

**MODELADO ESTOCÁSTICO DE DESASTRES NATURALES**

**OSCAR EDUARDO MUÑOZ PEDROZA  
SEBASTIAN URIBE SANCHEZ**

**UNIVERSIDAD ICESI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
CALI  
NOVIEMBRE 2019**

**MODELADO ESTOCÁSTICO DE DESASTRES NATURALES**

**OSCAR EDUARDO MUÑOZ PEDROZA  
SEBASTIAN URIBE SANCHEZ**

**Proyecto de Grado para optar el título de Ingeniero Industrial**

**Director proyecto  
ROLANDO JOSÉ ACOSTA AMADO**

**UNIVERSIDAD ICESI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
CALI  
NOVIEMBRE 2019**

## Contenido

pág.

### Tabla de contenido

Introducción	8
1. Contexto, Formulación y Justificación del Problema	9
1.1. Contexto	9
1.2. Situación objeto de estudio	11
1.3. Justificación de la situación objeto de estudio	11
2. Objetivos	12
2.1. Objetivo del Proyecto	12
2.2. Objetivos Específicos	12
2.2.1. Identificar los desastres naturales relevantes en Colombia que serán objeto de estudio.	12
2.2.2. Desarrollar los modelos estocásticos con información histórica sobre los sucesos de desastres naturales en Colombia identificados en el objetivo anterior.	12
2.2.3. Validar la capacidad de los modelos estocásticos propuestos de representar la realidad de los desastres naturales seleccionados.	12
2.3. Entregables:	12
2.3.1. Análisis sobre los desastres naturales que tienen mayor porcentaje de ocurrencia y poder destructivo en Colombia.	12
2.3.2. Modelos estocásticos que representen la ocurrencia de los desastres naturales en Colombia.	12
2.3.3. Diagnóstico sobre la capacidad de los modelos estocásticos de representar la realidad de los desastres naturales seleccionados.	12
3. Marco de Referencia	13
3.1. Antecedentes o Estudios Previos	13
3.2. Marco Teórico	14
3.3. Contribución Intelectual o Impacto del Proyecto	16
4. Metodología	18
5. Resultados y discusión	19
5.1. Identificación de los desastres naturales más relevantes en Colombia.	19
5.2. Desarrollo de modelos estocásticos que representan los desastres naturales más importantes en Colombia.	25
5.2.1. Cadena de Márkov para la Región Andina.	26

5.2.2.	Cadena de Márkov para la Región Caribe	29
5.2.3.	Cadena de Márkov para la Región Pacífico	30
5.2.4.	Cadena de Márkov para Inundaciones.	32
5.2.5.	Cadena de Márkov para Deslizamientos	34
5.2.6.	Cadena de Márkov para Vendavales	36
5.2.7.	Cadena de Márkov para Desastre_Región	38
5.3.	Validación de la capacidad de los modelos estocásticos de representar la realidad de los desastres naturales seleccionados	42
6.	Conclusiones	44
7.	Recomendaciones	45
	BIBLIOGRAFÍA	46
	ANEXOS	48

## Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Número de eventos vs Cantidad de afectados. Fuente: IMPACTO DE LOS DESASTRES NATURALES SOBRE EL CRECIMIENTO ECONÓMICO EN COLOMBIA DURANTE EL PERIODO 1986 – 2015. ....	9
Ilustración 2. Natural Disasters Risk Index 2010. Fuente: Maplecroft. ....	10
Ilustración 3. Concepto de riesgo natural. Fuente: Desastres de origen natural en Colombia 1979-2004. ....	14
Ilustración 4. Gestión del Riesgo de Desastres. Fuente: Minambiente. ....	15
Ilustración 5. Diagrama de Pareto por ocurrencia. Fuente: Propia. ....	19
Ilustración 6. Gráfico circular por ocurrencia. Fuente: Propia. ....	21
Ilustración 7. Diagrama de Pareto por número de afectados. Fuente: Propia. ....	22
Ilustración 8. Gráfico circular por número de afectados. Fuente: Propia. ....	24
Ilustración 9. Pareto ocurrencia por regiones. Fuente: Propia. ....	25
Ilustración 10. MPTE Región Andina. Fuente: Propia. ....	27
Ilustración 11. Diagrama de transición de estados Región Andina. Fuente: Propia. ....	27
Ilustración 12. MPTE Región Caribe. Fuente: Propia. ....	29
Ilustración 13. Diagrama de transición de estados Región Caribe. Fuente: Propia. ....	29
Ilustración 14. MPTE Región Pacífico. Fuente: Propia. ....	31
Ilustración 15. Diagrama de transición de estados Región Pacífica. Fuente: Propia. ....	31
Ilustración 16. MPTE Inundaciones. Fuente: Propia. ....	32
Ilustración 17. Diagrama de transición de estados Inundaciones. Fuente: Propia. ....	33
Ilustración 18. MPTE Deslizamientos. Fuente: Propia. ....	34
Ilustración 19. Diagrama de transición de estados Deslizamientos. Fuente: Propia. ....	35
Ilustración 20. MPTE Vendavales. Fuente: Propia. ....	36
Ilustración 21. Diagrama de transición de estados Vendavales. Fuente: Propia. ....	37
Ilustración 22. MPTE Desastre_Región. Fuente: Propia. ....	39
Ilustración 23. Diagrama de transición de estados Desastre_Región. Fuente: Propia. ....	39
Ilustración 24. Matriz tiempos de primer retorno y paso. Fuente: Propia. ....	41

## Lista de tablas

Tabla 1. Ocurrencia de tipos de eventos. Fuente: Propia. ....	20
Tabla 2. Número de afectados por evento. Fuente: Propia. ....	23
Tabla 3. Clasificación ABC por afectados y ocurrencia. Fuente: Propia. ....	24
Tabla 4. Clasificación ABC por regiones. Fuente: Propia. ....	25
Tabla 5. Ocurrencia en las regiones seleccionadas. Fuente: Propia. ....	26
Tabla 6. Proporciones de largo plazo Región Andina. Fuente: Propia. ....	28
Tabla 7. Tiempos promedio de primer retorno Región Andina. Fuente: Propia. ....	28
Tabla 8. Proporciones de largo plazo Región Caribe. Fuente: Propia. ....	30
Tabla 9. Tiempos promedio de primer retorno Región Caribe. Fuente: Propia. ....	30
Tabla 10. Proporciones de largo plazo Región Pacífico. Fuente: Propia. ....	31
Tabla 11. Tiempos promedio de primer retorno Región Pacífico. Fuente: Propia. ....	32
Tabla 12. Proporciones de largo plazo Inundaciones. Fuente: Propia. ....	33
Tabla 13. Tiempos promedio de primer retorno Inundaciones. Fuente: Propia. ....	34
Tabla 14. Proporciones de largo plazo Deslizamientos Fuente: Propia. ....	35
Tabla 15. Tiempos promedio de primer retorno Deslizamientos. Fuente: Propia. ....	36
Tabla 16. Proporciones de largo plazo Vendavales. Fuente: Propia. ....	37
Tabla 17. Tiempos promedio de primer retorno Vendavales. Fuente: Propia. ....	37
Tabla 18. Proporciones de largo plazo Desastre_Región Fuente: Propia. ....	40
Tabla 19. Validación. Fuente: Propia. ....	42

## Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Proporciones de largo plazo. Fuente: Rolando Acosta.....	27
Ecuación 2. Suma de las proporciones de largo plazo. Fuente: Rolando Acosta. .	28
Ecuación 3. Tiempos promedio de primer retorno. Fuente: Rolando Acosta. ....	28
Ecuación 4. Ecuación tiempo promedio del primer paso por el estado j iniciando en el estado i. Fuente: Rolando Acosta. ....	41

## Introducción

El objetivo de este documento es proponer modelos estocásticos que permitan modelar el comportamiento a largo plazo de los desastres naturales en Colombia. Los desastres naturales son “aquellos elementos del medio ambiente que son peligrosos al hombre y que están causados por fuerzas extrañas a él... Que por su ubicación, severidad y frecuencia tienen el potencial de afectar adversamente al ser humano y sus actividades” (OEA, 1991).

La mayoría de los estudios existentes sobre los desastres naturales tratan sobre cómo disminuir su impacto generando políticas de socorro, de distribución de recursos, entre otras, además, determinar las zonas con mayores riesgos de desastres naturales; pero existen muy pocas investigaciones sobre entender el comportamiento en el largo plazo de estos eventos, buscando con esto descubrir patrones que permitan acercarse a determinar con cierta incertidumbre cuándo, dónde y de qué magnitud pueden ocurrir.

Con este trabajo se buscará dar una respuesta a esos interrogantes utilizando procesos estocásticos, Según (Lieberman and Hillier, 2010) Un proceso estocástico se define como una colección indexada de variables aleatorias  $\{X_t\}$ , donde el índice  $t$  toma valores de un conjunto  $T$  dado. Con frecuencia  $T$  se considera el conjunto de enteros no negativos mientras que  $X_t$  representa una característica de interés cuantificable en el tiempo  $t$ ... Los procesos estocásticos  $\{X_t\}$  5  $\{X_0, X_1, X_2, \dots\}$  proporcionan una representación matemática de la forma en que evoluciona la condición del sistema físico a través del tiempo.



# 1. Contexto, Formulación y Justificación del Problema

## 1.1. Contexto

Colombia es un país que presenta un alto riesgo de desastres naturales, lo cual hace importante realizar distintas investigaciones sobre este que permitan entender y gestionar de forma efectiva el alto impacto negativo que estos eventos generan sobre la sociedad.

Colombia es una zona vulnerable a los desastres naturales por varias circunstancias como lo son su geografía y una cantidad considerable de poblaciones en condiciones de vulnerabilidad lo cual genera que los desastres tengan un poder destructivo superior al que se tendría en zonas con mayor desarrollo. Como nos dice (Cardona et al., 2004) “La posición geográfica de Colombia..., y la manera como las comunidades colombianas han ocupado sus ecosistemas, en especial a partir de la segunda mitad del siglo XX, determinan que cada vez se presenten más desastres en el país” esta afirmación se puede ratificar en la ilustración 1 extraída del estudio de (Rodríguez López, 2016). Donde se analizan cuatro tipos de desastres naturales, los cuales son: Erupciones volcánicas, inundaciones, sequías y terremotos.

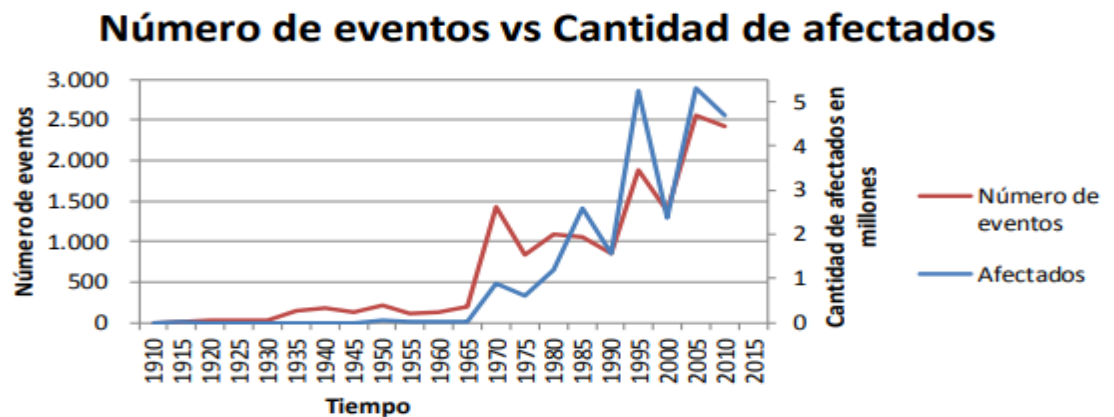


Ilustración 1. Número de eventos vs Cantidad de afectados. Fuente: IMPACTO DE LOS DESASTRES NATURALES SOBRE EL CRECIMIENTO ECONÓMICO EN COLOMBIA DURANTE EL PERIODO 1986 – 2015.

La ilustración 1 da una información preocupante no solamente lo que sería un incremento de los desastres naturales antes mencionados, sino que también muestra como el número de afectados por estos eventos ha venido creciendo exponencialmente.

Por otro lado Verisk Maplecroft en mayo de 2010 dio a conocer el Índice de Riesgo de Desastres Naturales (NDRI) mostrando los países con mayor riesgo de desastres naturales. Este índice “se calcula midiendo el impacto humano de los desastres naturales, en términos de muertes anuales y por millón de habitantes, más la frecuencia de los eventos en los últimos 30 años” (Maplecroft, 2010). En la ilustración 2 se muestra un mapa mundial el cual señala el riesgo de desastres naturales de cada país.

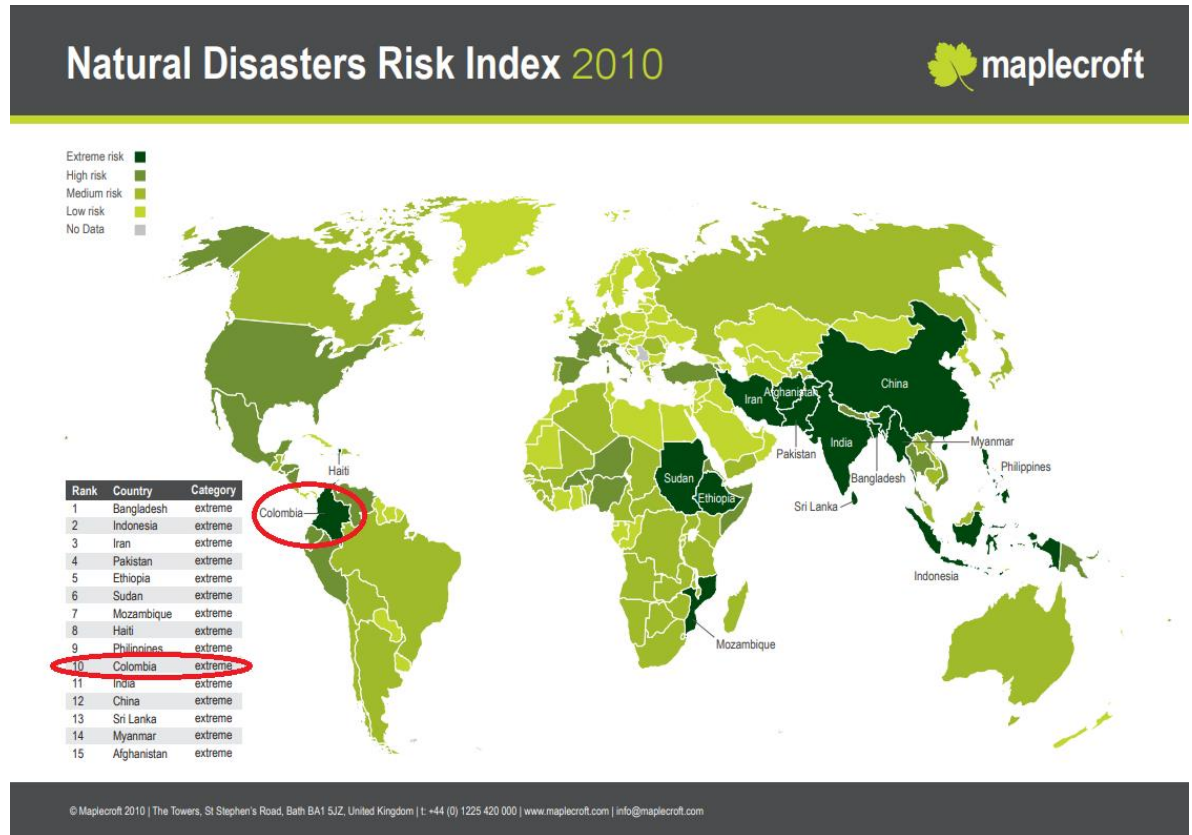


Ilustración 2. Natural Disasters Risk Index 2010. Fuente: Maplecroft.

Como se puede observar en la ilustración 2 Colombia es el décimo país con mayor riesgo de desastres naturales según Maplecroft, siendo este un puesto muy elevado que ciertamente genera mucha preocupación. Esto es ratificable mediante los datos del Departamento Nacional de Planeación (DNP) “el cual dice: 3.181 muertos y 12,3 millones de afectados: las cifras de desastres naturales entre 2006 y 2014.” (DNP, 2015)

Con los datos suministrados anteriormente se puede concluir que los desastres naturales en Colombia representan una situación de preocupación la cual debe

ser tratada urgentemente por su alto impacto. Cada vez se realizan más estudios sobre esta problemática, pero estos estudios están encaminados en el impacto económico, la gestión de recursos, el impacto social que estos eventos generan, entre otras perspectivas de la situación, pero se presenta una brecha de conocimiento debido a la falta de investigaciones y proyectos que busquen predecir con algún grado de certeza la ocurrencia de los desastres naturales.

## **1.2. Situación objeto de estudio**

Los modelos que se han desarrollado en Colombia como parte de investigaciones para mejorar la logística humanitaria se centraron en su mayoría en la evaluación del riesgo, asignación de recursos, etc. Pero es necesario ampliar el conocimiento acerca del comportamiento a largo plazo de los desastres naturales en cuanto a su poder destructivo, lugar de ocurrencia, vulnerabilidad de las comunidades afectadas.

## **1.3. Justificación de la situación objeto de estudio**

La ocurrencia de desastres naturales es impredecible y esto hace que sea difícil lidiar con los efectos destructivos que estos tienen en la sociedad en especial en las comunidades vulnerables. El modelo propuesto busca representar la aleatoriedad de dichos eventos, a fin de poder estudiar su comportamiento a largo plazo y generar información que sea útil para entidades del sector público o privado, con el objetivo de mejorar la toma de decisiones estratégicas, tácticas y operativas en el ámbito de la prevención y mitigación de los efectos negativos de los desastres naturales.

A nivel nacional los desastres naturales le han costado al país una gran cantidad de vidas humanas y miles de millones de pesos en pérdidas relacionadas con infraestructura de las comunidades, infraestructura vial, afectaciones en la industria, el comercio y otros servicios además de años en el proceso de recuperación. Las entidades encargadas de atención y prevención de los desastres podrán utilizar esta información para desarrollar planes de contingencia con el fin de minimizar las consecuencias devastadoras ocasionadas por los desastres naturales.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo del Proyecto**

Proponer modelos estocásticos que permitan investigar el comportamiento a largo plazo de los desastres naturales en Colombia.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- 2.2.1.** Identificar los desastres naturales relevantes en Colombia que serán objeto de estudio.
- 2.2.2.** Desarrollar los modelos estocásticos con información histórica sobre los sucesos de desastres naturales en Colombia identificados en el objetivo anterior.
- 2.2.3.** Validar la capacidad de los modelos estocásticos propuestos de representar la realidad de los desastres naturales seleccionados.

### **2.3. Entregables:**

- 2.3.1.** Análisis sobre los desastres naturales que tienen mayor porcentaje de ocurrencia y poder destructivo en Colombia.
- 2.3.2.** Modelos estocásticos que representen la ocurrencia de los desastres naturales en Colombia.
- 2.3.3.** Diagnóstico sobre la capacidad de los modelos estocásticos de representar la realidad de los desastres naturales seleccionados.

### **3. Marco de Referencia**

#### **3.1. Antecedentes o Estudios Previos**

Los investigadores que se han decantado por estudiar el comportamiento de los desastres naturales con frecuencia se dividen en dos ideologías, unos aseguran que estos han aumentado su frecuencia, mientras que otros dicen que la frecuencia de los desastres naturales no ha aumentado, solo que con los avances en la tecnología que permite recolectar los datos y acceder a la información global hace que los desastres naturales sean más visibles y se genere la impresión de un aumento de la frecuencia. Lo que es claro es que la relevancia del estudio de los desastres naturales ha aumentado en el transcurso de los años despertando el interés de los investigadores a nivel internacional debido a la necesidad de establecer diferentes medidas que permitan reducir los efectos destructivos de los desastres naturales. En la Conferencia Mundial sobre la Reducción de los Desastres, se aprobó el Marco de Acción de Hyogo (MAH), este aspira “la reducción sustancial de las pérdidas por desastres en vidas y en los activos medioambientales, económicos y sociales de los países y las comunidades” (Baas, Stephan; Ramasamy, Selvaraju; De Prick, Jennie Dey; Battista, 2009). Promoviendo las acciones preventivas de la Gestión de Operaciones de Desastres o DOM, por sus siglas en inglés (Disaster Operations Management). que abarca los conceptos de prevención, mitigación y preparación.

Las investigaciones que se realizan acerca del DOM pueden ser clasificadas por la metodología de búsqueda, contribución a la investigación, tipo de desastre, método utilizado y escenario del problema. En el análisis bibliográfico realizado por (Altay & Green, 2006), sobre 109 artículos académicos de los cuales el 43.1% son de Estados Unidos y fueron publicados en revistas relacionadas con Investigación de operaciones/ciencia de gestión encontraron que únicamente en el 3.7% de las investigaciones se desarrollaron modelos estocásticos. El comportamiento de los desastres naturales sigue una secuencia cambiante al pasar el tiempo, por eso es imposible determinar con total certeza cuándo ocurrirán, el impacto, la posible infraestructura afectada, entre muchos otros, pero es posible predecir con determinada certeza su comportamiento mediante el uso de la teoría de la probabilidad, más concretamente con procesos estocásticos.

En el contexto colombiano el estudio de la DOM ha sido muy escaso y las investigaciones existentes son muy recientes, pero se sabe que el país es un lugar que puede presentar desastres naturales de gran escala como el maremoto de Tumaco (1979). Se ha encontrado que las inundaciones son los eventos más comunes en el país y las áreas que representan un impacto notable al verse afectadas por un desastre natural son las grandes ciudades (CEPAL, 2007). Las

investigaciones sobre el DOM se basan principalmente en las implicaciones sociales y económicas, cabe resaltar que no hay suficiente literatura sobre estudios que ayuden a prevenir o alertar sobre posibles fechas de ocurrencia como para tomar decisiones al respecto.

### 3.2. Marco Teórico

Para el desarrollo de esta investigación, es necesario analizar pilares teóricos como son riesgos naturales, gestión del riesgo de desastres, procesos estocásticos, cadenas de Márkov, con el fin de disponer la base conceptual necesaria para la investigación.

Como se mencionó anteriormente el análisis de los riesgos naturales es imprescindible para los diferentes entes encargados de la atención y prevención de los desastres, como las Oficinas de Gestión de Riesgos, la defensa civil, el cuerpo de bomberos, entre otras. Es importante mencionar que el riesgo natural abarca la intensidad con la que puede ocurrir, el espacio que podría verse afectado y la frecuencia con la que ocurrirá. La siguiente ilustración representa como una amenaza en este caso un deslizamiento unida a una condición de vulnerabilidad como son edificaciones no aptas para afrontar un deslizamiento representa el riesgo de perder vidas humanas, sufrir afectaciones en la infraestructura de la comunidad, el comercio y otros servicios.

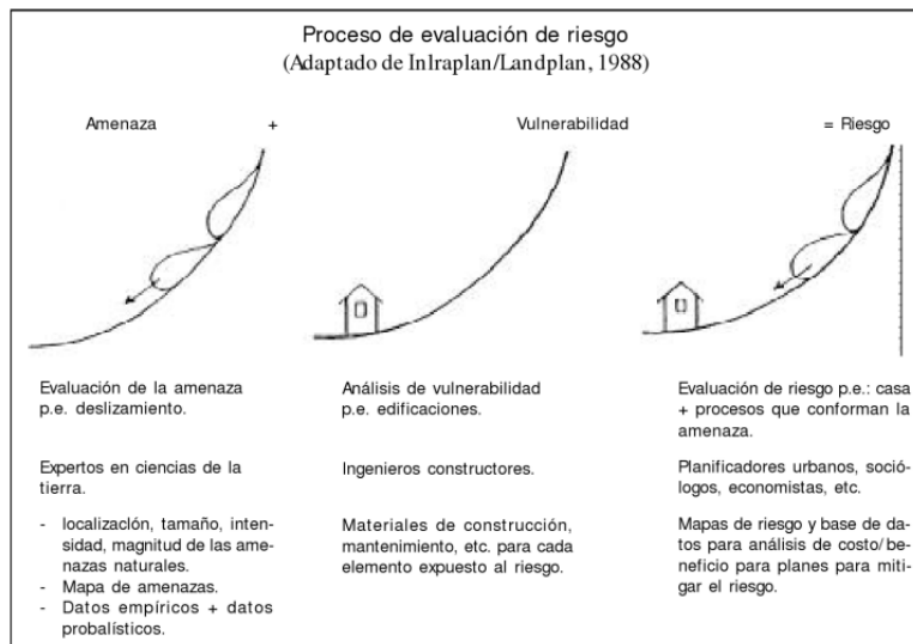


Ilustración 3. Concepto de riesgo natural. Fuente: Desastres de origen natural en Colombia 1979-2004.

Cuando tratamos con riesgos naturales es importante comprender cómo ha evolucionado la terminología para el manejo de los desastres naturales esta ha tenido una gran evolución desde su apogeo en los años setenta, cuando se referían al tema con diferentes nociones como Manejo, Gestión o Administración de desastres. El eje principal de análisis en ese tiempo era como afrontar el desastre y sus consecuencias (el daño y la pérdida), pero a partir de la última mitad de los años noventa se cambió el paradigma y se empezó a tratar el concepto de Gestión de Riesgo de Desastre cuyo eje principal es analizar la potencialidad del riesgo y del posible daño o pérdida. Esta nueva forma de ver los desastres abrió las puertas para el nacimiento de nuevos procesos enfocados en la mitigación y prevención, cabe resaltar que no se puede enmarcar la Gestión del Riesgo de Desastres solo en la mitigación y prevención, ya que este va más allá de los procesos pre-desastre y también incluye los procesos post desastre (Narváez, L.; Lavell, A. y Pérez, 2009).

Colombia regula el concepto de Gestión de Riesgo de Desastre mediante la Ley 1523 de 2012, Lo define como una responsabilidad de todos los habitantes del territorio colombiano y en especial de las autoridades competentes. También lo descompone en 3 procesos principales como son el Conocimiento del Riesgo, Reducción del Riesgo y Manejo del Riesgo. Estos tres procesos abarcan desde el análisis previo para la caracterización del riesgo, las intervenciones dirigidas a modificar o disminuir las condiciones de riesgo existentes hasta la preparación para la respuesta a situaciones de emergencia y los planes post desastre (Minambiente, 2012) . La siguiente imagen muestra como la integración de los tres procesos forma la base de la Gestión de Riesgo de Desastre.



Ilustración 4. Gestión del Riesgo de Desastres. Fuente: Minambiente.

El comportamiento de los desastres naturales es aleatorio, dado que es imposible predecir cuándo ocurrirán o con qué fuerza, pero también depende del tiempo haciendo que sea factible analizar su comportamiento mediante el uso de procesos estocásticos dado que sabemos que este comportamiento depende tanto de las acciones predecibles del proceso como de los elementos aleatorios. Los procesos estocásticos se pueden ver como una familia de variables aleatorias relacionadas por el tiempo y para cada instante de tiempo definido (días, meses, años, etc.) tendremos una variable aleatoria distinta, los posibles valores que pueden tomar estas variables se le denominan estados que para el caso de los desastres naturales pueden ser todas sus posibilidades: sismos, inundaciones, incendios, tsunamis, huracanes, etc.

Para estudiar el comportamiento de los Desastres naturales utilizaremos un modelo especial de proceso estocástico denominado Cadena de Márkov el cual se caracteriza por no poseer memoria, es decir, la probabilidad de que ocurra un suceso futuro depende solamente del suceso inmediatamente anterior. Para este proyecto será de vital importancia el uso de esta herramienta para el desarrollo de los modelos que serán propuestos (Lieberman and Hillier, 2010).

### **3.3. Contribución Intelectual o Impacto del Proyecto**

Con este proyecto se realizará una contribución a diferentes entidades públicas como la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastre (UNGRD) debido que, al generar información sobre el comportamiento de los desastres naturales en el largo plazo, estas entidades podrán realizar una mejor distribución de los recursos y preparación al tener una idea de cuándo pueden ocurrir los diferentes desastres.

La importancia de este proyecto está enmarcada en el hecho de que es una perspectiva de los desastres naturales que en Colombia ha sido poco estudiada, siendo así un trabajo que servirá como antecedente para futuras investigaciones tanto de la perspectiva abordada en este proyecto como las demás perspectivas desde las cuales se suele estudiar.

Por otro lado, al generar los modelos estocásticos para investigar el comportamiento de los desastres naturales en el largo plazo se podrán tomar mejores decisiones estratégicas en el país como por ejemplo sería poder determinar cuáles son las mejores áreas en el país para construir, los tipos de construcciones se requieren, mejorando así la prevención para dichos eventos de una forma informada y objetiva.



Finalmente, este proyecto permitirá definir la capacidad de los modelos estocásticos para modelar el comportamiento de los desastres naturales, sirviendo esto para tomar decisiones sobre si es adecuado realizar futuras investigaciones del tema utilizando otra herramienta o si es más preciso utilizar otro tipo de herramientas.

## 4. Metodología

Para la realización de este trabajo se planteó una adaptación de la metodología de investigación de operaciones propuesta por (Lieberman and Hillier, 2010).

En camino de cumplir con el primer objetivo específico con el que se buscó definir los desastres naturales más relevantes en Colombia que fueron objeto de estudio se realizó una recolección de datos e información en la base de datos pertinente, de esta forma se permitió el cumplimiento de dicho objetivo mediante un análisis de la información encontrada por medio de la clasificación ABC, la identificación de los desastres pertenecientes a cada categoría se realizó por medio de dos criterios: ocurrencia y cantidad de afectados, ya que un desastre que tenga mucha ocurrencia en zonas donde la población sea mínima no podría ser considerado relevante y un desastre que afecte a muchas personas pero que casi no ocurra tampoco. Los desastres que acumulan una participación del 80% se nombraron categoría A, dentro del siguiente 15% como categoría B y el último 5% categoría C de esta forma los desastres más representativos en estos dos criterios fueron escogidos como los más relevantes de Colombia.

Para cumplir con el segundo objetivo específico, el cual consistió en desarrollar modelos estocásticos que permitieran representar los eventos seleccionados en el primer objetivo específico. Se clasificó la información histórica de los desastres naturales por región del país, haciendo uso de la clasificación ABC para encontrar las regiones más afectadas por los desastres seleccionados en el objetivo 1. Con esta información se procedió a realizar los modelos estocásticos por medio de las cadenas de Márkov. Las cadenas de Márkov fueron realizadas por medio de un código escrito en java, el cual se encuentra como anexo 1.

Para realizar la validación de los modelos estocásticos propuestos se tomaron datos desde 1914 hasta 2016 y se buscó predecir el año 2017. Estos tiempos fueron tomados así, debido a que después de varias pruebas se encontró que de esta forma los modelos representan más fidedignamente la realidad. Esto se hizo mediante la utilización del código del anexo 1.

En la sección de resultados se realizó una división por objetivos donde cada uno se desarrolló individualmente mostrando detalladamente la metodología usada en cada uno de estos.

## 5. Resultados y discusión

En esta sección del proyecto se presenta el desarrollo de cada uno de los objetivos propuestos con sus respectivos hallazgos.

### 5.1. Identificación de los desastres naturales más relevantes en Colombia.

Al desarrollar los objetivos mediante la metodología planteada anteriormente, identificamos la base de datos Desinventar.org perteneciente a la corporación Osso. Esta cuenta con un total de 53.605 desastres registrados en Colombia desde el año 1914 hasta el 2018. A Partir del diagrama de Pareto por ocurrencia podemos ver que son pocos los desastres que más aportan al total de ocurrencia siendo las inundaciones, deslizamientos, incendios forestales y vendavales los más sobresalientes, representando un 10,52% del total de los desastres registrados en la base de datos.

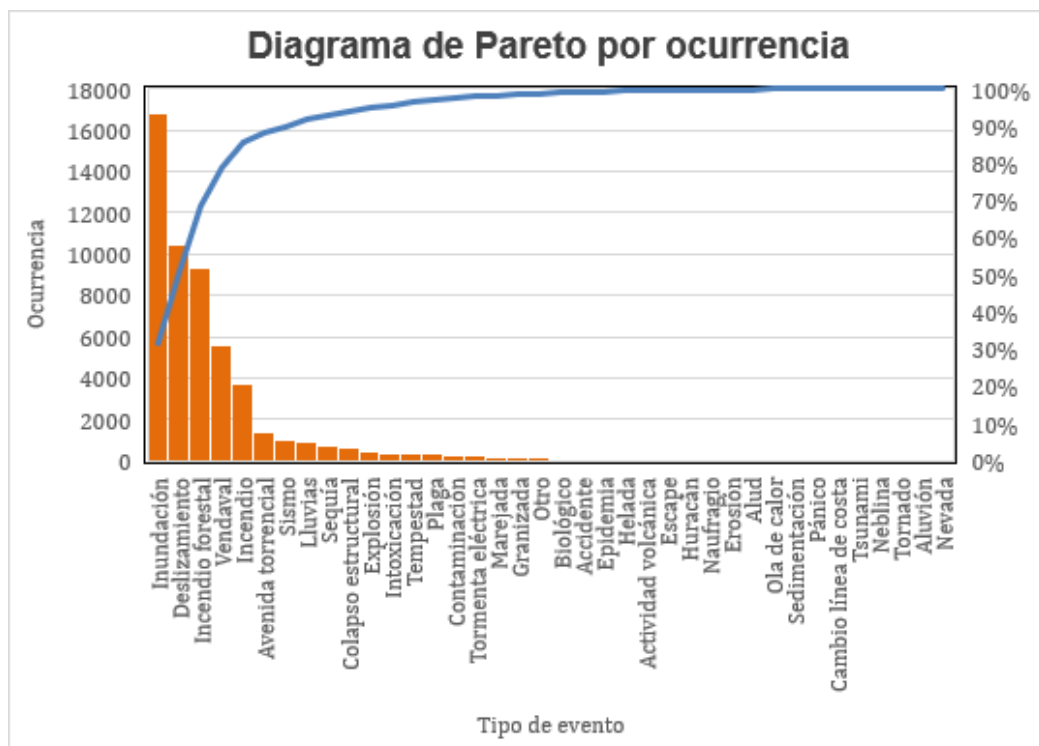
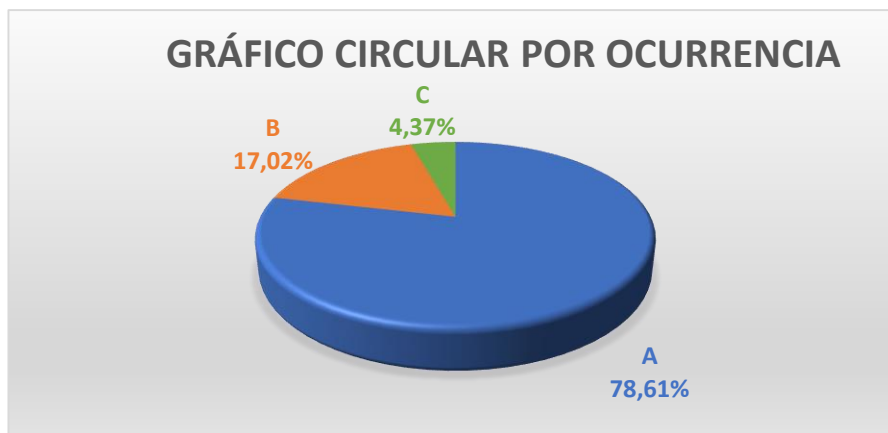


Ilustración 5. Diagrama de Pareto por ocurrencia. Fuente: Propia.

Tabla 1. Ocurrencia de tipos de eventos. Fuente: Propia.

Numero	Tipo de evento	Ocurrencia	% ocurrencia	% Acumulado	Clasificación ABC	Ocurrencia
1	Inundación	16855	31,44%	31,44%	A	16855
2	Deslizamiento	10438	19,47%	50,92%		10438
3	Incendio forestal	9300	17,35%	68,26%		9300
4	Vendaval	5548	10,35%	78,61%		5548
5	Incendio	3668	6,84%	85,46%	B	3668
6	Avenida torrencial	1363	2,54%	88,00%		1363
7	Sismo	1015	1,89%	89,89%		1015
8	Lluvias	916	1,71%	91,60%		916
9	Sequía	700	1,31%	92,91%		700
10	Colapso estructural	653	1,22%	94,13%		653
11	Explosión	424	0,79%	94,92%		424
12	Intoxicación	383	0,71%	95,63%		383
13	Tempestad	377	0,70%	96,33%	C	377
14	Plaga	366	0,68%	97,02%		366
15	Contaminación	258	0,48%	97,50%		258
16	Tormenta eléctrica	246	0,46%	97,96%		246
17	Marejada	169	0,32%	98,27%		169
18	Granizada	130	0,24%	98,52%		130
19	Otro	126	0,24%	98,75%		126
20	Biológico	106	0,20%	98,95%		106
21	Accidente	102	0,19%	99,14%		102
22	Epidemia	99	0,18%	99,32%		99
23	Helada	68	0,13%	99,45%		68
24	Actividad volcánica	65	0,12%	99,57%		65
25	Escape	54	0,10%	99,67%		54
26	Huracán	37	0,07%	99,74%		37
27	Nafragio	27	0,05%	99,79%		27
28	Erosión	26	0,05%	99,84%		26
29	Alud	25	0,05%	99,89%		25
30	Ola de calor	17	0,03%	99,92%		17
31	Sedimentación	12	0,02%	99,94%		12
32	Pánico	11	0,02%	99,96%		11
33	Cambio línea de costa	6	0,01%	99,97%	6	
34	Tsunami	5	0,01%	99,98%	5	
35	Neblina	4	0,01%	99,99%	4	
36	Tornado	3	0,01%	99,99%	3	
37	Aluvión	2	0,00%	100,00%	2	
38	Nevada	1	0,00%	100,00%	1	
<b>Total</b>		53605	100,00%			

En la Tabla 1. Ocurrencia de tipos de eventos se identificaron como categoría A los siguientes desastres: inundación, deslizamiento, incendio forestal y vendaval. Los cuales son un 10,52 % del total de los desastres registrados en la base de datos y representan el 78,61% de la ocurrencia total de los desastres. Se encontró que las inundaciones son el desastre con mayor porcentaje de participación en el total de ocurrencias en el país con un 31,44%.



Como podemos ver en la ilustración 6 los desastres pertenecientes a la categoría A representan el 78,61% del total de los desastres y son menos del 20% de los desastres, por lo cual podemos considerar que cumplen con el principio de Pareto.

El siguiente diagrama de Pareto representa el número de afectados por desastre natural, de el podemos observar que las inundaciones, sequías, deslizamientos y vendavales son los de mayor aporte en el total de afectados representando un 85,15 %, siendo un 10,52% de los desastres naturales registrados en la base de datos.

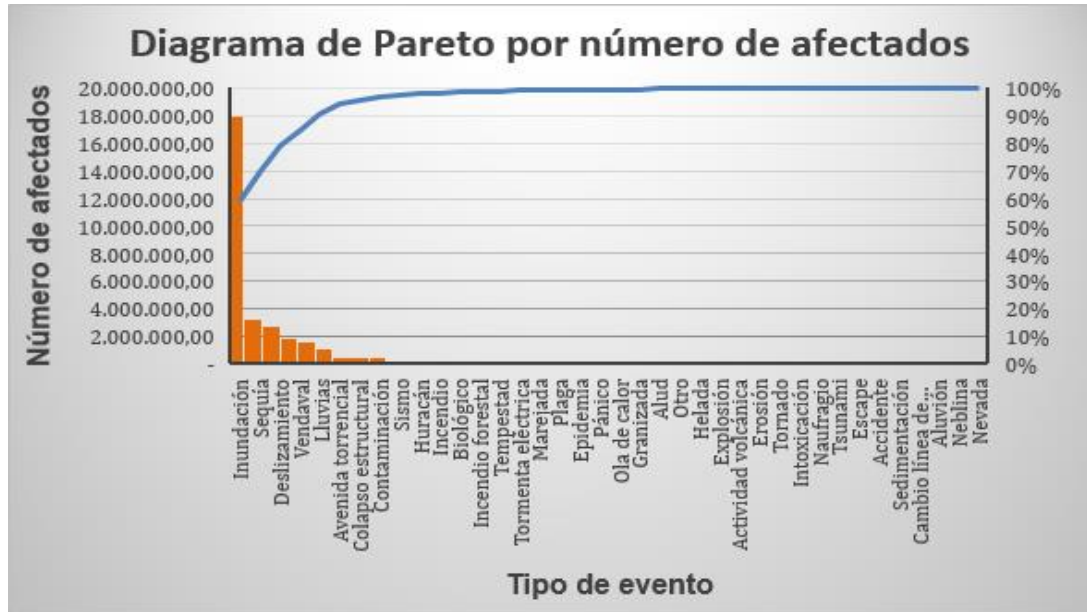


Ilustración 7. Diagrama de Pareto por número de afectados. Fuente: Propia.

Tabla 2. Número de afectados por evento. Fuente: Propia.

Numero	Tipos de eventos	Numero de afectados	% Afectados	% Acumulado	Clasificación ABC
1	Inundación	18.035.941,00	59,37%	59,37%	A
2	Sequía	3.234.670,00	10,65%	70,02%	
3	Deslizamiento	2.728.046,00	8,98%	79,00%	
4	Vendaval	1.867.003,00	6,15%	85,15%	
5	Lluvias	1.602.661,00	5,28%	90,42%	B
6	Avenida torrencial	1.152.336,00	3,79%	94,21%	
7	Colapso estructural	466.792,00	1,54%	95,75%	C
8	Contaminación	412.890,00	1,36%	97,11%	
9	Sismo	162.296,00	0,53%	97,64%	
10	Huracán	152.002,00	0,50%	98,14%	
11	Incendio	114.310,00	0,38%	98,52%	
12	Biológico	103.922,00	0,34%	98,86%	
13	Incendio forestal	47.462,00	0,16%	99,02%	
14	Tempestad	36.387,00	0,12%	99,14%	
15	Tormenta eléctrica	33.011,00	0,11%	99,25%	
16	Marejada	32.932,00	0,11%	99,36%	
17	Plaga	28.651,00	0,09%	99,45%	
18	Epidemia	26.395,00	0,09%	99,54%	
19	Pánico	26.000,00	0,09%	99,62%	
20	Ola de calor	25.000,00	0,08%	99,71%	
21	Granizada	23.415,00	0,08%	99,78%	
22	Alud	17.021,00	0,06%	99,84%	
23	Otro	17.013,00	0,06%	99,89%	
24	Helada	13.047,00	0,04%	99,94%	
25	Explosión	6.402,00	0,02%	99,96%	
26	Actividad volcánica	5.919,00	0,02%	99,98%	
27	Erosión	3.101,00	0,01%	99,99%	
28	Tornado	2.645,00	0,01%	100,00%	
29	Intoxicación	491,00	0,00%	100,00%	
30	Naufragio	150,00	0,00%	100,00%	
31	Tsunami	150,00	0,00%	100,00%	
32	Escape	113,00	0,00%	100,00%	
33	Accidente	51,00	0,00%	100,00%	
34	Sedimentación	-	0,00%	100,00%	
35	Cambio línea de costa	-	0,00%	100,00%	
36	Aluvión	-	0,00%	100,00%	
37	Nebolina	-	0,00%	100,00%	
38	Nevada	-	0,00%	100,00%	
	Total	30.378.225,00	100%		

En la tabla 2. Número de afectados por evento, encontramos que la inundación sigue siendo el principal desastre. Por otro lado, los incendios forestales dejaron de ser uno de los principales desastres.



*Ilustración 8. Gráfico circular por número de afectados. Fuente: Propia.*

En la ilustración 8. Gráfico circular por número de afectados se puede observar que el 85% de los afectados están concentrados en la categoría A, por lo cual los desastres pertenecientes a estas categorías son los más importantes desde la perspectiva de número de afectados.

Es necesario ver cómo se comportan los desastres naturales respecto a los dos criterios, el número de ocurrencia y el número de afectados para poder definir si son relevantes para el estudio, por lo cual se creó la tabla 3 que separa los eventos de categoría A y B con más porcentaje de cada una de las tablas anteriores.

*Tabla 3. Clasificación ABC por afectados y ocurrencia. Fuente: Propia.*

Evento	Clasificación ABC por afectados	Clasificación ABC por ocurrencia
Inundación	A	A
Sequía	A	B
Deslizamiento	A	A
Vendaval	A	A
Lluvias	B	B
Avenida torrencial	B	B
Colapso estructural	B	B

Como se había mencionado los desastres naturales que consideramos relevantes para son los que se encuentren en categoría A en ambos criterios. Por esta razón los desastres naturales que consideramos relevantes para Colombia serán las inundaciones, los deslizamientos y los vendavales.



## 5.2. Desarrollo de modelos estocásticos que representan los desastres naturales más importantes en Colombia.

Se realizó la Clasificación ABC con las regiones Andina, Pacífico, Caribe, Amazonas, Orinoquía para determinar las más afectadas por los desastres naturales.

Tabla 4. Clasificación ABC por regiones. Fuente: Propia.

Numero	Región	Ocurrencia por región	% Ocurrencia por región	% Acumulado	Clasificación ABC
1	Andina	16.578	50,48%	50,48%	A
2	Pacífica	7.157	21,79%	72,27%	A
3	Caribe	6.420	19,55%	91,82%	B
4	Amazónica	1.743	5,31%	97,13%	C
5	Orinoquía	943	2,87%	100,00%	C
	Total	32.841	100,00%		

En la tabla 4 encontramos que las regiones más afectadas son Andina, Pacífica y Caribe, representando el 91,82% de los desastres en el país, por lo tanto, estas 3 regiones se seleccionaron como objeto de estudio. Esto se evidencia gráficamente en la ilustración 9.

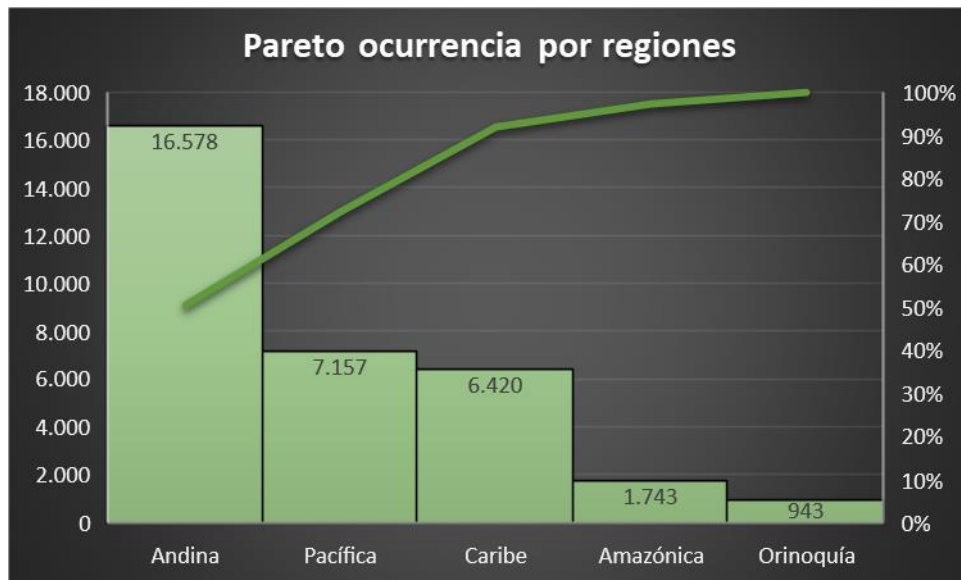


Ilustración 9. Pareto ocurrencia por regiones. Fuente: Propia.

Luego de seleccionar las regiones objeto de estudio la base de datos posee un total de 30.155 datos como se puede evidenciar en la tabla 5.

Tabla 5. Ocurrencia en las regiones seleccionadas. Fuente: Propia.

Numero	Región	Ocurrencia por región	% Ocurrencia por región
1	Andina	16.578	55,0%
2	Pacífica	7.157	23,7%
3	Caribe	6.420	21,3%
	Total	30.155	100%

Con el uso del código desarrollado en la metodología para el objetivo número dos, se realizaron siete modelos estocásticos que buscan describir el comportamiento a largo plazo de los desastres naturales seleccionados. Estos siete modelos estocásticos consisten en tres modelos hechos por regiones donde se muestra el comportamiento de los desastres naturales en cada una de las regiones, los siguientes tres por desastre natural los cuales buscan analizar el comportamiento de cada desastre en las regiones y el último es un modelo donde se busca analizar el comportamiento entre los distintos desastres y las regiones. El modelo de cadena de Márkov para Desastre\_Región es el modelo que presentó un mayor porcentaje de acierto en la prueba de validación que se mostrara en el resultado 5.3 sin embargo no fue el único modelo de este tipo realizado por lo que los demás modelos no seleccionados se mostraran como un anexo 2. Además, se realizó una cadena de Márkov de orden 2 con estos modelos la cual no logra representar los desastres naturales seleccionados debido a que no se poseen suficientes datos para que la matriz sea completada.

### 5.2.1. Cadena de Márkov para la Región Andina.

Los estados correspondientes para la matriz de probabilidad de transición de estados son:

Estado (I): Inundación

Estado (D): Deslizamiento

Estado (V): Vendaval

A partir de los datos de la región Andina se realizó una matriz de probabilidad de transición de estados o MPTE.

## Matriz de probabilidad de transición de estados (MPTE)

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} I & D & V \end{matrix} \\ \begin{matrix} I \\ D \\ V \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,65 & 0,23 & 0,11 \\ 0,27 & 0,67 & 0,06 \\ 0,16 & 0,32 & 0,52 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Ilustración 10. MPTE Región Andina. Fuente: Propia.

## Diagrama de transición de estados

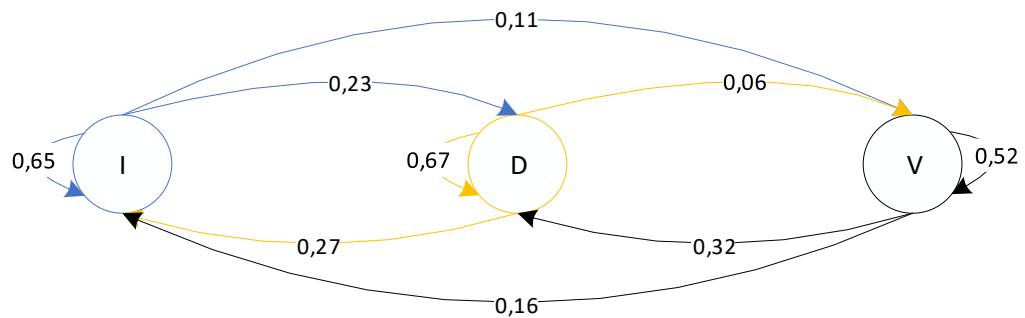


Ilustración 11. Diagrama de transición de estados Región Andina. Fuente: Propia.

Como se puede apreciar en el diagrama de transición de estados la matriz es recurrente positiva debido a que el proceso puede volver a pasar por cada estado una y otra vez de manera infinita por esto es irreducible; por otro lado, como la cadena puede regresar a cualquier estado no solamente en un número de pasos múltiplo de  $d > 1$  es aperiódica. Debido a que la matriz es irreducible positiva, recurrente y aperiódica es ergódica, por esta razón sus probabilidades límites existen y no dependerán del estado inicial y son iguales a las proporciones a largo plazo.

Mediante la ecuación 1 y 2 se obtuvieron las probabilidades de largo plazo ( $\pi_j$ ) para cada uno de los estados mostrados en la tabla 6.

$$\pi_j = \sum_{i=0}^{\infty} \pi_i P_{i,j}, j \geq 1$$

Ecuación 1. Proporciones de largo plazo. Fuente: Rolando Acosta.

$$\sum_{i=0}^{\infty} \pi_i = 1$$

Ecuación 2. Suma de las proporciones de largo plazo. Fuente: Rolando Acosta.

Tabla 6. Proporciones de largo plazo Región Andina. Fuente: Propia.

Inundación	0,41
Deslizamiento	0,43
Vendaval	0,15
	$\pi$

Esto quiere decir que en el largo plazo el 41% de los desastres en la región Andina son Inundaciones, el 43% deslizamientos y el 15% vendavales.

Haciendo uso de la ecuación 3 se pudo calcular el tiempo promedio de primer retorno ( $\mu_{jj}$ ). Esto para cada uno de los desastres.

$$\mu_{jj} = \frac{1}{\pi_j}, j = 1, 2, \dots, n$$

Ecuación 3. Tiempos promedio de primer retorno. Fuente: Rolando Acosta.

Tabla 7. Tiempos promedio de primer retorno Región Andina. Fuente: Propia.

Inundación	2,41
Deslizamiento	2,30
Vendaval	6,61
	$\mu$

Como se muestra en la tabla 7 en promedio se requieren 2.41 eventos para que se vuelva a presentar una Inundación, 2.30 eventos para que se vuelva a presentar un Deslizamiento y 6.61 eventos para que se presente nuevamente un Vendaval.

## 5.2.2. Cadena de Márkov para la Región Caribe

Los estados correspondientes para la matriz de probabilidad de transición de estados son:

Estado (I): Inundación.

Estado (V): Vendaval.

Estado (D): Deslizamiento.

A partir de los datos de la región Caribe se realizó una MPTE.

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} I & V & D \end{matrix} \\ \begin{matrix} I \\ V \\ D \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,86 & 0,11 & 0,03 \\ 0,32 & 0,63 & 0,05 \\ 0,67 & 0,13 & 0,20 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Ilustración 12. MPTE Región Caribe. Fuente: Propia.

### Diagrama de transición de estados

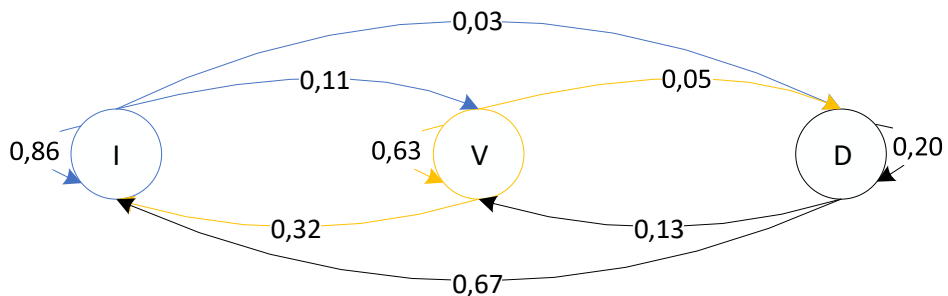


Ilustración 13. Diagrama de transición de estados Región Caribe. Fuente: Propia.

Esta cadena de Márkov es ergódica, por las mismas razones que se aplicaron para la cadena de Márkov de la región Andina. Por lo tanto, sus probabilidades límites existen y no dependerán del estado inicial y son iguales a las proporciones a largo plazo.

Mediante la ecuación 1 y 2 se obtuvieron las probabilidades de largo plazo ( $\pi_j$ ) para cada uno de los estados mostrados en la tabla 8.

*Tabla 8. Proporciones de largo plazo Región Caribe. Fuente: Propia.*

Inundación	0,73
Vendaval	0,22
Deslizamiento	0,05
	$\pi$

Esto quiere decir que en el largo plazo el 73% de los desastres en la región Caribe son Inundaciones, el 22% Vendavales y el 5% Deslizamientos.

Haciendo uso de la ecuación 3 se pudo calcular el tiempo promedio de primer retorno ( $\mu_{jj}$ ). Esto para cada uno de los desastres.

*Tabla 9. Tiempos promedio de primer retorno Región Caribe. Fuente: Propia.*

Inundación	1,37
Vendaval	4,50
Deslizamiento	21,84
	$\mu$

Según la tabla 9 en promedio se requieren 1.37 eventos para que se vuelva a presentar una Inundación, 4.50 eventos para que se vuelva a presentar un Vendaval y 21.84 eventos para que se presente nuevamente un Deslizamiento.

### **5.2.3. Cadena de Márkov para la Región Pacífico**

Los estados correspondientes para la matriz de probabilidad de transición de estados son:

Estado (I): Inundación.

Estado (D): Deslizamiento.

Estado (V): Vendaval.

A partir de los datos de la región Pacífico se realizó una MPTE.

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} I & D & V \end{matrix} \\ \begin{matrix} I \\ D \\ V \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,65 & 0,23 & 0,12 \\ 0,35 & 0,56 & 0,09 \\ 0,26 & 0,26 & 0,47 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Ilustración 14. MPTE Región Pacífico. Fuente: Propia.

### Diagrama de transición de estados

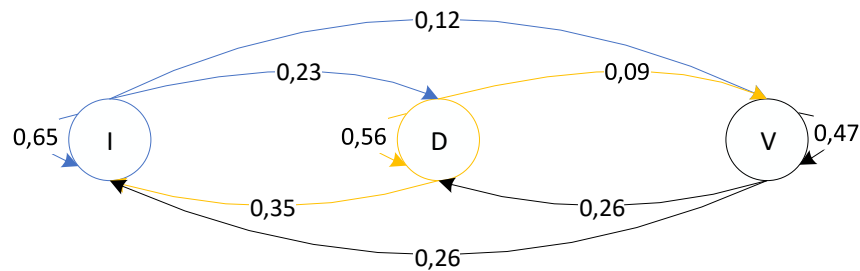


Ilustración 15. Diagrama de transición de estados Región Pacífica. Fuente: Propia.

Esta cadena de Márkov es ergódica, por las mismas razones que se aplicaron para la cadena de Márkov de la región Andina. Por lo tanto, sus probabilidades límites existen y no dependerán del estado inicial y son iguales a las proporciones a largo plazo.

Mediante la ecuación 1 y 2 se obtuvieron las probabilidades de largo plazo ( $\pi_j$ ) para cada uno de los estados mostrados en la tabla 10.

Tabla 10. Proporciones de largo plazo Región Pacífico. Fuente: Propia.

Inundación	0,48
Deslizamiento	0,35
Vendaval	0,17
	$\pi$

Esto quiere decir que en el largo plazo el 48% de los desastres en la región Pacífico son Inundaciones, el 35% Deslizamientos y el 17% Vendavales.

Haciendo uso de la ecuación 3 se pudo calcular el tiempo promedio de primer retorno ( $\mu_{jj}$ ). Esto para cada uno de los desastres.

Tabla 11. Tiempos promedio de primer retorno Región Pacífico. Fuente: Propia.

Inundación	2,07
Deslizamiento	2,85
Vendaval	5,99
	$\mu$

En promedio se requieren 2.07 eventos para que se vuelva a presentar una Inundación, 2.85 eventos para que se vuelva a presentar un Deslizamiento y 5.99 eventos para que se presente nuevamente un Vendaval.

#### 5.2.4. Cadena de Márkov para Inundaciones.

Los estados correspondientes para la matriz de probabilidad de transición de estados son:

Estado (A): Región Andina.

Estado (P): Región Pacífico.

Estado (C): Región Caribe.

**A partir de los datos de las inundaciones por región se generó la siguiente MPTE.**

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & P & C \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ P \\ C \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,67 & 0,17 & 0,16 \\ 0,33 & 0,53 & 0,14 \\ 0,24 & 0,10 & 0,66 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Ilustración 16. MPTE Inundaciones. Fuente: Propia.



## Diagrama de transición de estados

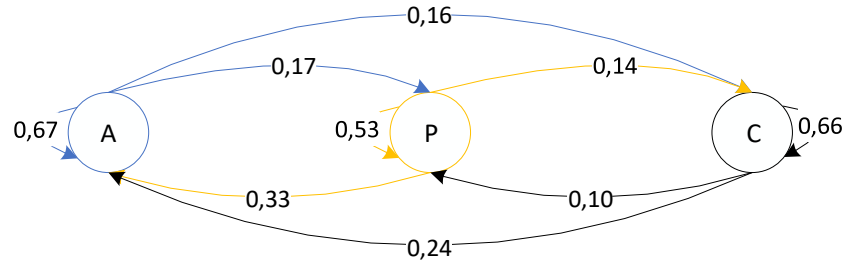


Ilustración 17. Diagrama de transición de estados Inundaciones. Fuente: Propia.

Esta cadena de Márkov es ergódica, por las mismas razones que se aplicaron para la cadena de Márkov de la región Andina. Por lo tanto, sus probabilidades límites existen y no dependerán del estado inicial y son iguales a las proporciones a largo plazo.

Mediante la ecuación 1 y 2 se obtuvieron las probabilidades de largo plazo ( $\pi_j$ ) para cada uno de los estados mostrados en la tabla 12.

Tabla 12. Proporciones de largo plazo Inundaciones. Fuente: Propia.

Andina	0,45
Pacífico	0,23
Caribe	0,32
	$\pi$

Esto quiere decir que en el largo plazo el 45% de las inundaciones ocurrirán en la región Andina, el 23% en la región Pacífico y el 32% en la región Caribe.

Haciendo uso de la ecuación 3 se pudo calcular el tiempo promedio de primer retorno ( $\mu_{jj}$ ). Esto para cada uno de los desastres.

Tabla 13. Tiempos promedio de primer retorno Inundaciones. Fuente: Propia.

Andina	2,20
Pacífico	4,35
Caribe	3,16
	$\mu$

En promedio como se evidencia en la tabla 13 se requieren 2.20 eventos para que se vuelva a presentar una Inundación en la región Andina, 4.35 eventos para que se vuelva a presentar en la región Pacífico y 3.16 eventos para que se presente nuevamente en la región Caribe.

### 5.2.5. Cadena de Márkov para Deslizamientos

Los estados correspondientes para la matriz de probabilidad de transición de estados son:

Estado (P): Región Pacífico.

Estado (A): Región Andina.

Estado (C): Región Caribe.

**A partir de los datos de las inundaciones por región se generó la siguiente MPTE.**

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} P & A & C \end{matrix} \\ \begin{matrix} P \\ A \\ C \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,49 & 0,48 & 0,02 \\ 0,17 & 0,80 & 0,03 \\ 0,18 & 0,66 & 0,16 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Ilustración 18. MPTE Deslizamientos. Fuente: Propia.

## Diagrama de transición de estados

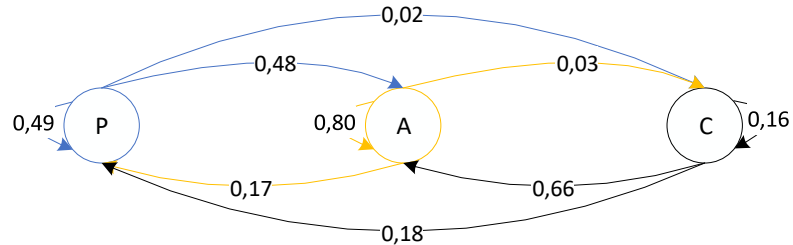


Ilustración 19. Diagrama de transición de estados Deslizamientos. Fuente: Propia.

Esta cadena de Márkov es ergódica, por las mismas razones que se aplicaron para la cadena de Márkov de la región Andina. Por lo tanto, sus probabilidades límites existen y no dependerán del estado inicial y son iguales a las proporciones a largo plazo.

Mediante la ecuación 1 y 2 se obtuvieron las probabilidades de largo plazo ( $\pi_j$ ) para cada uno de los estados mostrados en la tabla 14.

Tabla 14. Proporciones de largo plazo Deslizamientos Fuente: Propia.

Pacífico	0,25
Andina	0,72
Caribe	0,03
	$\pi$

Esto quiere decir que en el largo plazo el 25% de los Deslizamientos ocurrirán en la región Pacífica, el 72% en la región Andina y el 3% en la región Caribe.

Haciendo uso de la ecuación 3 se pudo calcular el tiempo promedio de primer retorno ( $\mu_{jj}$ ). Esto para cada uno de los desastres.

Tabla 15. Tiempos promedio de primer retorno Deslizamientos. Fuente: Propia.

Pacífico	3,96
Andina	1,39
Caribe	33,48
	$\mu$

De acuerdo a la tabla 15 en promedio se requieren 3.96 eventos para que se vuelva a presentar un Deslizamiento en la región Pacífico, 1.39 eventos para que se vuelva a presentar en la región Andina y 33.48 eventos para que se presente nuevamente en la región Caribe.

### 5.2.6. Cadena de Márkov para Vendavales

Los estados correspondientes para la matriz de probabilidad de transición de estados son:

Estado (A): Región Andina.

Estado (P): Región Pacífico.

Estado (C): Región Caribe.

**A partir de los datos de las inundaciones por región se generó la siguiente MPTE.**

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & P & C \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ P \\ C \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,60 & 0,21 & 0,19 \\ 0,40 & 0,34 & 0,25 \\ 0,35 & 0,19 & 0,46 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Ilustración 20. MPTE Vendavales. Fuente: Propia.

## Diagrama de transición de estados

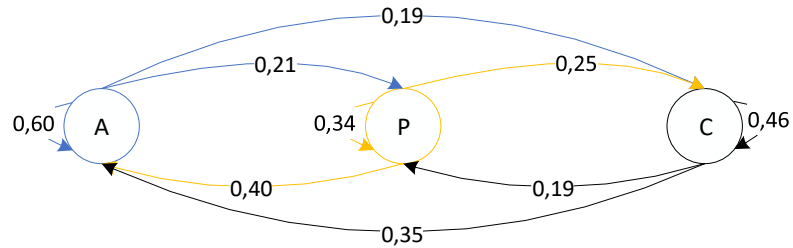


Ilustración 21. Diagrama de transición de estados Vendavales. Fuente: Propia.

Esta cadena de Márkov es ergódica, por las mismas razones que se aplicaron para la cadena de Márkov de la región Andina. Por lo tanto, sus probabilidades límites existen y no dependerán del estado inicial y son iguales a las proporciones a largo plazo.

Mediante la ecuación 1 y 2 se obtuvieron las probabilidades de largo plazo ( $\pi_j$ ) para cada uno de los estados mostrados en la tabla 16.

Tabla 16. Proporciones de largo plazo Vendavales. Fuente: Propia.

Andina	0,49
Pacífico	0,23
Caribe	0,28
$\pi$	

Esto quiere decir que en el largo plazo el 49% de los Vendavales ocurrirán en la región Andina, el 23% en la región Pacífico y el 28% en la región Caribe.

Haciendo uso de la ecuación 3 se pudo calcular el tiempo promedio de primer retorno ( $\mu_{jj}$ ). Esto para cada uno de los desastres.

Tabla 17. Tiempos promedio de primer retorno Vendavales. Fuente: Propia.

Andina	2,06
Pacífico	4,29
Caribe	3,55
$\mu$	

Según la tabla 17 en promedio se requieren 2.06 eventos para que se vuelva a presentar un Vendaval en la región Andina, 4.29 eventos para que se vuelva a presentar en la región Pacífico y 3.55 eventos para que se presente nuevamente en la región Caribe.

### **5.2.7. Cadena de Márkov para Desastre\_Región**

Después de realizar los análisis de los modelos anteriores encontramos que estos nos ofrecen información valiosa, pero tiene un alcance muy limitado al ser estudios regionales o por un único desastre, generando que los resultados estén limitados a una sola región o un solo desastre. Por lo tanto, se realizó un modelo que contenga información de cada desastre en cada región permitiendo tener un panorama general de como interactúan los desastres y las regiones en conjunto.

Los estados correspondientes para la matriz de probabilidad de transición de estados son:

Estado (IA): Inundación\_Andina.

Estado (DA): Deslizamiento\_Andina.

Estado (DP): Deslizamiento\_Pacífico.

Estado (IP): Inundación\_Pacífico.

Estado (VA): Vendaval\_Andina.

Estado (IC): Inundación\_Caribe.

Estado (VP): Vendaval\_Pacífico.

Estado (VC): Vendaval\_Caribe.

Estado (DC): Deslizamiento\_Caribe.

A partir de los datos de las regiones y los desastres se realizó una MPTE.

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} IA & DA & DP & IP & VA & IC & VP & VC & DC \end{matrix} \\ \begin{matrix} IA \\ DA \\ DP \\ IP \\ VA \\ IC \\ VP \\ VC \\ DC \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,53 & 0,11 & 0,03 & 0,11 & 0,06 & 0,10 & 0,03 & 0,03 & 0,01 \\ 0,16 & 0,55 & 0,11 & 0,05 & 0,03 & 0,07 & 0,02 & 0,02 & 0,01 \\ 0,17 & 0,20 & 0,37 & 0,12 & 0,03 & 0,08 & 0,02 & 0,02 & 0,01 \\ 0,15 & 0,14 & 0,06 & 0,43 & 0,07 & 0,07 & 0,05 & 0,04 & 0,00 \\ 0,08 & 0,20 & 0,06 & 0,04 & 0,38 & 0,05 & 0,09 & 0,08 & 0,01 \\ 0,15 & 0,08 & 0,02 & 0,07 & 0,04 & 0,58 & 0,02 & 0,03 & 0,01 \\ 0,09 & 0,20 & 0,07 & 0,05 & 0,20 & 0,06 & 0,20 & 0,12 & 0,01 \\ 0,07 & 0,17 & 0,05 & 0,03 & 0,18 & 0,07 & 0,10 & 0,32 & 0,01 \\ 0,14 & 0,35 & 0,11 & 0,03 & 0,02 & 0,18 & 0,02 & 0,03 & 0,13 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Ilustración 22. MPTE Desastre\_Región. Fuente: Propia.

### Diagrama de transición de estados

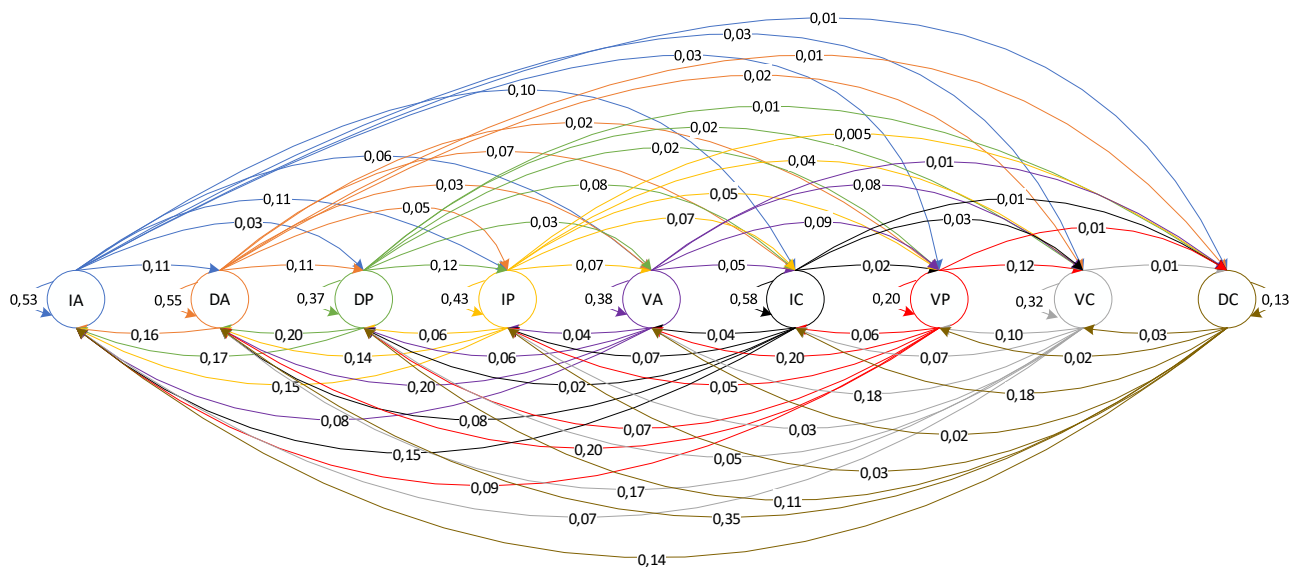


Ilustración 23. Diagrama de transición de estados Desastre\_Región. Fuente: Propia.

Esta cadena de Márkov es ergódica, por las mismas razones que se aplicaron para la cadena de Márkov de la región Andina. Por lo tanto, sus probabilidades límites

existen y no dependerán del estado inicial y son iguales a las proporciones a largo plazo.

Mediante la ecuación 1 y 2 se obtuvieron las probabilidades de largo plazo ( $\pi_j$ ) para cada uno de los estados mostrados en la tabla 18.

*Tabla 18. Proporciones de largo plazo Desastre\_Región Fuente: Propia.*

IA	0,23
DA	0,24
DP	0,08
IP	0,11
VA	0,08
IC	0,16
VP	0,04
VC	0,05
DC	0,01
	$\pi$

La tabla 18 nos muestra el porcentaje de ocurrencia que tendrá cada estado en el largo plazo. Estos resultados muestran que la Región Andina es la más afectada por los desastres naturales en Colombia, dado que en el largo plazo el 55% de los desastres naturales estudiados ocurrirán en esta región, siendo así la región más afectada por las inundaciones y los deslizamientos. Por otro lado, la Región Caribe es la menos afecta por estos desastres naturales con una ocurrencia del 22%, pero con una cantidad de inundaciones considerable presentando un 16% de los desastres estudiados en esta región.

Haciendo uso de la ecuación 3 se pudo calcular el tiempo promedio de primer retorno ( $\mu_{jj}$ ). El tiempo de primer retorno esta dado por la diagonal de la ilustración 24, por ejemplo, en promedio se requieren 4.41 eventos para regresar a Inundación en la región Andina. Haciendo uso de la ecuación 4 se pudo calcular el tiempo promedio del primer paso por el estado  $j$  iniciando en el estado  $i$  ( $\mu_{ij}$ ). Es decir, con esto se podrá saber cuántos eventos en promedio son necesarios para pasar de determinado estado a otro distinto. Estos resultados se encuentran expresados en la ilustración 24 por los valores que no conforman la diagonal, se leen de la siguiente forma:

- Se requieren en promedio 7,55 eventos para pasar de Inundación en la Región Andina (IA) a Deslizamiento en la Región Andina (DA).
- Se requieren en promedio 6,92 eventos para pasar de Deslizamiento en la Región Andina (DA) a Inundación en la Región Andina (IA).



	IA	DA	DP	IP	VA	IC	VP	VC	DC
IA	4,41	6,92	6,86	7,16	8	7,11	7,86	8,12	7,11
DA	7,55	4,21	6,62	7,06	6,36	8,11	6,35	6,57	5,53
DP	18,57	16,16	11,99	17,62	17,21	19,14	17,05	17,52	16,48
IP	12,70	13,90	12,60	8,72	14,40	13,51	14,19	17,76	14,16
VA	18,38	19,31	19,46	18,06	12,10	19,05	15,06	15,07	19,66
IC	12,23	12,91	12,70	13	13,35	6,34	13,24	13,06	11,31
VP	31,28	32,28	32,05	30,32	28,07	31,70	25,19	27,81	32,16
VC	30,34	31,24	31,04	29,74	27,65	29,99	26,67	20,85	30,73
DC	114,82	114,16	114,81	115,10	113,88	113,92	113,88	113,22	101,39

Ilustración 24. Matriz tiempos de primer retorno y paso. Fuente: Propia.

$$\|\mu_{ij}\| = (\mathbf{I} - \mathbf{N}_j)^{-1} \mathbf{1}, j \neq i$$

Ecuación 4. Ecuación tiempo promedio del primer paso por el estado  $j$  iniciando en el estado  $i$ . Fuente: Rolando Acosta.

Donde:

$\mathbf{I}$ : Matriz identidad de  $m - 1$

$\mathbf{N}_j$ : Matriz  $P$  sin fila  $j - \text{ésima}$  y sin columna  $j - \text{ésima}$  estado destino

$\mathbf{1}$ : Vector columna de  $(m - 1)$  con todos los elementos iguales a 1

Los resultados que se muestran en la matriz  $M$  son muy consecuentes con los resultados obtenidos en la tabla 18, dado que, como se observa cuando ocurre determinado desastre en una región, la Región Andina debería estar alerta por riesgo de inundaciones o deslizamientos, por lo cual se debería realizar una preparación adecuada para mitigar el posible efecto de estos desastres. Por otro lado, se observa que típicamente se requieren una gran cantidad de eventos para que ocurra un deslizamiento en la Región Caribe, debido que independientemente de que tipo de desastre natural ocurra en determinada región se requieren más de cien eventos para que tenga lugar este desastre, esto es acorde con el hecho de que el porcentaje de ocurrencia de deslizamientos en la Región Caribe es de 0.99%.

Por otro lado, se encuentra que cuando ocurre un deslizamiento en la Región Caribe la Región Andina debería prepararse para un posible deslizamiento próximo, esto es debido a que el tiempo de primer paso entre deslizamiento de la región caribe y deslizamiento en la región Andina es de tan solo 5,53 eventos; para prepararse ante esta eventualidad la Región Andina debería como medida preventiva impedir la construcción de viviendas en zonas de alto riesgo para disminuir la vulnerabilidad de la comunidad ante la amenaza de deslizamientos, y de forma reactiva debería hacer planes de evacuación para proteger a la comunidad que se encuentra vulnerable ante la posibilidad de este suceso.

### 5.3. Validación de la capacidad de los modelos estocásticos de representar la realidad de los desastres naturales seleccionados

Para realizar la validación se hicieron 500.000 ejecuciones de cada modelo tomando el porcentaje de acierto más bajo, el más alto y el promedio de aciertos. A continuación, se mostrarán los resultados para cada uno de los modelos.

Tabla 19. Validación. Fuente: Propia

	Región Andina	Región Caribe	Región Pacífico	Inundaciones	Deslizamientos	Vendavales	Desastre_Región
Ejecuciones	500000	500000	500000	500000	500000	500000	500000
Promedio	35,59%	56,15%	36,41%	36,82%	58,32%	58,32%	15,88%
Mínimo	27,45%	35,90%	21,92%	25,00%	46,04%	46,04%	10,98%
Máximo	44,79%	72,82%	51,03%	48,45%	68,94%	68,94%	22,20%
Datos de la matriz	2016	2016	2016	2016	2016	2016	2016
Predicción de	2017	2017	2017	2017	2017	2017	2017

A partir de los resultados obtenidos se observa que las predicciones son relativamente bajas y menores a lo que se podría esperar, pero encontramos que esto va en la misma línea de la teoría que afirma: A medida que aumenta el orden de las cadenas de Márkov mejora la precisión de los pronósticos.

Por otro lado, es evidenciado en el trabajo que las matrices tres por tres arrojan un mejor pronóstico que las matrices nueve por nueve y una matriz de orden dos no es posible de realizar con los datos existentes, lo cual nos muestra que entre más datos se tengan para generar una matriz la precisión de la predicción de esta va a ser mayor.

Al principio de la investigación se consideró la posibilidad de no obtener modelos que arrojaran porcentajes de aciertos altos, debido a que en los antecedentes se encontró que prácticamente no existían investigaciones mediante el método de cadenas de Márkov para los desastres naturales. Pero se evidencia en este trabajo que las cadenas de Márkov proporcionan información valiosa para entender el comportamiento de los desastres naturales en el largo plazo y poder formular planes de mitigación para los efectos que podrían tener dichos desastres.

## 6. Conclusiones

Después de realizar los diferentes modelos estocásticos mediante el uso de cadenas de Márkov propuestos en el presente trabajo, se encontraron varias conclusiones importantes, las cuales son:

- La predicción de las cadenas de Márkov es más acertada entre más datos se tengan y mayor sea el orden de la cadena, lo cual se convierte en una limitación a la hora de aplicar esta herramienta en el ámbito de los desastres naturales debido a que las bases de datos existentes no poseen una amplia cantidad de registros. No obstante, con el modelado estocástico mediante cadenas de Márkov de orden uno fue posible obtener información valiosa respecto a la comprensión del comportamiento de los desastres naturales en el largo plazo. Esto facilita el entendimiento del comportamiento aleatorio de los principales desastres naturales en las diferentes regiones del país.
- Se encontró que la Región Andina es la más afectada en Colombia por los desastres naturales estudiados, lo cual hace que esta región sea la más vulnerable en el país en este ámbito y requiera especial atención.
- En la Región Andina los deslizamientos y las inundaciones son los desastres naturales más relevantes debido a que en el largo plazo estos eventos tienen una ocurrencia del 43 y 41% respectivamente, por otro lado, en la Región Caribe las inundaciones son el desastre natural más común con un 73% de ocurrencia y finalmente en la Región Pacífico las inundaciones siguen siendo el evento más relevante debido a que representa un 48% de las ocurrencias de los desastres naturales estudiados.
- Este trabajo tiene como limitaciones la cantidad de datos disponibles sobre los desastres naturales en Colombia y las variables que fueron asumidas para la realización de este proyecto, las cuales son cantidad de afectados por desastre y número de ocurrencia de cada desastre. A pesar de dichas limitaciones, es un estudio pionero en la utilización de cadenas de Márkov para el análisis de los desastres naturales, el cual muestra los desastres más relevantes en Colombia y las regiones más vulnerables a la ocurrencia de dichos desastres, además, da una guía sobre qué tipo de desastre va a ocurrir en mayor proporción en cada región, permitiendo así la posibilidad de generar una mejor preparación para estos.

## 7. Recomendaciones

Las cadenas de Márkov son un método muy valioso para analizar el comportamiento en el largo plazo de variables estocásticas y se recomienda su uso cuando se posean una gran cantidad de datos y se puedan realizar cadenas de orden superior a uno.

Dado los hallazgos encontrados en este proyecto se recomienda a la UNGRD enfocar esfuerzos dentro del Plan Nacional de Gestión de Riesgos de Desastre en la región Andina, la cual es la más proclive a la ocurrencia de los principales desastres naturales en el país. Así mismo, tener en cuenta que en la Región Andina los esfuerzos se deben centrar en la prevención y mitigación de los efectos producidos por los deslizamientos e inundaciones, igualmente, tanto en la Región Caribe como en la Región Pacífico se debe centrar esfuerzos en las inundaciones.

Se recomienda la creación de una base de datos de desastres naturales de carácter público más robusta de las que existen actualmente, donde estas se actualicen en tiempo real y este nutrida por fuentes confiables de distintas procedencias.

Para futuros estudios se recomienda tener este proyecto como base e implementar el análisis con otras variables como pueden ser la cantidad de muertos por desastre o afectaciones a la infraestructura.

## BIBLIOGRAFÍA

- Cardona, O.D., Wilches-Chaux, G., García, X., Mansilla, E., Ramírez, F. and Marulanda, M. (2004), "Estudio sobre desastres ocurridos en Colombia: Estimación de pérdidas y cuantificación de costos", *Disponibles En: Http://Www. ...*, No. 84, p. 224.
- DNP. (2015), "3.181 muertos y 12,3 millones de afectados: las cifras de desastres naturales entre 2006 y 2014", available at: <https://www.dnp.gov.co/Paginas/3-181-muertos,-21-594-emergencias-y-12,3-millones-de-afectados-las-cifras-de-los-desastres-naturales-entre-2006-y-2014-.aspx> (accessed 16 October 2019).
- Hermelin, M. ed. (2005), "Desastres de origen natural en \_\_\_ - Búsqueda de libros de Google", available at: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=FhxXMyuLJ8oC&oi=fnd&pg=PA11&dq=desastres+natruales+colombia&ots=DgRnadFHU0&sig=UNH1Qp9dU5d4HfTyzM\\_j\\_SB242w#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=FhxXMyuLJ8oC&oi=fnd&pg=PA11&dq=desastres+natruales+colombia&ots=DgRnadFHU0&sig=UNH1Qp9dU5d4HfTyzM_j_SB242w#v=onepage&q&f=false) (accessed 16 October 2019).
- Maplecroft. (2010), "Natural Disasters Risk Index 2010 - Maps - Knowledge Base - PreventionWeb.net", available at: <https://www.preventionweb.net/english/professional/maps/v.php?id=14169> (accessed 16 October 2019).
- Narváez, L.; Lavell, A. y Pérez, G. (2009), *La Gestión Del Riesgo de Desastres: Un Enfoque Basado En Procesos*, available at: [www.comunidadandina.org](http://www.comunidadandina.org) (accessed 16 October 2019).
- Rodríguez López, N. (2016). *Impacto de los desastres naturales sobre el crecimiento económico en Colombia durante el periodo 1986 – 2015*.
- Altay, N., & Green, W. G. (2006). OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 175(1), 475–493. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.05.016>
- Baas ,Stephan; Ramasamy, Selvaraju; De Prick, Jennie Dey; Battista, F. (2009). Una Guía Sistemas de Gestión del Riesgo de Desastres. In *Serie sobre el medio ambiente y la gestión de los recursos naturales. Cambio climático, bioenergía, control y evaluación*. Retrieved from <http://www.fao.org>
- CEPAL. (2007). Información para la gestión de riesgos y desastres, estudio de caso de cinco países: Estudio de caso Colombia. *Sede Subregional de La CEPAL En México (Estudios e Investigaciones)*.

Liberman, G.J. and Hillier, F.S. (2010), "Introducción a la Investigación de Operaciones", *Introducción a La INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES*, Novena edi., available at:<https://doi.org/10.2307/j.ctt2111g6q.5>.

Minambiente. (2012), "Gestión del Riesgo de Desastres | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible", available at: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-del-riesgo-de-desastres#anexos> (accessed 18 October 2019).

OEA. (1991), "¿Qué son las amenazas naturales?", available at: <https://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea57s/ch005.htm> (accessed 30 October 2019).

## **ANEXOS**

Anexo 1. El código se encuentra en la carpeta Estocasticos\_Markov.

Anexo 2. Los modelos se muestran en el Excel “Matrices y predicciones”.