

## RIESGOS POR FLUCTUACIONES EN LAS OSCILACIONES CÍCLICAS DEL CLIMA FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL NORTE DE CHILE

### RISKS FROM FLUCTUATIONS IN CYCLICAL CLIMATE OSCILLATIONS IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE IN NORTHERN CHILE

Daniel Valenzuela-Heredia <sup>1</sup>

#### ABSTRACT

Northern Chile faces significant challenges due to the interaction between cyclical climate events, such as the El Niño-Southern Oscillation (ENSO), and climate change. Populations living in areas prone to climate variability must adapt to unstable and intense conditions. It is essential to design strategies based on historical data and predictive models to reduce the risks associated with the irregular alternation of seemingly periodic phases between El Niño and La Niña, which are expected to increase in duration and intensity due to climate change. During El Niño events, intense rains generate floods that impact cities, causing significant human and material losses. Northern Chile has recorded an increase in the frequency of these events over the last years. In cities such as Copiapó and Antofagasta, proximity to work centers and available land has led to settlements in areas vulnerable to floods. Floods also disrupt local ecosystems. The transport of sediments and mining tailings has altered river and coastal ecosystems, contaminating soil and water with metals. To address flood risks in this region, it is essential to implement comprehensive strategies involving infrastructure, technology, and governance to reduce risks and improve resilience to future extreme climate events. This work explores the impact of cyclical climate events on infrastructure, urban planning, and biodiversity, and proposes mitigation and adaptation strategies.

**Key words:** Climate events; El Niño-Southern Oscillation (ENSO); Climate change; Floods; Mitigation strategies

#### RESUMEN

El norte de Chile se enfrenta a desafíos significativos debido a la interacción entre eventos climáticos cíclicos, como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), y el cambio climático. La población que habita en territorios propensos a variaciones climáticas debe adaptarse a condiciones inestables e intensas. Es fundamental diseñar estrategias basadas en datos históricos y modelos predictivos para reducir los riesgos asociados a la alternancia irregular de fases de dinámicas aparentemente periódicas entre El Niño y La Niña, que se espera aumenten en duración e intensidad debido al cambio climático. Durante eventos de El Niño, las intensas lluvias generan aluviones que afectan las ciudades, causando pérdidas humanas y materiales significativas. El norte de Chile ha registrado un aumento en la frecuencia de estos eventos en los últimos años. En ciudades como Copiapó y Antofagasta, la cercanía a los centros de trabajo y la disponibilidad de terrenos ha propiciado asentamientos en zonas vulnerables a aluviones. Los aluviones también generan perturbaciones en los ecosistemas locales. El arrastre de sedimentos y relaves mineros ha modificado los ecosistemas fluviales y costeros, contaminando el suelo y el agua con metales. Para enfrentar los riesgos de aluviones en esta región, es esencial implementar estrategias integrales que involucren infraestructura, tecnología y gobernanza, para reducir los riesgos y mejorar la resiliencia frente a futuros eventos climáticos extremos. Este trabajo explora el impacto de eventos climáticos cíclicos en la infraestructura, la planificación urbana y la biodiversidad, y propone estrategias de mitigación y adaptación.

**Palabras clave:** Eventos climáticos; El Niño-Oscilación del Sur (ENSO); Cambio climático; Aluviones; Estrategias de mitigación

---

<sup>1</sup> Universidad Bernardo O'Higgins, Centro de Investigación en Recursos Naturales y Sustentabilidad (CIRENYS), Santiago, Chile

## 1. INTRODUCCIÓN

El territorio que es habitado tiene que cumplir con ciertos aspectos que pueden fluctuar dinámicamente, por ejemplo, frente a las variaciones que presenta el clima. Esto motiva el desarrollo de estrategias de adaptación que reduzcan la vulnerabilidad de los habitantes y minimicen los daños a la infraestructura y los ecosistemas (Clar et al., 2023; Valdés-Pineda et al., 2016).

Los procesos cíclicos de variabilidad climática se ven afectados por el cambio climático (Levell et al., 2012; Lavado-Casimiro & Espinoza, 2014), por ejemplo, la circulación meridional del Atlántico y el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) (Trenberth, 1997; Ditlevsen et al., 2023; Geng et al., 2023; Gou et al., 2024). Estos procesos climáticos oscilantes afectan significativamente la cantidad de calor y nutrientes que se transportan globalmente (Vuille et al., 2000). Estos fenómenos están relacionados de manera directa con los cambios en las temperaturas del océano y en las pautas de precipitación a nivel mundial (Garreaud et al., 2003; Valdés-Pineda et al. 2016). La alteración de estos componentes cíclicos del clima ha llevado a un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, lo que genera desajustes en el balance natural del territorio y representa una amenaza cada vez más apremiante (Lavado-Casimiro & Espinoza, 2014; Cea & Costabil, e 2022).

El fenómeno ENSO se caracteriza por etapas de Niño, etapas de transición y etapas de Niña, las que sufrirán alteraciones en su frecuencia e intensidad debido al cambio climático, lo cual podría resultar en eventos de sequía e inundaciones más extremos en el futuro (Trenberth, 1997; Trenberth & Fasullo, 2012; Diaz et al., 2001; Cai et al., 2015). América del Sur y, en particular, la región andina y la costa del Pacífico, enfrentan mayores riesgos de inundaciones y sequías asociadas con ENSO (Lavado-Casimiro & Espinoza, 2014). En otras partes del mundo, como Australia y el sudeste asiático, se generan sequías prolongadas durante los eventos de El Niño y precipitaciones extremas durante La Niña. Estos cambios afectan áreas críticas para la agricultura, la disponibilidad de agua y la salud ambiental de estas regiones, y la probabilidad de que se presenten con mayor intensidad en las próximas décadas resalta la

necesidad de monitorear cuidadosamente estos patrones climáticos (McPhaden et al., 2006; Lavado-Casimiro & Espinoza 2014). La variabilidad natural de estos fenómenos, combinada con la influencia del cambio climático, añade una capa de complejidad a las proyecciones y hace imperativo adaptar las estrategias de mitigación y respuesta para evitar las graves consecuencias que estas variaciones pueden tener en el entorno natural y en la infraestructura urbana (Trenberth 1997; Trenberth & Fasullo 2012; Cea & Costabile 2022).

Chile, considerado un país altamente expuesto a diversas amenazas naturales y antrópicas, se encuentra en una región caracterizada por una alta actividad sísmica, actividad volcánica y alternancia irregular de fases del fenómeno climático ENSO. Esta condición implica que los habitantes, autoridades y expertos en gestión de riesgos deben estar en constante estado de alerta y desarrollo de conocimientos para adaptar sus respuestas ante emergencias, desastres y catástrofes. Las estrategias de adaptación a las condiciones climáticas, que se han desarrollado históricamente en el país, están actualmente sometidas a desajustes causados por el cambio climático (Diaz et al., 2001; Cai et al., 2015; Cea & Costabile, 2022). En muchos casos, estas estrategias deben sobredimensionarse para abarcar posibles escenarios extremos, lo cual conlleva costos sociales y económicos.

El territorio del norte de Chile, uno de los más áridos del planeta, enfrenta desafíos climáticos que han impactado y siguen afectando a las comunidades que lo habitan y a los ecosistemas únicos que alberga (Garreaud et al., 2003; Valdés-Pineda et al., 2016; Gómez-Silva & Batista-García, 2022). La coexistencia entre los habitantes y los factores climáticos es un acto de constante adaptación (Cea & Costabile 2022), ya que el clima de esta región fluctúa de manera dinámica y es particularmente sensible a las variaciones cíclicas y al cambio climático (Vuille et al., 2000). La ubicación estratégica de las poblaciones, y el desarrollo de medidas para enfrentar el comportamiento de eventos climáticos extremos, constituyen la base de la gestión del riesgo en Chile. Sin embargo, estas estrategias requieren una evaluación y una adaptación continua frente a las características impredecibles del cambio climático (Levell et al., 2012), que van a amplificar

la magnitud y frecuencia de los eventos El Niño y La Niña (Montecinos & Aceituno, 2003).

El cambio climático ha contribuido también a un aumento en la temperatura de las aguas del Pacífico ecuatorial, lo cual no solo exacerba los efectos de El Niño, sino que reduce la duración de los periodos de neutralidad entre ciclos de ENSO (Lavado-Casimiro & Espinoza 2014; Garreaud & Falvey, 2009). En el norte de Chile, una región que ha experimentado un aumento significativo en la frecuencia de aluviones en los últimos años, este cambio en los ciclos ha resultado en desastres recurrentes que afectan a las poblaciones locales y generan consecuencias devastadoras para la economía, la infraestructura y la vida en general (Easton et al., 2018). Desde 1990, Chile experimentó intensos eventos catastróficos de inundaciones y aluviones, especialmente en las regiones de Atacama y Antofagasta. Eventos como los de 1991, 2015 y 2017 causaron graves daños, dejaron múltiples víctimas y afectaron extensas áreas urbanas y rurales. Los episodios de El Niño incrementan significativamente las lluvias intensas en esta zona árida, lo que lleva a crecidas de ríos y deslizamientos de tierra en zonas habitadas, poniendo de relieve las limitaciones de las estrategias de mitigación actuales y la urgente necesidad de fortalecer las políticas de gestión del riesgo (Trenberth, 1997; Diaz et al., 2001; Cai et al., 2015).

El Niño que comenzó en 2023 se extendió hasta mediados de 2024, seguido por condiciones climáticas neutras hacia el final del año. Las proyecciones para 2025 sugieren condiciones estables, pero con la probabilidad de un cambio a una fase de La Niña. Este patrón cíclico implica que las autoridades y la población deben mantenerse en estado de preparación para enfrentar los riesgos asociados a estos eventos y sus consecuencias. Durante las fases de La Niña, el territorio del norte de Chile podría considerarse en condiciones menos riesgosas para ocupación y uso humano, dado que estas suelen venir con condiciones climáticas más estables (Easton et al., 2018). No obstante, los eventos cíclicos de El Niño requieren una gobernanza efectiva que permita disminuir los riesgos proyectados y prevenir situaciones críticas en zonas habitadas que podrían quedar expuestas a peligros al no contar con una infraestructura adecuada (Diaz et al., 2001; Lavado-Casimiro & Espinoza, 2014; Cai et al., 2015).

La intervención de cuencas hidrográficas y su planificación en el norte de Chile representa un desafío de sostenibilidad a largo plazo, dado que la expansión de la población y el uso de estas áreas como receptores de residuos sólidos urbanos e industriales ha incrementado la vulnerabilidad de la región ante desastres (Rojas et al., 2017; Easton et al., 2018). La preparación para enfrentar los efectos de El Niño y La Niña en este territorio implica la implementación de estrategias de gobernanza que promuevan un uso racional y seguro de estas áreas. Durante las fases de La Niña, estas áreas pueden considerarse para su ocupación y aprovechamiento, pero durante El Niño, la gestión de riesgos debe ser prioritaria para proteger tanto a la población como al medio ambiente de los impactos derivados de lluvias intensas y aluviones.

La comprensión de los procesos cíclicos y su interacción con el cambio climático es esencial para garantizar la seguridad y sostenibilidad del norte de Chile (Cutter et al., 2008; Alexander, 2013; Rojas et al., 2017). Las autoridades, los expertos en climatología y los gestores de riesgos deben trabajar en conjunto para desarrollar y perfeccionar estrategias que aborden tanto la prevención de desastres como la recuperación ante eventos adversos (Levell et al., 2012; Cea & Costabile 2022). El conocimiento detallado de las dinámicas climáticas y su interacción con la ocupación del territorio permitirá desarrollar políticas más robustas de adaptación y resiliencia que protejan a la población y promuevan la conservación del medio ambiente (Levell et al., 2012; Cutter et al., 2008; Alexander, 2013). Este enfoque adaptativo y multidisciplinario será fundamental para enfrentar los desafíos climáticos actuales y futuros en esta región estratégica de Chile y para garantizar la seguridad y el bienestar de las comunidades y los ecosistemas en un contexto de cambio climático acelerado (Cea & Costabile, 2022).

La comprensión del entorno, involucrando los procesos cíclicos del clima al que se expone el territorio y el desajuste que genera el cambio climático en este proceso es el foco de este análisis de la literatura. El cambio en la intensidad y frecuencia de estos fenómenos sugiere que las herramientas de monitoreo, prevención y mitigación deben actualizarse para poder responder a un entorno que es cada vez menos predecible.

### *1.1. Impacto social y ecológico de los aluviones*

Los aluviones en el norte de Chile causan un impacto significativo en múltiples niveles de la estructura social y ecológica. Estos eventos no solo alteran la infraestructura y los hábitats, sino que generan una crisis de resiliencia y adaptación en las comunidades, creando un efecto en cadena sobre la economía local, la salud pública, y el medio ambiente (Levell et al., 2012; Rojas et al., 2017).

Desde una perspectiva social, los aluviones representan una amenaza constante para las comunidades asentadas en áreas de riesgo (Clar et al., 2023). La pérdida de viviendas, infraestructura y recursos básicos afecta profundamente el bienestar de los habitantes, quienes muchas veces carecen de alternativas para reubicarse. La frecuencia y severidad de los eventos climáticos extremos también provocan desplazamientos temporales o permanentes, afectando la estabilidad familiar y aumentando la presión sobre las infraestructuras sociales y de salud (Astudillo Pizarro & Sandoval Diaz, 2019). Los servicios médicos, por ejemplo, deben lidiar con un aumento en enfermedades respiratorias e infecciosas relacionadas con la exposición a metales pesados, como el cobre y el arsénico, que suelen encontrarse en los sedimentos arrastrados durante los aluviones (Easton et al., 2018).

En el ámbito ecológico, los aluviones provocan un efecto devastador sobre los ecosistemas fluviales y costeros, llevando sedimentos y contaminantes a zonas sensibles (Garreaud & Falvey, 2009; Massotiti et al., 2018; Gómez-Silva & Batista-García, 2022). Estos sedimentos, con alta concentración de relaves mineros y metales pesados, alteran la química del suelo y del agua, afectando la flora y fauna local (Syvitski et al., 2005). La biodiversidad sufre grandes pérdidas, especialmente en especies endémicas adaptadas a las condiciones extremas del desierto de Atacama (León & Hernández, 2010; Gómez-Silva & Batista-García, 2022), cuya adaptabilidad no resiste los cambios abruptos causados por los flujos repentinos de agua y lodo. Los ecosistemas costeros de la región, como los ubicados en la bahía de Chañaral (Figura 1), sufren transformaciones de larga duración debido a la contaminación crónica y al cambio en la morfología de los cauces hidrográficos, lo cual altera los ciclos

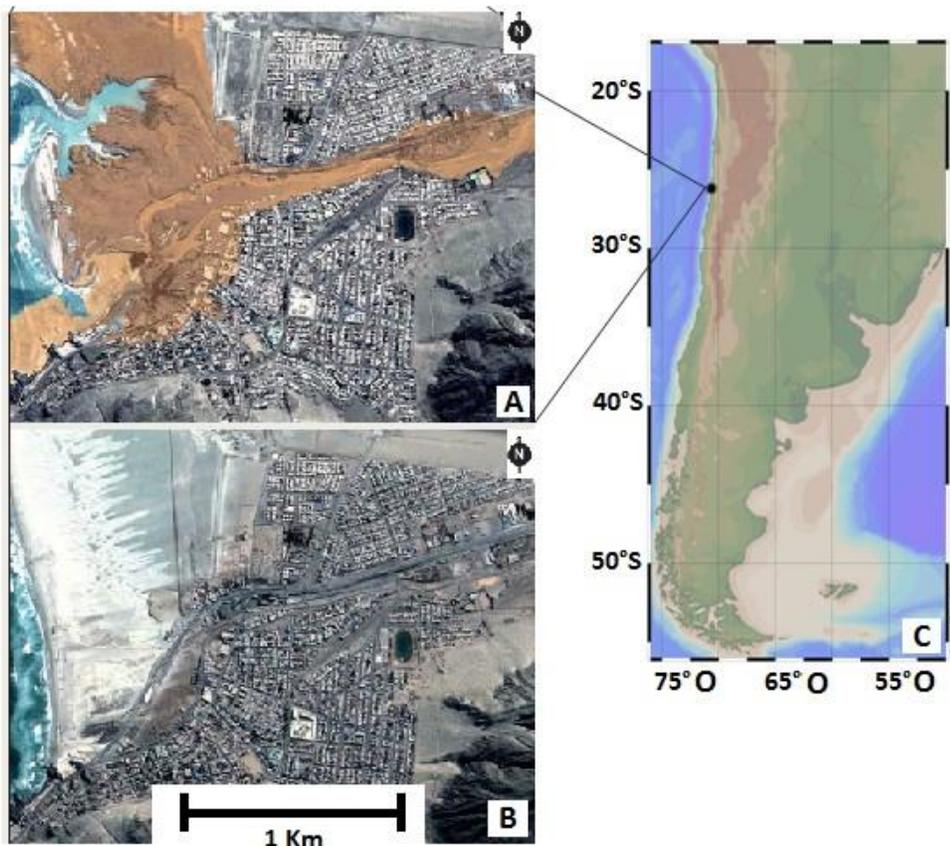
de nutrientes y la dinámica de las comunidades biológicas (Castilla et al., 1978; Medina et al., 2005; Correa et al., 1998).

### *1.2. Desafíos en el crecimiento poblacional y expansión urbana*

El crecimiento urbano en el norte de Chile, impulsado principalmente por el desarrollo económico, ha generado una expansión desordenada hacia áreas de alto riesgo de aluviones (Rojas et al., 2017; Easton et al., 2018), como las ciudades de Antofagasta, Calama, Copiapó y Chañaral. Este fenómeno responde tanto a la atracción económica que genera la disponibilidad de empleo, como a la falta de planificación urbana efectiva y la memoria social de riesgo (Rojas et al., 2017; Clar et al., 2023).

En ciudades como Antofagasta y Copiapó, la expansión hacia quebradas y zonas cercanas a cauces secos responde a la necesidad de espacio para viviendas y la cercanía a lugares de trabajo (Astudillo Pizarro & Sandoval Diaz, 2019). Sin embargo, la falta de planificación urbana que considere el historial de aluviones y la vulnerabilidad de estos sitios ha llevado a un aumento en la exposición al riesgo de desastres (Falvey & Garreaud, 2007; Garreaud et al., 2003; Pizarro et al., 2015; Rojas et al., 2017). La memoria social juega un papel crucial, ya que, aunque las personas experimenten episodios de aluviones, con el tiempo tienden a minimizar el peligro o incluso olvidarlo. Este comportamiento está influenciado por la necesidad económica y la falta de políticas de gobernanza del suelo que regulen el uso de estos espacios (Cutter et al. 2008; Rojas et al., 2017).

Otro desafío importante es la reconstrucción en zonas afectadas después de un aluvión, donde la necesidad inmediata de restablecer la normalidad lleva a una ocupación rápida y poco planificada (Clar et al., 2023). Esta ocupación perpetúa el ciclo de vulnerabilidad, ya que los asentamientos informales suelen desarrollarse en los mismos espacios de riesgo (Astudillo Pizarro & Sandoval Diaz, 2019; Cea & Costabile, 2022). En este contexto, la presión para construir infraestructura básica rápidamente suele superar los esfuerzos de concientización y planificación de largo plazo, dejando a las comunidades expuestas a futuros eventos climáticos extremos (Levell et al., 2012; Rojas et al., 2017).



**Figura 1.** Ubicación geográfica y morfología costera de Chañaral. a. Desembocadura del río Salado el 28 marzo del 2015. b. Desembocadura del río Salado el 27 junio del 2014. c. Situación geográfica de la bahía de Chañaral. El impacto del aluvión sobre la ciudad de Chañaral se evidencia en los movimientos de sedimentos costeros y continentales hacia la plataforma continental (Fuente: Modificado de El mercurio 2015).

## 2. IMPACTO EN ECOSISTEMAS Y ÁREAS PROTEGIDAS

Los aluviones en el norte de Chile alteran profundamente los ecosistemas locales, especialmente en áreas protegidas y sitios de conservación (Garreaud et al., 2003; León & Hernández, 2010). La biodiversidad del desierto de Atacama, con especies endémicas y adaptadas a condiciones de aridez extrema (Gómez-Silva & Batista-García, 2022), enfrenta riesgos de extinción debido a la destrucción de hábitats y la contaminación con metales pesados transportados por los aluviones. En áreas protegidas como el Parque Nacional Pan de Azúcar, los aluviones invaden los ecosistemas con grandes cantidades de sedimentos (Easton et al., 2018), dañando especies vegetales y fauna local, incluyendo reptiles y aves.

La modificación de las cuencas hidrográficas altera los patrones de flujo y sedimentación, afectando a las especies fluviales y la vegetación ribereña que depende de una dinámica de agua y nutrientes estable (Boulton & Lake 1992; Garreaud et al., 2003; Valdés-Pineda et al., 2016). Esta situación genera un efecto cascada que afecta la estabilidad del ecosistema y su capacidad para sostener a la fauna y flora nativa (Beaumont et al., 2007). El daño a estos ecosistemas repercute a nivel global (Borges y Gypens, 2010; León & Hernández, 2010), dado que los servicios ecosistémicos, como la captura de carbono y la generación de oxígeno en zonas costeras, son esenciales para la salud ambiental planetaria (Gómez-Silva & Batista-García, 2022).

Además, los aluviones generan zonas de contaminación que se extienden más allá del área inmediata del evento (Syvitski et al., 2005), ya que los contaminantes de origen minero se filtran a

través de los cauces y llegan al océano, afectando las poblaciones marinas y la productividad primaria del océano en estas regiones costeras (Borges & Gypens, 2010; Easton et al., 2018). La recuperación de estos ecosistemas requiere un largo periodo de tiempo (Paine et al., 1998; White & Jentsch, 2001; Borja et al., 2010)) y la intervención activa para remover los sedimentos contaminantes.

### **3. MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y REDUCCIÓN DEL RIESGO**

La mitigación de los riesgos de aluviones en el norte de Chile requiere un enfoque integral (Tabla 1), que combine tecnología avanzada, planificación de infraestructura y participación comunitaria (Levell et al., 2012; Easton et al., 2018). La implementación de estas medidas debe adaptarse a las características particulares de la región árida del desierto de Atacama, donde los eventos de precipitación son raros, pero extremadamente intensos (Cai et al., 2015; Marengo et al., 2010; Pizarro et al., 2015).

**Infraestructura de contención:** La construcción de muros de contención y diques en áreas críticas es fundamental para dirigir el flujo de agua y sedimentos, protegiendo las zonas urbanas de los impactos directos de un aluvión. En Chañaral, la construcción de muros en la desembocadura del río Salado ha sido propuesta como una medida para desviar el agua y reducir el impacto de los sedimentos (Easton et al., 2018). Además, los sistemas de captación y almacenamiento de agua de aluvión podrían aprovechar el flujo de agua, aumentando la disponibilidad hídrica en la región y reduciendo los impactos negativos de los aluviones (Pelletier et al 2005; Grodek & Benito, 2024).

**Sistemas de alerta temprana y monitoreo:** La instalación de estaciones meteorológicas y el monitoreo de cuencas hidrográficas permiten predecir condiciones que podrían desencadenar un aluvión. La tecnología LiDAR y los sensores remotos permiten detectar variaciones en la topografía y humedad del suelo, proporcionando datos cruciales para la toma de decisiones en tiempo real (Lombana et al., 2024). Estos sistemas permiten alertar a la población y activar planes de evacuación. Sin embargo, para que estos sistemas sean efectivos, es fundamental educar a la población sobre su uso y las acciones a tomar ante una alerta (Cai et al., 2015; Pizarro et al., 2015; Marengo et al., 2010).

**Reforestación y gestión de la vegetación:** En zonas áridas, la reforestación con especies autóctonas puede estabilizar el suelo y reducir la velocidad y volumen de escurrimiento durante un aluvión (Grodek & Benito, 2024). La vegetación ayuda a retener los sedimentos y disminuye la cantidad de material transportado hacia las áreas urbanas y costeras, donde los sedimentos tienden a contaminar los cuerpos de agua y el suelo.

**Planificación urbana y gobernanza del uso del suelo:** Una política de zonificación rigurosa es crucial para evitar el desarrollo urbano en zonas propensas a deslizamientos y aluviones (Thomalla et al. 2006; Cea & Costabile 2022). Esto implica revisar y ajustar los planes reguladores, además de establecer restricciones en las áreas de riesgo (Grodek & Benito, 2024). En el caso de Chañaral y Copiapó, los esfuerzos de mitigación deberían incluir el traslado de asentamientos ubicados en zonas de alto riesgo y la creación de reservas de suelo seguro para futuros desarrollos urbanos (Levell et al., 2012).

**Mantenimiento de cauces y manejo de relaves mineros:** La acumulación de sedimentos y relaves en los cauces de los ríos agrava el riesgo de inundación (Syvitski et al., 2005; Easton et al., 2018). El dragado y la limpieza regular de cauces permiten el flujo adecuado del agua y previenen obstrucciones que intensifican el riesgo de desbordamiento. En Chañaral, el manejo de los relaves mineros debe ser una prioridad, ya que estos desechos, al no ser correctamente controlados, representan una carga contaminante de largo plazo para el ecosistema costero (Castilla et al., 1978; Medina et al., 2005).

### **4. REDUCCIÓN DEL RIESGO: EL ROL DE LA COMUNIDAD Y LAS POLÍTICAS DE ADAPTACIÓN**

El éxito en la reducción del riesgo en áreas propensas a aluviones depende en gran medida de la concienciación y participación de la comunidad en estrategias de gestión del riesgo (Askman et al., 2018; Clar et al., 2023). Las políticas de adaptación deben incluir programas de educación para que los habitantes comprendan los riesgos y sepan cómo responder ante una alerta de aluvión (Turner et al. 2003; Thomalla et al. 2006). También es fundamental el desarrollo de prácticas de gobernanza que involucren a las comunidades en la planificación y ejecución de medidas de mitigación (Cea & Costabile 2022).

La participación comunitaria en simulacros de evacuación, así como la creación de redes de apoyo local, permite que las comunidades se organicen y respondan rápidamente durante emergencias (Easton et al., 2018). Las políticas deben estar orientadas a empoderar a las comunidades en la toma de decisiones relacionadas con la seguridad y el manejo de desastres (Clar et al. 2023; Rojas et al. 2017; Cutter et al. 2008).

La implementación de un marco regulatorio sólido que regule el uso del suelo, la gestión de residuos

mineros, y las prácticas de urbanización es indispensable para reducir el riesgo en zonas vulnerables y asegurar un desarrollo urbano sostenible (Cutter et al. 2008; Adger et al. 2009; Pelling 2011). La colaboración entre entidades gubernamentales, sector privado, y la comunidad fortalecerá las medidas de reducción de riesgos en el norte de Chile, creando una sociedad más resiliente frente a los desafíos del cambio climático y los eventos climáticos extremos (Thomalla et al., 2006; Levell et al., 2012; Cea & Costabile 2022).

Estrategia	Medida	Objetivo
Obras de contención	Diques y muros	Dirigir el flujo evitando afectaciones en zonas urbanas.
Sistema de alerta temprana	Instalación de estaciones meteorológicas y monitoreo fluvial	Alertar a la población con antelación.
Reforestación	Introducción de vegetación autóctona	Estabilizar el suelo y reducir el escurrimiento.
Planificación urbana	Planes reguladores	Limitar el desarrollo en zonas de alto riesgo.
Mantenimiento de cauces	Dragado y limpieza de los cauces	Evita obstrucciones y reducir riesgos.

**Tabla 1.** Estrategias de mitigación y reducción del riesgo

## 5. CONCLUSIONES

El uso del territorio, en términos de infraestructura y planificación urbana en áreas vulnerables a aluviones, pone urgencia para adoptar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático. La falta de una planificación urbana que integre riesgos ambientales y los déficits en la infraestructura de mitigación agravan la vulnerabilidad de estas regiones. Para reducir el riesgo futuro, es fundamental que los gobiernos

implementen políticas y medidas de adaptación efectivas, fortalezcan la educación y concienciación pública sobre el riesgo de aluviones, y promuevan una gobernanza territorial que priorice la seguridad y resiliencia frente a un clima cambiante.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Adger, W. N., et al. (2009). "Are there social limits to adaptation to climate change?". *Climatic Change*, 93(3), 335-354.

Alexander, D. E. (2013). "Resilience and disaster risk reduction: An etymological journey". *Natural*

*Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), 2707-2716.

Aravena, J. C., & Luckman, B. H. (2009). "Spatio-temporal rainfall patterns in southern South America". *International Journal of Climatology*, 29(13), 2106-2120.

Askman, J., Nilsson, O., & Becker, P. (2018). Why people live in flood-prone areas in Akuressa, Sri Lanka. *International Journal of Disaster Risk Science*, 9, 143-156.

Astudillo Pizarro, F., & Sandoval Diaz, J. (2019). Justicia espacial, desastres socionaturales y políticas del espacio: dinámicas sociopolíticas frente a los aluviones y proceso de recuperación en Copiapó, Chile. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(2), 303-321.

Beaumont, N. J.; Austen, M. C.; Atkins, J. P.; Burdon, D.; Degraer, S.; Dentinho, T. P.; Zarzycki, T. Identification, definition and quantification of goods and services provided by marine biodiversity: implications for the ecosystem approach. *Marine pollution bulletin*: 54 (2007).

- Borgesa A.V.; Gypens N. Carbonate chemistry in the coastal zone responds more strongly to eutrophication than to ocean acidification. *Limnol. Oceanogr*: 55 (2010)
- Borja, Á.; Dauer, D. M.; Elliott, M.; Simenstad, C. A. Medium and long-term recovery of estuarine and coastal ecosystems: patterns, rates and restoration effectiveness. *Estuaries and Coasts* 33 (2010).
- Boulton, A. J., & Lake, P. S. (1992). "The ecology of two intermittent streams in Victoria, Australia". *Freshwater Biology*, 27(1), 99-121.
- Cai, W., et al. (2015). "Increased frequency of extreme La Niña events under greenhouse warming". *Nature Climate Change*, 5(2), 132-137.
- Castilla, J.C.; Nealler, E. Marine Environmental Impact Due to Mining Activities of El Salvador Copper Mine, Chile. *Marine Pollution Bulletin*: 9 (1978).
- Cea, L., & Costabile, P. (2022). Flood risk in urban areas: Modelling, management and adaptation to climate change. A review. *Hydrology*, 9(3), 50.
- Clar, C., Junger, L., Nordbeck, R., & Thaler, T. (2023). The impact of demographic developments on flood risk management systems in rural regions in the Alpine Arc. *International journal of disaster risk reduction*, 90, 103648.
- Correa, J.; Castilla, J.; Ramírez, M.; Varas, M.; Lagos, N.; Vergara, S., Moenne, A.; Romás D.; Brown, M. Copper, copper mine tailings and their effect on marine algae in Northern Chile. *Journal of Applied Phycology*: 11 (1999).
- Cutter, S. L., et al. (2008). "A place-based model for understanding community resilience to natural disasters". *Global Environmental Change*, 18(4), 598-606.
- Diaz, H. F., Hoerling, M. P., & Eischeid, J. K. (2001). ENSO variability, teleconnections and climate change. *International Journal of Climatology*, 21(15), 1845-1862.
- Ditlevsen, P., & Ditlevsen, S. (2023). Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nature Communications*, 14(1), 1-12.
- Easton, G. V., Tello, S. P., & Ide, P. A. (2018). *Aluviones y resiliencia en Atacama. Construyendo saberes sobre riesgos y desastres*. Santiago: Social-Ediciones.
- Falvey, M., & Garreaud, R. (2007). "Wintertime precipitation episodes in central Chile: Associated meteorological conditions and orographic influences". *Journal of Hydrometeorology*, 8(2), 171-193.
- Field, C. B., et al. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge University Press.
- Garreaud, R. D. (2009). "The Andes climate and weather". *Advances in Geosciences*, 22, 3-11.
- Garreaud, R. D., & Falvey, M. (2009). "The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios". *International Journal of Climatology*, 29(4), 543-554.
- Garreaud, R., Vuille, M., & Clement, A. C. (2003). "The climate of the Altiplano: Observed current conditions and mechanisms of past changes". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 194(1-3), 5-22.
- Geng, X., Zhao, J., & Kug, J. S. (2023). ENSO-driven abrupt phase shift in North Atlantic oscillation in early January. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1), 80.
- Gómez-Silva, B., & Batista-García, R. A. (2022). The Atacama desert: a biodiversity hotspot and not just a mineral-rich region. *Frontiers in Microbiology*, 13, 812842.
- Gou, R., Lohmann, G., & Wu, L. (2024). Atlantic meridional overturning circulation decline: Tipping small scales under global warming. *Physical Review Letters*, 133(3), 034201.
- Grodek, T., & Benito, G. (2024). Reevaluating Flood Protection: Disaster Risk Reduction for Urbanized Alluvial Fans. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2024, 1-28.
- IPCC. (2014). "Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects". Cambridge University Press.

- Lavado-Casimiro, W., & Espinoza, J. C. (2014). Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú (1965-2007). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29, 171-182.
- Lavell, A., Oppenheimer, M., Diop, C., Hess, J., Lempert, R., Li, J., & Myeong, S. (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change (IPCC), 3, 25-64.
- León, R. J., & Hernández, M. C. (2010). "Biodiversity and its conservation in the Atacama Desert". *Biodiversity*, 11(1-2), 14-23.
- Lombana, L., Bhattacharya, B., Alfonso, L., & Martínez-Graña, A. (2024). Hydrogeomorphological approach for flood analyses at high-detailed scale: Narrow rivers with broad complex alluvial plains. *Catena*, 242, 108081.
- Marengo, J. A., et al. (2010). "Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system". *International Journal of Climatology*, 30(15), 2241-2255.
- Masotti, I., Aparicio-Rizzo, P., Yevenes, M. A., Garreaud, R., Belmar, L., & Farías, L. (2018). The influence of river discharge on nutrient export and phytoplankton biomass off the Central Chile coast (33–37 S): Seasonal cycle and interannual variability. *Frontiers in Marine Science*, 5, 423.
- McPhaden, M. J., et al. (2006). "ENSO as an integrating concept in earth science". *Science*, 314(5806), 1740-1745.
- Medina, M.; Andrade, S.; Faugeron, S.; Mella, D.; Correa, J. (2005) Biodiversity of rocky intertidal benthic communities associated with copper mine tailing discharge in northern Chile. *Mar. Poll. Bull.*: 50 (2005).
- Montecinos, A., & Aceituno, P. (2003). "Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies". *Journal of Climate*, 16(2), 281-296.
- Ortega, C., Vargas, G., Rojas, M., Rutilant, J. A., Muñoz, P., Lange, C. B., ... & Ortlieb, L. (2019). Extreme ENSO-driven torrential rainfalls at the southern edge of the Atacama Desert during the Late Holocene and their projection into the 21st century. *Global and planetary change*, 175, 226-237.
- Paine R.T.; Tegner M.J.; Johnson E.A. Compounded Perturbations Yield Ecological Surprises. *Ecosystems*: 1 (1998).
- Pelletier, J. D., Mayer, L., Pearthree, P. A., House, P. K., Demsey, K. A., Klawon, J. E., & Vincent, K. R. (2005). An integrated approach to flood hazard assessment on alluvial fans using numerical modeling, field mapping, and remote sensing. *Geological Society of America Bulletin*, 117(9-10), 1167-1180.
- Pelling, M. (2011). *Adaptation to Climate Change: From Resilience to Transformation*. Routledge.
- Pizarro, R., Valdés, R., Abarza, A., & Garcia-Chevesich, P. (2015). A simplified storm index method to extrapolate intensity–duration–frequency (IDF) curves for ungauged stations in central Chile. *Hydrological Processes*, 29(5), 641-652.
- Rojas, O., Mardones, M., Rojas, C., Martínez, C., & Flores, L. (2017). Urban growth and flood disasters in the coastal river basin of south-central Chile (1943–2011). *Sustainability*, 9(2), 195.
- Syvitski, J.P.; Vörösmarty, C.J.; Kettner, A.J.; Green, P. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*: 308 (2005).
- Thomalla, F., et al. (2006). "Reducing hazard vulnerability: Towards a common approach between disaster risk reduction and climate adaptation". *Disasters*, 30(1), 39-48.
- Trenberth, K. E. (1997). "The definition of El Niño". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2771-2777.
- Trenberth, K. E., & Fasullo, J. T. (2012). "Climate extremes and climate change: The Russian heat wave and other climate extremes of 2010". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D17).
- Turner, B. L., et al. (2003). "A framework for vulnerability analysis in sustainability science". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8074-8079.

Valdés-Pineda, R., Valdes, J. B., Diaz, H. F., & Pizarro-Tapia, R. (2016). Analysis of spatio-temporal changes in annual and seasonal precipitation variability in South America-Chile and related ocean-atmosphere circulation patterns. *International Journal of Climatology*, (8), 2979-3001.

Vuille, M., & Bradley, R. S. (2000). "Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes". *Geophysical Research Letters*, 27(23), 3885-3888.

Vuille, M., Bradley, R. S., & Keimig, F. (2000). Climate variability in the Andes of Ecuador and its relation to tropical Pacific and Atlantic sea surface temperature anomalies. *Journal of climate*, 13(14), 2520-2535.

White, P.S.; Jentsch, A. *The Search for Generality in Studies of Disturbance and Ecosystem Dynamics*. *Progress in botany*: 62 (2001).

