

MODELO MATEMÁTICO PARA LA PRIORIZACIÓN DE LA INTERVENCIÓN DE  
PUNTOS AFECTADOS POR EROSION DEL RIO SINÚ, UBICADO EN EL  
DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA.



ANDRÉS FELIPE CÁRDENAS ARRÁZOLA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
SECCIONAL MONTERIA

ESCUELA DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE INGENIERIA INDUSTRIAL  
MONTERIA, CORDOBA.

2024

MODELO MATEMÁTICO PARA LA PRIORIZACIÓN DE LA INTERVENCIÓN DE  
PUNTOS AFECTADOS POR EROSION DEL RIO SINÚ, UBICADO EN EL  
DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA.

ANDRES FELIPE CARDENAS ARRAZOLA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO INDUSTRIAL

ASESOR:  
PhD. ALFREDO DANIEL MORENO ARTEAGA.  
INGENIERO INDUSTRIAL

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
SECCIONAL MONTERIA  
ESCUELA DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE INGENIERIA INDUSTRIAL  
MONTERIA, CORDOBA.

2024.

Junio 14, 2024

Andrés Felipe Cárdenas Arrázola

“Declaro que este trabajo de grado no ha sido presentado para optar a un título, ya sea en igual forma o variaciones, en esta o en otra universidad” (Art.82.Acuerdo No.116 CD- de mayo 26 de 2000

## Dedicatoria

*Con todo cariño este proyecto va dedicado hacia mi familia y amigos, quienes me han demostrado y enseñado que no hay que rendirse cuando la vida está en tu contra. Por eso también dedico esta tesis a todas aquellas personas que sienten que su vida no mejora, que todo lo que hacen está mal, que son buenos de corazón aun cuando la sociedad no lo es con ellos, nunca pierdan la fe en ustedes, todo tiene solución, y a su tiempo lograrán ser felices, y se darán cuenta que no deben depender de los demás, pues eso los retrasa. **Andrés Felipe Cárdenas Arrázola.***

*Todo se termina cuando te rindes*

**Brook – One Piece.**

*Mi locura es otra realidad*

**El Sombrero Loco – Mägo de Oz.**

*Cuando las cosas no marchen como planeabas*

*Para y respira profundo*

**One in a Million – Twice.**

*Quiero ser yo mismo (no me importa)*

*Incluso si sigo siendo extraño*

*simplemente no me importa*

*Lo único que necesitaba era a mí mismo*

**Levanter – Stray Kids.**

*Por supuesto que tengo miedo, no todo está bien*

*Tengo que volverme loco para mantenerme sano*

*No puedes detenerme, porque sabes que soy un luchador*

*Incluso si caigo de rodillas al suelo, me levanto al instante y grito*

*Mientras no sean enterradas, eso no importará*

*Gana, pase lo que pase*

**ON – BTS**

## **Agradecimientos**

Todas las cosas que nos suceden en la vida tienen un motivo. Por eso hoy quiero agradecer primeramente por la fortaleza que me dio Dios y por todo mi proceso de pregrado, en el cual adquirí los conocimientos necesarios para realizar este trabajo, sin mencionar la que tuve en medio de la adversidad realizando este trabajo.

Agradezco a mi familia, especialmente mi abuelo Luis Carlos Arrázola González, por ser mi Ilustración paterna y ejemplo a seguir e inspiración, por su sabiduría e iluminación a lo largo de todos estos años para cumplir mis metas, propósitos y objetivos, mi madre, tías y hermana Beatriz, Lucía Teresa, María del Rosario y María José Arrázola Pérez, a todas ellas les agradezco su apoyo y amor, y gracias a todos ellos soy quien soy hoy en día. A mis hermanos paternos Germán y David Cárdenas, por todo el apoyo y respaldo de todos estos años, aconsejándome desde sus experiencias de vida.

A mis amigos, principalmente Iván Antonio Higuabita González por su paciencia, tolerancia, sinceridad y apoyo brindado en todos estos años y que siempre estuvo para apoyarme, desahogarme, aconsejarme, guiarme, orientarme, ser de soporte y ayudarme a poner los pies sobre la tierra cuando lo requería, también Carlos Fernando García Guerra, Laura Vanessa Pedroza Díaz, Diana Carolina Benedetti Arguello, Hugo Daniel López Argumedo, Boris Andrés Doval Martínez, Urías Humberto Oyaga Sánchez y los miembros de “Partido RP” y “Team Ereh” por todo su acompañamiento en mi vida. Mis amigos miembros de “el grupo de la sala de descanso”, principalmente Antonio Kerguelen Garcés, Luis Fernando Peña Cabarcas, Jorge David Berrocal Echeverría, Mario José Macea Lobo y los demás, que, gracias a ellos logré conocerme, aceptarme, superarme, y luchar por mis propósitos.

A mis compañeros, de quienes semestre a semestre siempre aprendí algo, sus vidas han sido experiencias, experiencias de las cuales siempre encontré momentos de fortaleza para seguir adelante

o incluso me tendieron la mano aun cuando no veía posibilidades para salir de la penumbra, por eso les agradezco, especialmente Andrés Felipe Herrera Flandorffer, Daren Dayani Osorio Burgos, Jammy Alexandra Teherán Flórez, Andrés Felipe Montoya Luna, Fernando José Álvarez Petro, Diego Andrés Moreno López, han sido un gran apoyo en mi carrera.

A mis docentes, inicialmente mi asesor Alfredo Daniel Moreno Arteaga, por su gran apoyo, ayuda, paciencia, esfuerzo y dedicación. Así como también todos aquellos que me brindaron su guía, orientación y conocimiento a través de cada una de las materias cursadas a través de mi carrera profesional, tanto las asignaturas del ciclo profesional, como las del ciclo básico universitario, ciclo básico disciplinar y ciclo de integración.

## Tabla de contenido

Dedicatoria .....	iv
Agradecimientos .....	v
Resumen: .....	13
Abstract .....	14
<b>1. Generalidades</b>	<b>15</b>
1.1. Introducción	15
1.2. Planteamiento Del Problema .....	16
1.3. Justificación.....	19
1.4. Objetivos.....	21
1.4.1. <i>Objetivo General</i> .....	21
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	22
1.5. Metodología.....	22
1.6. Estructura Del Trabajo.....	23
<b>2. Estado Del Arte</b>	<b>25</b>
2.1. Marco Teórico y Conceptos	25
2.1.1. <i>Amenaza</i> .....	25
2.1.1.1. Inundaciones. ....	26
2.1.1.1. Erosión.....	26
2.1.2. <i>Vulnerabilidad</i> .....	26
2.1.3. <i>Riesgo</i> .....	27
2.1.4. <i>Factor De Riesgo</i> .....	28
2.1.5. <i>Gestión Del Riesgo</i> .....	28

2.1.6.	<i>Medidas De Intervención</i> .....	30
2.1.7.	<i>Modelo De Asignación</i> .....	30
2.1.8.	<i>Programación Lineal Entera.</i> .....	33
2.1.9.	<i>Programación Lineal Entera Binaria.</i> .....	34
2.1.10.	<i>Problema De La Mochila (Knaspack Problem)</i> .....	38
2.2.	<b>Antecedentes</b>	38
2.2.1.	<i>Riesgo</i> .....	39
2.2.1.1.	<b>Protocolo Control De Erosión Del Río Sinú 2021</b> .....	39
2.2.1.2.	<b>Protocolo Control De Erosión Del Río Sinú 2022</b> .....	43
2.2.1.3.	<b>Protocolo Control De Erosión Del Río Sinú 2023</b> .....	47
2.2.2.	<i>Vulnerabilidad</i> .....	50
2.2.2.1.	<b>Vulnerabilidad Ante Erosión. Ejemplo Lorica – Córdoba</b> .....	51
2.2.3.	<i>Modelos De Programación</i> .....	51
2.2.3.1.	<b>Modelo De Programación Lineal Estocástico Para La Coordinación Logística De Suministros Humanitarios Hacia Las Áreas Afectadas Por Inundaciones En Colombia.</b> .....	52
2.2.3.2.	<b>Modelos, Soluciones y Tecnologías Habilitadoras En Logística Humanitaria</b> .....	53
2.2.3.3.	<b>Modelado De Operaciones De Respuesta A Emergencias: Una Encuesta De Construcción De Teoría.</b> .....	53
2.2.3.4.	<b>Modelos Matemáticos En La Gestión De La Cadena De Suministro Humanitaria: Una Revisión Sistemática De La Literatura</b> .....	54
2.2.3.5.	<b>Modelo De Asignación De Recursos En Atención Primaria</b> .....	55
2.2.3.6.	<b>Modelación Hidrodinámica Para Estimar Escenarios De Inundación Bajo Diferentes Regímenes De Precipitación. Aplicación Al Río Sinú, Tramo Montería</b> . 56	
3.	<b>Modelación Matemática</b>	57
4.	<b>Construcción Del Caso De Estudio</b>	60
4.1.	<b>Descripción De Los Puntos Afectados</b>	60
4.2.	<b>Niveles De Intervención</b> .....	67
4.3.	<b>Costos Y Presupuesto</b> .....	70



<b>5.</b>	<b>Vulnerabilidad, Riesgo y Amenaza.</b>	<b>71</b>
<b>5.1.</b>	<b>Amenaza.</b>	<b>71</b>
<b>5.2.</b>	<b>Vulnerabilidad.</b>	<b>75</b>
<b>5.3.</b>	<b>Riesgo.</b>	<b>81</b>
<b>6.</b>	<b>Resultados Computacionales</b>	<b>83</b>
<b>6.1.</b>	<b>Presupuesto Ideal.</b>	<b>84</b>
<b>6.2.</b>	<b>Modelo Principal</b>	<b>85</b>
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y Trabajos Futuros</b>	<b>95</b>
<b>8.</b>	<b>Referencias</b>	<b>97</b>
<b>9.</b>	<b>Anexos</b>	<b>100</b>
<b>9.1.</b>	<b>A</b>	<b>100</b>
<b>9.2.</b>	<b>B</b>	<b>100</b>
<b>9.3.</b>	<b>C</b>	<b>101</b>
<b>9.4.</b>	<b>D</b>	<b>101</b>
<b>9.5.</b>	<b>E</b>	<b>101</b>

## Lista De Ilustraciones

<i>Ilustración 1</i> .....	16
<i>Ilustración 2</i> .....	40
<i>Ilustración 3</i> .....	41
<i>Ilustración 4</i> .....	41
<i>Ilustración 5</i> .....	42
<i>Ilustración 6</i> .....	43
<i>Ilustración 7</i> .....	44
<i>Ilustración 8</i> .....	44
<i>Ilustración 9</i> .....	45
<i>Ilustración 10</i> .....	45
<i>Ilustración 11</i> .....	46
<i>Ilustración 12</i> .....	47
<i>Ilustración 13</i> .....	48
<i>Ilustración 14</i> .....	48
<i>Ilustración 15</i> .....	49
<i>Ilustración 16</i> .....	50
<i>Ilustración 17</i> .....	62
<i>Ilustración 18</i> .....	64
<i>Ilustración 19</i> .....	65
<i>Ilustración 20</i> .....	66
<i>Ilustración 21</i> .....	68
<i>Ilustración 22</i> .....	68
<i>Ilustración 23</i> .....	69
<i>Ilustración 24</i> .....	70
<i>Ilustración 25</i> .....	87
<i>Ilustración 26</i> .....	87
<i>Ilustración 27</i> .....	88
<i>Ilustración 28</i> .....	89
<i>Ilustración 29</i> .....	90
<i>Ilustración 30</i> .....	91
<i>Ilustración 31</i> .....	92
<i>Ilustración 32</i> .....	93
<i>Ilustración 33</i> .....	94

## Lista De Ecuaciones

<i>Ecuación 1</i> .....	31
<i>Ecuación 2</i> .....	32
<i>Ecuación 3</i> .....	32
<i>Ecuación 4</i> .....	32
<i>Ecuación 5</i> .....	33
<i>Ecuación 6</i> .....	34
<i>Ecuación 7</i> .....	35
<i>Ecuación 8</i> .....	35
<i>Ecuación 9</i> .....	35
<i>Ecuación 10</i> .....	36
<i>Ecuación 11</i> .....	36
<i>Ecuación 12</i> .....	37
<i>Ecuación 13</i> .....	37
<i>Ecuación 14</i> .....	58
<i>Ecuación 15</i> .....	58
<i>Ecuación 16</i> .....	58
<i>Ecuación 17</i> .....	58
<i>Ecuación 18</i> .....	58
<i>Ecuación 19</i> .....	59
<i>Ecuación 20</i> .....	74
<i>Ecuación 21</i> .....	80
<i>Ecuación 22</i> .....	82
<i>Ecuación 23</i> .....	84
<i>Ecuación 24</i> .....	84
<i>Ecuación 25</i> .....	85

## Lista de Tablas

<i>Tabla 1</i>	17
<i>Tabla 2</i>	21
<i>Tabla 3</i>	36
<i>Tabla 4</i>	61
<i>Tabla 5</i>	61
<i>Tabla 6.</i>	62
<i>Tabla 7</i>	65
<i>Tabla 8</i>	66
<i>Tabla 9</i>	67
<i>Tabla 10</i>	71
<i>Tabla 11</i>	72
<i>Tabla 12</i>	73
<i>Tabla 13</i>	74
<i>Tabla 14</i>	75
<i>Tabla 15</i>	76
<i>Tabla 16</i>	77
<i>Tabla 17</i>	78
<i>Tabla 18</i>	79
<i>Tabla 19</i>	81
<i>Tabla 20</i>	82
<i>Tabla 21</i>	85
<i>Tabla 22</i>	86
<i>Tabla 23</i>	90
<i>Tabla 24</i>	91
<i>Tabla 25</i>	92
<i>Tabla 26</i>	93
<i>Tabla 27</i>	94

## **Resumen:**

Esta investigación propone una alternativa para la organización y la priorización de acciones con el fin de prever o mitigar los impactos de desastres naturales causados por inundaciones y la erosión generada por el cauce del río Sinú, haciendo uso de la programación lineal para la optimización de recursos, con el fin de asignar medidas de intervención a los puntos afectados de las municipalidades a través de la información recaudada en un intervalo de 18 años, dando como resultado un modelo matemático propuesto para priorizar puntos afectados y minimizar el riesgo de inundación y erosión presente en el Río Sinú en la zona en estudio. Se enfoca en el desarrollo de una metodología integral para la asignación óptima de recursos destinados a la protección de las zonas afectadas, cumpliendo con el objetivo principal, el cual es determinar a través de un modelo matemático la distribución eficiente de los recursos y la generación de un orden de priorización de puntos críticos identificados disponibles para intervenir, maximizando así el impacto positivo de las medidas de mitigación y reduciendo al mínimo los riesgos asociados con futuros desbordamientos y erosiones. Al utilizar variables binarias y considerar múltiples factores como el presupuesto disponible, el costo de intervención, la vida útil e impacto de esta, el modelo optimiza la asignación de recursos a lo largo del tiempo, ofreciendo una solución práctica y adaptable para la gestión del riesgo en la región.

**Palabras clave:** Asignación de recursos, Amenaza, Vulnerabilidad, Riesgo, Gestión del riesgo, Inundaciones, Erosión, Investigación operativa.

## **Abstract**

This research proposes an alternative for the organization and prioritization of actions in order to foresee or mitigate the impacts of natural disasters caused by floods and erosion generated by the Sinu riverbed, making use of linear programming for the optimization of resources, in order to assign intervention measures to the affected points of the municipalities through the information collected in an interval of 18 years, resulting in a mathematical model proposed to prioritize affected points and minimize the risk of flooding and erosion present in the Sinu river in the area under study. It focuses on the development of an integral methodology for the optimal allocation of resources for the protection of affected areas, fulfilling the main objective, which is to determine through a mathematical model the efficient distribution of resources and the generation of an order of prioritization of identified critical points available for intervention, thus maximizing the positive impact of mitigation measures and minimizing the risks associated with future flooding and erosion. By using binary variables and considering multiple factors such as available budget, intervention cost, intervention life and impact, the model optimizes the allocation of resources over time, offering a practical and adaptable solution for risk management in the region.

**Keywords:** Resource allocation, Hazard, Vulnerability, Risk, Risk management, Floods, Erosion, Operational research.

# 1. Generalidades

## 1.1. Introducción

Los fenómenos naturales suponen un riesgo continuo para la seguridad y el bienestar de las comunidades humanas a nivel mundial. El cambio climático, junto con otros factores ambientales y socioeconómicos, ha magnificado la intensidad y frecuencia de estos eventos, aumentando su impacto en las poblaciones vulnerables. En Colombia, un país altamente expuesto a fenómenos climáticos extremos, las inundaciones son uno de los desastres más recurrentes y devastadores, causando pérdidas humanas, económicas, sociales y ambientales significativas cada año.

Una región particularmente afectada por estos eventos es la zona en estudio (departamento de Córdoba), ubicado en la costa caribe del país. En esta zona, el cauce del Río Sinú se ha convertido en un punto crítico de riesgo, enfrentando desbordamientos y erosiones que amenazan la vida y la propiedad de miles de personas que viven a lo largo de su ribera, según datos proporcionados por la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS). Con el pasar de los años se ha visto un aumento de afectados y los daños económicos causados por inundaciones en la región, lo que subraya la implementación de medidas eficientes de prevención y mitigación.

En respuesta a esta problemática, el enfoque del presente trabajo de investigación desarrolla un método integral que asigna de forma óptima los recursos destinados a la protección de las zonas vulnerables a lo largo del Río Sinú. El objetivo principal es determinar a través de un modelo matemático la distribución eficiente de los recursos y la generación de un orden de priorización de puntos críticos identificados disponibles para intervenir, maximizando así el impacto positivo de las medidas de mitigación y reduciendo al mínimo los riesgos asociados con futuros desbordamientos y erosiones.

A través de un enfoque basado en modelos matemáticos y análisis de riesgos, se busca ofrecer una solución innovadora y científicamente fundamentada en una problemática real y urgente en la región del Río Sinú. Al integrar aspectos de vulnerabilidad, riesgo y amenaza

en un marco analítico y metodológico; se espera contribuir significativamente a la resiliencia de las comunidades afectadas y al desarrollo sostenible de la región.

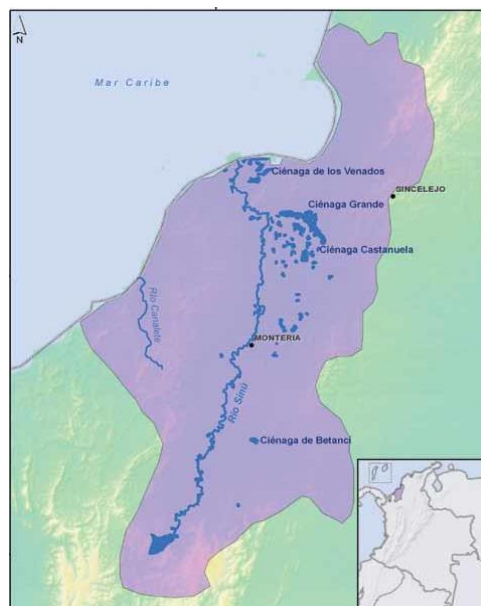
En las siguientes secciones del presente documento, se presenta un análisis de literatura y modelos matemáticos aplicados a la asignación de recursos. Posteriormente, se detalla la metodología propuesta, incluyendo la construcción del modelo matemático, la validación de resultados y el análisis de las soluciones obtenidas. Finalmente, se presentan las deducciones obtenidas con base en el desarrollo de todo el proyecto.

## 1.2. Planteamiento Del Problema

El Río Sinú es un cauce perteneciente a la región caribe colombiana, naciendo del Nudo del Paramillo, Antioquia, a 3960 msnm, desembocando en el Mar Caribe, la longitud del río se estima en alrededor de unos 415 km, posee una cavidad de 13000 km<sup>2</sup>, pasando por 8 municipalidades de la zona en estudio (Olaya Nieto, Tordecilla Petro, & Segura Guevara, 2008). En la Ilustración 1. se muestra un mapa del Río Sinú y su respectivo trayecto, iniciando en la municipalidad de Tierralta, hasta llegar a la municipalidad de San Bernardo del Viento.

*Ilustración 1.*

*Mapa del Río Sinú.*



*(Ramírez-Gil, Ajiaco-Martínez, & Lasso, 2011).*



Los años recientes han presentado un aumento en las precipitaciones durante diversas temporadas. Esta situación plantea la posibilidad de que el riesgo de desbordamiento del Río Sinú aumente en 206 ubicaciones consideradas como críticas por la CVS, dados a conocer a través de un informe realizado en el año 2021. (CVS, 2021)

El 10 de mayo de 2022, la zona en estudio declaró estado de calamidad pública a través del Decreto No. 00439, debido a las intensas lluvias y otros fenómenos naturales adversos. Este estado de emergencia se extendió a 28 municipalidades, entre ellos las municipalidades por donde pasa el Río Sinú desde Tierralta hasta San Bernardo del Viento. Según el IDEAM, en julio de 2022, se observó un debilitamiento de las temperaturas en el centro – oriente del océano Pacífico ecuatorial. Estas circunstancias sugieren una influencia del fenómeno de La Niña en el clima regional. El año 2022 presentó fuertes lluvias, sobrepasando los 0,01 km<sup>3</sup>/h en lo alto del Río Sinú donde se ubica la represa de Urrá. Adicionalmente se presentaron más de 42.000 perjudicados por el desborde. (CVS, 2022). En la Tabla 1 se presentan las resoluciones relacionadas:

*Tabla 1*

*Actos administrativos de las municipalidades del área de estudio.*

No.	Decreto No. – Municipalidad.	Mes (2022)
1	027 – Tierralta	Febrero
2	051 – Valencia	Abril
3	273 – Montería	Mayo
4	063 – Cereté	Abril
5	257 – San Pelayo	Mayo
6	140 – Cotorra	Junio
7	472 – Loricá	Mayo
8	146 – San Bernardo del Viento	Abril

*Fuente: Alcaldías y Gobernación de Córdoba.*

La vulnerabilidad, según la ley 1523 de 2012 es fragilidad en aspectos físicos, económicos, sociales, ambientales o institucionales que presenta una población para sufrir impactos desfavorables si ocurriese una situación peligrosa. (Congreso Colombiano, 2012).

Sobre el aumento del riesgo de desbordamiento del Río Sinú debido a las intensas lluvias y otros fenómenos naturales adversos, así como las declaratorias de calamidad pública

en varias municipalidades a lo largo de su curso, resulta evidente la urgencia de adoptar acciones de intervención estructurales para mitigar los efectos de estos eventos. En este contexto, se plantea que este proyecto se enfoque en la optimización de recursos destinados al tratamiento de la erosión aplicando de diversas técnicas como mantos permanentes, hidromallas, formaletas geotextiles, entre otras, con el fin de proteger las áreas vulnerables a lo largo del río. Sin embargo, se reconoce la limitación de recursos, tanto económicos como de insumos, lo cual puede afectar la capacidad de implementar todas estas medidas de manera simultánea.

Considerando el contexto de aumento de precipitaciones y eventos climáticos adversos en la región de la zona en estudio, específicamente a lo largo del Río Sinú, surge la necesidad de plantear estrategias efectivas para reducir el riesgo de inundaciones y erosión. En este sentido, se desarrolla la pregunta de investigación: ¿Qué modelo matemático es adecuado para la generación del orden de prioridad de los puntos afectados con el fin de minimizar el riesgo por inundación y erosión del río Sinú en el departamento de Córdoba?

### **1.3. Justificación**

El abordaje efectivo de la problemática asociada al aumento del nivel del Río Sinú y los eventos climáticos adversos en la zona en estudio requiere una metodología integral que considere los aspectos de vulnerabilidad, riesgo y amenaza. En este contexto, el proyecto desarrollará una metodología basada en un modelo matemático enfocado a la asignación de recursos, con el objetivo de optimizar la protección de las zonas vulnerables a lo largo del río.

En junio de 2017, siete barrios y cinco corregimientos de Loricá, Córdoba, enfrentaron una emergencia debido al desbordamiento del Río Sinú, afectando a unas mil familias. Las autoridades enviaron 20,000 costales de arena para mitigar la situación, pero los habitantes trabajaron intensamente para evitar que sus hogares fueran inundados. El polideportivo local y varias aulas escolares también resultaron afectados. (Noticias RCN, 2017)

Para el año 2021 la CVS identificó 206 puntos críticos a lo largo del Río Sinú con alto riesgo de desbordamiento. En Montería, se identificaron 51 lugares vulnerables. La Gobernación de Córdoba anunció el proyecto que busca construir un muro de contención en Tierralta para proteger a las comunidades más afectadas. También se está trabajando en la reactivación de comités locales de emergencias para mejorar las alertas tempranas y la gestión de riesgos. (Montaño, 2020)

El defensor del Pueblo en Córdoba, Ricardo Madera, solicitó acciones inmediatas para mitigar los riesgos en zonas vulnerables como Puerto Escondido y el Bajo Sinú. A pesar de la situación crítica y los fenómenos naturales recientes, muchas familias aún no han recibido ayuda y viven en condiciones de alta vulnerabilidad. Madera enfatizó la necesidad de una colaboración efectiva entre la UNGRD y las entidades territoriales. (Hernández, WRadio, 2023)

Erasmó Zuleta Bechara, Gobernador de Córdoba, pidió al Gobierno Nacional un estudio detallado sobre la dinámica del Río Sinú para entender mejor las causas de las recurrentes inundaciones y sequías. Desde la construcción del embalse de Urrá, no se ha

realizado un análisis exhaustivo, lo que ha dejado a la región vulnerable a estos fenómenos naturales, afectando al 60% del departamento. (La razón, 2024).

El 22 de mayo de 2024, el municipio de Lórica, en el Bajo Sinú, sufrió inundaciones en siete sectores debido a dos horas de intensas lluvias. Las áreas afectadas incluyen San Vicente, Kennedy, Arenal, San Pedro, Paraíso, Medio Oriente y la Avenida Bicentenario. Los canales de desagüe, obstruidos y colapsados, no pudieron contener el agua, lo que causó desbordamientos en las calles. Se espera que la situación mejore en las horas de la tarde. Durante esta semana, se pronostican más lluvias intensas en Córdoba debido que la temporada de lluvias de 2024 ha comenzado, especialmente en Montería y la zona costera. (Hernández, WRadio, 2024).

Esta metodología se fundamenta en la necesidad de encarar los obstáculos surgidos debido a la variación climática y la creciente magnitud y periodicidad de los sucesos en el área. Al utilizar un enfoque basado en modelos matemáticos, se busca aumentar y mejorar la gestión al momento de asignar los recursos limitados, disminuyendo el riesgo presente y priorizando las intervenciones en los puntos afectados identificados mediante el análisis de vulnerabilidades y amenazas.

Este proyecto mantiene su importancia en la capacidad para entregar una solución integral y sistemática a una problemática real y urgente en la región del Río Sinú. Al optimizar la protección de las comunidades afectadas y reducir los riesgos asociados a las inundaciones y la erosión, se contribuye significativamente a la resiliencia de la región frente a eventos extremos. La utilización de un modelo matemático permite identificar las intervenciones más efectivas y priorizar su implementación, maximizando así el uso de los recursos disponibles, pese a la escasez de estos. En la Tabla 2, de fuente propia, se presenta una compilación de presupuestos para proyectos desde el 2018 hasta el 2022. Esta información se extiende en el Anexo E (Sección 9.5).

Tabla 2

*Histórico Presupuestos Gestión de Riesgo*

<b>AÑO</b>	<b>PRESUPUESTO (COP)</b>
2018	\$ 310.727.717
2019	\$ 339.306.230
2020	\$ 427.399.257
2021	\$ 8.059.385.620
2022	\$ 1.044.432.463

La metodología propuesta proporciona información valiosa para la resolución de riesgos, contribuyendo a un desarrollo sostenible y resiliente. Al proteger las zonas vulnerables a lo largo del Río Sinú, se minimizan los impactos negativos de los eventos extremos, tanto en términos de pérdidas materiales como de vidas humanas.

El enfoque basado en modelos matemáticos es altamente adaptable a diferentes contextos y escenarios, lo que facilita su aplicación en otras regiones afectadas por problemas similares, permitiendo replicaciones del modelo en contextos de asignación.

El presente proyecto aporta significativamente a investigación de operaciones, que constituye la rama central de la temática abordada. Al desarrollar y aplicar modelos matemáticos para optimizar recursos y decidir en situaciones complejas y dinámicas, se fortalece la información en esta rama y se abre espacio para nuevas investigaciones y desarrollos metodológicos.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Determinar a través de un modelo matemático la distribución eficiente de los recursos y la generación de un orden de priorización de puntos críticos identificados disponibles para intervenir, maximizando así el impacto positivo de las medidas de mitigación y reduciendo al mínimo los riesgos asociados con futuros desbordamientos y erosiones.

#### **1.4.2. *Objetivos Específicos***

- Identificar los modelos existentes de asignación de recursos que pueden ser utilizados para representar el problema en estudio.
- Diseñar un modelo matemático con el fin de solventar la ausencia de un sistema automatizado de priorización de puntos afectados.
- Definir los aspectos de vulnerabilidad, riesgo y amenaza que serán utilizados para la priorización de los puntos afectados.
- Ejecutar experimentos computacionales aplicados al caso en estudio.

#### **1.5. Metodología**

Se construirá un modelo matemático con base en un problema observado en la práctica como lo es el de la asignación de recursos para la priorización de puntos afectados en riesgo de inundación teniendo en cuenta aspectos de vulnerabilidad de las comunidades. Las fases para cumplir los objetivos del proyecto serán mostradas a continuación.

- Revisión de literatura: El presente trabajo parte desde la revisión de literatura, la cual está enfocada en dos principales puntos. El primero está relacionado con el problema de priorización de puntos afectados, como está siendo abordado este problema y como se define el riesgo con base en la vulnerabilidad y amenaza. El segundo punto consiste en una toma de inspiración de modelos matemáticos para la asignación de recursos y en como esos modelos han sido utilizados en el problema en cuestión o problemas relacionados. Se revisaron artículos científicos, tesis y reportes con temáticas similares a la estudiada en este proyecto.
- Definición de datos: Posterior al análisis bibliográfico, se organizarán los datos formalmente, estableciendo los datos disponibles y organizando la información obtenida a través de la CVS y otras entidades.

- Construcción del modelo matemático: Luego de haber establecido los datos se procederá a realizar la formulación del modelo de asignación con los datos obtenida, se espera que dicho modelo sea válido y replicable.
- Construcción de la instancia de estudio: Debido a que la CVS es una entidad ligada a la temática de enfoque del presente trabajo, se tuvo presente los puntos afectados que dicha entidad determinó y su justificación del porqué fueron denominados puntos afectados, se utilizaron diferentes matrices, que se muestran en el presente documento. Adicionalmente, más adelante se mostró el proceso de obtención de datos para tener en cuenta en el modelo matemático. Luego de tener los datos, se establecieron los parámetros y variables para el desarrollo del modelo, teniendo en cuenta factores económicos como presupuesto, las intervenciones por asignar y el nivel de riesgo de los puntos afectados.
- Validación del modelo matemático: A partir de la instancia construida, se realizaron experimentos computacionales preliminares alterando los parámetros del modelo con datos aleatorios con el fin de validar que las soluciones obtenidas tuvieran sentido en la práctica.
- Experimentos computacionales: Una vez el modelo sea validado, se rodarán experimentos computacionales con la instancia basada en datos reales obtenidos de las fuentes mencionadas y en compañía de un ingeniero civil experto en proyectos y taludes.
- Análisis de resultados: Luego de los pasos anteriores, se continuó con el análisis de los resultados obtenidos gracias a dicho modelo, para finalizar con las conclusiones por parte de los resultados y del modelo.

## **1.6. Estructura Del Trabajo**

En los siguientes capítulos se presenta:

Estado del Arte: Este capítulo se subdivide en dos secciones: Marco Teórico y Conceptos, y Antecedentes. En la primera parte, se abordan los conceptos y teorías fundamentales necesarios para comprender el presente trabajo. En la segunda parte, se

revisan trabajos e informes previos relacionados con temáticas similares o directamente vinculados con la problemática del Río Sinú.

**Modelo Matemático:** Este capítulo se centra en el desarrollo del modelo matemático, desglosando cada una de sus partes. Posteriormente, se aborda la construcción de la instancia de estudio, proporcionando información adicional relevante para abordar la problemática investigada en este proyecto.

**Resultados Computacionales:** Aquí se presentan los resultados generados por el modelo matemático propuesto, acompañados de un análisis detallado. Este análisis sirve como base para las conclusiones y para destacar posibles direcciones futuras de investigación, centradas en las conclusiones del presente proyecto de tesis.

**Conclusiones y Trabajos Futuros:** Esta sección plasma los hallazgos y conclusiones encontrados derivados del proyecto de tesis y se exploran posibles trabajos futuros que puedan llevarse a cabo para aquellos interesados en dar continuidad a esta investigación.

**Referencias:** En este apartado se recopilan las referencias bibliográficas, reconociendo a aquellas personas que contribuyeron de manera indirecta con definiciones, teorías, informes, proyectos u otros productos informativos.

**Anexos:** Por último, se incluyen los anexos, que contienen documentos relevantes de extensión o relevancia limitada que no se incorporaron directamente en el cuerpo del documento, pero que complementan cierta información.



## **2. Estado Del Arte**

Esta sección se divide en dos partes clave: "Marco Teórico y Conceptual" y "Antecedentes", donde se resaltan las definiciones fundamentales y en la aplicación práctica de conceptos y modelos que fundamentan esta investigación.

### **2.1. Marco Teórico y Conceptos**

En la primera parte se analizan los conceptos cruciales como las amenazas, centrándose en las inundaciones y erosiones, para luego continuar con vulnerabilidad y riesgo, así como también factor de riesgo y gestión del riesgo, así terminando con las medidas de intervención, acciones esenciales para prevenir o reducir la exposición a las fuentes de riesgo, e información proporcionada por la CVS.

#### ***2.1.1. Amenaza***

Se define amenaza como el potencial riesgo de que ocurra un evento físico. Sea de origen natural o inducido a través de la acción del ser humano de manera accidental, con suficiente intensidad que provocando impactos negativos ya sea a través de lesiones, daños en la salud y generando detrimentos en bienes, infraestructuras, medios de sustento, servicios y recursos ambientales. Estas amenazas se pueden clasificar según su origen como natural, socio-natural, antrópica o tecnológica. En Colombia, frecuentan las amenazas naturales como inundación, deslizamiento, sismo, huracán, vendaval, sequía, incendios forestales y erupciones volcánicas. La comprensión detallada de estas amenazas es fundamental para identificar los posibles eventos que podrían afectar la zona de estudio y priorizar acciones de mitigación y adaptación de manera más efectiva, especialmente para las comunidades ribereñas. (PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)

#### **2.1.1.1. Inundaciones.**

Se define como inundación cuando el nivel del agua sube a niveles anormalmente altos o se agua desborda y cubre áreas que normalmente están secas. Pueden ser resultado de lluvias intensas, fallos en represas o diques, el rápido derretimiento de la nieve y el hielo, o eventos costeros como tormentas o tsunamis. El cambio climático aumenta el riesgo de inundaciones en todo el mundo debido al incremento de fenómenos meteorológicos extremos y al aumento del nivel del mar. Representan una de las principales amenazas naturales que enfrenta la ribera del Río Sinú, lo que resalta la necesidad de implementación de estrategias efectivas de gestión del riesgo (Núñez, 2010).

#### **2.1.1.1. Erosión.**

La erosión se define como el proceso de desgaste y transporte de materiales provocado por agentes externos, unos de los más comunes son el agua y el viento. Puede manifestarse de diversas formas, como erosión fluvial, costera, eólica y submarina. Este fenómeno puede tener un impacto significativo en el paisaje, la infraestructura y los ecosistemas. Es una amenaza importante para la ribera del Río Sinú, lo que resalta la necesidad de implementar medidas de gestión del riesgo para mitigar sus efectos. (Brady III, 2018).

#### **2.1.2. Vulnerabilidad**

La vulnerabilidad se refiere a la condición de las comunidades en relación con su susceptibilidad a desastres y peligros. Proviene de la conexión de diversos factores, como la disponibilidad y distribución de recursos, así como las políticas públicas. La vulnerabilidad está influenciada por aspectos sociales como desigualdades, disparidades económicas, estado socioeconómico, raza o etnia, género, edad, desarrollo comercial e industrial, entre otros. (Kapucu & Rivera, 2015).

Existen diferentes dimensiones de vulnerabilidad. La vulnerabilidad se relaciona con la calidad o la tipología del material usado en construcciones de viviendas, establecimientos económicos, servicios e infraestructura socioeconómica. Por otro lado, la vulnerabilidad económica se refiere al acceso de la población a los activos económicos y su capacidad para

enfrentar un desastre, lo que se ve afectado por el nivel de ingresos y la capacidad para cubrir las necesidades básicas. Desde la perspectiva de la pobreza a nivel material, una persona muestra una vulnerabilidad económica alta cuando es pobre y no cubre al menos dos necesidades básicas. La vulnerabilidad ambiental está vinculada con la resistencia del medio natural y los seres vivos frente a la variabilidad climática y el deterioro ambiental. Por su parte, la vulnerabilidad social evalúa la capacidad de organización y participación comunitaria en la prevención y respuesta a emergencias. La población organizada puede responder de manera más efectiva ante desastres. Factores como la organización comunitaria y la participación ciudadana son fundamentales para comprender la resiliencia frente a eventos adversos. (PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)

Al analizar la vulnerabilidad de las comunidades locales, se pueden identificar las características sociales, económicas y ambientales que las hacen más susceptibles a los impactos de las amenazas identificadas. Esta comprensión detallada de la vulnerabilidad ayuda a diseñar estrategias de gestión del riesgo más inclusivas y centradas en las necesidades de las poblaciones con mayor vulnerabilidad. Esta condición está influenciada por una variedad de factores, incluidos aspectos sociales, económicos, ambientales y físicos.

### **2.1.3. Riesgo**

El riesgo se manifiesta cuando una amenaza se presenta en condiciones específicas de vulnerabilidad, dentro de un espacio y tiempo determinados. La relación entre amenazas y vulnerabilidades es recíproca; es decir, no puede haber amenaza en ausencia de una sociedad vulnerable y viceversa. Fortalecer la resiliencia implica reducir las condiciones que generen un estado vulnerabilidad y, por ende, el nivel de riesgo de una comunidad, según lo establecido por la UNGRD en 2018. (CVS, 2021).

La combinación de amenazas y vulnerabilidades crea el riesgo de aparición de desastres, definido como la posibilidad de que ocurra un evento peligroso y el impacto que este puede tener en las personas, los bienes y el medio ambiente. Al evaluar y cuantificar el riesgo en la zona de estudio, se pueden identificar áreas críticas que requieren atención prioritaria y asignación adecuada de recursos. La gestión del riesgo se convierte en un proceso clave para reducir el riesgo existente y prevenir la generación de nuevos riesgos.

Surge de la combinación de amenazas y vulnerabilidades y se manifiesta en condiciones específicas de tiempo y espacio. La gestión del riesgo implica evaluar y cuantificar este riesgo para identificar áreas críticas que requieran atención prioritaria y asignación adecuada de recursos. La evaluación del riesgo en la ribera del Río Sinú es fundamental para desarrollar estrategias efectivas en el tema de gestión del riesgo de desastres.

#### **2.1.4. *Factor De Riesgo***

Son tanto eventos físicos, como vulnerabilidades lo que se conoce como factores de riesgo, sin la presencia y conocimiento de estos, el concepto de riesgo no podría existir. El concepto de desastre incluye un cierto nivel de daños y pérdidas que pueden perturbar gravemente el funcionamiento correcto de la sociedad y, por lo tanto, afectar su vida cotidiana. En consecuencia, no puede haber riesgo de catástrofe, sino un grado de daño y pérdida controlable y no crítico. Reducir el daño potencial a un nivel aceptable o manejable es una de las más importantes funciones de la gestión del riesgo de desastres. (Narváez, Lavell, & Pérez Ortega, 2009). Los factores de riesgo son eventos físicos y vulnerabilidades que coopera a la generación del riesgo de desastres. Incluyen una variedad de elementos, como fenómenos naturales, exposición de poblaciones e infraestructura, y condiciones socioeconómicas. La comprensión de estos factores es esencial para identificar y gestionar eficazmente el riesgo de desastres, permitiendo una evaluación integral del riesgo en la ribera del Río Sinú y la implementación de medidas de intervención adecuadas.

#### **2.1.5. *Gestión Del Riesgo***

La gestión de riesgos se refiere al proceso de anticipar y controlar condiciones o eventos que pueden afectar los objetivos de una organización, como los peligros. Los principios de la gestión de riesgos están establecidos en la norma internacional ISO 31000 (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2018a) y se pueden aplicar a diversos tipos de riesgos, en diferentes ámbitos industriales (por ejemplo, fabricación de productos químicos, sistemas de transporte) o a proyectos específicos dentro de esos ámbitos (por ejemplo, construcción de una nueva carretera). La gestión de riesgos puede abordar riesgos

relacionados con la salud y seguridad, así como riesgos financieros u operativos, entre otros. (Glendon, Clarke, & McKenna, 2006).

La gestión de riesgo de desastres se define como los posibles daños o pérdidas debido a eventos físicos peligrosos, ya sean de origen natural, socio-natural, tecnológico, biosanitario o humano no intencional, acorde a lo dicho en la Ley 1523 de 2012. Estos riesgos se manifiestan en un determinado periodo y se determinan de acuerdo con la vulnerabilidad de la exposición de los elementos. En esencia, el riesgo de desastres se origina de la unión de la amenaza y la vulnerabilidad. Según esta ley, la reducción del riesgo abarca el proceso de gestión del riesgo, implicando intervenciones destinadas a modificar o disminuir las condiciones de riesgo existentes. Se implementan medidas de mitigación y prevención con antelación para reducir amenazas, exposición y vulnerabilidad en personas, medios de subsistencia, bienes, infraestructura y recursos ambientales. La mitigación del riesgo se refiere a intervenciones prescriptivas o correctivas para reducir daños mediante reglamentos de seguridad y proyectos de inversión. Por otro lado, la prevención del riesgo implica medidas restrictivas o prospectivas para evitar la generación de riesgo, ya sea neutralizando amenazas, exposiciones o vulnerabilidades. Estas acciones buscan impedir la ocurrencia de nuevos riesgos. (Congreso Colombiano, 2012).

La gestión del riesgo implica conocer y comprender los factores que lo determinan. La cuantificación del riesgo es esencial para su adecuada gestión, y su precisión depende del nivel de conocimiento sobre los factores involucrados, como fenómenos naturales, exposición y vulnerabilidad de los elementos expuestos. La calidad de la información disponible también influye en la estimación del riesgo, siendo más fácil cuantificarlo con información detallada sobre eventos pasados. La gestión del riesgo implica el proceso de anticipar, evaluar y mitigar los riesgos de desastres para reducir su impacto en las personas, los bienes y el medio ambiente. Incluye una serie de acciones y estrategias destinadas a prevenir, prepararse y responder a eventos peligrosos. La gestión del riesgo de desastres en la ribera del Río Sinú implica la identificación de amenazas, la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo, y la implementación de medidas de intervención para reducir los impactos negativos de eventos como inundaciones y erosión. (CVS, 2021).

### **2.1.6. Medidas De Intervención**

Las medidas de intervención se refieren a las acciones tomadas para prevenir o reducir la exposición de individuos a fuentes de radiación que no forman parte de la práctica radiológica o que, debido a una emergencia, no están bajo control. Estas medidas están dirigidas tanto a las fuentes de radiación como a las vías de transferencia y los individuos, e incluyen acciones de protección frente a desastres naturales y otros eventos, como evacuación y refugio (Caponecchia, 2021).

Estas medidas implican la aplicación de intervenciones destinadas a modificar las características de un fenómeno o elemento expuesto para reducir la amenaza y la vulnerabilidad. Pueden ser correctivas, buscando disminuir el riesgo existente mediante acciones de mitigación, o prospectivas, previniendo la aparición de nuevas situaciones de riesgo a través de acciones preventivas. Las medidas estructurales incluyen la implementación de obras físicas, como geoceldas, geotextiles y colchacreto para protección de superficies, mientras que las no estructurales se centran en acciones de planificación y gestión del territorio (CVS, 2022).

Estas acciones son fundamentales para reducir el riesgo y aumentar la resiliencia de las comunidades frente a las amenazas identificadas. La implementación de medidas de intervención adecuadas, considerando tanto la eficacia técnica como la aceptabilidad social, es crucial para garantizar su efectividad a largo plazo en la ribera del Río Sinú.

### **2.1.7. Modelo De Asignación**

La investigación operativa engloba métodos agrupados bajo el término de optimización o programación matemática. Este enfoque implica seleccionar la mejor opción entre varias posibles para tomar decisiones adecuadas en un problema dado. La programación lineal (PL), perteneciente a esta rama, es utilizada para resolver asignación de recursos limitados entre actividades en competencia, centrándose en funciones objetivo y restricciones lineales. Aunque la PL es efectiva en muchos casos, cuando no se cumplen ciertos supuestos, es posible recurrir a otros modelos matemáticos como la programación entera o no lineal.

Los problemas de asignación son una categoría específica dentro de los problemas de PL donde a las tareas planteadas se les asignan recursos disponibles. Un ejemplo típico de estos problemas es donde se busca la asignación de los empleados a diferentes trabajos, como cuando un empleado necesita ser reasignado a una nueva tarea. Aunque, el cedente no necesita ser una persona. Aunque la asignación de personas a trabajos es una aplicación frecuente, los recursos a asignar no se limitan a personas; también pueden incluir fábricas, máquinas, máquinas o incluso intervalos de tiempo en los que se deben realizar ciertas tareas. Para que un problema se considere problema de asignación, el problema debe estructurarse de manera que la cantidad de recursos a asignar coincida con el número de tareas (representado por  $n$ ). Además, cada asignación de un recurso  $i$  (donde  $i = 1, 2, \dots, n$ ) a una tarea  $j$  (donde  $j = 1, 2, \dots, n$ ) tiene un costo asociado  $C_{ij}$ . El objetivo principal es decidir la forma en que estas  $n$  asignaciones deben llevarse a cabo para minimizar el costo total. Si un problema satisface estas suposiciones puede resolverse de manera eficiente utilizando algoritmos diseñados específicamente para problemas de asignación. (Hillier & Lieberman, 2010)

El modelo matemático que se utiliza para abordar los problemas de asignación emplea las siguientes variables de decisión:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si se asigna } i \text{ para realizar la tarea } j \\ 0, & \text{de lo contrario (si no se asigna, dlc)} \end{cases}$$

Para:

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

Cada  $X_{ij}$  es una variable binaria (sus valores son 0 o 1), que representa la decisión que se toma a, de si se asigna o no. Adicionalmente, si la función objetivo (Ecuación 1) es  $Z$  que representa el costo final o total el modelo del problema sería:

*Ecuación 1*

*Función Objetivo*

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} * X_{ij}$$

(Hillier & Lieberman, 2010)

Sujeto a las siguientes restricciones (Ecuación 2, Ecuación 3,

Ecuación 4):

*Ecuación 2*

*Primera Restricción*

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \geq 1, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$

*(Hillier & Lieberman, 2010)*

*Ecuación 3*

*Segunda Restricción*

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} \geq 1, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n$$

*(Hillier & Lieberman, 2010)*

*Ecuación 4*

*Tercera Restricción*

$$X_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j$$

$$X_{ij} \text{ binaria}, \quad \forall i, j.$$

*(Hillier & Lieberman, 2010)*

Estas restricciones establecen que cada tarea debe tener al menos una persona asignada para llevarla a cabo, y que cada asignado debe realizar al menos una tarea. La última restricción se refiere a que la variable de asignación es binaria, es decir, indica si se asigna o no, ya que, sin esta restricción, el modelo no daría la solución requerida.

El modelo de asignación es un enfoque de la investigación operativa que busca optimizar la asignación de recursos limitados entre diversas actividades competitivas. Utiliza métodos matemáticos, como la programación lineal, para determinar la asignación óptima de recursos con el objetivo de minimizar costos o maximizar beneficios. Este modelo se aplica para priorizar acciones de gestión del riesgo en la ribera del Río Sinú, identificando las áreas más vulnerables y las medidas de intervención más efectivas. La programación lineal y otros modelos matemáticos se utilizan para optimizar la asignación de recursos limitados y maximizar el impacto de las acciones de gestión del riesgo. Estos modelos proporcionan una



herramienta analítica poderosa para tomar decisiones informadas y eficientes en la gestión del riesgo de desastres.

### 2.1.8. Programación lineal entera.

La programación lineal entera (PLE) es una extensión de la programación lineal que se utiliza cuando las variables de decisión deben ser números enteros. Esta necesidad de integralidad aparece en diversos problemas reales, como la construcción, logística y selección de proyectos, donde no es posible trabajar con fracciones. (Docío Tomás, 2015)

La integralidad de las variables implica que el conjunto de soluciones factibles es mucho más reducido en comparación con el problema lineal continuo. Por lo tanto, evaluar simplemente la función objetivo en todos los puntos posibles no es práctico debido a la gran cantidad de soluciones potenciales. Además, redondear las soluciones de un problema continuo suele resultar en violaciones de las restricciones originales.

En un problema de programación lineal entera con  $n$  variables y  $m$  restricciones se trata de encontrar el valor de las variables  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Por lo tanto, en la Ecuación 5 se presenta la estructura de la modelación lineal entera.

*Ecuación 5*

*Estructura de la modelación lineal entera.*

$$\begin{aligned}
 & \text{máx o mín } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \\
 \text{s. a: } & a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq (\geq)(=)b_1 \\
 & a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq (\geq)(=)b_2 \\
 & \dots \\
 & a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq (\geq)(=)b_m \\
 & x_j \text{ enteras, } j \in J \subseteq \{1, \dots, n\}
 \end{aligned}$$

*(Docío Tomás, 2015)*

Donde,  $J$  es un subconjunto de  $\{1, \dots, n\}$ .

Si las variables de decisión en su totalidad están restringidas a tomar valores enteros, este problema recibirá el nombre de problema de programación lineal entera pura. Si de las variables de decisión solo algunas deben tomar valores enteros, se conoce como programación lineal entera mixta, y los problemas de programación lineal entera cero-uno o problemas binarios, son aquellos donde sus variables de decisión sólo tomarán valores de 0 o 1.

Los problemas de programación lineal entera se clasifican en tres tipos: problemas directos, donde sus variables de decisión son cuantitativas; problemas codificados cuyas variables de decisión son cualitativas y se cuantifican a través de variables binarias; y por último, modelos transformados que emplean variables enteras para facilitar un mejor análisis del modelo.

### **2.1.9. Programación lineal entera binaria.**

La programación entera binaria (PEB) es una especialización de la programación entera. En la PEB, las variables toman valores solamente de 0 o 1, lo que es ideal para problemas que involucran decisiones divididas, como la realización de proyectos, inversiones específicas o la ubicación de instalaciones. La PEB permite modelar decisiones binarias de manera precisa y eficiente, representando opciones exclusivas de manera clara. Esta técnica es particularmente relevante cuando las decisiones son de tipo "sí o no", facilitando la toma de decisiones en escenarios complejos mediante el uso de variables binarias que aseguran una solución eficiente y efectiva. (Hillier & Lieberman, 2010)

La California Manufacturing Company considera expandirse construyendo una nueva fábrica en Los Ángeles o en San Francisco, o tal vez en ambas ciudades. Asimismo, están evaluando la construcción de un almacén, con la condición de que este solo puede ubicarse en la ciudad donde se construya la fábrica. La Tabla 3 presenta el valor presente neto, que representa el rendimiento total considerando el valor del dinero en el tiempo, de cada opción. La última columna muestra el capital necesario, incluido el VPN, para cada inversión, con un capital total disponible de 10 millones de dólares. El objetivo es determinar la combinación viable de opciones que maximice el VPN total. Aunque este problema es tan pequeño que se puede resolver rápidamente mediante inspección, construyendo fábricas en ambas ciudades sin un almacén, se formulará un modelo de programación entera a modo ilustrativo. Todas las variables de decisión son binarias, como se muestra en la Ecuación 6.

*Ecuación 6*

*Variable de decisión*

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{si la decisión } j \text{ es sí,} \\ 0 & \text{si la decisión } j \text{ es no,} \end{cases} \quad (j = 1,2,3,4).$$

*(Hillier & Lieberman, 2010)*

Sea

$$Z = \text{valor presente neto de estas decisiones.}$$

Si la inversión no se hace y, por tanto, la variable de decisión es igual a 0, el vpn será 0. En cambio, si se hace la inversión, la variable tomaría el valor de 1, y el vpn respectivo se expone en la Tabla 3. Entonces, con unidades de millones de dólares el vpn se calcula con la Ecuación 7.

*Ecuación 7*

*Función Objetivo*

$$Z = 9x_1 + 5x_2 + 6x_3 + 4x_4$$

*(Hillier & Lieberman, 2010)*

En la Tabla 3 se indica que la cantidad de capital que se gastará en las cuatro instalaciones no puede exceder a 10 millones de dólares. En consecuencia, si se sigue con el uso de estas unidades de millones de dólares, una restricción del modelo sería como se muestra en la Ecuación 8.

*Ecuación 8*

*Restricción límite de gasto*

$$6x_1 + 3x_2 + 5x_3 + 2x_4 \leq 10.$$

*(Hillier & Lieberman, 2010)*

Como las últimas dos decisiones representan alternativas mutuamente excluyentes la compañía quiere construir cuando mucho un almacén nuevo, se necesita la siguiente restricción (Ecuación 9).

*Ecuación 9*

*Restricción excluyente*

$$x_3 + x_4 \leq 1.$$

*(Hillier & Lieberman, 2010)*

En la Tabla 3 se presenta la información requerida para la toma de decisiones, la respectiva variable de decisión que la representa, el vpn que se obtendrá, capital requerido y el capital disponible.

Tabla 3

Tabla informativa: Datos del ejemplo de la California Manufacturing Co.

Número de decisión	Pregunta	Variable de decisión	VPN (5 M)	Capital requerido
	Sí o no			
1	¿Construir la fábrica en Los Ángeles?	$x_1$	\$ 9	\$ 6
2	¿Construir la fábrica en San Francisco?	$x_2$	\$ 5	\$ 3
3	¿Construir el almacén en Los Ángeles?	$x_3$	\$ 6	\$ 5
4	¿Construir el almacén en San Francisco?	$x_4$	\$ 4	\$ 2
Capital disponible: \$10 Millones				

(Hillier & Lieberman, 2010)

Aún más, las decisiones 3 y 4 son contingentes o condicionales porque dependen de las decisiones 1 y 2, respectivamente (la compañía considera la construcción de un almacén en determinada ciudad solo si la nueva fábrica va a estar ahí). Por tanto, en caso de tomar la decisión 3, se requiere que  $x_3 = 0$ , si  $x_1 = 0$ . Esta restricción sobre  $x_3$  cuando  $x_1 = 0$ , de manera similar, el requerimiento de que  $x_4 = 0$  si  $x_2 = 0$ , estas restricciones se imponen de la siguiente manera en la Ecuación 10:

Ecuación 10

Restricciones condicionales

$$x_3 \leq x_1.$$

$$x_4 \leq x_2$$

(Hillier & Lieberman, 2010)

Por tanto, después de escribir de nuevo estas dos restricciones para que todas las variables queden en el lado izquierdo, el modelo completo de PEB se presenta a continuación comenzando con la Función Objetivo representado en la Ecuación 11.

Ecuación 11

Función Objetivo

$$\text{Maximizar } Z = 9x_1 + 5x_2 + 6x_3 + 4x_4$$

(Hillier & Lieberman, 2010)

Sujeta a las siguientes restricciones (Ecuación 12):

*Ecuación 12*

*Restricciones*

$$\begin{array}{rccccrcr} 6x_1 & + & 3x_2 & + & 5x_3 & + & 2x_4 & \leq & 10 \\ & & & & x_3 & + & x_4 & \leq & 1 \\ -x_1 & & & & + & x_3 & & \leq & 0 \\ & - & x_2 & & & + & x_4 & \leq & 0 \\ & & & & & + & x_j & \leq & 1 \\ & & & & & + & x_j & \geq & 0 \end{array}$$

$x_j$  es entera, para  $j = 1, 2, 3, 4$ .

(*Hillier & Lieberman, 2010*)

De manera equivalente, las dos últimas líneas de este modelo se pueden sustituir por una sola restricción, como en la Ecuación 13:

*Ecuación 13*

*Restricción binaria*

$x_j$  es binaria, para  $j = 1, 2, 3, 4$ .

(*Hillier & Lieberman, 2010*)

A pesar de su pequeño tamaño, este ejemplo releja varias aplicaciones reales de programación entera, donde las decisiones clave son del tipo si o no. Similar al segundo par de decisiones de este ejemplo, muchos grupos de decisiones sí o no son alternativas mutuamente excluyentes, donde sólo una decisión de ese grupo puede ser afirmativa. Cada grupo necesita una restricción que fuerce la suma de las variables binarias correspondientes a ser igual a 1 si exactamente una decisión de ese grupo debe ser si, o menor o igual a 1 (si máximo una decisión de ese grupo será afirmativa). En ocasiones, las decisiones del tipo sí o no, son decisiones contingentes, es decir, dependen de decisiones anteriores. Por ejemplo, una decisión se considera contingente respecto a otra si se permite que sea afirmativa solo si la otra también lo es. Esta situación ocurre cuando una decisión contingente requiere una acción consecuente a otra y se vuelve irrelevante o imposible si la otra decisión es negativa. La forma de la restricción que se obtiene se ilustra en la cuarta y quinta restricciones del ejemplo.

### **2.1.10. Problema de la Mochila (Knapsack problem)**

El problema de la mochila (KP) se plantea con un grupo de  $n$  artículos, cada uno con un valor entero  $p_i$  y un peso  $w_i$ . El desafío es elegir un subconjunto de estos artículos de manera que se maximice el beneficio total sin sobrepasar la capacidad  $c$  de la mochila. (Fuentes-Penna, Vélez-Díaz, Moreno-Gutiérrez, Martínez-Cervantes, & Sánchez-Muñoz, 2015)

Dados una mochila con capacidad  $C$  y un conjunto de  $n$  objetos los cuales tienen asociados valores  $\{p_1, \dots, p_n\}$ , tamaños  $\{w_1, \dots, w_n\}$  y duraciones  $\{d_1, \dots, d_n\}$ . El objetivo es maximizar el valor total almacenado en la mochila dentro de un intervalo de tiempo, el mismo que se considera discretizado en períodos  $\{1, 2, \dots, T\}$ . Si el objeto  $i$  ingresa en la mochila en período  $t \in \{1, \dots, T - d_i - 1\}$ , permanecerá en la misma hasta el período  $t + d_i + 1$ . Se asume que todos los parámetros  $C, T, p_i, w_i$  y  $d_i$  son enteros, y que un objeto puede ingresar más de una vez en la mochila. (Silva & Torres, 2014)

Se definen variables binarias  $x_{it}, i \in \{1, \dots, n\}, t \in \{1, \dots, T\}$ , que indican si el objeto  $i$  ingresa en la mochila en el período  $t$ ; y variables binarias  $z_{it}, i \in \{1, \dots, n\}, t \in \{1, \dots, T\}$ , que indican si el objeto  $i$  se encuentra presente en la mochila en el período  $t$ .

## **2.2. Antecedentes**

Esta segunda parte se centra en los antecedentes al proyecto de investigación realizado a través del presente documento, donde se encuentran investigaciones y estudios previos. Desde la evaluación de riesgos en municipalidades de Córdoba hasta la vulnerabilidad de poblaciones ribereñas, así como también los modelos matemáticos aplicados a la gestión logística de suministros humanitarios, la programación lineal estocástica, toma de decisiones en emergencias y la revisión sistemática de modelos matemáticos en la gestión de la cadena de suministro humanitaria.

### **2.2.1. Riesgo**

Esta sección se centra los antecedentes relacionados en la temática de riesgo, como la evaluación de los riesgos de inundación y erosión fluvial en las municipalidades circundantes al Río Sinú, en Córdoba. Estos fenómenos representan amenazas significativas para las comunidades ribereñas y la infraestructura local, lo que resalta la necesidad de abordarlos de manera integral y proactiva.

Los informes presentados, comenzando por el Protocolo de Control de Erosión del Río Sinú en 2021 y su actualización en 2022 y 2023, brindan un panorama detallado de los riesgos asociados con la dinámica fluvial en la región. Estos documentos no solo ofrecen un análisis exhaustivo de los factores que contribuyen a la erosión y las inundaciones, sino que también proponen estrategias para mitigar la vulnerabilidad de las comunidades frente a estos eventos adversos.

#### **2.2.1.1. Protocolo Control De Erosión Del Río Sinú 2021.**

El informe describe un estudio realizado en tres etapas para evaluar los riesgos de inundación y erosión fluvial en las municipalidades de la zona en estudio. En la primera etapa, se revisaron informes y documentos de la CAR (Corp. Autónoma Regional) y la Universidad EAFIT, así como los Estrategias de Preparación y Prevención para la Temporada de Lluvias y los Planes de Ordenamiento Territorial. También, se utilizó software de Geographic Information System (GIS - SIG) para analizar la cartografía del área designada. (CVS, 2021).

En la segunda etapa, se obtuvo información de campo mediante visitas y recorridos fluviales para evaluar el estado actual de los puntos afectados. Se recopilieron datos que incluye terreno afectado, la extensión de los taludes, la vegetación presente y la distancia a viviendas o vías cercanas. Se utilizó una metodología que incluyó el estudio de riesgos, vulnerabilidades y amenazas, siguiendo pautas establecidas por la UNGRD y el Decreto 1807 de 2014.

La tercera etapa consistió en formular estrategias en pro de la disminución de la vulnerabilidad en periodos prolongados, intermedio y de inmediato. Se realizaron análisis de elementos expuestos, amenazas, vulnerabilidad y riesgo para plantear medidas de

intervención estructurales y no estructurales. Se enfatiza que estas medidas deben ser respaldadas por estudios específicos en geomorfología, dinámica fluvial, geotecnia e hidrología.

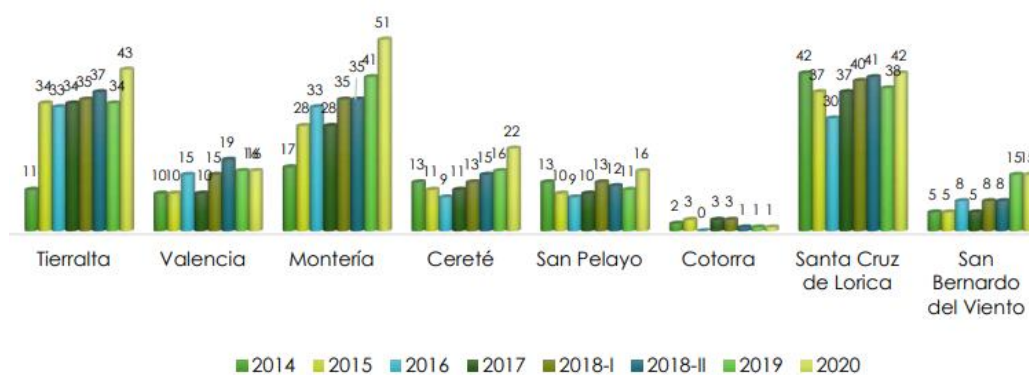
Se observó que los procesos erosivos en el Río Sinú están relacionados con su cauce sinuoso, la variación del caudal, la poca presencia de vegetación, la obtención de recursos presentes, la utilización del dique como ruta y los habitantes en las orillas, construcción de estructuras de control de erosión sin el debido proceso de investigación y adaptación, el manejo hidráulico de la represa de URRÁ S.A. y la presencia de cosechas que debilitan los taludes.

Por otro lado, las inundaciones ocurren principalmente por el aumento de lluvias debido al Fenómeno de La Niña, lo que provoca saturación del suelo y el incremento de caudal en ríos y quebradas, generando graves consecuencias para las poblaciones ubicadas a orillas del río.

El estudio se enfocó en evaluar los riesgos de inundación y erosión fluvial en las municipalidades de Córdoba. Se revisaron documentos existentes, se recopiló información de campo y se formularon estrategias para reducir la vulnerabilidad a largo plazo, basadas en análisis de amenazas, vulnerabilidad y riesgo. En la Ilustración 2. se ve un histórico de puntos afectados a lo largo de los años, desde el 2014 hasta el 2020, por municipalidad.

Ilustración 2.

Histórico De Puntos afectados 2014-2020



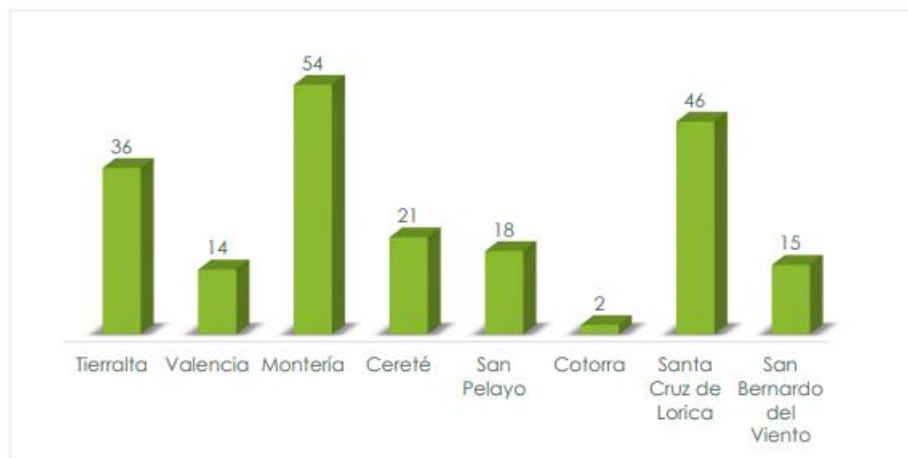
(CVS, 2021)



Se encontraron 206 puntos afectados, desde la localidad de Tierralta hasta el final del recorrido del río en San Bernardo del Viento. En la Ilustración 3 se muestran los puntos afectados por municipalidad, destacando que la municipalidad de Montería tiene el 26,21% de los puntos identificados.

Ilustración 3

Puntos afectados 2021.

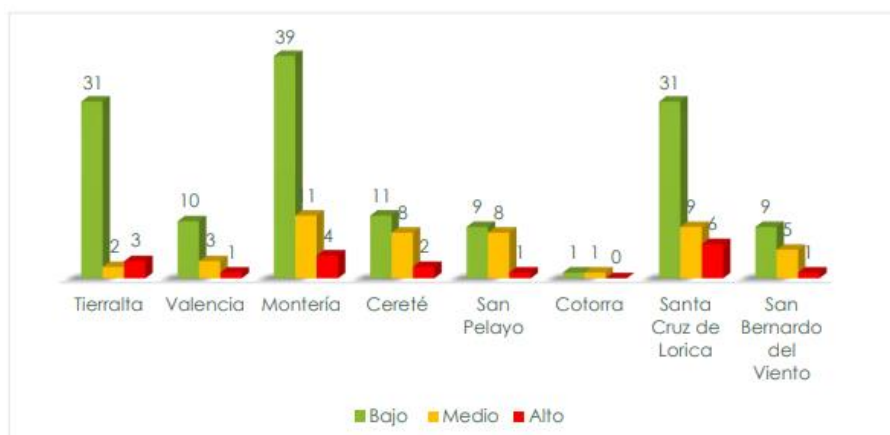


(CVS, 2021).

En relación con la erosión fluvial, se identificaron un total de 141 puntos afectados con bajo riesgo, correspondiente al 68,45% del total, como se muestra en la Ilustración 4. Además, se encontraron 47 puntos con riesgo medio, y 18 puntos con riesgo alto.

Ilustración 4

Puntos afectados Por Erosión 2021

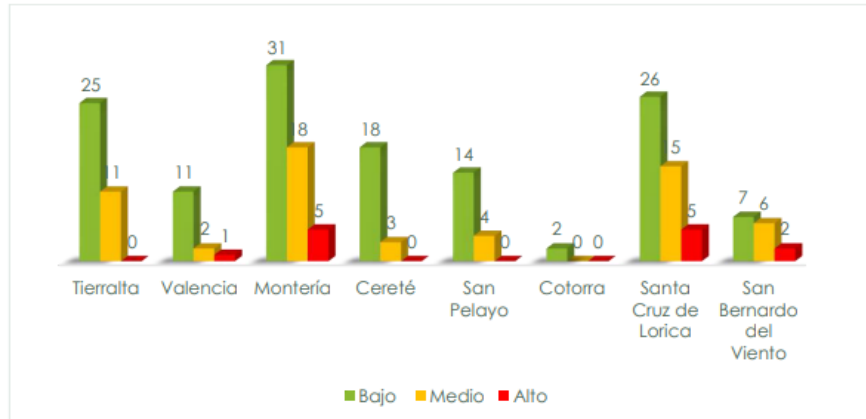


(CVS, 2021)

Con base en el riesgo por inundación, se identificaron 134 puntos afectados con bajo riesgo, lo que representa el 65,05% del total. Además, se encontraron 59 puntos con riesgo medio y 13 puntos con riesgo alto, como está en la Ilustración 5.

Ilustración 5

Puntos afectados Por Inundación 2021.

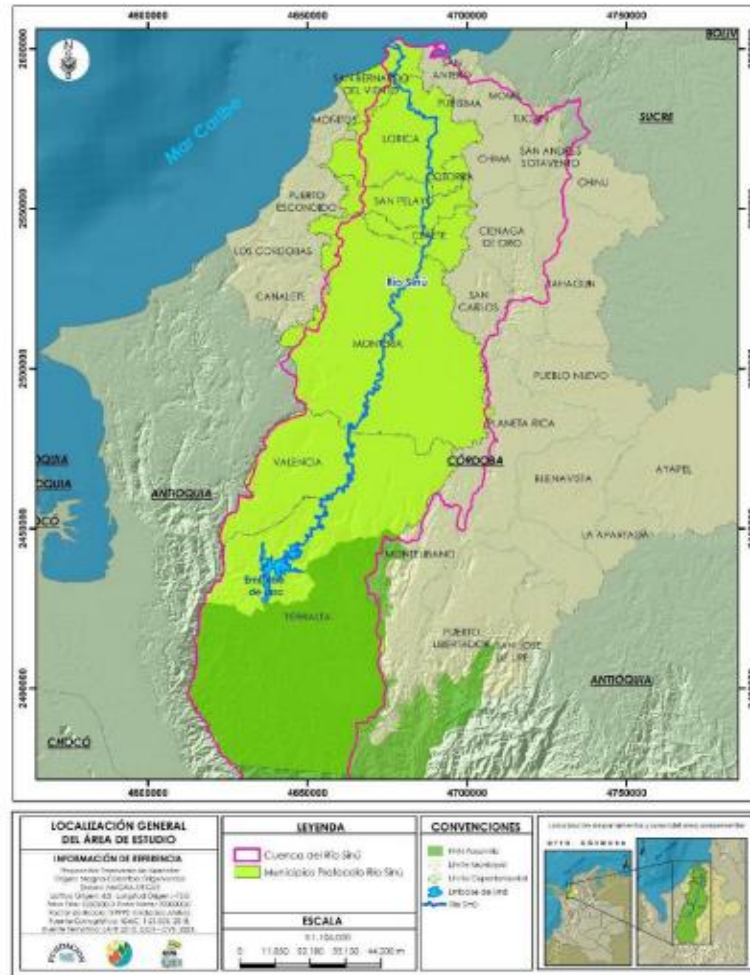


(CVS, 2021)

A continuación, en la Ilustración 6. se encuentra el Mapa del recorrido del Río Sinú, el cual hace su recorrido a través de las 8 localidades mostradas anteriormente.

Ilustración 6.

Mapa De Puntos afectados 2021.



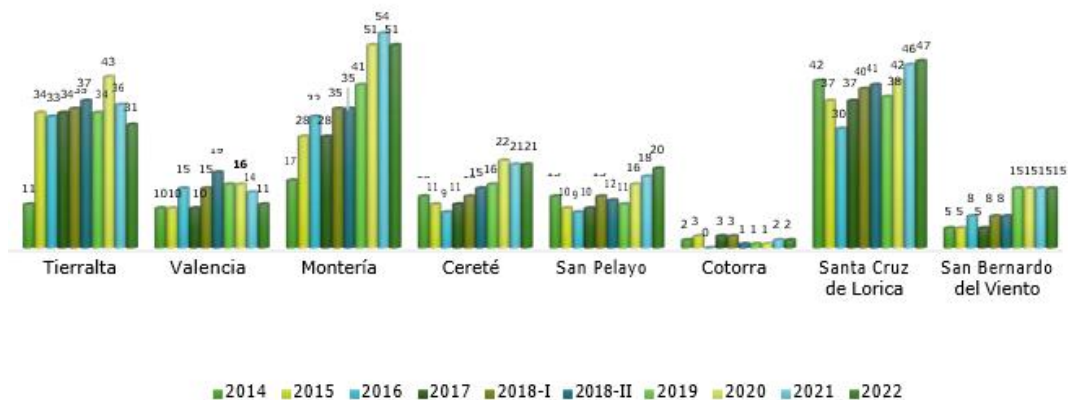
(CVS, 2021)

### 2.2.1.2. Protocolo Control De Erosión Del Río Sinú 2022.

Este informe presenta una actualización de los datos del informe del año anterior. Es el mismo estudio presentado en el año 2021, con la misma metodología, mostrando los puntos afectados encontrados para ese año. En la Ilustración 7 se ve un histórico de puntos afectados a lo largo de los años, desde el 2014 hasta el 2022, por municipalidad, es decir incluye los datos actualizados.

Ilustración 7

Histórico De Puntos afectados 2015-2022

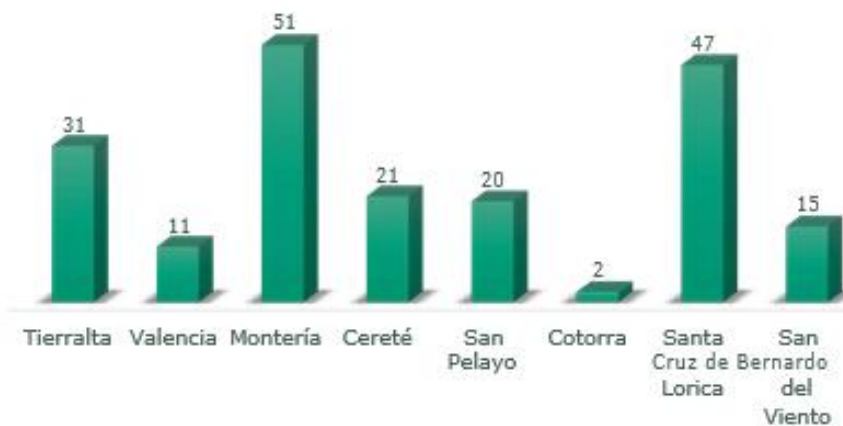


(CVS, 2022)

Se encontraron 198 puntos afectados. En la Ilustración 8 se muestran los puntos afectados por municipalidad, destacando que la municipalidad de Montería tiene el 25,75% de los puntos identificados.

Ilustración 8

Puntos afectados 2022



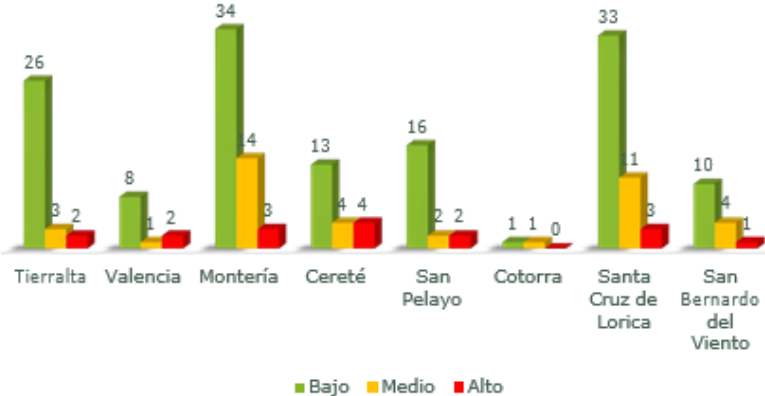
(CVS, 2022)

En relación con la erosión fluvial, se identificaron un total de 141 puntos afectados en estado inferior, correspondiente al 71,21% del total, como se muestra en la Ilustración 9. Además, se encontraron 30 puntos en estado intermedio, y 17 puntos en estado alto. En

comparación con el año anterior, los puntos afectados en estado inferior se mantuvieron, los de estado intermedio y superior se redujeron, a pesar de que el alto fue solo uno. Sin embargo, aunque en algunas municipalidades se redujeron, otros aumentaron, como por ejemplo Cereté en el 2022 tuvo el mayor número en riesgo alto.

Ilustración 9

Puntos afectados Por Erosión 2022

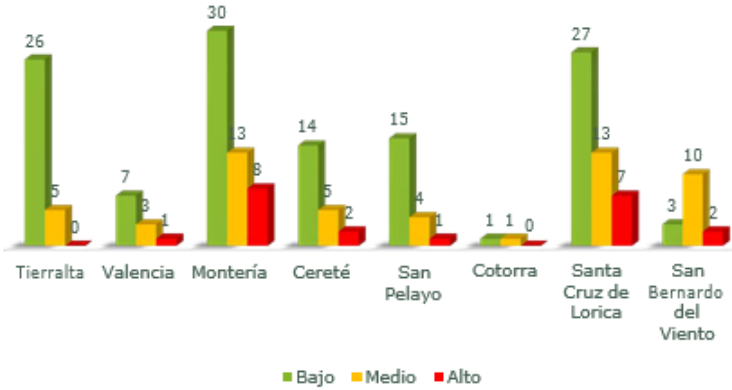


(CVS, 2022)

En cuanto al riesgo de inundación, se identificaron 123 puntos afectados con bajo riesgo, lo que representa el 62,12% del total. Además, se encontraron 54 puntos con riesgo medio y 21 puntos con riesgo alto, como se muestra en la Ilustración 10. Los puntos bajos y medios se redujeron, mientras que los puntos con riesgo alto aumentaron.

Ilustración 10

Puntos afectados Por Inundación 2022

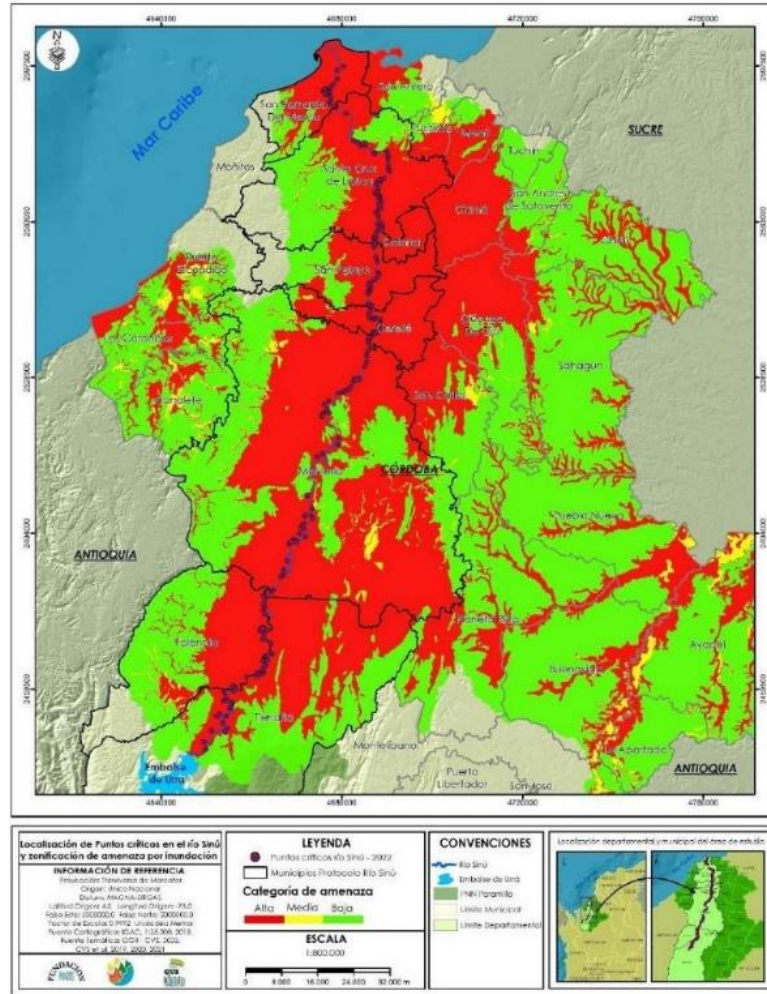


(CVS, 2022)

A continuación, en la Ilustración 11 se encuentra el Mapa del recorrido del Río Sinú, el cual pasa a través de las 8 localidades mostradas anteriormente.

Ilustración 11

Mapa De Puntos afectados 2022



(CVS, 2022)

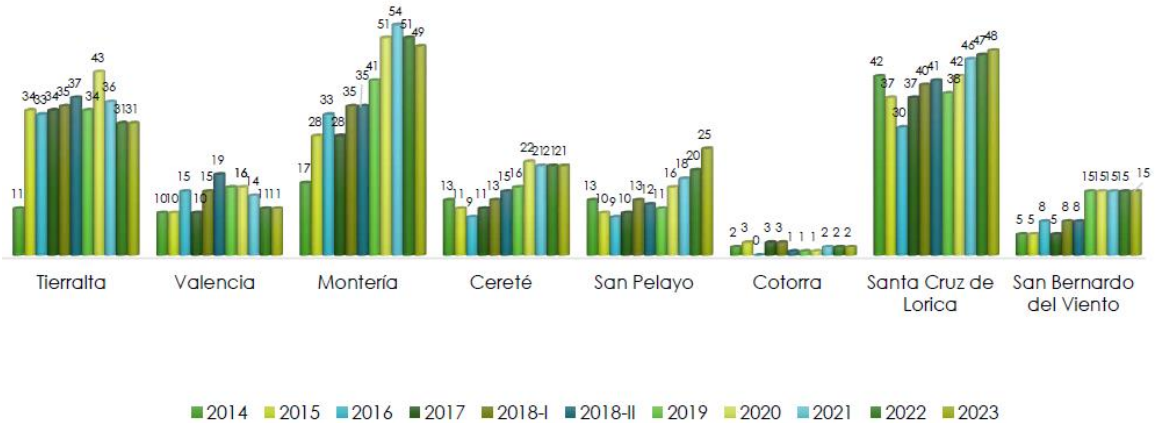
### 2.2.1.3. Protocolo Control De Erosión Del Río Sinú 2023.

Este informe presenta una actualización de los datos del informe del año anterior. Es el mismo estudio presentado en los años anteriores a través de ellos informes con el mismo nombre variando el año de entrega (2021-2022), presenta la misma metodología, mostrando los puntos afectados encontrados para este año. En la ilustración se ve un histórico de puntos afectados a lo largo de los años, desde el 2014 hasta el 2022, por municipalidad, es decir incluye los datos actualizados.

El estudio se enfocó en evaluar los riesgos de inundación y erosión fluvial en las municipalidades de Córdoba. Se revisaron documentos existentes, se recopiló información de campo y se formularon estrategias para reducir la vulnerabilidad a largo plazo, basadas en análisis de amenazas, vulnerabilidad y riesgo. En la Ilustración 12 se ve un histórico de puntos afectados a lo largo de los años, desde el 2014 hasta el 2023, por municipalidad.

Ilustración 12

Histórico De Puntos afectados 2014 – 2023



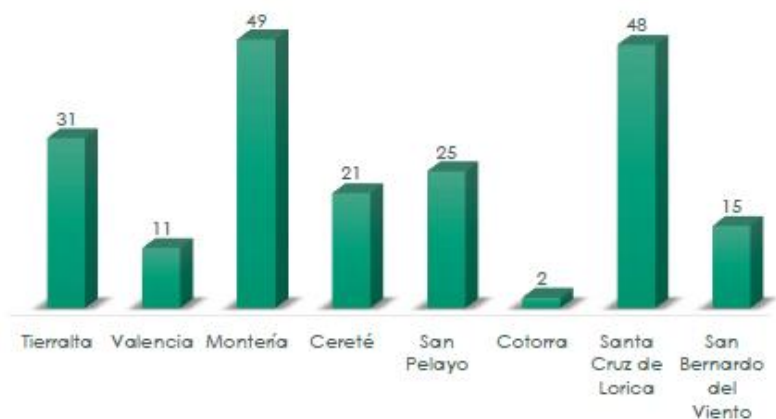
(CVS, 2023)

Se encontraron 202 puntos afectados a lo largo del trayecto del río. En la Ilustración 13 se muestran los puntos afectados por municipalidad, destacando que la municipalidad de Montería tiene el 24,26% de los puntos identificados y Lorica con el 23.76% abarcando en total un 48.02%.



Ilustración 13

Puntos afectados 2023

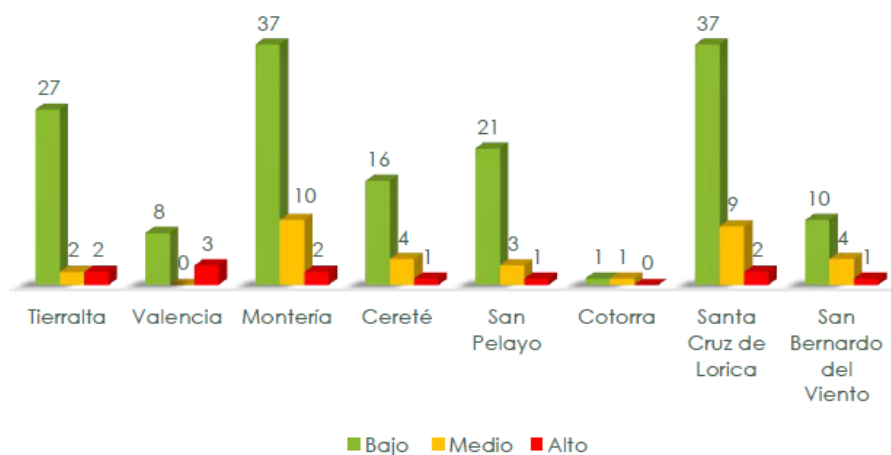


(CVS, 2023)

En relación con la erosión fluvial, se identificaron un total de 157 puntos afectados con bajo riesgo, correspondiente al 77,72% del total, como se muestra en la Ilustración 14. Además, se encontraron 33 puntos con riesgo medio, y 12 puntos con riesgo alto. Se ve una disminución en los riesgos medio y alto, y un aumento en el riesgo bajo, apreciándose como una mejora en ellos.

Ilustración 14

Puntos afectados Por Erosión



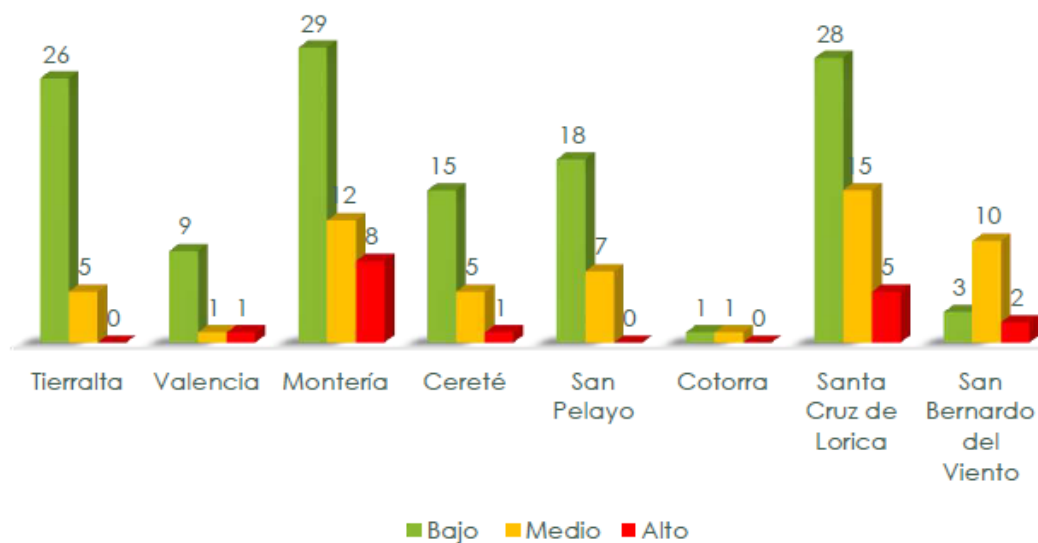
(CVS, 2023)



En cuanto al riesgo de inundación, se identificaron 129 puntos afectados con bajo riesgo, lo que representa el 63,86% del total. Además, se encontraron 56 puntos con riesgo medio y 17 puntos con riesgo alto, como se muestra en la Ilustración 15. Disminuyeron los puntos con riesgo bajo y medio, pero aumentaron los de riesgo alto.

Ilustración 15

Puntos afectados Por Inundación



(CVS, 2023)

A continuación, en la Ilustración 16 se muestra el Mapa del recorrido del Río Sinú, el cual pasa a través de las 8 localidades mostradas anteriormente.



### **2.2.2.1. Vulnerabilidad Ante Erosión. Ejemplo Lorica – Córdoba.**

A través de este trabajo realizado en el año 2016, el autor Orlando Inocencio Tordecilla Correa habla sobre como debido a la dinámica y el cambio climático, la continuidad y el grado de severidad de los fenómenos extremos climáticos conducen a un aumento en el número de desastres relacionados, como sequías e inundaciones, como es el caso en varias municipalidades de la provincia de Córdoba, destacando y haciendo énfasis en la municipalidad de Lorica, donde los problemas de inundaciones y erosión fluvial están ligados al proceso del Río Sinú y sus afluentes, buscando aplicar un método para evaluar los efectos a nivel de estructuras, no estructural, social, ecológicos y económicos, en base de la detección del peligro combinada con los cálculos de vulnerabilidad e información de amenazas, permite calcular el riesgo causado por la erosión fluvial en la municipalidad, y estos resultados contribuyen significativamente a la elección de las áreas geográficas para implementar medidas de prevención y mitigación según la vulnerabilidad presente. (Tordecilla Correa, 2016).

### **2.2.3. Modelos De Programación**

En la sección de modelos matemáticos, se presentan los trabajos relacionados con modelos matemáticos, en los que se destacan un modelo de programación estocástica para minimizar costos en la preparación y respuesta ante desastres naturales, una encuesta sobre modelos matemáticos y tecnologías aplicadas en la planificación y respuesta ante desastres, la gestión de procesos durante la fase de respuesta a emergencias, utilizando métodos adaptados para reducir sesgos, una revisión de contribuciones matemáticas para mejorar la eficiencia en operaciones humanitarias, un modelo para asignar recursos de salud de manera justa y eficiente, considerando diferencias en la demanda epidemiológica, y un modelo que identifica puntos de desbordamiento en el Río Sinú y genera zonas de inundación para facilitar la gestión de riesgos.

### **2.2.3.1. Modelo De Programación Lineal Estocástico Para La Coordinación Logística De Suministros Humanitarios Hacia Las Áreas Afectadas Por Inundaciones En Colombia.**

A través de este trabajo realizado en el año 2021, siendo el primer trabajo de este tipo que se realiza en el país, las autoras Eveling Yulissa García De La Barrera y María Carolina Vergara Orozco, proponen un diseño de la red logística humanitaria en Colombia mediante la implementación de un modelo de programación estocástica de dos etapas para minimizar el costo total de las decisiones que componen las fases de preparación y respuesta ante un desastre natural hidrometeorológico. La primera fase del modelo consideró la ubicación de los almacenes y centros de ayuda, mientras que la segunda fase involucró decisiones sobre el tamaño de la flota, el movimiento de los almacenes y la adquisición y transporte de suministros humanitarios de los municipios de Colombia priorizados por el índice Municipal de Riesgo de Desastres ajustado por Capacidades. El modelo matemático propuesto considera los escenarios generados por la probabilidad de ocurrencia de cada fase del ciclo El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y su impacto en diferentes municipios del país. Además, se utiliza en diferentes situaciones para evaluar su flexibilidad en relación con los diversos cambios que pueden ocurrir en la entrega de bienes humanitarios. (García De La Barrera & Vergara Orozco, 2021)

En este trabajo realizado por García de la Barrera y Vergara Orozco en 2021, se propone un modelo de programación estocástica de dos etapas para minimizar el costo total de las decisiones relacionadas con la preparación y respuesta ante desastres naturales hidrometeorológicos en Colombia. El modelo considera la ubicación de almacenes y centros de ayuda, así como decisiones sobre el tamaño de la flota y el transporte de suministros humanitarios. Su flexibilidad se evalúa mediante la consideración de escenarios generados por la probabilidad de ocurrencia del ciclo El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Aporta a la literatura al ofrecer un enfoque sistemático y adaptable para la coordinación logística en situaciones de emergencia, y su relevancia para este proyecto radica en su capacidad para optimizar la asignación de recursos en áreas afectadas por inundaciones.

### **2.2.3.2. Modelos, Soluciones y Tecnologías Habilitadoras En Logística Humanitaria.**

En este artículo polaco realizado en el año 2015 los autores Linet Özdamar y Mustafa Alp Ertem, presentan una encuesta que se centra en las fases de planificación de respuesta y recuperación del ciclo de vida del desastre. Los modelos matemáticos desarrollados en esta área de investigación se clasifican según la estructura de la representación de vehículos/redes y su funcionalidad. También se estudia la aplicación de los sistemas de información en la logística humanitaria, ya que los modelos de logística humanitaria y sus soluciones deben combinarse con las tecnologías de la información para ser utilizados en la práctica. (Ozdamar & Alp Ertem, 2014).

Özdamar y Alp Ertem (2014) presentan una encuesta que aborda las fases de planificación de respuesta y recuperación en el ciclo de vida de desastres. Se clasifican los modelos matemáticos según la estructura de la representación de vehículos/redes y su funcionalidad, y se discute la integración de sistemas de información en la logística humanitaria. Este trabajo enriquece la literatura al destacar la importancia de la integración de sistemas de información en la logística humanitaria, ofreciendo una visión completa de las soluciones disponibles. Para este proyecto, proporciona un marco de referencia para comprender cómo la tecnología puede mejorar la coordinación logística en casos de emergencia.

### **2.2.3.3. Modelado De Operaciones De Respuesta A Emergencias: Una Encuesta De Construcción De Teoría.**

En este artículo de origen portugués publicado en el año 2020, los autores J.P. Minas, N.C. Simpson, Z.Y. Tacheva hablan de como durante la fase de respuesta de una emergencia, los responsables de la toma de decisiones gestionan procesos que salvan vidas, protegen la infraestructura y contienen amenaza, utilizando nuevos métodos adaptados del aprendizaje no supervisado y el análisis de varios tipos de redes entre las que se destacan redes de citas, redes autónomas, redes de servicios de emergencia, redes complejas, entre muchas otras; todo esto para reducir el sesgo de muestreo y expectativa. Descubrieron que la investigación operativa en apoyo de la preparación para emergencias se había desarrollado en grupos

identificables, cada uno de los cuales se centraba en un proceso específico, como la evacuación o la distribución de ayuda. El objetivo principal de este estudio es ayudar a informar a los investigadores interesados sobre el estado actual de la ciencia en la toma de decisiones de emergencia mientras se demuestran nuevos métodos de revisión de la literatura para reducir el posible sesgo de evaluación. (Minas, Simpson, & Tacheva, 2020)

Minas, Simpson y Tacheva (2020) exploran la gestión de procesos durante la fase de respuesta de emergencias, utilizando métodos adaptados del aprendizaje no supervisado y el análisis de redes para reducir el sesgo de muestreo y expectativa, identificando grupos de investigación centrados en procesos específicos como la evacuación y la distribución de ayuda. Este estudio identifica grupos de investigación centrados en procesos específicos, como la evacuación y la distribución de ayuda. Su enfoque en nuevos métodos para reducir el sesgo de muestreo y expectativa tiene valiosos aportes a la literatura. En el contexto de este proyecto, ofrece perspectivas sobre cómo mejorar la coordinación y toma de decisiones durante situaciones de emergencia.

#### **2.2.3.4. Modelos Matemáticos En La Gestión De La Cadena De Suministro Humanitaria: Una Revisión Sistemática De La Literatura.**

Este trabajo realizado en el año 2015 por Muhammad Salman Habib, Young Hae Lee y Muhammad Saad Memon en la república de Corea del Sur, comentan como en su última década Debido a los frecuentes desastres, las cadenas de suministro humanitario (HSC, por sus siglas en inglés) han atraído la atención de los investigadores. La incertidumbre sobre el momento, la ubicación y la gravedad de los desastres en la fase previa al desastre y el mal estado de la infraestructura disponible en la fase posterior al desastre dificultan la gestión de las operaciones del HSC. Para superar las dificultades durante estas fases, debemos asegurarnos de que las operaciones de HSC estén diseñadas de manera eficiente para minimizar las pérdidas humanas y económicas. Recientemente, se han desarrollado varios métodos y algoritmos de optimización matemática para mejorar la eficiencia de las operaciones de HSC. Dada la importancia de las técnicas de modelado matemático, este artículo revisa las contribuciones matemáticas al campo de HSC durante la última década. Debido al procedimiento de revisión, este artículo utiliza una revisión sistemática de la

literatura. Este estudio tiene dos objetivos: el primero es realizar investigaciones de vanguardia sobre modelos matemáticos desarrollados en el campo de HSC, y el segundo es resaltar áreas de investigación potenciales que requieren la atención de los investigadores. (Salman Habib, Hae Lee, & Saad Memon, 2015).

Habib, Lee y Memon (2015) revisan contribuciones matemáticas a la gestión de cadenas de suministro humanitarias (HSC) durante la última década. Destacan la importancia de los modelos matemáticos en la eficiencia de las operaciones de HSC y resaltan áreas de investigación potenciales. Su revisión sistemática ofrece una visión integral del campo, identificando áreas de investigación potenciales. En relación con este proyecto, proporciona un contexto valioso sobre cómo aplicar modelos matemáticos para mejorar la gestión de recursos en situaciones de emergencia.

#### **2.2.3.5. Modelo De Asignación De Recursos En Atención Primaria.**

El presente artículo desarrollado en Chile el año 2006 por los ingenieros Javier Raña, Juan-Carlos Ferrer y Paula Bedregal, comentan que la asignación de recursos primarios de salud es un problema mundial. En Chile, el Estado asigna fondos a los municipios a través de un mecanismo denominado "per cápita". Sin embargo, cada municipio asigna estos fondos con base en los costos históricos de cada centro de salud. Ninguno de estos enfoques tiene en cuenta las diferencias epidemiológicas y demográficas en la demanda. Este documento propone un modelo para la asignación de recursos a los centros de salud de manera justa, eficiente y transparente. El modelo contiene dos tipos de operaciones; los que son programables y cuya demanda es generada por el equipo médico y relacionada con la morbilidad que provoca el paciente. En el primer caso, las medidas de promoción, prevención y control de la salud se organizan de acuerdo con las metas establecidas por las instituciones de salud. En el segundo caso, la tasa de utilización se calcula para diferentes grupos sociodemográficos. El modelo se aplicó a una de las áreas más densamente pobladas del área metropolitana de Santiago y se encontró que aumenta la eficiencia y la transparencia en la asignación de recursos. (Raña, Ferrer, & Bed, 2007)

Raña, Ferrer y Bedregal (2006) proponen un modelo para la asignación de recursos a los centros de salud de manera justa, eficiente y transparente, teniendo en cuenta las diferencias epidemiológicas y demográficas en la demanda. El modelo se aplicó en el área metropolitana de Santiago, Chile, demostrando aumentar la eficiencia y la transparencia en la asignación de recursos. En el marco de este proyecto, ofrece ideas sobre cómo diseñar un modelo de asignación de recursos que considere múltiples variables y sea aplicable a situaciones de emergencia.

#### **2.2.3.6. Modelación Hidrodinámica Para Estimar Escenarios De Inundación Bajo Diferentes Regímenes De Precipitación. Aplicación Al Río Sinú, Tramo Montería.**

Este trabajo realizado por Gerardo Cusi Hernández Sibaja y Andrés Felipe Ruíz Hernández en el año 2021, identificar puntos de desbordamiento en la región central del Río Sinú (Montería) causados por precipitaciones típicas y anormales. La modelación numérica es una herramienta confiable para identificar áreas propensas a inundaciones, que son las causas fundamentales, para desarrollar la esencia de esta investigación, en primer lugar se realizaron simulaciones hidrológicas para evaluar el comportamiento de las precipitaciones en el medio de la cuenca, tomando en cuenta parámetros morfológicos, uso y cobertura del suelo, modelos digitales de elevación e información hidrometeorológica, los cuales arrojaron unos resultados confiables. La implementación del modelo hidrodinámico configura aspectos básicos como la geometría del modelo, que se adapta de manera efectiva a las condiciones de la zona de estudio y, además, se comprueba la precisión del modelo, como es el dato de nivel real medido por la estación limnimétrica de Montería. Finalmente, se genera una zona de inundación para cada período de retorno, se pueden identificar medidas de gestión de riesgos a tiempo para la toma de decisiones y mitigación de impactos potenciales. (Ruíz Hernández & Hernández Sibaja, 2021)

Cusi Hernández Sibaja y Ruíz Hernández (2021) identifican puntos de desbordamiento en la región central del Río Sinú (Montería) causados por precipitaciones típicas y anormales. Utilizan modelación numérica para evaluar el comportamiento de las precipitaciones y generar zonas de inundación para diferentes períodos de retorno, facilitando



la gestión de riesgos y la toma de decisiones. Su enfoque en generar zonas de inundación para diferentes períodos de retorno ofrece herramientas prácticas para abordar la problemática de inundaciones. Para este proyecto, su modelo hidrodinámico proporciona información crucial para entender y mitigar los efectos de las inundaciones en la región del Río Sinú.

### 3. Modelación Matemática

En esta sección, se presenta el modelo matemático utilizado para el problema de asignación de recursos y priorización de puntos afectados en la rivera del río Sinú considerando riesgo de inundaciones y vulnerabilidad de las comunidades. La estructura del modelo de asignación está compuesta por conjuntos, parámetros, variables, función objetivo y restricciones como se muestra a continuación:

#### Conjuntos:

$I$ : Puntos afectados.

$M$ : Municipalidades.

$L_i$ : Posibles niveles de intervención aplicables para el punto crítico  $i \in I$ .

$T$ : Periodos.

#### Parámetros:

$I_m$ : Puntos afectados localizados en la municipalidad  $m \in M$ .

$P_{li}$ : Número de períodos protegidos con el nivel de intervención  $l \in L_i$  en el punto crítico  $i \in I$ .

$B_{mt}$ : Presupuesto disponible en el periodo  $t \in T$  para intervenciones en la municipalidad  $m \in M$ .

$C_{li}$ : Costo de implementar el nivel de intervención  $l \in L_i$  en el punto crítico  $i \in I$ .

$r_i$ : Nivel de riesgo asociado al punto crítico  $i \in I$ .

### **VARIABLES:**

$R_{it}$ : Variable binaria igual a 1 si el punto crítico  $i \in I$  está amenazado por inundación en el periodo  $t \in T$ , y 0 en caso contrario.

$X_{lit}$ : Variable binaria igual a 1 si el punto crítico  $i \in I$  es intervenido con el nivel de intervención  $l \in L_i$  en el periodo  $t \in T$ , y 0 en caso contrario.

Dados los conjuntos, parámetros y variables previamente definidos, el modelo matemático para el problema es:

*Ecuación 14*

*Función Objetivo*

$$\min Z = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} r_i R_{it} \quad (1)$$

*S.a.*

*Ecuación 15*

*Restricción 1.*

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L_i} C_{li} I_m X_{lit} \leq B_{mt}, \quad \forall m \in M, t \in T, \quad (2)$$

*Ecuación 16*

*Restricción 2.*

$$R_{it} \geq 1 - \sum_{t'=t}^{t'+P_{li}-1} X_{lit}, \quad \forall i \in I, t \in T, \quad (3)$$

$t'$ : Periodo final donde termina la protección de la intervención.

*Ecuación 17*

*Restricción 3.*

$$\sum_{l \in L_i} X_{lit} \leq 1, \quad \forall i \in I, t \in T, \quad (4)$$

*Ecuación 18*

*Restricción 4*

$$\sum_{t'=t}^{t'+P_{li}-1} X_{lit} \leq 1, \quad \forall l \in L, i \in I, \quad \forall t' \in T: t + P_l \leq |T| \quad (5)$$

Ecuación 19

Restricción 10.

$$X_{it}, R_{it} \in \{0, 1\}, \quad (6)$$

La función objetivo (1) busca minimizar el riesgo definido como la función objetivo Z busca minimizar el riesgo total asociado a los puntos críticos en todos los períodos de tiempo. Esta función calcula la suma del producto entre el nivel de riesgo  $r_i$  de cada punto crítico  $i$  y una variable binaria  $R_{it}$ , que indica si el punto crítico  $i$  está en riesgo de inundación en el período  $t$ . Por lo tanto, la función objetivo busca reducir el riesgo total considerando todos los puntos críticos y períodos de tiempo.

La Restricción (2) establece que el costo total de implementar todas las intervenciones en un municipio durante un período dado no debe exceder el presupuesto disponible para ese municipio y período.

La restricción (3) establece que una acción de protección implementada en el período  $t$  protege un punto crítico  $i$  contra la amenaza de inundación en el período  $t$  y en  $P_i - 1$  períodos consecutivos después de ese período. El periodo donde inicia la intervención se le suma la duración de la protección, y al final se le resta 1. Debido que la intervención comienza desde el periodo  $t$ , no el periodo siguiente, por ejemplo si se comienza una intervención de duración 1 periodo, en el periodo 5, sería  $5 + 1 - 1$ , ya que la protección solo sería en ese periodo 5. O si se usa una intervención con protección de 5 periodos que comienza en el periodo 7, será  $7 + 5 - 1$ , la protección terminará al final al final del periodo 11.

La restricción (4) asegura que en cada punto crítico  $i$  y en cada período  $t$ , solo se pueda aplicar un nivel de intervención. La restricción (5) garantiza que para cada punto crítico  $i$ , nivel de intervención  $l$  y período, se puede aplicar el nivel de intervención  $l$  en un solo período dentro del intervalo de protección definido por  $P_l$ . Finalmente, la restricción (6) establece que las variables X y R son binarias (toman valores de 0 o 1).

## **4. Construcción Del Caso De Estudio**

Después de haber realizado la revisión de literatura se comienza a desarrollar el modelo agrupando los datos que se tienen y la relación entre cada uno de ellos. De la información recolectada de la literatura, no se tomó en cuenta ningún aspecto relacionado a los modelos publicados anteriormente. Sin embargo, la información de los puntos afectados se tomó con base en los informes de la CVS y cómo se obtuvieron a partir de la Guía Metodológica para Elaboración de Planes Departamentales para la Gestión del Riesgo.

La siguiente sección describe los puntos afectados, utilizando información recopilada de informes de la CVS de los años 2021, 2022 y 2023. Se establece una clasificación de riesgo combinando los riesgos de erosión e inundación. Luego, se presentan datos históricos y análisis del año 2023, seguidos por los niveles de intervención propuestos y sus costos asociados.

### **4.1. Descripción De Los Puntos afectados**

Con base a la información obtenida en los 3 informes de la CVS de los años 2021, 2022 y 2023, se realizaron diferentes tablas y gráficos donde se compacta la información más importante, como primera instancia se mostrará en la Tabla 4 una clasificación de riesgo que se estableció para combinar los riesgos de erosión e inundación en uno solo. Si el punto crítico en cuestión presenta un riesgo bajo en inundación y en erosión, se clasifica como No urgente, en cambio sí para alguno de los dos es bajo y para el otro es medio, se clasifica como prioritario, si ambos riesgos son medio, o uno es alto y el otro es bajo, se clasifica como Urgente, también si uno es medio y el otro es alto se clasifican como de Emergencia, y por último si ambos tienen riesgo alto se clasifican como Crítico.

Tabla 4

Clasificación De Riesgo

Clasificación de riesgo	
No urgente	Bajo - Bajo
Prioritario	Bajo - Medio
Urgente	Medio, Alto - Bajo
Emergencia	Medio - Alto
Crítico	Alto - Alto

Fuente: Propia.

Después de saber cómo se clasificaron los puntos afectados, se realizó la Tabla 5 con los datos históricos sacados en los informes de los 3 años, donde se muestran los datos clasificados por municipalidades, por año y por tipo de riesgo, dando:

Tabla 5

Histórico De Puntos afectados 2021-2023 Por Municipalidad, Por Año Y Por Tipo De Riesgo.

	Clasificación de riesgo	Bajo - Bajo	Bajo - Medio	Medio, Alto - Bajo	Medio - Alto	Alto - Alto	Total
		No urgente	Prioritario	Urgente	Emergencia	Crítico	
Tierralta	2021	24	7	3	2	0	36
	2022	23	4	4	0	0	31
	2023	23	5	3	0	0	31
Valencia	2021	10	1	2	0	1	14
	2022	8	1	1	1	1	12
	2023	8	0	1	1	1	11
Montería	2021	26	16	6	5	1	54
	2022	21	14	13	2	0	50
	2023	20	17	11	1	0	49
Cereté	2021	11	7	1	2	0	21
	2022	9	8	1	1	2	21
	2023	12	6	2	1	0	21
San Pelayo	2021	9	5	3	1	0	18
	2022	12	5	2	1	0	20
	2023	16	6	3	0	0	25
Cotorra	2021	1	1	0	0	0	2
	2022	1	0	1	0	0	2
	2023	1	0	1	0	0	2
Lorica	2021	23	8	8	6	1	46
	2022	25	7	10	3	2	47
	2023	26	10	9	2	1	48
San Bernardo del Viento	2021	5	5	4	0	1	15
	2022	3	6	4	2	0	15
	2023	3	6	4	2	0	15

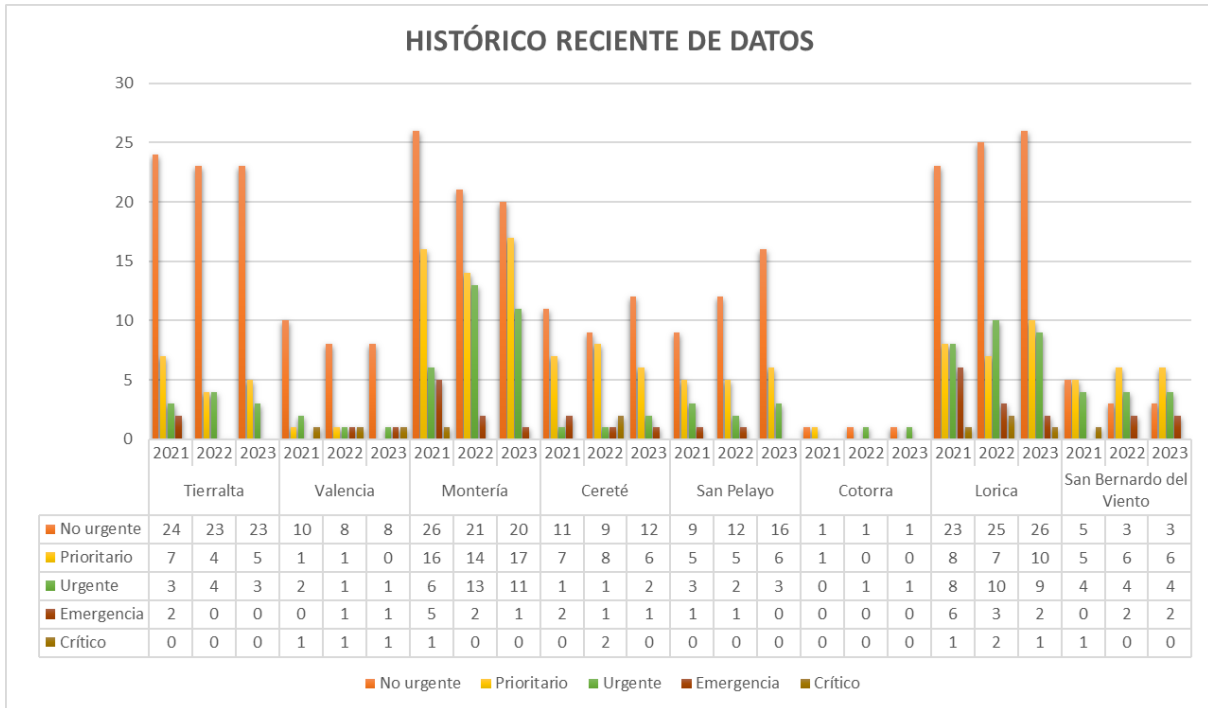
Fuente: Propia.

De la Tabla 5 se realizó la

Ilustración 17 donde se ven los datos presentados a través de barras, con el fin de realizar una comparación gráfica de los puntos afectados con el pasar de los años.

Ilustración 17

Gráfico Histórico De Datos 2021-2023.



*Fuente: Propia*

De los datos obtenidos en el informe del año 2023 se hizo un recuento del número de puntos clasificados por el nivel de riesgo tanto por inundación como por erosión, presentados en la Tabla 6.

Tabla 6.

Clasificación Puntos afectados Nivel De Riesgo (Erosión-Inundación).

Municipio	Erosión			Inundación			Total
	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	
Tierralta	27	2	2	26	5	0	31
Valencia	8	0	3	9	1	1	11
Montería	37	10	2	29	12	8	49
Cereté	16	4	1	15	5	1	21
San Pelayo	21	3	1	18	7	0	25
Cotorra	1	1	0	1	1	0	2
Lorica	37	9	2	37	9	2	48
San Bernardo	10	4	1	3	10	2	15
Total	157	33	12	138	50	14	202

*Fuente: Propia.*

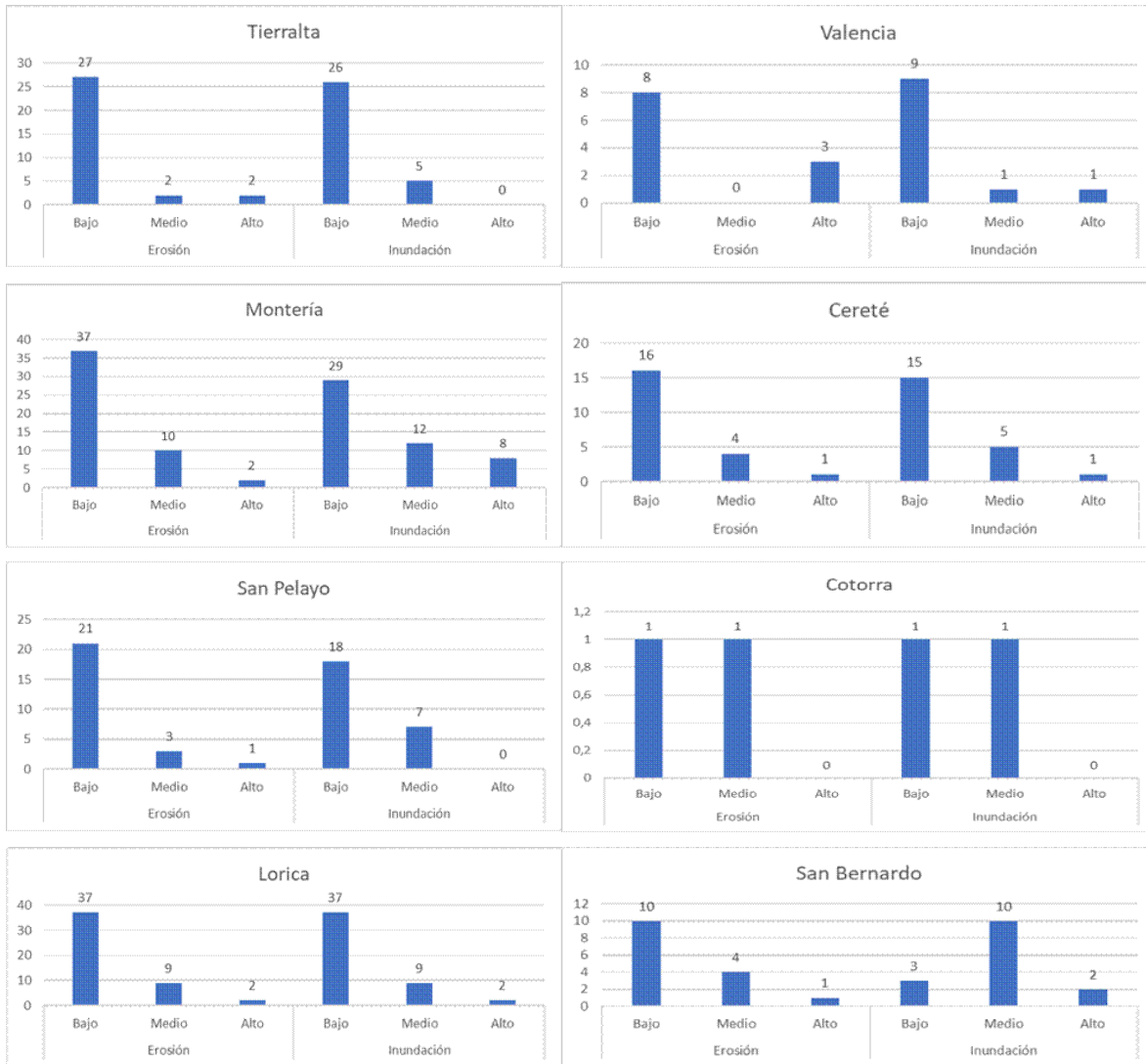
En la

Ilustración 18. se muestra de manera gráfica los puntos afectados de riesgo por erosión e inundación de las municipalidades en cuestión.



Ilustración 18.

Puntos afectados Por Erosión E Inundación De Las municipalidades De la zona en estudio 2023

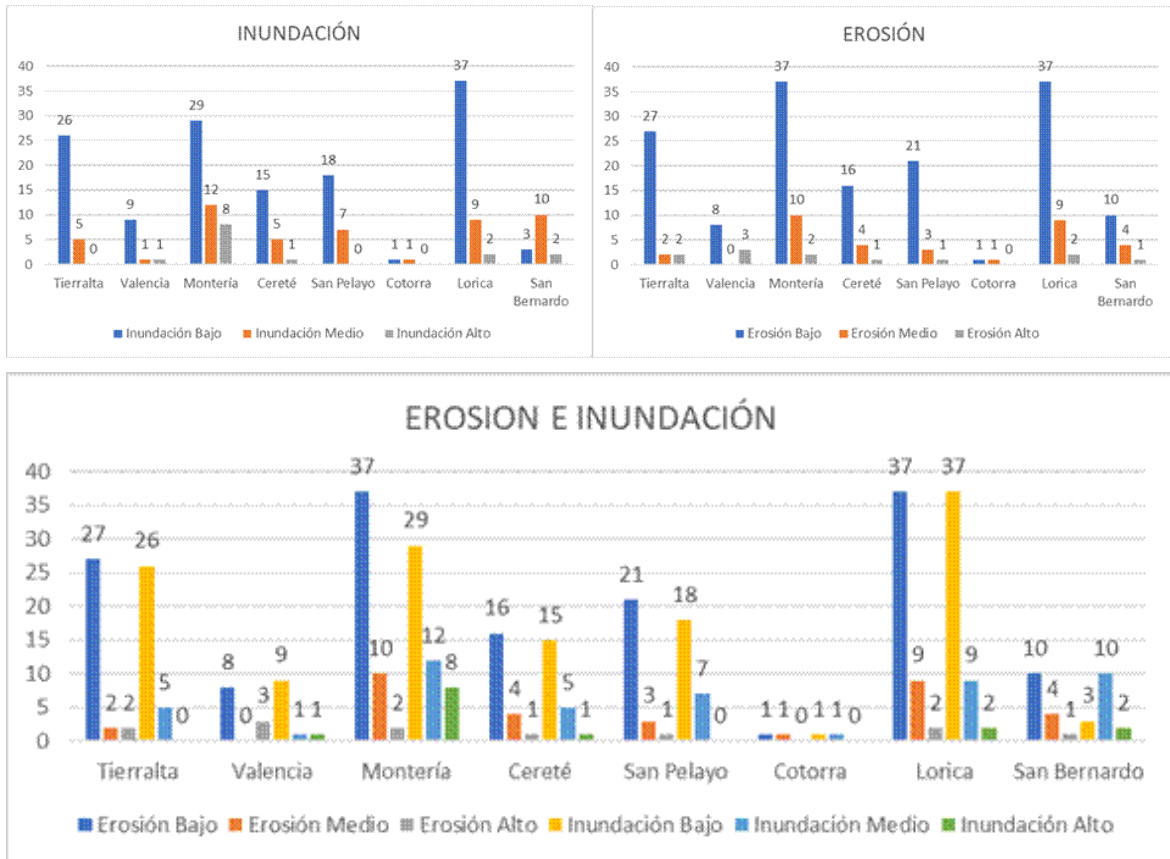


Fuente: Propia

En la Ilustración 19. se muestran los gráficos para los puntos afectados por erosión, por inundación y la combinación de estos, para cada una de las municipalidades.

Ilustración 19.

Gráfico Puntos afectados Por Erosión E Inundación.



Fuente: Propia.

Para el modelo matemático se realiza el cambio de la clasificación de riesgo a establecerlos por números, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7

Clasificación de riesgo

1	No urgente
2	Prioritario
3	Urgente
4	Emergencia
5	Crítico

Fuente: Propia

Con base en la información suministrada anteriormente se establece la clasificación de riesgo basada en la unión de la exposición a la erosión e inundación, estableciéndose de la siguiente manera como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8

Clasificación De Riesgo Puntos afectados 2023.

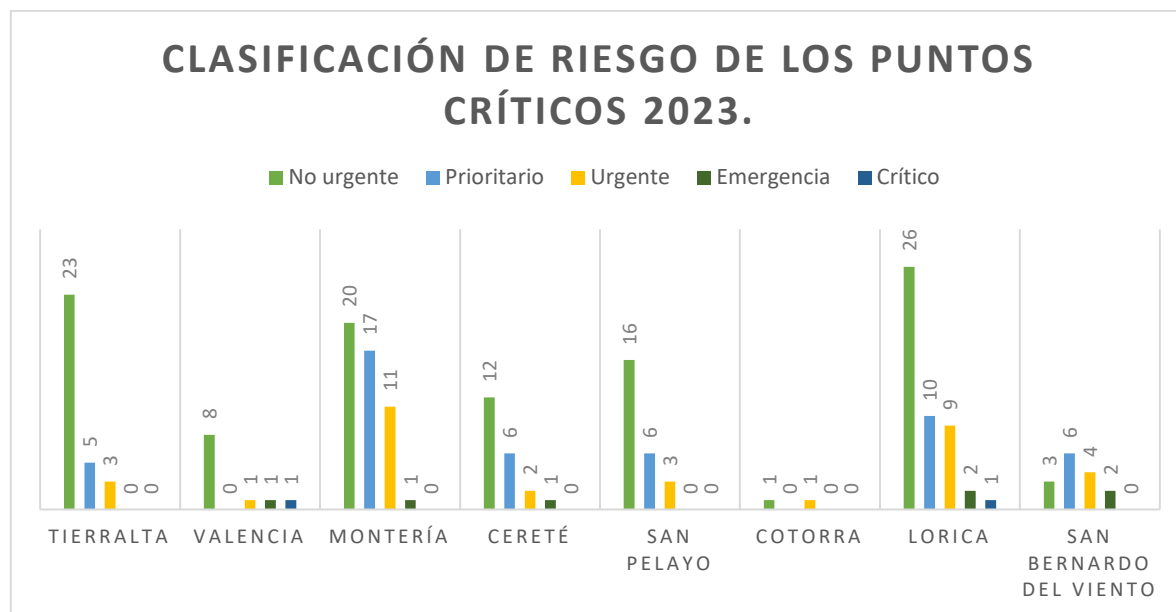
Clasificación de riesgo		Tierralta	Valencia	Montería	Cereté	San Pelayo	Cotorra	Lorica	San Bernardo del Viento	Total
Bajo - Bajo	No urgente	23	8	20	12	16	1	26	3	109
Bajo - Medio	Prioritario	5	0	17	6	6	0	10	6	50
Medio, Alto - Bajo	Urgente	3	1	11	2	3	1	9	4	34
Medio - Alto	Emergencia	0	1	1	1	0	0	2	2	7
Alto - Alto	Crítico	0	1	0	0	0	0	1	0	2
Total		31	11	49	21	25	2	48	15	202

Fuente: Propia.

En la Ilustración 20 se muestra de manera gráfica la clasificación de riesgo de los puntos afectados por municipalidad.

Ilustración 20

Clasificación De Riesgo Puntos afectados 2023



Fuente: Propia.

## 4.2. Niveles De Intervención

Los niveles de intervención a utilizar son las aplicaciones de protección de taludes con mantos Terratrak TRM, geotextil Fortex Bx40, colchacreto articulado, geoceldas Conficell Ec. El estudio se realizará para un periodo de 18 años, y cada nivel de intervención previene un número de periodos, como se muestra en la Tabla 9. Los valores correspondientes a costos expuestos en la tabla se profundizan en la sección 4.3 página 70 correspondiente a Costo y Presupuesto.

Tabla 9

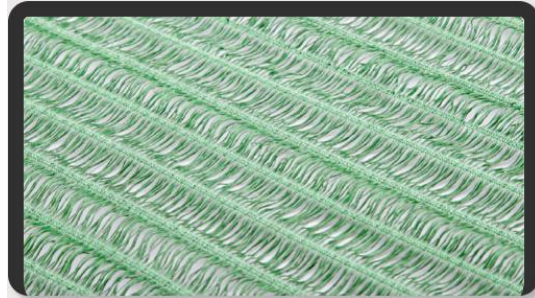
*Datos Niveles De Intervención.*

#	Intervención	Costo/m <sup>2</sup>	# de Periodos que protege
1	GEOTEXTIL FORTEX BX 40	\$ 29.623	3
2	MANTOS TERRATRAC TRM	\$ 42.103	5
3	COLCHACRETO ARTICULADO	\$ 83.703	7
4	GEOCELDA CONFICELL EC	\$ 97.092	10

**PROTECCIÓN DE TALUDES CON MANTO:** El manto permanente para control de erosión Terratrak TRM (Ilustración 21) está destinado para prevenir contra la erosión, sirve como soporte para el establecimiento y crecimiento de cultivos, y actuar como soporte constante para los cultivos maduros. Al estar hecho con fibras de origen sintético y poliéster resiste a los rayos ultravioleta, este manto forma una estructura tridimensional porosa. Es empleado para proteger taludes y canales de la erosión, siendo inerte sin causar consecuencias negativas en el ambiente. Es de fácil y rápida instalación, ofreciendo protección inmediata en ausencia de vegetación y reduciendo las fuerzas erosivas asociadas a la lluvia escorrentía y el viento. A continuación se muestra una (GeoMatrix, 2024).

*Ilustración 21*

*Manto Terratac TRM*

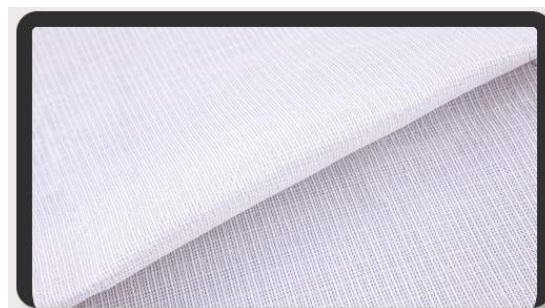


*Fuente:* (GeoMatrix, 2024)

**GEOTEXTIL FORTEX BX 40:** El geotextil tejido Fortex Bx40 (Ilustración 22) está fabricado con multifilamentos de poliéster de alto módulo, ofrece un excelente rendimiento hidráulico y mecánico. El tejido de la estructura garantiza una reacción ágil frente a las alteraciones en el terreno y consistencia en el desempeño hidráulico. Cumple con las especificaciones para refuerzo, filtración, separación y estabilización de suelos en construcción de vías. Su tecnología de producción permite obtener geotextiles con alta resistencia a la deformación, durabilidad ante condiciones ambientales adversas y excelentes propiedades mecánicas e hidráulicas. Presenta ventajas como ahorro en cantidad de material, reducción de costos de preparación de terrenos y excelentes propiedades de permeabilidad. (GeoMatrix, 2024).

*Ilustración 22*

*Geotextil tejido Fortex Bx40*



*Fuente:* (GeoMatrix, 2024)

**COLCHACRETO ARTICULADO:** El colchacreto articulado (Ilustración 23) es una formaleta textil diseñada para ser llenada con concreto hidráulico de agregado fino, utilizada en la protección de orillas y revestimientos flexibles. Contiene dos capas de geotextil entretejidas, al ser llenada genera un sistema de bloques articulados interconectados que se adaptan a los cambios de nivel de la superficie de apoyo. Ofrece una macrotextura similar a la de cantos de río, disipando la energía del flujo y evitando la formación de olas y el rebote de la corriente. Su instalación es fácil y no necesita personal especializado ni maquinaria específica, lo que resulta en un mayor rendimiento y ahorro en el consumo de concreto. Se utiliza para proteger márgenes fluviales, cuerpos de agua, embalses, laderas propensas a la erosión, y revestimiento de canales, cunetas, zanjas, entre otros. (GeoMatrix, 2024).

*Ilustración 23*

*Colchacreto articulado*



*Fuente:* (GeoMatrix, 2024)

**GEOCELDA CONFICELL EC:** CONFICELL EC (Ilustración 24) es un geocompuesto diseñado para la recuperación vegetal de taludes. Utiliza franjas de geotextil tejido de poliéster de alta tenacidad PET, recubiertas con un copolímero que les otorga alta rigidez y protección UV. Estas franjas están unidas mediante costura mecánica con hilo de poliéster de alta tenacidad, asegurando eficiencia en las juntas y durabilidad a largo plazo. Incorpora una geomalla biaxial Fortgrid BX30 en la parte inferior para estabilidad dimensional y sostenimiento radicular. Conficell EC ofrece protección permanente contra la erosión y permite el uso de diversos materiales de llenado. Su diseño en forma de panel de abeja asegura robustez estructural y adaptabilidad a cambios de nivel en el terreno,

facilitando la instalación y ofreciendo una solución eficaz para problemas de erosión en taludes y laderas. (GeoMatrix, 2024).

*Ilustración 24*

*Geocelda CONFICELL EC*



*Fuente:* (GeoMatrix, 2024)

### **4.3. Costos y Presupuesto**

La siguiente sección se realizó en compañía del ingeniero José Dolores Arteaga Hernández, ingeniero civil con experiencia en proyectos de ingeniería como servidor público y experiencia en Taludes. Con él se obtuvo la información requerida para realizar la información de la Tabla 10, donde se muestran las intervenciones, los costos de mano de obra y materiales para la implementación de los niveles de intervención, basado en el APU del año pasado desarrollado por INVÍAS (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2023), realizando una actualización en los valores relacionados con el SMLMV del año 2024, aplicando esta metodología para algunos productos y materiales cotizados en la empresa GEOMATRIX (GeoMatrix, 2024).

Tabla 10

Precios Unitarios Niveles De Intervención.

PROYECTO	SUBTOTAL MATERIALES	SUBTOTAL MANO DE OBRA	PRECIO UNITARIO TOTAL (\$COP/m <sup>2</sup> )
GEOTEXTIL FORTEX BX 40	\$ 13.400,00	\$ 9.386,84	\$ 29.622,89
MANTOS TERRATRAC TRM	\$ 23.000,00	\$ 9.386,84	\$ 42.102,89
COLCHACRETO ARTICULADO	\$ 55.000,00	\$ 9.386,84	\$ 83.702,89
GEOCELDA CONFICELL EC	\$ 54.545,83	\$ 4.087,62	\$ 97.092,46

Fuente: Propia, basado en el APU de INVIAS (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2023).

## 5. Vulnerabilidad, Riesgo y Amenaza.

En esta sección se explicará cómo identificar y asignar valores a los parámetros de amenaza, riesgo y vulnerabilidad y su interacción para todo este proceso.

### 5.1. Amenaza.

La identificación de amenazas puede llevarse a cabo utilizando diversas metodologías, como encuestas a grupos locales, revisión de archivos públicos, informes de entidades especializadas como el Servicio Geológico Nacional o el IDEAM, gráficos como árbol de problemas, entrevistas con personas clave, mapeo colaborativo e inspecciones y recorrido en sitios vulnerables. El parámetro “amenaza” se puede definir en una función que depende de 3 variables: frecuencia (¿Con que periodicidad ocurren eventos amenazantes en el distrito?), intensidad (¿Qué tan fuerte o grave se ve distrito porque ocurra o haya ocurrido un fenómeno?), abordando estudio cuantificado y cualificado de la gravedad de un evento en una ubicación particular) y zona impactada (¿Cuál es la magnitud del área afectada en el territorio?), para ello se explicará en las siguientes tablas los valores que tendrán estas variables y en que situaciones obtienen dichos valores. (PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)



En la Tabla 11, se presenta el nivel de frecuencia de las amenazas en el distrito. Siendo una calificación Alta de valor 3 cuando es una situación presentada más de una vez en el año o al menos una vez en un intervalo de uno a tres años, se otorga una calificación Media con un valor de 2 si es una situación presentada por lo menos una vez en un intervalo entre 5 a 20 años, mientras que se le da una calificación Baja con una puntuación de 1 si es una situación presentada al menos una vez en intervalo entre 5 a 20 años.

Tabla 11

Valores Para La Frecuencia De Las Amenazas.

Descripción	Valor	Calificación
Evento que se presenta más de una vez en el año o por lo menos una vez en un periodo de uno a tres años	3	ALTA
Evento que se presenta por lo menos una vez en un periodo de tiempo entre 5 a 20 años	2	MEDIA
Evento que se presenta al menos una vez en un periodo de tiempo entre 5 a 20 años	1	BAJA

(PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)

En la Tabla 12, se muestra como para cada amenaza identificada en el distrito se otorga un puntaje de acuerdo con las descripciones detalladas en la misma. Si se presenta un elevado número de víctimas mortales, una considerable cantidad de heridos, impacto en amplias áreas del territorio, daños significativos en recursos naturales, interrupción de servicios públicos esenciales y actividades económicas por varios meses, pérdidas económicas considerables, daños graves en la infraestructura departamental y una gran cantidad de viviendas destruidas, se le da un valor de 3 correspondiente a una calificación alta. Sin embargo, si se registran pocas víctimas mortales, varias personas con lesiones leves, impacto moderado en los recursos naturales, afectaciones en las redes de servicios públicos, suspensión temporal de actividades económicas, daño moderado en la infraestructura departamental, pocas viviendas destruidas y varias viviendas afectadas se le da un valor de 2

correspondiente con una clasificación media, mientras que si no hay personas fallecidas, muy pocas personas lesionadas de forma leve, mínima afectación en el territorio, sin impacto en las redes de servicios públicos, sin interrupción en las actividades económicas, sin daño en la infraestructura departamental, sin viviendas destruidas ni dañadas se le asocia un valor de 1 clasificando como bajo.

Tabla 12

Valores Para La Intensidad De Las Amenazas.

Descripción	Valor	Calificación
Numerosas personas fallecidas, gran cantidad de personas lesionadas, afectación de grandes extensiones del territorio, afectaciones graves en los recursos naturales, suspensión de servicios públicos básicos y de actividades económicas durante varios meses, pérdidas económicas considerables, graves afectaciones en la infraestructura departamental y un gran número de viviendas destruidas	3	ALTA
Pocas personas fallecidas, varias personas lesionadas de mínima gravedad, afectación moderada de los recursos naturales, afectaciones en las redes de servicios públicos, suspensión temporal de actividades económicas, afectación moderada en la infraestructura departamental, pocas viviendas destruidas y varias viviendas afectadas	2	MEDIA
Sin personas fallecidas, muy pocas personas lesionadas de mínima gravedad, mínima afectación en el territorio, sin afectación en las redes de servicios públicos, no hay interrupción en las actividades económicas, sin afectación en infraestructura departamental, no hay destrucción de viviendas, ni viviendas averiadas.	1	BAJA

(PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)

El territorio incluye las porciones físicas como tierras, cuerpos de agua y otras características dentro del distrito, los cuales muestran diversas afectaciones cuando se enfrentan a fenómenos amenazantes. Cuando un lugar se enfrenta a fenómenos amenazantes el territorio muestra afectaciones, ya sea en tierras, cuerpos de agua o alguna otra

característica. La Tabla 13, proporciona una descripción de los niveles de afectación en el territorio, y este análisis debe ser realizado individualmente para cada amenaza presente en el distrito. Donde se clasifica en Alto, medio o bajo si respectivamente presentan más del 80% del territorio se encuentra afectado, o está afectado entre el 50% y 80% o si menos del 50% del territorio presenta algún tipo de afectación, valorándose en 3 si es Alto, 2 si es Medio, o 1 si es Bajo.

Tabla 13

Valores Para Territorio Afectado Por Las Amenazas

Descripción	Valor	Calificación
Más del 80% de su territorio se encuentra afectado	3	ALTA
Entre el 50% y 80% del territorio presenta afectación	2	MEDIA
Menos del 50% del territorio presenta algún tipo de afectación	1	BAJA

(PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)

La calificación de las amenazas en total se basa evaluando el nivel de intensidad, frecuencia y afectación en el territorio para cada amenaza identificada. Después del análisis realizado anteriormente en cada una de estas variables se procede con la calificación de la amenaza correspondiente, utilizando la Ecuación 20:

Ecuación 20

Amenaza

$$\text{Amenaza (A)} = \text{Intensidad (I)} + \text{Frecuencia (F)} + \text{territorio afectado (T)}$$

(PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)

Es necesario realizar la calificación de cada amenaza teniendo en cuenta los valores obtenidos en cada una de las variables mencionadas previamente. Los intervalos de calificación de las amenazas se basan en el resultado de la ecuación, como se presenta en la Tabla 14, donde si el resultado de la ecuación está en el intervalo 1-3 se clasifica como Bajo, si está entre 4-6 se clasifica como Medio, y si está entre 7-9 clasifica como Alto.

Tabla 14

Clasificación De La Amenaza

Intervalo	Clasificación
1-3.	Baja
4-6.	Media
7-9.	Alta

(PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)

## 5.2. Vulnerabilidad.

La vulnerabilidad busca evaluar el grado de debilidad y exposición ante la ocurrencia de un peligro, ya sea natural o causado por el hombre, es también la facilidad con la que elementos como infraestructura, viviendas o actividades productivas pueden sufrir daños. Para realizar este análisis, es crucial identificar y caracterizar los elementos expuestos en un área geográfica y comprender los efectos adversos de una amenaza. Este proceso implica combinar información estadística y científica con conocimientos existentes en la sociedad y la participación de otros actores en el territorio. Al comprender claramente la vulnerabilidad, se pueden definir medidas apropiadas para reducir el riesgo. La vulnerabilidad se divide en 4 aspectos que son económico, físico, ambiental y social, los cuales a su vez se dividen también en un total de 17 aspectos por evaluar, cada tipo de vulnerabilidad es analizado por aparte para luego hacer un análisis final para una vulnerabilidad total. (PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)

La Tabla 15 presenta las variables a considerar para determinar una aproximación numérica de vulnerabilidad física, siendo la vulnerabilidad física la suma de los valores dados para cada una de las 5 variables presentadas.

Tabla 15

Clasificación Vulnerabilidad Física

Variable	Valor de vulnerabilidad		
	Baja	Media	Alta
	1	2	3
Antigüedad de la edificación	Menos de 5 años	Entre 6 y 20 años	Mayor de 20 años
Materiales de construcción	Estructura con materiales de muy buena calidad y adecuada técnica constructiva	Estructura de madera, concreto, adobe, bloque o acero, sin adecuada técnica constructiva.	Estructura de adobe, madera u otros materiales en estado precario.
Cumplimiento de la normativa vigente	Se cumple de forma estricta las leyes	Se cumple medianamente con las leyes	No se cumple con las leyes
Características geológicas y tipo de suelo	Zonas sin fallas, fracturas y/o diaclasas. Suelos con buenas características geotécnicas.	Zonas ligeramente fracturadas. Suelos con mediana capacidad portante.	Zonas muy fracturadas y falladas. Suelos colapsables (lentos, nivel freático alto, material orgánico)
Localización de las edificaciones con respecto a zonas de retiro a fuentes de agua y zonas de riesgo	Muy alejada	Medianamente cerca	Muy cercana

(PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)

La Tabla 16 presenta las variables a considerar para determinar el valor de vulnerabilidad económica, siendo la vulnerabilidad económica la suma de los valores dados para cada una de las 4 variables presentadas, siendo influenciada por el nivel de ingresos o la capacidad de satisfacer las necesidades básicas desde la perspectiva de la pobreza material, una persona exhibirá una alta vulnerabilidad económica cuando sea pobre y no satisfaga dos o más necesidades básicas, vivienda inadecuada, hacinamiento crítico, acceso inadecuado a servicios públicos (especialmente acueducto y saneamiento básico), dependencia económica

e inasistencia escolar de niños menores de 11 años. (PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)

Tabla 16

*Clasificación Vulnerabilidad Económica*

Variable	Valor de vulnerabilidad		
	Baja	Media	Alta
	1	2	3
Situación de pobreza y seguridad alimentaria.	Población sin pobreza y con seguridad alimentaria	Población por debajo de la línea de pobreza.	Población en situación pobreza extrema
Nivel de ingresos	Alto nivel de ingresos	El nivel de ingreso cubre las necesidades básicas	Ingresos inferiores para suplir las necesidades básicas
Acceso a los servicios públicos	Total cobertura de servicios públicos básicos	Regular cobertura de los servicios públicos básicos	Muy escasa la cobertura de los servicios públicos básicos
Acceso al mercado laboral	La oferta laboral es mayor que la demanda	La oferta laboral es igual a la demanda	La oferta laboral es mucho menor que la demanda

. (PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)

La Tabla 17 presenta las variables a considerar para determinar el valor de vulnerabilidad ambiental, siendo la vulnerabilidad ambiental la suma de los valores dados para cada una de las 4 variables presentadas.

Tabla 17

Clasificación Vulnerabilidad Ambiental.

Variable	Valor de vulnerabilidad		
	Baja	Media	Alta
	1	2	3
Condiciones atmosféricas	Niveles de temperatura y/o precipitación promedio normales	Niveles de temperatura y/o precipitaciones ligeramente superiores al promedio normal	Niveles de temperatura y/o precipitaciones ligeramente superiores medio normal
Composición y calidad del aire	Sin ningún grado de contaminación	Con un nivel moderado de contaminación	Alto grado de contaminación, niveles perjudiciales para la salud
Composición y calidad del agua	Sin ningún grado de contaminación	Con un nivel moderado de contaminación	Alto grado de contaminación, niveles perjudiciales para la salud
Condiciones de los recursos ambientales	Nivel moderado de explotación de los recursos naturales, ligero crecimiento de la población, nivel de contaminación leve y no se practica la deforestación	Alto nivel de explotación de los recursos naturales, incremento de la población y del nivel de contaminación	Explotación indiscriminada de los recursos naturales, incremento acelerado de la población, deforestación y contaminación.

(PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)

En la Tabla 18, se presentan las variables para tener en cuenta para determinar el valor de vulnerabilidad social, siendo la vulnerabilidad social la suma de los valores dados para cada una de las 4 variables presentadas.

Tabla 18

Clasificación Vulnerabilidad Social

Variable	Valor de vulnerabilidad		
	Baja	Media	Alta
	1	2	3
Nivel de organización	Población organizada	Población medianamente organizada	Población sin ningún tipo de organización
Participación	Población total de la población	Escasa participación de la población	Nula participación de la población
Grado de relación entre las organizaciones comunitarias y las instituciones	Fuerte relación entre las organizaciones comunitarias y las instituciones	Relaciones débiles entre las organizaciones comunitarias y las instituciones	No existen relaciones entre las organizaciones comunitarias y las instituciones
Conocimiento comunitario del riesgo	La población tiene total conocimiento de los riesgos presentes en el territorio y asume su compromiso frente al tema	La población tiene poco conocimiento de los riesgos presentes y no tiene un compromiso directo frente al tema	Sin ningún tipo de interés por tema

(PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)

En síntesis, la vulnerabilidad se evalúa considerando factores físicos, ambientales y sociales. Cada tipo de vulnerabilidad se califica con valores numéricos de alto (3), medio (2) o bajo (1) según el análisis de las variables presentadas en las tablas. Al realizar la evaluación sumando las calificaciones de las cuatro vulnerabilidades (física, ambiental, social y económica) para obtener la vulnerabilidad total, realizándose como se en la

Ecuación 21:



*Ecuación 21*

*Vulnerabilidad Total*

$$V_t = V_f + V_a + V_e + V_s$$

(PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)

Donde,

V<sub>t</sub>: vulnerabilidad Total

V<sub>f</sub>: Vulnerabilidad Física

V<sub>e</sub>: Vulnerabilidad Económica

V<sub>a</sub>: Vulnerabilidad Ambiental

V<sub>s</sub>: Vulnerabilidad Social

El valor de V<sub>t</sub> se compara con los intervalos definidos en la

Tabla 19 para determinar si la vulnerabilidad es alta, media o baja. Este enfoque permite comprender las condiciones que contribuyen a la vulnerabilidad y facilita la identificación de áreas críticas para la reducción del riesgo. Si la vulnerabilidad total da como resultado un valor entre 17 y 27, sería clasificada como vulnerabilidad baja, mientras que si queda en el segundo intervalo (18-39) sería vulnerabilidad media, y si queda en el último intervalo (20-51) sería vulnerabilidad alta. Este proceso permite asignar niveles específicos de vulnerabilidad a cada amenaza y facilita la priorización de acciones para reducir el riesgo en áreas identificadas como más críticas.

Tabla 19

Clasificación Vulnerabilidad Total

CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN/CARACTERÍSTICAS	INTERVALO
VB (Vulnerabilidad Baja)	Viviendas asentadas en terrenos seguros, con materiales sismorresistentes, en buen estado de conservación, población con un nivel de ingreso medio y alto, con estudios y cultura de prevención, con cobertura de servicios públicos básicos, con un buen nivel de organización, participación y articulación entre las instituciones y organizaciones existentes.	17-27
VM (Vulnerabilidad Media)	Sectores que presentan inundaciones muy esporádicas, construcciones con materiales de buena calidad, en regular y buen estado de conservación, población con un nivel de ingreso económico medio, cultura de prevención, con cobertura parcial de servicios básicos, con facilidades de acceso para atención de emergencia. Población organizada, con participación de la mayoría, medianamente relacionados e integración parcial entre las instituciones y organizaciones existentes.	28-39

VA (Vulnerabilidad Alta)	Edificaciones en materiales precarios, en mal y regular estado de construcción, con procesos de hacinamiento y tugurización. Población de escasos recursos económicos, sin conocimientos y cultura de prevención, cobertura parcial a inexistente de servicios públicos básicos, accesibilidad limitada para atención de emergencias; así como escasa a nula organización, participación y relación entre las instituciones y organizaciones existentes.	40-51
--------------------------------	--	-------

(PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)

### 5.3. Riesgo.

El riesgo se define como la combinación de amenaza y vulnerabilidad, aspectos inseparables pero independientes. La evaluación del riesgo busca valorar los posibles impactos de fenómenos naturales extremos en una población y sus condiciones de vida, abarcando aspectos sociales, económicos y ambientales. El cálculo del riesgo implica evaluar conjuntamente las amenazas identificadas (A) y el análisis de vulnerabilidad (V) para estimar la probabilidad de pérdidas y daños esperados en caso de que ocurra un fenómeno. Este cálculo se basa en datos teóricos y empíricos relacionados con la probabilidad de ocurrencia de la amenaza, su intensidad y la capacidad de resistencia de los elementos expuestos. Hay dos enfoques principales para el cálculo del riesgo: el descriptivo y el analítico o matemático. El descriptivo utiliza una matriz de doble entrada llamada "Matriz de Amenaza y Vulnerabilidad" (

Tabla 20) para estimar el nivel de riesgo esperado al cruzar los valores de amenaza y vulnerabilidad. Este procedimiento se adapta a las características específicas de cada situación.

*Tabla 20*

*Matriz de peligro y vulnerabilidad para estimación del nivel de riesgo*

RIESGO			
Amenaza Alta	Riesgo Medio	Riesgo Alto	Riesgo Alto
Amenaza Media	Riesgo Bajo	Riesgo Medio	Riesgo Alto
Amenaza Baja	Riesgo Bajo	Riesgo Bajo	Riesgo Medio
	Vulnerabilidad Baja	Vulnerabilidad Media	Vulnerabilidad Alta

(PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)

Por otro lado, el método analítico se basa en la ecuación fundamental (

Ecuación 22):

$$R = f(A, V)$$

(PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)

Donde R representa el riesgo, A la amenaza y V la vulnerabilidad. Este enfoque implica aplicar ecuaciones matemáticas para estimar el riesgo, teniendo en cuenta los valores obtenidos anteriormente como amenazas y vulnerabilidades totales, para luego clasificar el riesgo como se mostró en la

Tabla 20 entre Riesgo Bajo, Riesgo Medio y Riesgo Alto.

Es importante señalar que el riesgo solo puede existir cuando hay interacción y relación entre los factores de amenaza y vulnerabilidad, en espacios o territorios definidos y determinados. No puede existir una amenaza sin la existencia de una sociedad vulnerable y viceversa; esto implica que el riesgo puede reducirse o evitarse interviniendo en los factores que generan la vulnerabilidad de la sociedad o en las amenazas en el territorio. De hecho, amenazas y vulnerabilidades están mutuamente condicionadas, por lo tanto, cuando una comunidad aumenta su resiliencia, reduce sus condiciones de vulnerabilidad y sus niveles de riesgo. (PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE, 2012)

## 6. Resultados Computacionales

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la implementación del modelo descrito en la sección de Modelación Matemática. Se llevaron a cabo ajustes preliminares con el fin de determinar el presupuesto ideal óptimo para la ejecución del modelo principal. Dichos ajustes incluyeron la adición de una variable llamada  $B_{var_m}$ , indexada en el conjunto de Municipalidades (M), cuya función era minimizar la cantidad total de presupuesto asignado a cada municipalidad para intervenciones.

La función objetivo del modelo se transformó para garantizar que el riesgo total asociado con los puntos afectados a lo largo de todos los períodos fuera igual o menor que cero. Asimismo, se estableció una restricción presupuestaria para limitar el gasto en intervenciones de acuerdo con la disponibilidad de recursos financieros en cada municipalidad y período específico.

Tras la ejecución del modelo en AMPL y la obtención de los presupuestos resultantes, se presentan los resultados generales que muestran la distribución de las intervenciones para distintos porcentajes del presupuesto ideal. Se analiza cómo varían las funciones objetivo, el tiempo de ejecución del software y el porcentaje GAP en función del presupuesto asignado. Además, se detalla la distribución de las intervenciones en cada municipalidad y período, destacando aquellos períodos sin protección y puntos no protegidos en cada escenario presupuestario.

Estos resultados permiten evaluar la eficacia del modelo en la asignación de recursos para la mitigación del riesgo de inundación en diferentes escenarios financieros, así como identificar áreas críticas que requieren atención prioritaria en la planificación de medidas de intervención.

## **6.1. Presupuesto Ideal.**

Para llevar a cabo la ejecución del modelo principal descrito en la sección de Modelación Matemática, se realizaron ajustes preliminares con el propósito de determinar el presupuesto ideal óptimo. El primer cambio realizado fue el de añadir una variable llamada  $Bvar_m$  indexada en el conjunto de Municipalidades ( $M$ ). Esta variable representa un presupuesto  $b$  para el municipio  $m$ , con la característica de que pertenece al conjunto de números reales no negativos. La función objetivo (Ecuación 14) fue transformada como se muestra en la Ecuación 23, que representa la suma de los valores de  $Bvar[m]$  para todas las

municipalidades  $m$  en el conjunto  $M$ .  $Bvar[m]$  es una variable continua, y en la ecuación se busca minimizar la cantidad total de presupuesto asignado a cada municipalidad para intervenciones.

*Ecuación 23*

*Función Objetivo Presupuesto*

$$\min \text{Presupuesto} = \sum_{m \in M} Bvar_m$$

La función objetivo del modelo principal se convierte en una restricción que asegura que el riesgo total asociado con los puntos afectados a lo largo de todos los períodos sea igual o menor que cero. Esto significa que se busca minimizar el riesgo de inundación en los puntos afectados a lo largo del tiempo, como se muestra en la Ecuación 24.

*Ecuación 24*

*Restricción 1.*

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} r_i R_{it} = 0$$

El último cambio realizado fue el de la restricción presupuesto, esta restricción garantiza que el costo total de implementar medidas de intervención en cada municipalidad y período no exceda el presupuesto disponible para esa municipalidad y período específico. Es decir, limita el gasto en intervenciones de acuerdo con la disponibilidad de recursos financieros, queda como se muestra en la Ecuación 25, es similar a la Ecuación 16, con la diferencia de que se cambia el parámetro  $B$  que se tenía por la variable  $Bvar$ .

*Ecuación 25*

*Restricción 2.*

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in L_i} C_{it} * I_m * X_{it} \leq Bvar_m, \quad \forall m \in M, t \in T$$

Se conservaron las demás restricciones, se ejecutó en AMPL, y a través del comando display, se le pide que muestre los presupuestos resultantes, los cuales representan el presupuesto ideal requerido para mitigar el riesgo en todos los puntos afectados a través del tiempo. Dando como resultado la Tabla 21, que representa los presupuestos por municipalidad para cada periodo, dado que no se tiene en cuenta una variación constante con

el pasar los años, se estima que el costo de las intervenciones y el valor propuesto para el primer periodo no varíe con al avanzar los años.

Tabla 21

*Presupuestos Óptimos Ideales*

Tierralta	\$3.342.940.001
Valencia	\$1.402.940.001
Montería	\$3.899.710.001
Cerete	\$961.263.001
San_Pelayo	\$1.213.500.001
Cotorra	\$62.356.201
Lorica	\$3.547.930.001
San_Bernardo_Del_Viento	\$1.182.690.001

## 6.2. Modelo Principal

Después de haber obtenido los resultados de presupuesto óptimo ideal, se realizaron experimentos computacionales para determinar a qué puntos afectados y en qué periodo se les aplicaría alguna de las intervenciones propuestas. Se tienen los 202 puntos críticos a lo largo de los 8 municipios, donde cada uno cuenta con su propio presupuesto, se realiza el estudio en 18 periodos equivalentes a 1 año por periodo, buscando la implementación de una de las cuatro medidas de intervención propuestas, donde cada medida de intervención tiene un número de periodos de protección determinado. Se realizaron análisis de sensibilidad, variando los valores del presupuesto óptimo ideal, aplicando el modelo para el 100%, 75%, 50%, 25% y 10% de dicho presupuesto, dando como resultado la información dada en las siguientes tablas. El límite de tiempo fue de 4 horas con 18 minutos, esto porque llegó al óptimo en ese tiempo. Sin embargo, se realizó la prueba con límite de 5 minutos y 90 minutos, y la función objetivo aumentó 10% en ambos casos.

En la Tabla 22, se presentan los resultados de las funciones objetivo para cada una de las variantes del presupuesto óptimo ideal, el tiempo que demoró el software en determinar dicha solución y la fórmula del GAP. Además, se muestra el total de veces que se utiliza cada intervención de acuerdo con el porcentaje. Se puede ver que con el 100% del presupuesto ideal óptimo se mitiga el riesgo, y a medida que este presupuesto se reduce, la función

objetivo va aumentando significativamente. Mientras que aspectos como el tiempo y el GAP son independientes del porcentaje del presupuesto a utilizar.

Tabla 22

Resultados Generales.

PRESUPUESTO	F. O	INTERVENCION				TIME (s)	GAP
		1	2	3	4		
100%	0	634	73	116	188	0,51	0%
75%	42	386	99	164	223	0,69	0%
50%	161	538	246	122	124	16,75	0%
25%	784	269	424	0	0	15511,21	4,72%
10%	3093	149	213	0	0	4123,71	0,84%

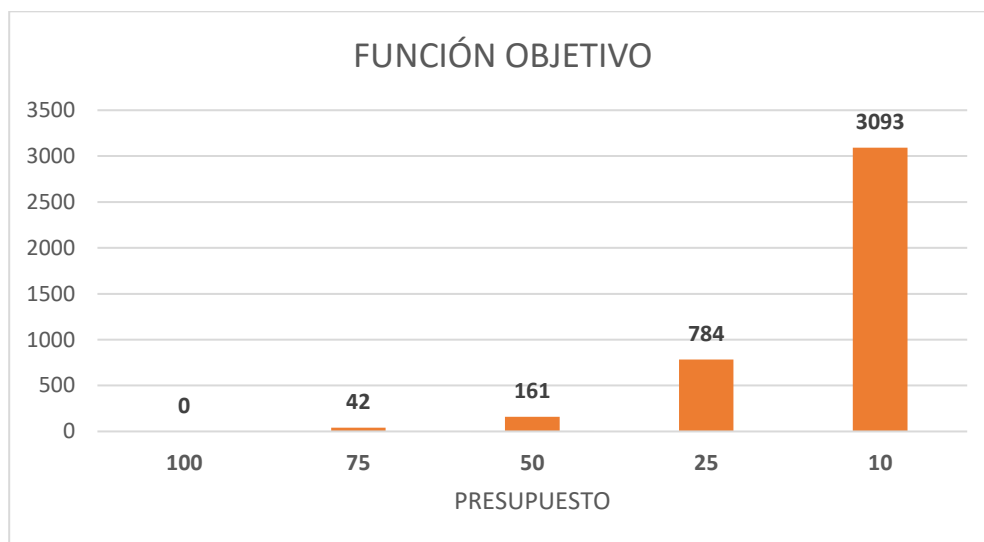
En la



Ilustración 25, se muestran los resultados de la función objetivo de acuerdo con el porcentaje de presupuesto utilizado, demostrando la relación inversamente proporcional entre la función objetivo y el presupuesto, a menor presupuesto mayor será la función objetivo, esto es debido que la función objetivo busca la minimización del riesgo, para lo cual requiere de presupuesto, entre menos se tenga de este menos se podrá reducir el riesgo.

Ilustración 25

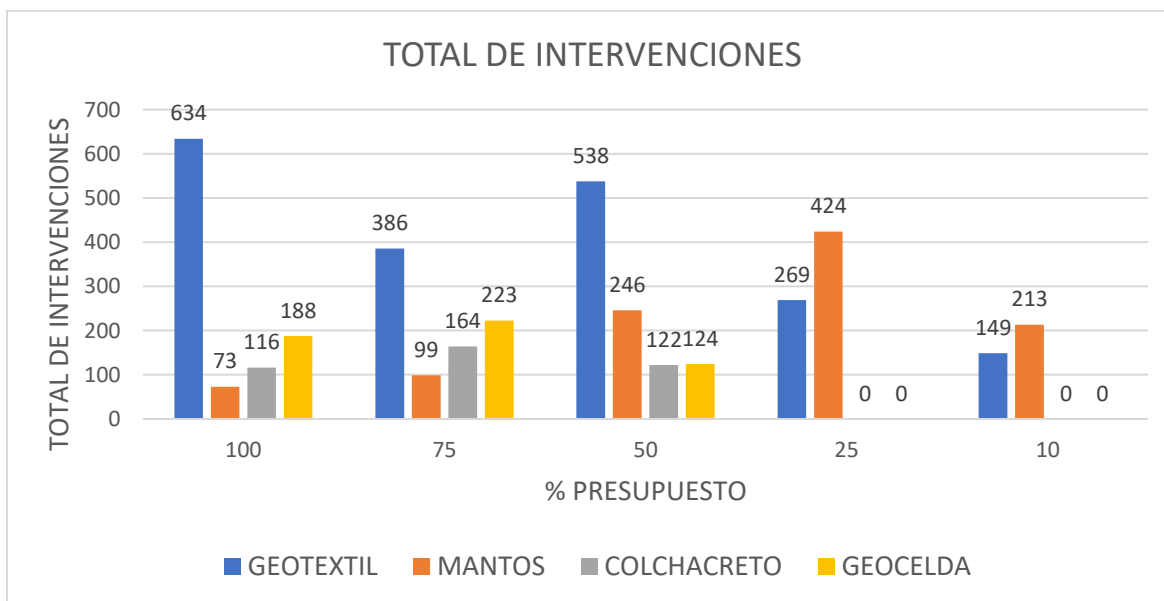
Función Objetivo



La Ilustración 26, muestra el total de intervenciones asignadas a lo largo de los periodos en los puntos afectados, agrupándolas de acuerdo con el nivel de intervención en cuestión, y dependiendo del porcentaje del presupuesto utilizado.

Ilustración 26

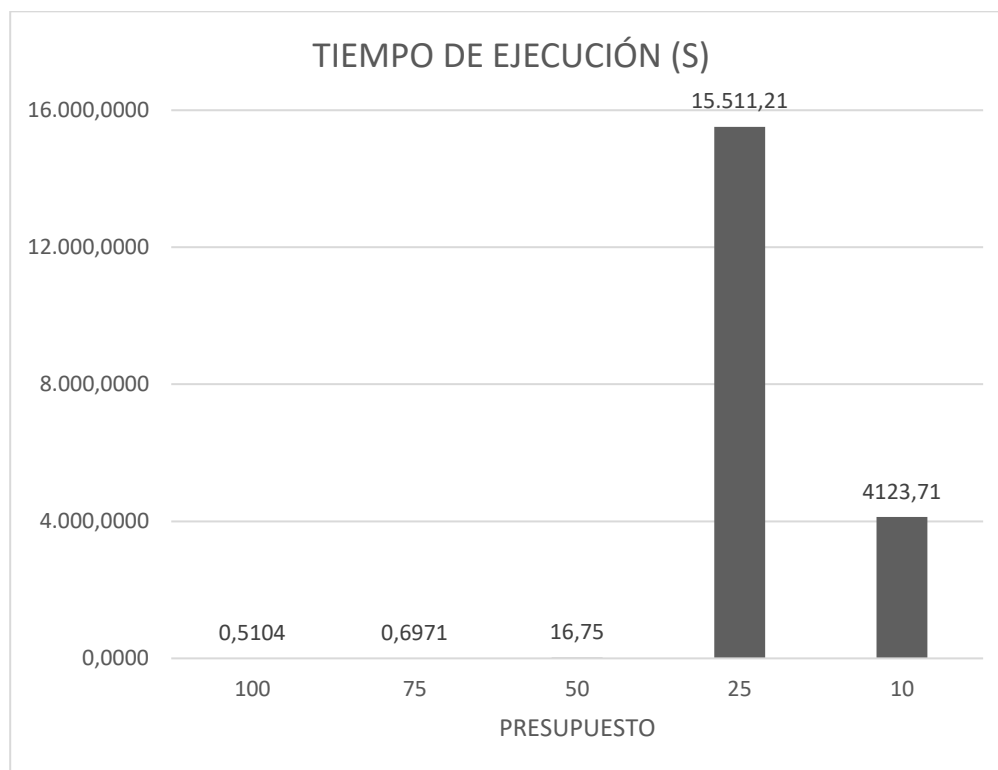
Total de intervenciones



En la Ilustración 27 se muestra el tiempo de ejecución del modelo de acuerdo con el porcentaje del presupuesto utilizado.

Ilustración 27

Tiempo de ejecución

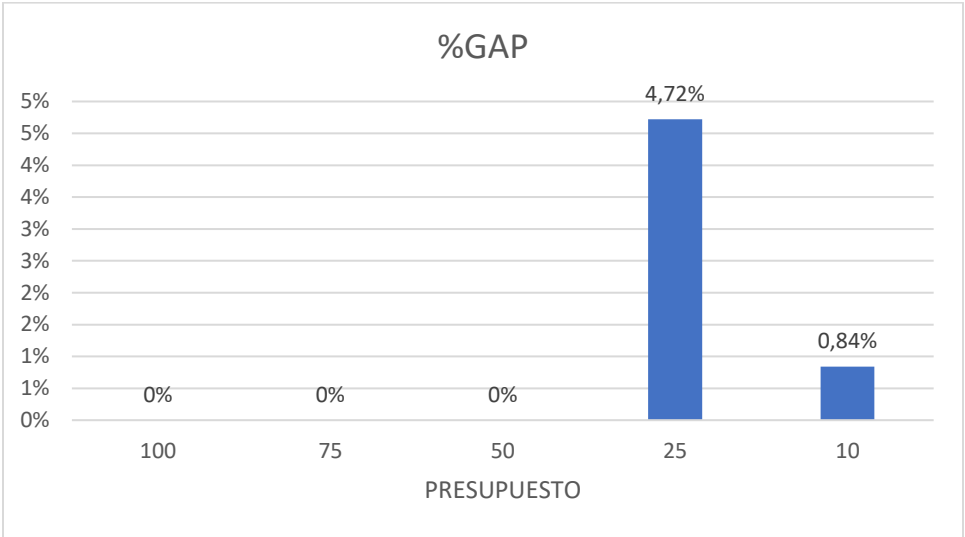


El hecho de que el tiempo sea tan elevado se debe a la sea tan elevado se puede explicar con la teoría de la utilidad marginal decreciente de Friedrich von Wieser, cuando una persona desea un bien, la primera unidad le proporciona una gran satisfacción, resultando en una alta utilidad total y marginal. Según von Wieser, cuando la utilidad marginal llega a cero, se alcanza el punto de saciedad y el valor del bien desaparece por completo. Por lo tanto, la primera unidad del producto ofrece el mayor incremento de utilidad al satisfacer la necesidad más urgente, mientras que las unidades adicionales tienen menor utilidad porque satisfacen deseos menos urgentes en comparación. (Borgucci García & Castellano Montiel, 2023). Entonces con un presupuesto alto se puede tener todos los bienes que generen la saciedad o satisfacción, mientras que a medida que se reduce el presupuesto se tiene que elegir de una mejor manera los bienes primordiales, luego de satisfacer la necesidad principal, se puede proceder a la adquisición de bienes con menor utilidad marginal, que aunque dicha utilidad marginal sea menor, se requieren de igual manera.

Esto se puede ilustrar de la siguiente manera: con un presupuesto amplio, en este caso el 100%, las medidas de intervención pueden asignarse a todos los puntos, reduciendo el riesgo por completo y requiriendo menos tiempo para solucionar la problemática. Sin embargo, cuando el presupuesto comienza a reducirse, se descartan puntos menos urgentes. Con un presupuesto mínimo, se asignan intervenciones a los puntos en su estado más crítico. Con un presupuesto un poco más alto, primero se satisfacen las necesidades primordiales de los puntos críticos y luego se considera atender otros puntos urgentes para cumplir con lo esperado.

La Ilustración 28 proyecta el porcentaje GAP que representa la discrepancia entre la solución encontrada por el modelo y la solución óptima esperada. El valor de 0% de GAP en el 100%, 75% y 50% de presupuesto, quiere decir que AMPL llegó a una solución óptima con los parámetros establecidos.

Ilustración 28  
%GAP



En la Tabla 23, se muestra la distribución de las intervenciones en las 8 municipalidades con una inversión del 100% del presupuesto ideal. En la municipalidad 1, se aplicó la primera intervención 56 veces, 15 veces la segunda, 18 veces la intervención 3 y 42 veces la cuarta intervención. No hay períodos sin protección en ninguno de las

municipalidades, es decir todas las municipalidades están protegidos al menos una vez, y los periodos tienen al menos una intervención asignada.

Tabla 23

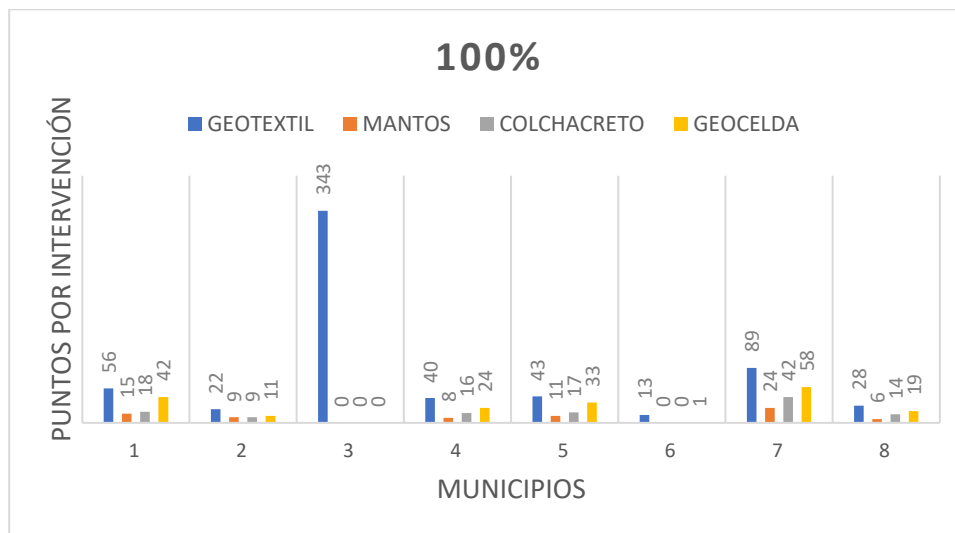
Resultados 100%

100%	INTERVENCIÓN			
	1	2	3	4
MUNICIPALIDADES				
1	56	15	18	42
2	22	9	9	11
3	343	0	0	0
4	40	8	16	24
5	43	11	17	33
6	13	0	0	1
7	89	24	42	58
8	28	6	14	19
Total	634	73	116	188

La Ilustración 29, presenta los resultados expuestos en laTabla 23.

Ilustración 29

100%



La Tabla 24, refleja cómo se distribuyen las intervenciones en las municipalidades con una inversión del 75% del presupuesto ideal. Se encontraron con un total de 34 periodos sin proteger a lo largo de los 18 periodos, en las 8 municipalidades y las 4 intervenciones.

Tabla 24

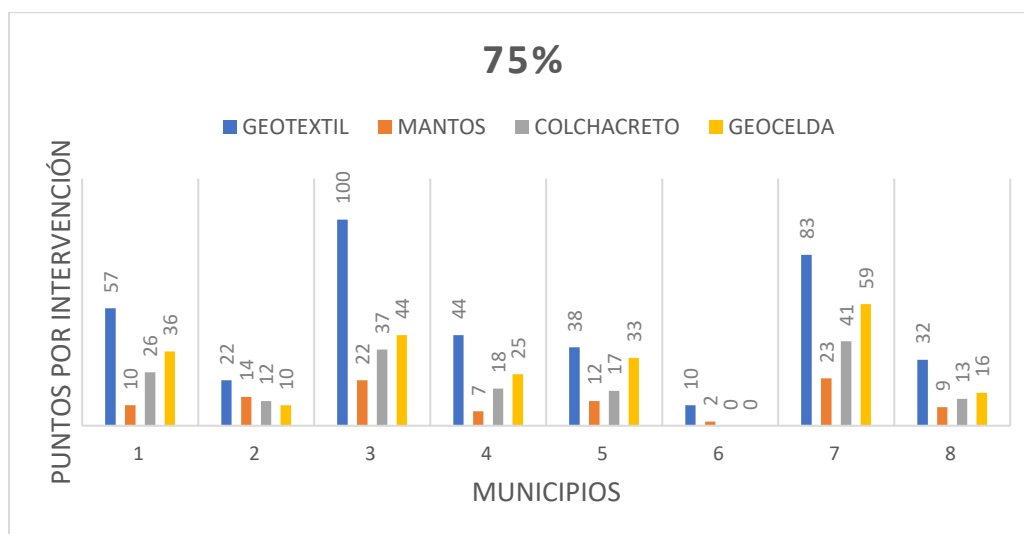
Resultados 75%

75% MUNICIPALIDADES	INTERVENCIÓN				PERIODOS NO PROTEGIDOS
	1	2	3	4	
1	57	10	26	36	4
2	22	14	12	10	2
3	100	22	37	44	8
4	44	7	18	25	4
5	38	12	17	33	5
6	10	2	0	0	1
7	83	23	41	59	6
8	32	9	13	16	4
Total	386	99	164	223	34

La Ilustración 30, presenta los resultados expuestos en la Tabla 24.

Ilustración 30

75%



La Tabla 25, evidencia la distribución de las intervenciones en las municipalidades con una inversión del 50% del presupuesto ideal. Se observa que hay un total de 97 periodos sin asignar intervenciones, esto se debe que las intervenciones tienen duraciones de varios periodos, así que si no se tuvo asignación en tales periodos se deba a que están bajo el efecto

de alguna intervención. Adicionalmente, se muestra que un punto en la municipalidad 6 (Cotorra) no recibió ningún tipo de intervención.

Todo esto se debe a la asignación realizada por el modelo, dado la disminución del presupuesto, se está priorizando unas intervenciones por encima de otras, lo que deja algunos periodos desprotegidos en ciertas intervenciones.

Tabla 25

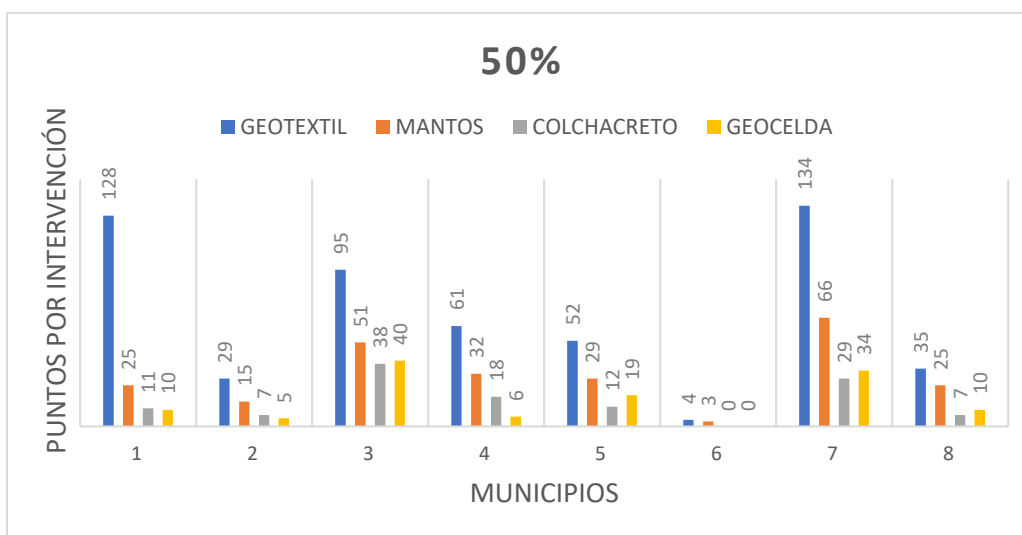
Resultados 50%

50% MUNICIPALIDADES	INTERVENCIÓN				PUNTOS NO PROTEGIDOS	PERIODOS NO PROTEGIDOS
	1	2	3	4		
1	128	25	11	10	0	10
2	29	15	7	5	0	6
3	95	51	38	40	0	19
4	61	32	18	6	0	11
5	52	29	12	19	0	11
6	4	3	0	0	1	18
7	134	66	29	34	0	16
8	35	25	7	10	0	6
Total	538	246	122	124	1	97

La Ilustración 31, muestra los resultados expuestos en la Tabla 25.

Ilustración 31

50%



En la Tabla 26, se ve cómo se distribuyen las intervenciones en las municipalidades con una inversión del 25% del presupuesto ideal. Hay 586 períodos sin protección, y no se activó en ninguna municipalidad las intervenciones 3 y 4. Adicionalmente, se muestra que no se protegieron ninguno de los dos puntos afectados de la municipalidad 6 (Cotorra).

Tabla 26

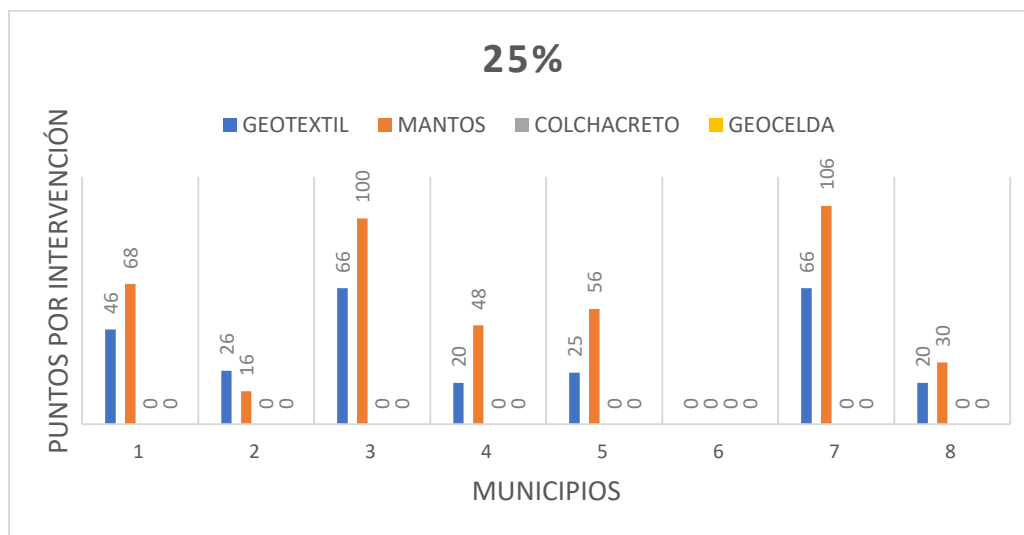
Resultados 25%

25% MUNICIPALIDADES	INTERVENCIÓN				PUNTOS NO PROTEGIDOS	PERIODOS NO PROTEGIDOS
	1	2	3	4		
1	46	68	0	0	0	68
2	26	16	0	0	0	41
3	66	100	0	0	0	146
4	20	48	0	0	0	65
5	25	56	0	0	0	65
6	0	0	0	0	2	36
7	66	106	0	0	0	117
8	20	30	0	0	0	48
Total	269	424	0	0	0	586

La Ilustración 32, presenta los resultados expuestos en la Tabla 26.

Ilustración 32

25%





Finalmente, la Tabla 27 señala la distribución de las intervenciones en las municipalidades con una inversión del 10% del presupuesto ideal. Hay 2029 períodos sin protección, nuevamente no se activaron las intervenciones 3 y 4, así como tampoco las de la municipalidad 6 (Cotorra). Sin embargo, solo la municipalidad 1 (Tierralta) activó la intervención en todos sus puntos, mientras que en las demás municipalidades no se protegieron en su totalidad. Se muestran un total de 73 de puntos no protegidos.

Tabla 27

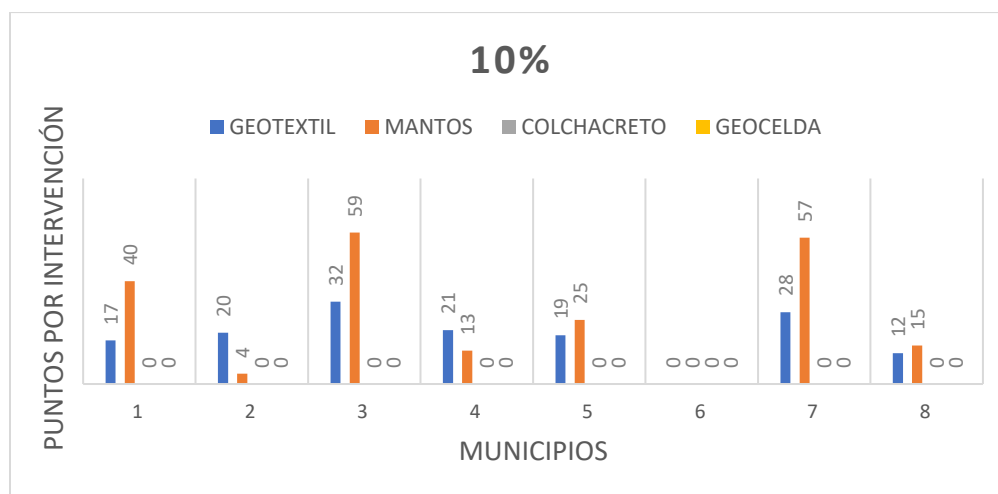
Resultados 10%

10% MUNICIPALIDADES	INTERVENCIÓN				PUNTOS NO PROTEGIDOS	PERIODOS NO PROTEGIDOS
	1	2	3	4		
1	17	40	0	0	0	286
2	20	4	0	0	6	124
3	32	59	0	0	19	465
4	21	13	0	0	11	247
5	19	25	0	0	10	242
6	0	0	0	0	2	36
7	28	57	0	0	19	478
8	12	15	0	0	6	151
Total	149	213	0	0	73	2029

La Ilustración 33, presenta los resultados expuestos en la Tabla 27.

Ilustración 33

10%



## **7. Conclusiones y Trabajos Futuros**

La metodología desarrollada ofrece una solución eficiente y adaptable para abordar la erosión en el Río Sinú en Córdoba. A través de un modelo matemático validado computacionalmente, se prioriza la asignación de recursos según el riesgo y la vulnerabilidad de las comunidades. Esto garantiza una gestión efectiva de los recursos, maximizando la protección de las poblaciones ribereñas frente a la amenaza de inundación.

El análisis de modelos de asignación de recursos proporcionó una sólida base para diseñar una metodología de priorización de puntos afectados por erosión en el Río Sinú. Desde programación lineal estocástica hasta un modelo con énfasis en hidrodinámica, estos modelos ofrecen herramientas adaptables y efectivas. Esta diversidad en los modelos refleja la complejidad del problema y su aplicabilidad en entornos dinámicos como desastres naturales. La integración de tecnologías de información mejora la comprensión y facilita decisiones informadas. Todos los modelos revisados tienen relevancia directa, con aplicaciones potenciales más allá del Río Sinú.

Los aspectos de vulnerabilidad, riesgo y amenaza buscan evaluar y priorizar puntos afectados en el área de estudio. Se emplean diversas metodologías para identificar amenazas, asignando valores según la magnitud y periodicidad de los eventos. La vulnerabilidad se analiza en aspectos económicos, físicos, ambientales y sociales, proporcionando una evaluación integral. El riesgo, resultado de la combinación de amenaza y vulnerabilidad, se calcula con enfoques descriptivos y analíticos, permitiendo su clasificación en niveles de riesgo bajo, medio y alto. Este enfoque facilita la implementación de medidas efectivas de gestión de riesgos en el Río Sinú y contribuye al conocimiento en este campo.

El modelo matemático propuesto ofrece una estructura sólida para abordar la priorización de puntos afectados en el Río Sinú. Al considerar múltiples variables, como el presupuesto disponible, el costo de intervención, y el nivel de riesgo asociado a cada punto

crítico, este modelo permite tomar decisiones informadas sobre las acciones de intervención necesarias para reducir el riesgo de inundación. La formulación de las restricciones asegura la eficiencia, la eficacia y viabilidad en la asignación de recursos, optimizando así la protección de las comunidades vulnerables. Además, la capacidad de adaptarse a diferentes escenarios y periodos de tiempo facilita su aplicabilidad en entornos dinámicos y cambiantes, proporcionando una herramienta valiosa para la gestión de riesgos y la toma de decisiones en situaciones de desastre.

Los experimentos computacionales y la validación del modelo matemático revelan la importancia de asignar recursos de manera eficiente para mitigar el riesgo de inundación en puntos afectados. La introducción de ajustes en el modelo permitió determinar el presupuesto óptimo por municipalidad, evidenciando su efectividad en la distribución precisa de recursos. Además, al evaluar distintos escenarios de asignación de presupuesto, se observa cómo la reducción de recursos incrementa los puntos afectados sin protección. Estos resultados validan la utilidad del modelo y ofrecen guía para la gestión efectiva del riesgo hidrológico.

Para la continuación del presente proyecto, se propone hacer un estudio de impacto ambiental para cada una de las intervenciones planteadas, así como también una simulación de la aplicación de los procesos propuestos. También se sugiere la implementación de otro tipo de modelación matemática así como añadir parámetros adicionales.

## 8. Referencias

- Borgucci García, E. V., & Castellano Montiel, A. G. (2023). Friedrich von Wieser, pionero en el estudio de la sociedad dentro del pensamiento austriaco. *Lecturas de Economía*, 99, 7-32. doi:<https://doi.org/10.17533/udea.le.n99a351524>
- Brady III, R. H. (2018). *Encyclopedia of Engineering Geology*. Springer. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9\\_114](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_114)
- Caponecchia, C. (2021). *Dignity and Inclusion at Work*. Springer, Singapore. doi:[https://doi.org/10.1007/978-981-13-0218-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0218-3_1)
- Congreso Colombiano. (04 de 04 de 2012). *Función Pública*. Obtenido de [https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=47141](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=47141)
- CVS. (2021). *Protocolo control de erosión del Río Sinú año 2021*. CVS, Córdoba. Departamento de Córdoba.: CVS. Obtenido de <https://cvs.gov.co/download/585/gestion-de-riesgo/14340/actualizacion-protocolo-sinu-2021.pdf>
- CVS. (2022). *Protocolo control de erosión del Río Sinú año 2022*. CVS, Córdoba. Departamento de Córdoba: CVS. Obtenido de <https://cvs.gov.co/download/585/gestion-de-riesgo/21775/actualizacion-protocolo-sinu-2022.pdf>
- CVS. (2023). *Protocolo control de erosión del Río Sinú año 2023*. CVS, Córdoba. Departamento de Córdoba.: CVS. Obtenido de <https://cvs.gov.co/download/585/gestion-de-riesgo/23145/actualizacion-protocolo-sinu-2023.pdf>
- Docío Tomás, M. R. (2015). *Programación Lineal Entera, Un Problema de Planificación de Plantilla*. Valladolid: Universidad de Valladolid. Obtenido de <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/15593>
- Fuentes-Penna, A., Vélez-Díaz, D., Moreno-Gutiérrez, S., Martínez-Cervantes, M., & Sánchez-Muñoz, O. (2015). Problema de la mochila (Knapsack problem). *XIKUA Boletín Científico De La Escuela Superior De Tlahuelilpan*, 20.
- García De La Barrera, E. Y., & Vergara Orozco, M. C. (2021). *Modelo de Programación Lineal Estocástico Para La Coordinación Logística de Suministros Humanitarios Hacia Las áreas Afectadas Por Inundaciones en Colombia*. Montería: Universidad Pontificia Bolivariana seccional Montería. Recuperado el 22 de Septiembre de 2022
- GeoMatrix. (09 de Febrero de 2024). *GeoMatrix*. Obtenido de <https://geomatrix.co/terratrac-trm/>
- Glendon, I., Clarke, S., & McKenna, E. (2006). *Human Safety and Risk Management* (Segunda ed.). Boca Raton: CRC Press. doi:<https://doi.org/10.1201/9781420004687>
- Hernández, C. (20 de Noviembre de 2023). *WRadio*. Obtenido de WRadio: <https://www.wradio.com.co/2023/11/20/advierten-que-familias-afectadas-por-inundaciones-aun-no-reciben-ayudas-en-cordoba/>

- Hernández, C. (22 de Mayo de 2024). *WRadio*. Obtenido de WRadio: <https://www.wradio.com.co/2024/05/23/suspenden-el-pae-en-dos-municipios-del-sur-de-cordoba-por-presuntas-amenazas/>
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones* (Vol. 9). Stanford: McGRAW-HILL. Recuperado el 15 de Octubre de 2022, de [https://dudasytareas.files.wordpress.com/2017/05/hillier\\_lieberman.pdf](https://dudasytareas.files.wordpress.com/2017/05/hillier_lieberman.pdf)
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (01 de Diciembre de 2023). *Instituto Nacional de Vías*. Recuperado el 04 de Febrero de 2024, de <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/hechos-de-transparencia/analisis-de-precio-unitarios>
- Kapucu, N., & Rivera, F. I. (2015). *Disaster Vulnerability, Hazards and Resilience. Perspectives from Florida*. Florida: Springer. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-319-16453-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16453-3_5)
- La razón. (29 de Febrero de 2024). *La razón.co*. Obtenido de La razón.co: <https://larazon.co/cordoba/gobernador-de-cordoba-solicita-a-urra-estudio-sobre-dinamica-del-rio-sinu-ante-inundaciones-y-sequias/>
- Minas, J., Simpson, N., & Tacheva, Z. (2020). *Modeling emergency response operations: A theory building survey*. Nueva York: Computers & Operations Research. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2020.104921>
- Montaño, J. (19 de Agosto de 2020). *El Tiempo*. Obtenido de El Tiempo: <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/el-rio-sinu-amenaza-con-desbordamientos-en-206-puntos-criticos-de-cordoba-531016>
- Narváez, L., Lavell, A., & Pérez Ortega, G. (2009). *La Gestión Del Riesgo De Desastres: Un Enfoque Basado en Procesos*. Lima, Perú: PULL CREATIVO S.R.L. Recuperado el 22 de Septiembre de 2022, de [http://repo.floodalliance.net/jspui/bitstream/44111/2259/1/procesos\\_ok.pdf](http://repo.floodalliance.net/jspui/bitstream/44111/2259/1/procesos_ok.pdf)
- Noticias RCN. (29 de Junio de 2017). *Noticias RCN*. Obtenido de Noticias RCN: <https://www.noticiasrcn.com/colombia/emergencia-e-inundaciones-en-lorica-cordoba-por-desbordamiento-del-rio-sinu-306608>
- Núñez, C. (6 de Enero de 2010). *National Geographic*. Recuperado el 22 de Septiembre de 2022, de <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/inundaciones>
- Olaya Nieto, C. W., Tordecilla Petro, G., & Segura Guevara, F. F. (2008). *Relación Longitud-Peso del Rubio (Salminus affinis Steindachner, 1880) en la cuenca del Río Sinú, Colombia*. Córdoba. Loric: Universidad de Córdoba. doi:<https://doi.org/10.21897/rmvz.394>
- Ozdamar, L., & Alp Ertem, M. (2014). *Modelos, Soluciones Y Tecnologías Habilitadoras en Logística Humanitaria*. Turkía: European Journal of Operational Research. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2014.11.030>
- PNUD, SNGRD, UNGRD, financiado por la UE. (2012). *Guía Metodológica para la Elaboración de Planes Departamentales para la Gestión del Riesgo*. Guía, ONU, PNUD, SNGRD, UNGRD, UE. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.11762/20871>
- Ramírez-Gil, H., Ajiaco-Martínez, R., & Lasso, C. (2011). *Pinirampus pirinampu Cuenca del Orinoco*. Colombia: Instituto Alexander von Humboldt. Recuperado el 14 de 09 de 2023, de

- [https://www.researchgate.net/publication/296333460\\_Pinirampus\\_pirinampu\\_Cuenca\\_del\\_Orinoco](https://www.researchgate.net/publication/296333460_Pinirampus_pirinampu_Cuenca_del_Orinoco)
- Raña, J., Ferrer, J. C., & Bed, P. (2007). *Modelo De Asignación De Recursos En Atención Primaria*. Chile: Revista médica de Chile. doi:<https://dx.doi.org/10.4067/S0034-98872007000100008>
- Ruíz Hernández, A. F., & Hernández Sibaja, G. C. (2021). *Modelación hidrodinámica para estimar escenarios de inundación bajo diferentes regímenes de precipitación. aplicación al Río Sinú, tramo Montería*. Montería: Universidad de Córdoba. Recuperado el 30 de Septiembre de 2022, de <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/4478>
- Salman Habib, M., Hae Lee, Y., & Saad Memon, M. (2015). *Mathematical Models in Humanitarian Supply Chain Management: A Systematic Literature Review*. Ansan: Hindawi. doi:<http://dx.doi.org/10.1155/2016/3212095>
- Semana. (26 de Mayo de 2022). *Semana*. Obtenido de Semana: <https://www.semana.com/sostenible/actualidad/articulo/defensoria-pide-adoptar-medidas-inmediatas-para-evitar-desbordamiento-del-rio-sinu/202218/>
- Silva, B., & Torres, L. (2014). Acerca De Una Versión Dinámica Del Problema De La Mochila. *Revista Politécnica*, 34(1), 143-144. Obtenido de [https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista\\_politecnica2/article/view/253](https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/253)
- Tordecilla Correa, O. I. (2016). *Vulnerabilidad Ante Erosión. Ejemplo Lorica*. Lorica: Universidad de Córdoba. Recuperado el 25 de Septiembre de 2022, de <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/6140>

## 9. Anexos

En esta sección se encuentran los anexos que complementan y respaldan la información presentada en el trabajo. Los anexos consisten en documentos en formato Excel que contienen datos detallados, tablas adicionales, y otros elementos relevantes para el estudio realizado. Estos documentos se han alojado en una nube para facilitar su acceso y consulta. Se puede acceder a los anexos a través del siguiente enlace: [ANEXOS<sup>1</sup>](#). La decisión de alojar los anexos en la nube se debe a que las tablas contienen una gran cantidad de datos, lo que dificulta su presentación dentro de los límites de formato establecidos por las normas APA en documentos de Word.

### 9.1. A

El [Anexo A<sup>2</sup>](#) comprende toda la información relacionada con los puntos afectados, incluyendo los siguientes datos: número de ficha, año de registro, margen del río, nombre del punto crítico, municipalidad al que pertenece, longitud en metros, coordenadas planas (coordenadas iniciales y finales), nivel de riesgo asociado, y clasificación de riesgo en términos de erosión e inundación.

### 9.2. B

El [Anexo B<sup>2</sup>](#) incluye imágenes del punto inicial y final de cada punto crítico, así como un mapa que muestra la ubicación específica de cada punto en el área de estudio.

---

<sup>1</sup> [https://drive.google.com/drive/folders/1YwT\\_Eq9mT2qW4c9psChykiT2Jer98w2k?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1YwT_Eq9mT2qW4c9psChykiT2Jer98w2k?usp=drive_link)

<sup>2</sup> [https://docs.google.com/spreadsheets/d/1v6posvTheLJlbdC1yyvsa7u8r9os-IVa/edit?usp=drive\\_link](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1v6posvTheLJlbdC1yyvsa7u8r9os-IVa/edit?usp=drive_link)

### 9.3. C

El [Anexo C](#)<sup>3</sup> contiene todos los datos utilizados para la ejecución del modelo propuesto en la tesis.

### 9.4. D

En el [Anexo D](#)<sup>4</sup> se encuentran tablas ordenadas por hojas, donde cada hoja representa el porcentaje del presupuesto ideal que se utilizará en la ejecución del experimento. Posteriormente, se presentan otras tablas, donde se llenan con los resultados generados por AMPL, seguidas de tablas adicionales que organizan esta información. En la hoja denominada "RESULTADOS", se disponen las tablas de resultados de acuerdo con la información proporcionada por AMPL, que son las tablas presentadas en la sección de Resultados Computacionales.

### 9.5. E

En el [Anexo E](#)<sup>5</sup> se encuentra la respuesta de la CVS ante el derecho de petición presentado. Dentro del documento se encuentra como información relevante un histórico de datos de los puntos críticos desde 2014 hasta 2021, fecha en la cual se comenzó con este proyecto, y un historial de presupuesto destinado para mantenimiento de los puntos críticos desde 2018 hasta 2024.

---

<sup>3</sup> [https://docs.google.com/spreadsheets/d/1lmQY4mjR14ONek3I2DyjatZqU0NKg5h6/edit?usp=drive\\_link](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1lmQY4mjR14ONek3I2DyjatZqU0NKg5h6/edit?usp=drive_link)

<sup>4</sup> <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1laqbTftMuGPug4BrTxOnWR7UDE66qew/edit?usp=sharing&ouid=112836264898551339617&rtpof=true&sd=true>

<sup>5</sup> [https://drive.google.com/file/d/1c3B-j\\_9g8y9pUx39nv3v320a9LHwe-wa/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1c3B-j_9g8y9pUx39nv3v320a9LHwe-wa/view?usp=sharing)