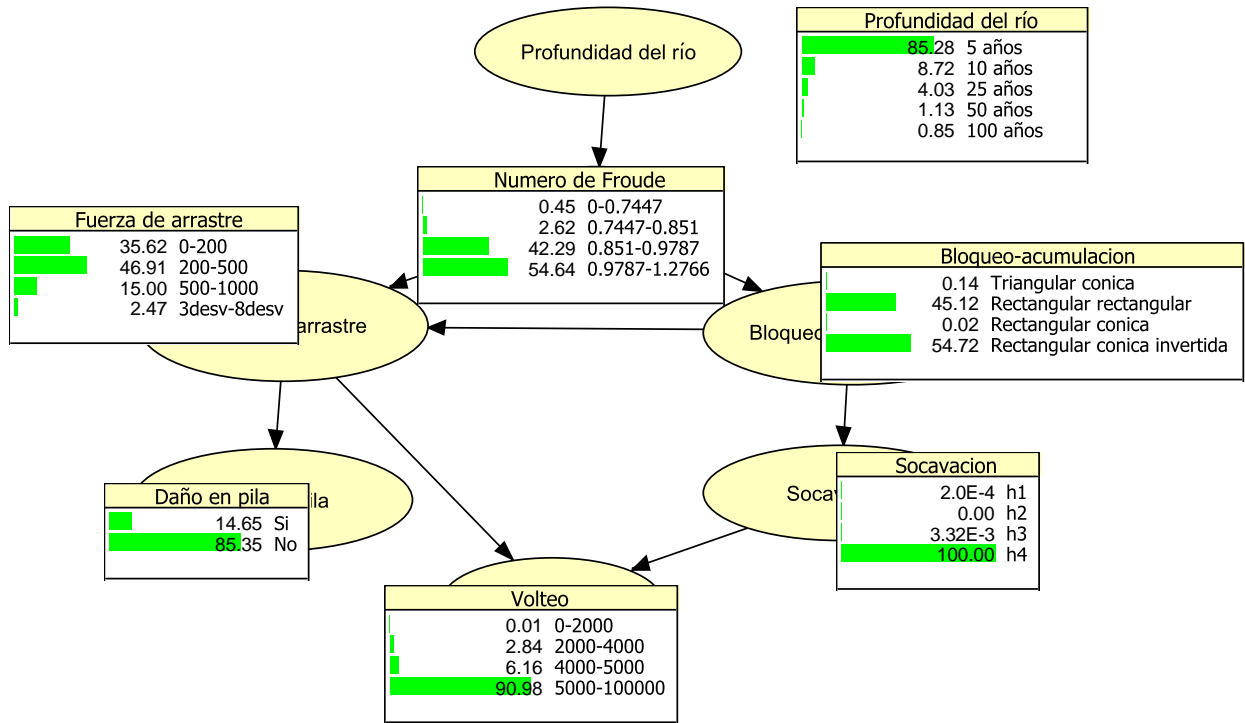
Al insertar la evidencia de que el daño se presente, se aprecia que el estado más probable del padre Fuerza de arrastre es el segundo con probabilidad de 73.19% y el de la configuración rectangular-rectangular. También la probabilidad de que sea el tercer intervalo de la variable número de Froude se incrementa aunque el más probable es el cuarto estado (ver figura 6.5). Al referirse al nodo profundidad del río, aumentan los tres últimos estados, siendo el más probable el tercero.

Estas cifras determinan las directrices a seguir, siendo un apoyo importante para labores de asignación de recursos al mantenimiento de elementos de este tipo.

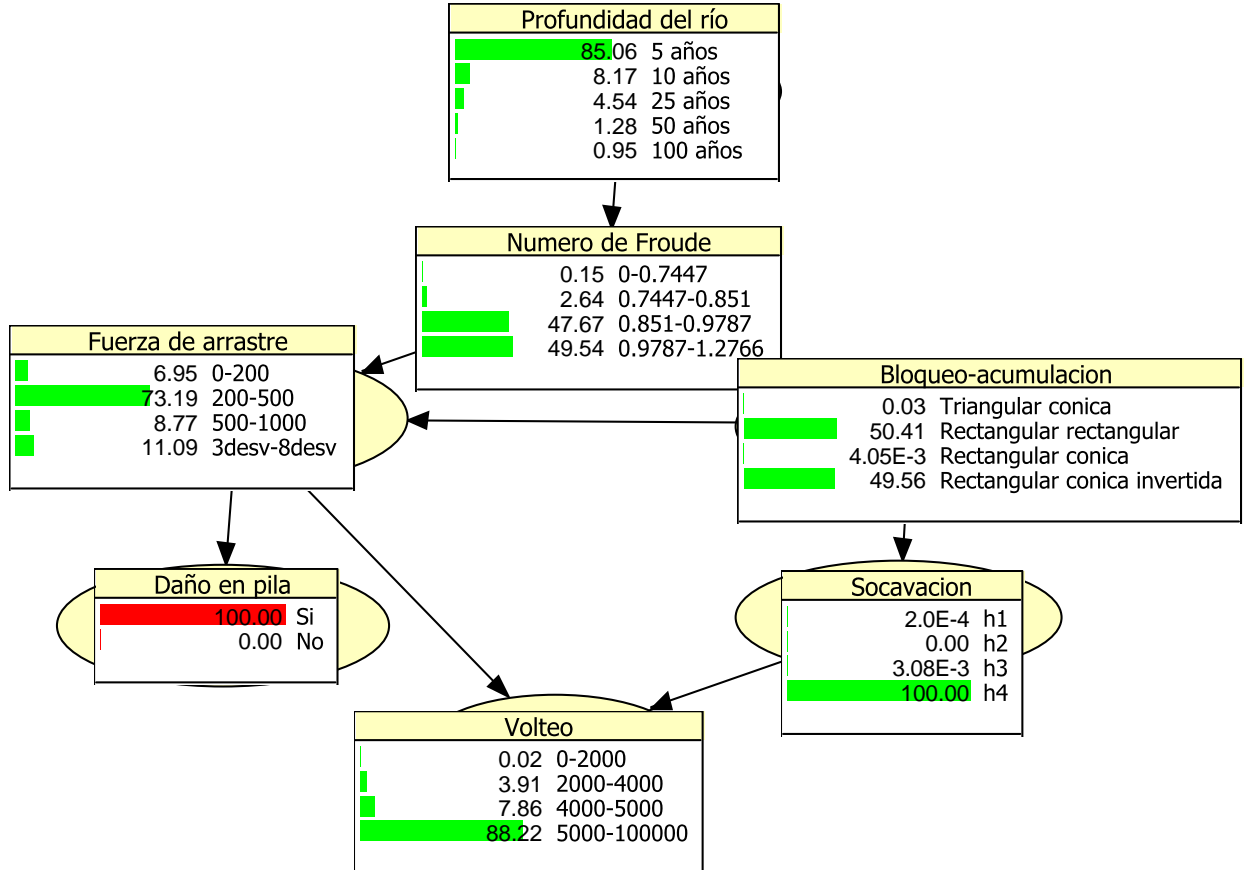
Sin embargo, es posible que se tenga información de más de una variable, lo que también se puede efectuar en este modelo y que no se podría llevar a cabo con un modelo bayesiano habitual. Por ejemplo, se obtiene una profundidad de río que cae en el tercer intervalo, y además se recoge evidencia en campo de que el elemento estructural tiene una socavación que está dentro del primer estado del nodo; si se centra la atención en el mecanismo de volteo, se aprecia que la probabilidad de tener el primer estado (que es el que significa realmente este proceso) es cercana al 0.05%. A su vez el nodo daño incrementa sus posibilidades de estar en el estado favorable con casi un 17%, (ver figura 6.7).

Si se realiza una campaña para recoger evidencia de las acumulaciones y sus geometrías, se puede introducir esta evidencia en el nodo bloqueo-acumulación, y a su vez evaluar el número de Froude normalizado, con ello se consigue un panorama del mismo tipo que el anterior. Resultando una probabilidad de volteo de 0.007% y una de presentarse el daño del orden del 13.28%. (Ver figura 6.8)

Al insertar evidencia en dos nodos, por ejemplo Número de Froude y Profundidad del río, se aprecian cambios en las probabilidades, pero que se presente un cambio más significativo, como el cambio en los estados de los nodos restantes es poco frecuente.

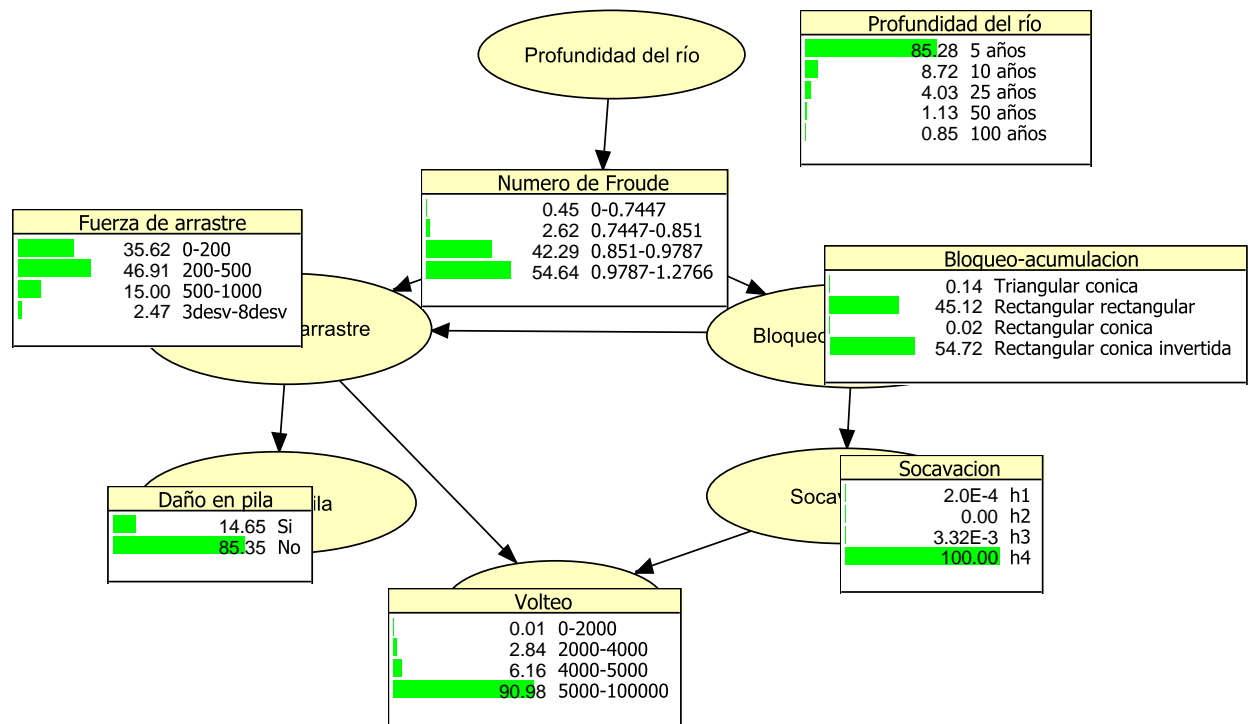


(a) Compilación de la red, probabilidades en porcentaje.

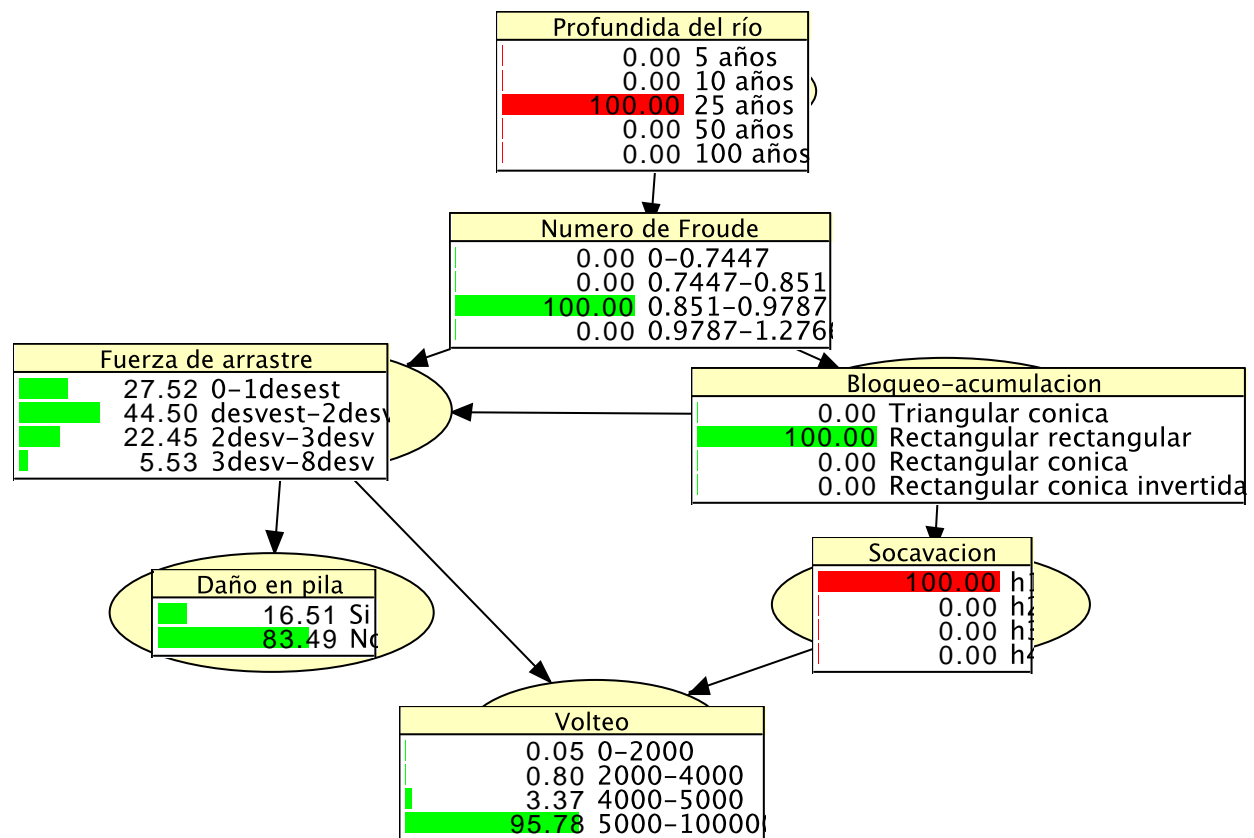


(b) Probabilidades de las causas del daño.

Figura 6.6: Propagación de evidencia en los padres, labor de diagnóstico.

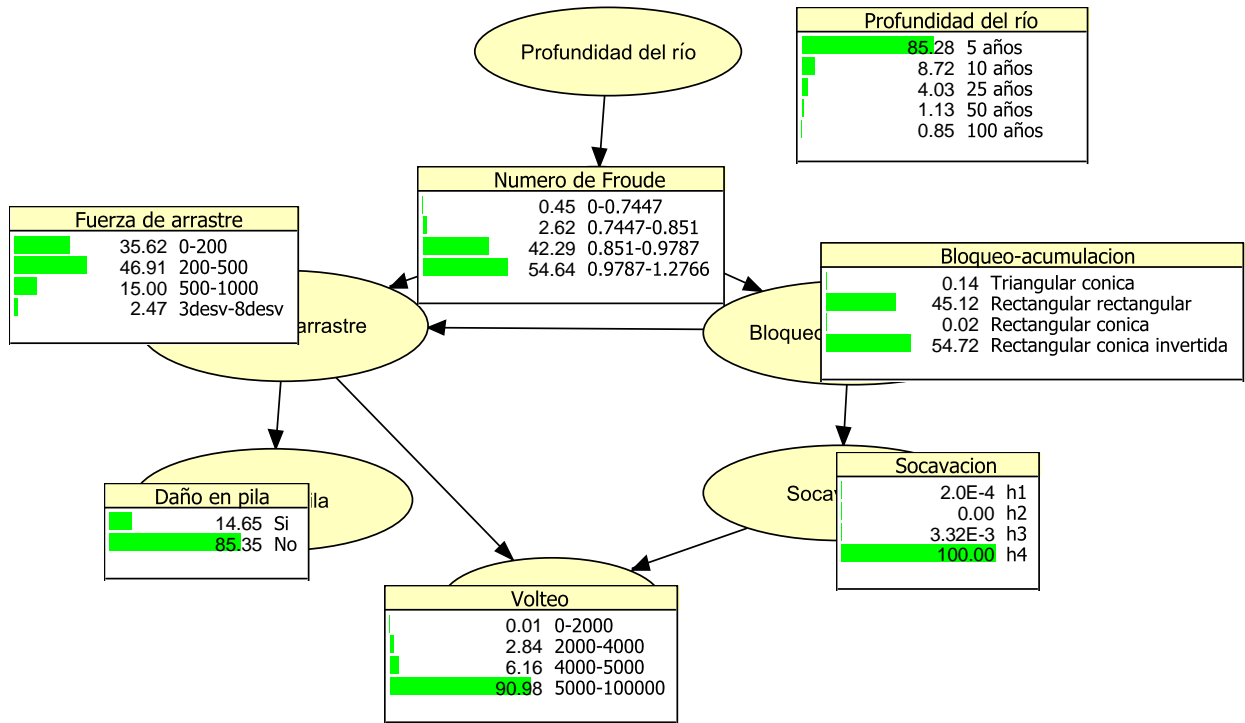


(a) Compilación del modelo, probabilidades en porcentaje

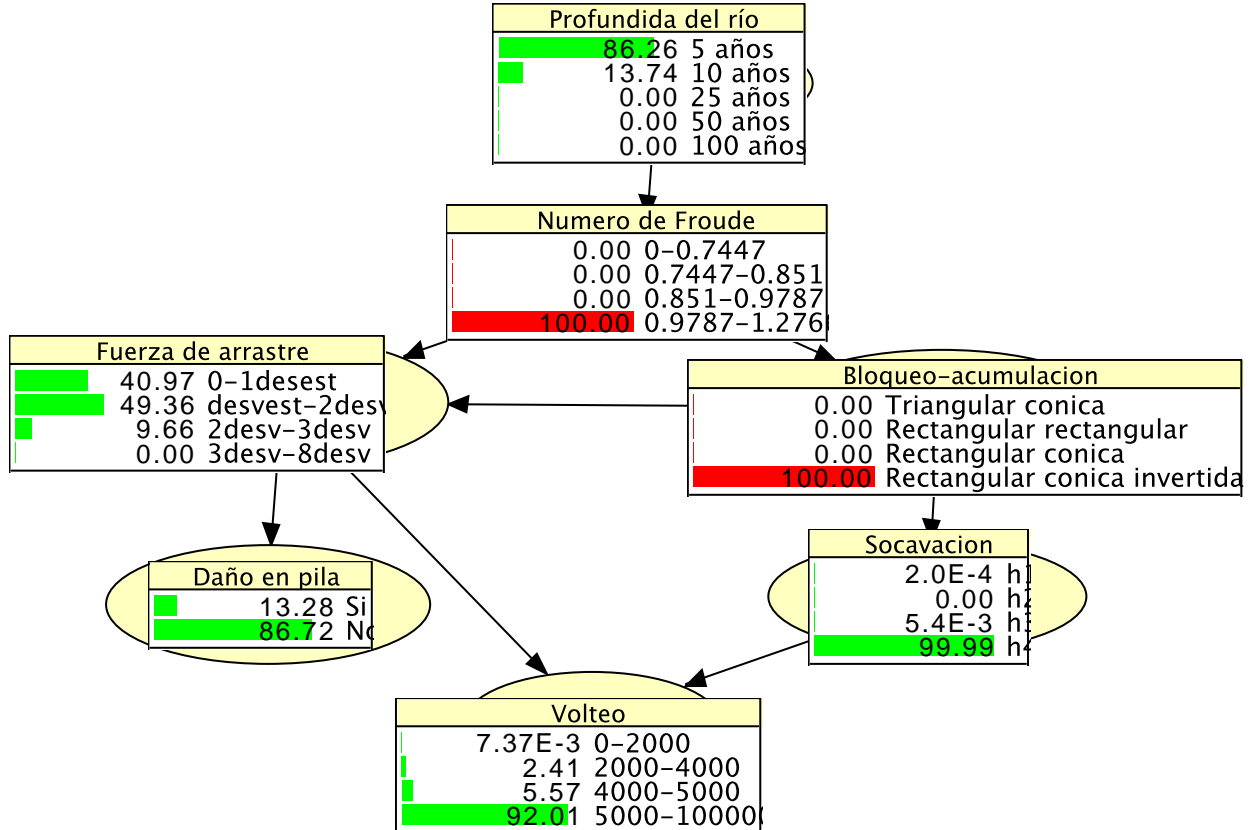


(b) Evidencia en dos nodos, Profundidad del río y Socavacion inducida probabilidades en porcentaje

Figura 6.7: Actualización de las probabilidades al insertar evidencia en dos nodos.



(a) Compilación de la red, probabilidades en porcentaje



(b) Evidencia en nodos Bloqueo-acumulacion y Número de Froude

Figura 6.8: Propagación de evidencia de dos nodos, probabilidades posteriores.

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajo futuro

7.1. Conclusiones

Una vez observada la capacidad del modelo, se puede concluir lo siguiente:

- La herramienta cumple con el objetivo de ser auxiliar en la toma de decisiones.
- Las dos consecuencias que son resultado de la presencia de escombros, fueron modeladas de una manera sencilla pero que alcanza a representar de forma completa a ambas.
- La capacidad del modelo permite que se use en tareas de diagnóstico y pronóstico.
- La herramienta puede evaluar las condiciones de una estructura que haya presentado alguna de las dos consecuencias que se tomaron en cuenta (Daño y Volteo), siendo útil en el campo denominado ingeniería forense.
- Con ayuda en modelos que representen los dos efectos adversos de la acumulación de escombros (Socavación y aumento en Fuerza de arrastre) es posible introducir evidencia, que permita evaluar las probabilidades de las consecuencias y ser útil para decidir acciones respecto a los elementos analizados.
- Usado en conjunción con un modelo de costos, esta herramienta funcionará como una ayuda para evaluar el riesgo.
- Se espera que tenga aplicación en el resto de puentes con características similares, situados en la misma zona geográfica.

7.2. Conclusiones particulares

- Cuando se inserta evidencia en Profundidad de río, la probabilidad de Volteo aumenta en 100 % lo que determina que esta variable tiene una influencia muy importante en este efecto, y marca una tendencia a determinar acciones para prevenir que se presente una profundidad determinada.
- La probabilidad de que Fuerza de Arrastre este en el segundo estado es de 0.73, cuando se tiene certeza en que daño, este cálculo denota el potencial del modelo, por que de algo que sucedió se pueden tener pistas y estimados numericos, capacidad valiosa si se lleva a cabo una investigación forense.
- La mayor probabilidad del estado que determina el Volteo se da con la combinación de la evidencia en socavación (primer estado) y profundidad (tercer estado) con un 0.0005, confirmando una vez más el importante efecto de estos dos nodos sobre este.
- De los cálculos efectuados, la mayor probabilidad de Daño se da cuando se introduce evidencia en Volteo (primer estado). Con un estimado de 0.2623 confirmando lo revisado en el capítulo 2 donde se tiene una conexión convergente y se introduce evidencia en el nodo común. Tiene un significado que implica una relación incluyente, para los dos problemas. Se debe confirmar cual es la máxima probabilidad que alcanza Daño y su relación con el nodo que produzca esta situación.
- La probabilidad de socavación se concentra en el último intervalo, lo que exige la revisión de su discretización y los cálculos que llevan a ella (tablas de probabilidad que intervienen en su cálculo).

7.3. Trabajo futuro

Una extensión que se requiere para una estructura completa, es la de aplicar el modelo a más de un elemento y saber las probabilidades de ocurrencia de las dos consecuencias en todas las pilas de una obra. Se utilizó un modelo simplificado, que determina la profundidad de socavación, este es susceptible de mejoras por ejemplo apoyado en los modelos de la CFD. La evaluación del daño, es invariante en el tiempo, un modelado mejor desarrollado involucra la evolución de este mecanismo a lo largo del tiempo. Para la socavación también aplica este principio, ya que esta en constante cambio el fondo de la corriente. Todas estas extensiones se pueden lograr en el contexto de Redes Bayesianas con las denominadas redes dinámicas que capturan la variación en el tiempo de sus nodos. Hay que aplicar el modelo en conjunción con uno de costos y mantenimiento, lo que se puede lograr con los denominados diagramas de influencia. Se espera conjuntar el modelo, con alguno que evalúe mecanismos de falla de la superestructura para tener la totalidad de elementos de un puente analizados. Así mismo, se espera conjuntarlo con un modelo que evalúe la socavación producto

del paso normal del agua a través de la subestructura llegando así a un modelo que considere todos los peligros relacionados a la hidráulica del canal.

Apéndice A

Conceptos básicos de la probabilidad

A.1. Introducción

Para entender los conceptos fundamentales bajo los que funcionan las Redes Bayesianas es necesario revisar conceptos de la teoría de probabilidad entre los cuales destacan el teorema de la probabilidad total, el teorema de Bayes y la probabilidad condicional, también se requiere de un repaso rápido de los conceptos más fundamentales de la probabilidad y estadística, para formar todo el contexto que haga mas fácil entender los conceptos manejados en los capítulos de este trabajo.

A.1.1. Probabilidad condicional, teorema de probabilidad total y teorema de Bayes

La probabilidad y todos los cálculos de su teoría estan fundamentados en tres expresiones que son denominados los tres axiomas de la probabilidad, que son válidos para los llamados eventos. También se les conoce como las condiciones mínimas que deben cumplirse para que de una función definida sobre un conjunto de eventos, se determinen de manera adecuada sus probabilidades.

$$Pr(E) \geq 0 \tag{A.1}$$

Este axioma define que la probabilidad del evento E es un número no negativo

$$Pr(\Omega) = 1 \tag{A.2}$$

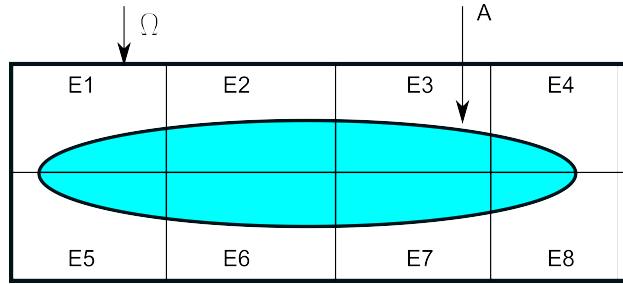


Figura A.1: Teorema de la probabilidad total

La probabilidad de un evento que se conoce con certeza es 1 ver(figura A.1). Para eventos mutuamente excluyentes E_1 y E_2

$$Pr(E_1 \cup E_2) = Pr(E_1) + Pr(E_2) \quad (\text{A.3})$$

De los tres axiomas también se deduce que la probabilidad de un evento es un valor que esta dentro del intervalo 0 a 1, $0 \leq Pr(E) \leq 1$. En el tercer axioma se establece que la propiedad aditiva de la probabilidad se puede extender a cualquier secuencia de eventos mutuamente excluyentes si $E_1, E_2, \dots, E_k \in \mathbf{E}$ y $E_i E_j = \emptyset$ para todo $i \neq j$ con $i, j = 1, 2, \dots, k$ por tanto:

$$Pr(E_1 \cup E_2 \cup E_3 \dots E_k) = Pr(E_1) + Pr(E_2) + \dots + Pr(E_k) \quad (\text{A.4})$$

De esta regla se pueden derivar mas propiedades de la probabilidad que pueden ser usadas para desarrollar operaciones aditivas en el espacio muestral como la unión o la intersección de los eventos. El segundo axioma puede ser aplicado a un evento E y complemento E^c , de $E + E^c = \Omega$ también se tiene $Pr(E + E^c) = Pr(\Omega) = 1$ Combinando ambos resultados:

$$Pr(E^c) = 1 - Pr(E) \quad (\text{A.5})$$

Esta propiedad es útil para evaluar la probabilidad de ocurrencia de un evento complementario a otro, estimandolo indirectamente.

El propósito de la teoría de probabilidad es la estimación cuantitativa de probabilidades, pero la verdadera interpretación y significado de lo que son las probabilidades y los cálculos como tal no son parte de esta teoría, puesto que existen tres formas de interpretarla: la **clásica**, la **frequentista** y la **bayesiana**.

Definición clásica: Es la interpretación que tuvo sus orígenes en los juegos de cartas y dados. Acerca del evento A su probabilidad se define como:

$$P(A) = \frac{n_A}{n_{tot}} \quad (\text{A.6})$$

Donde n_A es el número de formas en que un experimento se puede conducir al n_{tot} número total de formas iguales en las que se presenta el experimento. Por medio de esta definición, se calcula la probabilidad de lograr una de las dos caras de una moneda donde hay solo una posible manera de conseguir alguna de sus caras y hay sólo dos posibilidades propias del experimento. Se aprecia que bajo esta interpretación ya se conocen las probabilidades antes de realizar el experimento.

Definición frequentista: Bajo esta interpretación, se llega a decir que la probabilidad del evento A es simplemente la frecuencia relativa de la ocurrencia del evento dado en n número de intentos, o en otros términos por medio de la siguiente expresión:

$$P(A) = \lim \frac{N_A}{n} \quad (\text{A.7})$$

para $n \rightarrow \infty$

N_A =número de veces que el evento A sucede, n = número total de experimentos Al experimento se le conoce como un fenómeno del cual se tiene conocimiento de los resultados que puede generar pero que no se sabe el valor de este hasta realizarlo. Esta definición de la probabilidad responde a preguntas del tipo ¿cuál es la probabilidad de lograr cierta cara de una moneda dado que se lanzó una cantidad de veces determinada?. Si por ejemplo se lanza la moneda 100 veces y de este experimento se observa que una de las caras ocurre 54 ocasiones la probabilidad calculada es 0.54. Sin embargo, si el número de experimentos aumenta esta probabilidad va a converger a 0.5, bajo esta interpretación las probabilidades son vistas como características de la naturaleza del fenómeno estudiado.

Definición Bayesiana: Bajo esta definición, la probabilidad $P(A)$ de que el evento A ocurra se define como el grado de creencia de que el evento A suceda. Siguiendo con el ejemplo de lanzar una moneda, si se le cuestiona a alguien desde el punto de vista Bayesiano contestaría que existen dos posibilidades y si el no tiene preferencia por una cara o la otra podría juzgar que para determinada cara él juzga que es 0.5. La definición Bayesiana tiene que ver con el estado mental del individuo que la evalúa respecto de su experiencia, capacidad y preferencias, denotando el carácter subjetivo de esta interpretación que contrasta con la definición frequentista ya que dos personas pueden estimar una probabilidad de distinta forma anulando el elemento "natural" de las probabilidades que se explican de manera frequentista. Aunque por otro lado, también la incluyen por que la asignación de las probabilidades esta basada en experiencia que puede ser de experimentos realizados.

Al grado de creencia de esta definición se le conoce como creencia a priori o probabilidad a priori por que es asignada antes de obtener mayor conocimiento del fenómeno estudiado. Ciertos temas como confiabilidad estructural o análisis de riesgo, estan basados en esta interpretación de la probabilidad aunque la libertad para asignar probabilidades no es tan amplia como para que sea subjetiva. En un marco Bayesiano formal este elemento subjetivo debe ser formulado antes de que la información sea observada.

La razón del porque en los temas referentes a confiabilidad estructural y análisis de riesgo se prefiere una aproximación sobre la otra depende de las características y los objetivos del estudio por que por ejemplo es claro que para objetos que se producen en grandes cantidades como focos o tornillos sus probabilidades pueden ser evaluadas bajo el marco frequentista por que tienen características similares que se repiten en cada uno de ellos y toda su producción pasa por los mismos procesos o se ven expuestos a las mismas condiciones de prueba. Pero en el caso de obras de infraestructura como puentes, presas, estructuras marinas o configuraciones especiales de tuberías, si se tienen reportes de falla, esta información no llega a ser útil por la razón de que sus características en pocos casos se repiten o son únicas y sus condiciones de diseño y operación son por lo regular significativamente diferentes. En estas situaciones la interpretación Bayesiana es la mejor opción para su tratamiento [7]. Esta es una de las razones por las cuales se formuló el modelo desarrollado. Únicamente los reportes de las fallas de puentes debidas a la presencia de escombros y sus efectos adversos fueron usados como guías para decidir el tema estudiado, y su tratamiento se dió desde la interpretación bayesiana por medio de la herramienta que se construyó’.

Por otro lado, una variable aleatoria es aquella entidad cuyo valor específico no puede predecirse con certeza, también pueden ser vistas como una función definida en el espacio muestral de un experimento, tal que hay un valor numérico correspondiente de esta y cada posible valor, de manera que hay una probabilidad asociada con cada ocurrencia en el espacio muestral. Una variable aleatoria puede ser especificada por una distribución o una ley de probabilidad que es una función matemática.

Estas se clasifican en discretas y continuas. Las variables del tipo discreto son aquellas que sólo pueden asumir una cantidad contable o conocida de valores y que son definidas por la llamada función masa de probabilidad que es definida como la probabilidad de que la variable X tome un valor específico x como:

$$p_x = Pr(X = x) \tag{A.8}$$

Como es una probabilidad, esta función debe cumplir $0 \leq p_x \leq 1$

En cambio, una variable aleatoria continua es aquella que puede tomar cualquier valor entre dos límites determinados por razones físicas o teóricas. La ley de probabilidad de una variable de este tipo es definida por una función de densidad de probabilidad (fdp). Una fdp $f_x(x)$ es una función matemática no negativa cuya representación gráfica toma la forma de una curva continua sobre un rango de valores que la variable puede asumir. Por su definición $f_x(x)$ no esta normalizada y por si misma no representa una probabilidad, solamente representa ciertos valores que asume la probabilidad. Sin embargo, el área bajo la curva entre dos límites x_1 y x_2 da la probabilidad de que la variable aleatoria este entre el intervalo delimitado por x_1 y x_2 .

La función de distribución acumulada de una variable aleatoria de cualquier tipo $F_x(x)$ describe la

probabilidad de que la variable aleatoria X sea más pequeña o igual que un valor específico:

$$F_x(x) = Pr[X \leq x] \quad (\text{A.9})$$

la diferencia entre el caso para variables aleatorias discretas, es que esta función es la suma de los valores de la función masa de probabilidad, y en el caso continuo es una integral:

$$F_x(x) = \sum_{X_k \leq x} p_x(x_k) \quad (\text{A.10})$$

y en el caso continuo:

$$F_x(x) = \int p_x(x_k) \quad (\text{A.11})$$

es una función que esta limitada por 0 y 1 y regularmente tiene una forma sigmoïdal o parecida a una s o escalonada en el caso discreto. Para variables aleatorias discretas, esta función es la suma de los valores de la función masa de probabilidad, sobre los valores menores o iguales de la función. En el caso de que sea la variable continua, hay que mencionar que existe una relacion importante entre la función de distribución acumulada y la función de densidad de probabilidad por medio de la expresión:

$$F_x(x) = \int_{-\infty}^x f_x(z) \quad (\text{A.12})$$

$$\frac{dF_x(x)}{dx} = f_x(x)$$

Que resulta útil en algunos cálculos dentro de la teoría de la probabilidad. Cada una de estas funciones ya sea la función masa de probabilidad o la función de densidad de probabilidad proveen de un modelo de probabilidad que describe un proceso que esta sujeto a incertidumbre. El modelo probabilístico de un sistema aleatorio es frecuentemente desarrollado en la forma de una función paramétrica, esta función y sus parámetros vienen del mecanismo aleatorio que gobierna el comportamiento del sistema y es frecuentemente llamado como media de la población:

$$\mu_x = E[x] = \sum_{todax_i} x_i p_{x_i} \quad (\text{A.13})$$

Si X es una variable aleatoria continua:

$$\mu_x = E[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_x dx \quad (\text{A.14})$$

La diferencia entre la media de una muestra y la media de la población suele reducirse para muestras mayores a 30 para las distribuciones simétricas. Las medidas de tendencia central de dispersión y de asimetría son

estimaciones de las propiedades estadísticas del fenómeno estudiado y también son mediciones similares de las variables aleatorias y estas pueden describir la función masa de probabilidad o la función densidad de probabilidad. Estas medidas proporcionan importantes características del comportamiento de las variables aleatorias. Las medidas representan los valores esperados de la función. El valor esperado es el valor promedio el cual es ponderado de acuerdo a la distribución de probabilidad. La esperanza matemática de una función de la variable X denominada como $g(x)$ puede calcularse sustituyendo $g(x)$ en vez de X en la ecuación A.13 para el caso discreto:

$$E|g(x)| = \sum_{\text{todas } x_i} g(x_i)p_{x_i} \quad (\text{A.15})$$

Para el caso continuo

$$E|g(x)| = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x)f_x(x)dx \quad (\text{A.16})$$

Esto es aplicable si la integral es absolutamente convergente, situación que se da si $g(x)$ es remplazado por su valor absoluto.

Prueba de Bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov

Hasta aquí se ha hecho referencia a las características de una variable aleatoria y sus expresiones probabilísticas para representarlas, pero aún se describe como averiguar a que tipo de distribución se ajusta la muestra de los datos. Existen métodos para desarrollar este paso. Lo que se requiere conocer para aprovechar la información proporcionada en el Banco Nacional de Aguas Superficiales BANDAS que tiene una estadística correspondiente a los gastos pico anuales, y las correspondientes profundidades de agua que alcanzarán para esos gastos, con el propósito de determinar a que tipo de distribución se ajusta.

Esta técnica es una prueba no paramétrica que relaciona la distribución acumulada con la función de densidad. El estadístico de prueba es la máxima diferencia en valor absoluto entre la distribución empírica acumulada y la hipotética a la que se quiere ajustar, que regularmente es la distancia vertical. Para una variable X sean x_1, x_2, \dots, x_n los valores de la muestras ordenados de manera ascendente, cuya distribución empírica $F_n(x)$ es una función escalonada, que da la proporción de valores de que x no sea excedida y esta definida como:

$$\begin{aligned} F_n(x) &= 0 \quad \text{para } x < x_1 \\ &= k/n \quad \text{para } x_{(k)} \leq x \leq x_{(k+1)}; \quad k = 1, 2, \dots, n-2 \\ &= 1 \quad \text{para } x \geq x_n \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

Siendo $F_0(x)$ una función de distribución acumulada que se conoce, la hipótesis nula H_0 sostiene que es

verdad que la función de distribución acumulada de X es la misma que $F_0(x)$, o definido en:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} Pr[F_n(x) = F_0(x)] = 1 \quad (\text{A.18})$$

El criterio de la prueba es la máxima diferencia en valor absoluto entre $F_n(x)$ y $F_0(x)$, o definida con:

$$D_n = \sup[F_n(x) - F_0(x)] \quad (\text{A.19})$$

La prueba es aplicada bajo la suposición que $F_0(x)$ describe su función de distribución acumulada continua con parámetros conocidos. Para más detalles de como efectuar esta prueba consultar literatura como [13]. Aplicando esta prueba a los datos antes mencionados, se determinó que la distribución que se ajusta a los valores es de la del tipo Gumbel de valores máximos por lo cual se verán las propiedades de este tipo de distribuciones.

Distribucion de probabilidad Gumbel

Esta distribución es del tipo continua usada para modelar la distribución de los máximos o los mínimos de un conjunto de valores, su función de distribución acumulada es

$$Pr[X \leq x] = \exp[-e^{(x-\mu)/\sigma}] \quad (\text{A.20})$$

Donde σ es el parámetro de escala y μ parámetro de posición, su función de densidad de probabilidad (FDP) esta dada por

$$f_{x_n} = 1/\sigma \exp[-\frac{x-\mu}{\sigma} - \exp(-\frac{x-\mu}{\sigma})] \quad -\infty \leq x \leq +\infty \quad (\text{A.21})$$

El término de valores extremos es asignado a distribuciones como esta debido a que pueden ser obtenidas como distribuciones limitantes del mayor de los valores de entre n variables aleatorias independientes teniendo cada una la misma distribución continua. Este tipo de modelos surgen de la necesidad de representar el comportamiento de los valores extremos ya sean los mínimos o los máximos; aunque la asignación o determinación de distribuciones de probabilidad de este tipo no pueden ser basadas en el simple análisis estadístico de valores muestreados debe también incluirse el comportamiento que la distribución siga, en este trabajo se le aplicó una prueba de bondad de ajuste Kolgomorov Smirnov apoyado en el conocimiento de que esa estadística corresponde a los valores más grandes de un conjunto de datos. Aunque corresponde al tipo de valores extremos debe tenerse en cuenta que no representa todas las posibles distribuciones de valores extremos. La media y la varianza de una variable aleatoria con distribución Gumbel son

$$\begin{aligned} E[X_n] &= \mu + \gamma\sigma \\ Var[X_n] &= \frac{\pi^2\sigma_n^2}{6} \end{aligned} \quad (\text{A.22})$$

Donde $\gamma = 0.5772 \dots$ es la constante de Euler. Se busca una medida alternativa de hacer el ajuste a una distribución de este tipo puesto que en muchas ocasiones un método no es completamente válido. Considerando la distribución acumulada

$$Pr[X \geq x] = F(x; \mu\sigma) = 1 - \exp[-\exp(\frac{x - \mu}{\sigma})] \quad -\infty \leq x \leq +\infty \quad (\text{A.23})$$

Tomando el logaritmo se obtiene la relación lineal

$$x = \mu + \sigma \ln[-\ln(1 - F(x; \mu\sigma))] \quad (\text{A.24})$$

Se gráfica en un papel de valor extremo tipo I o papel tipo Gumbel si el valor $x_i, i = 1, \dots, n$ es un conjunto de observaciones ordenadas y $p_i, i = 1, \dots, n$ es un conjunto de puntos gráficos dado un método de graficación entonces los puntos graficados $(y_i, \ln[-\ln(1 - p_i)], i = 1, \dots, n)$ puede ser aproximadamente distribuido en una línea recta en el papel probabilístico (dicta que los datos se ajustan a una distribución de tipo I de valores extremos). Este método gráfico es una alternativa al ajuste Kolmogorov-Smirnov.

Probabilidad condicional Para dos eventos o variables A y B con $P(B) > 0$ La probabilidad de A dado B es

$$P(A|B) = P(A \cap B)/P(B) \quad (\text{A.25})$$

Esto para dos variables o eventos, pero obviamente cuando se trabaja con más de un evento condicional la regla se generaliza

$$P(A|B \cap C) = P(A \cap B \cap C)/P(B \cap C) \quad (\text{A.26})$$

Que se lee probabilidad de A dado que ocurrieron los eventos B y C

Teorema de la probabilidad total

Sean los eventos $E_1, E_2, E_3 \dots E_n$ la partición del espacio muestral Ω , siendo cada uno de ellos mutuamente excluyentes es decir al suceder uno de ellos ninguno de los otros componentes sucede, tal que la probabilidad de cada uno de ellos sea mayor a 0; y sea un evento A en el espacio Ω , la probabilidad de A se expresa como:

$$P(A) = \sum_{j=1}^n P(A|E_j)P(E_j) \quad (\text{A.27})$$

Podríamos definir al evento A como la falla de la pila de un puente y los eventos E_j que son responsables de ello por ejemplo: corrosión del acero de refuerzo, impacto de un camión, fenómeno de inundación, etc. Como se aprecia existe una probabilidad condicional en este teorema, la cual se estima como

$$P(A|E_j) = P(A \cap E_j)/P(E_j) \quad (\text{A.28})$$

Que no esta definida si el denominador no tiene ningún valor, del evento A se dice que es probabilísticamente independiente del evento E_j si

$$P(A|E_j) = P(A) \quad (\text{A.29})$$

Teorema de Bayes Siendo los eventos E_1, E_2, \dots, E_n una partición del espacio Ω tal que la $P(E_j) > 0$ y sea A un evento cualquiera, la probabilidad de este evento es estimada así (ver figura 2.1):

$$\begin{aligned} P(A) &= P(A \cap E_1) + P(A \cap E_2) + \dots + P(A \cap E_n) \\ &= P(A|E_1)P(E_1) + P(A|E_2)P(E_2) + \dots + P(A|E_n)P(E_n) \\ &= \sum_{j=1}^n P(A|E_j)P(E_j) \end{aligned} \quad (\text{A.30})$$

que vuelve a ser el teorema de la probabilidad total De la ecuación de probabilidad condicional

$$\begin{aligned} P(A|E_j)P(E_j) &= P(E_j|A)P(A) \\ P(E_j|A) &= P(A|E_j)P(E_j)/P(A) \end{aligned} \quad (\text{A.31})$$

sustituyendo el teorema de la probabilidad total en el denominador se llega

$$P(E_j|A) = P(A|E_i)P(E_i) / \sum_{j=1}^n P(A|E_j)P(E_j) \quad (\text{A.32})$$

que es denominado como el teorema de Bayes, donde el término $P(E_j|A)$ es conocido como probabilidad posterior, el miembro $P(A|E_i)$ se conoce como verosimilitud, el término $P(E_i)$ es la probabilidad a priori del evento E_i . La importancia de esta expresión es que en ambos terminos de la ecuación se presenta la probabilidad del evento A . En la parte derecha esta representada por la probabilidad marginal y en la parte izquierda como la probabilidad condicional del evento E_i dado A . Si el evento A es visto como informacion nueva (llamada evidencia) este teorema describe como esta evidencia cambia la probabilidad del evento E_i de la probabilidad a priori a la posterior.

Bibliografía

- [1] The r project for statistical computing. www.r-project.org.
- [2] M.M. Alshebani and S.N. Sinha. Stress-strain characteristics of brick masonry under uniaxial cyclic loading. *Journal of structural engineering*, 1999.
- [3] C. H. Bezael. Aspects of mechanical behavior of rock under static and cyclic loading. Technical report, University of Wisconsin, 1972.
- [4] G. Casella and C.P. Robert. *Introducing Monte Carlo Methods with R*. Springer, 2010.
- [5] T. H. Diehl. Potential drift accumulation at bridges. Technical report, Federal Highway Administration, 1997.
- [6] B. Ellingwood, T.V. Galambos, J.G. MacGregor, and C.A. Cornell. Development of a probability based load criterion for american national standard a58. Technical report, National Bureau of Standards, 1980.
- [7] M. H. Faber. *Risk and safety in engineering*. Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2009.
- [8] F. Hansen. *Bayesian networks as a decision tool in marine applications*. PhD thesis, Technical University of Denmark, 2000.
- [9] E. L. Houghton and P. W. Carpenter. *Aerodynamics for Engineering Students*. Butterworth-Heinemann, 2003.
- [10] D. Imhof. *Risk Assessment of Existing Bridge Structures*. PhD thesis, University of Cambridge, 2004.
- [11] P.A. Johnson. Reliability-based pier scour engineering. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992.
- [12] U. B. Kjaerulff and A.L. Madsen. *Bayesian networks and influence diagrams. A guide to Construction and Analysis*. Springer, 2008.

- [13] N. T. Kottegoda and R. Rosso. *Applied Statistics for civil and environmental engineers*. Blackwell Publishing, 2008.
- [14] P.F. Lagasse, P.E. Clopper, L.W. Zevenbergen, W.J. Spitz, and L.G. Girard. Effects of debris on bridge pier scour. Technical report, National Cooperative Highway Research Program, 2010.
- [15] D.A. Lyn, T.J. Cooper, C.A. Condon, and L. Gan. Factors in debris accumulation at bridge piers. Technical report, Indiana Department of Transportation and Purdue University, 2007.
- [16] D.A. Lyn, T.J. Cooper, Y. Yi, R.N. Sinha, and A.R. Rao. Debris accumulation at bridge crossing. Technical report, Indiana Department of Transportation and Purdue University, 2003.
- [17] A.K. Mandali, M.S. Sujith, B.N. Rao, and J. Maganti. Reliability analysis of counterfort retaining walls. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 2011.
- [18] B. Mazzorana. *Woody Debris Recruitment Prediction Methods and Transport Analysis*. PhD thesis, University of Natural Resources and Applied Life Sciences Vienna, 2009.
- [19] C. Melbourne, A.K. Tomor, and J. Wang. Cyclic load capacity and endurance limit of multi-ring masonry arches. In *Arch bridges IV conference*.
- [20] R. Neapolitan. *Learning Bayesian Networks*. Prentice Hall, 2003.
- [21] M. Neil, N. Fenton, and L. Nielsen. Building large-scale bayesian networks. *The Knowledge Engineering Review*, 2000.
- [22] I. Ntzoufras. *Bayesian Modeling Using Winbugs*. Wiley, 2009.
- [23] D.V. Oliveira. *Experimental and numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loading*. PhD thesis, Universidade do Minho Guimaraes, 2003.
- [24] A. C. Parola, D.J. Hagerty, and S. Kamojjala. Highway infrastructure damage caused by the 1993 upper mississippi river basin flooding. Technical report, National Cooperative Highway Research Program, 1998.
- [25] A.C. Parola, C.J. Apelt, and M.A. Jempson. Debris forces on highway bridges. Technical report, National Cooperative Highway Research Program, 2000.
- [26] J. G. Rangel. *Reliability Assessment and Reliability-Based Inspection and Maintenance of Offshore Wind Turbines*. PhD thesis, Aalborg University, 2010.

- [27] T.M. Roberts, T.G. Hughes, and V.R. Dandamundi. Quasi-static and high-cycle fatigue strength of brick masonry. *Construction and Building materials*, 2006.
- [28] L. Schmocker and W. H. Hager. Probability of drift blockage at bridge decks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011.
- [29] D. Straub. *Lecture Notes in Engineering Risk Analysis*. Technical University of Munich, 2010.
- [30] S. Suresh. *Fatigue of materials*. Cambridge University Press, 1998.
- [31] T. Tsutsui. Fluid force acting on a cylindrical pier standing in a scour. In *Bluff Bodies Aerodynamics and Applications*.
- [32] A. T. Zagorecki. *Local Probability Distributions in bayesian networks: elicitation and inference*. PhD thesis, University of Pittsburgh, 2010.