Módulo 5 – Tema 2 –
Planificación y preparación para eventos climáticos extremos.

RelaveNet
A Community of Excellence

- **Ing. Danny Flores Cruz**

EVALUACIÓN

Tabla 1. Directrices para la Evaluación de Riesgos Climáticos

PLANIFICACIÓN	Acciones Recomendadas	Estándares y buenas prácticas
Evaluación de riesgos climáticos	• Realizar evaluaciones periódicas de riesgo que incluyan eventos climáticos (p.ej. lluvias torrenciales, inundaciones, sequías, temperaturas extremas) actuales y proyectados • Incorporar proyecciones de cambio climático (datos del IPCC, escenarios regionales, etc.) para estimar cómo aumentará la frecuencia/magnitud de eventos extremos. • Actualizar la clasificación de consecuencias del depósito de relaves con base en nuevos datos (p.ej. si crece la población aguas abajo o cambian las condiciones climáticas), ya que una clasificación "Extrema" o "Muy Alta" exige criterios de diseño más estrictos. • Utilizar metodologías de análisis de riesgo (p. ej. ISO 31000) y análisis de brechas para identificar modos de falla potenciales asociados a eventos extremos, incorporando incertidumbres.	• La norma GISTM (2020) exige mantener una base de conocimiento del sitio que "capture las incertidumbres debidas al cambio climático", evaluándola y actualizándola regularmente para mejorar la resiliencia (enfoque de gestión adaptativa). • El IPCC (AR6) señala que la frecuencia e intensidad de las precipitaciones extremas ha aumentado desde 1950 debido al calentamiento global, lo que indica la necesidad de considerar escenarios de lluvia más severos. • Algunos estándares nacionales (ej.: Canadá, Chile) requieren análisis de Inundación Máxima Probable y estudios de amenaza climática en la evaluación de sitios de relaves. Además, eventos recientes han demostrado que lluvias inusualmente intensas pueden contribuir a fallas de relaves, subrayando la importancia de una rigurosa evaluación de riesgos climáticos.

Tabla 2. Climate change projection results through 2100

Ejemplo de resultados de proyecciones de cambio climático hasta el año 2100.

	SSP45				SSP85			
	Mean	Median	10th	90th	Mean	Median	10th	90th
Temperature 1-Day; C	2.8	2.8	1.7	3.8	6.3	6.5	4.2	8.0
Temperature 1-Day Summer; C	2.8	2.8	1.7	3.8	6.3	6.5	4.1	8.0
Temperature 1-Day Winter PF; C	3.0	3.2	1.9	3.9	6.6	6.4	5.0	8.8
*Precipitation 1-Day PF; %	12	9	-1	27	14	13	0	25
Precipitation 1-Day Summer PF; %	8	12	-6	19	12	12	-4	28
Precipitation 1-Day Winter PF; %	13	12	-1	26	18	20	3	34
*Precipitation 3-Day PF; %	23	18	1	37	29	24	3	63
Precipitation 3-Day Summer PF; %	15	9	-7	49	20	19	-7	47
Precipitation 3-Day Winter PF; %	20	21	-6	45	29	28	2	60
Precipitation 30-Day PF; %	14	13	-4	27	21	20	-1	48
Precipitation 90-Day PF; %	15	13	-2	32	19	17	-1	41
Precipitation Annual PF; %	10	10	-5	27	15	11	0	34
Moisture Maximization 1-Day, %	No Change				No Change			
Moisture Maximization 3-Day; %	No Change				No Change			

- La planificación debe incorporar impactos del cambio climático, evaluando la incertidumbre climática mediante modelos.
- El cambio climático afecta la infraestructura del depósito de relaves directamente y exige resiliencia operativa. Por lo tanto, los operadores deben definir objetivos de riesgo para impulsar las decisiones.
- Se debe contar con un informe hidrológico que describa la climatología del lugar, basada en registros de estaciones meteorológicas.

Ejemplo de de la distancia óptima a la playa (Doptimal)

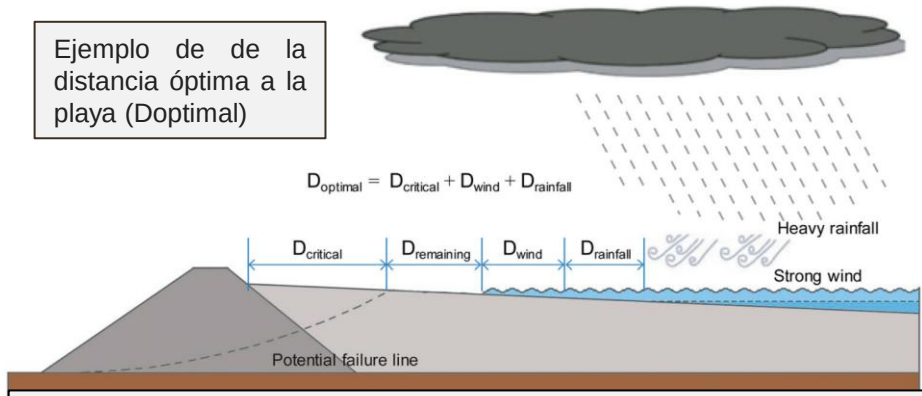

Figura 1. Illustration of the optimal beach distance (Doptimal)

RelaveNet
A Community of Excellence

DISEÑO HIDROLÓGICO

Tabla 3. Directrices para el Diseño

PLANIFICACIÓN	Acciones Recomendadas	Estándares y buenas prácticas
Diseño	• Actualizar criterios de diseño para que las estructuras del depósito resistan eventos (considerar precipitaciones de diseño con periodos de retorno mayores o *Precipitación Máxima Probable* ajustada por cambio climático). • Asegurar capacidad hidráulica suficiente: dimensionar aliviaderos, canales y sistemas de drenaje para evacuación de lluvias extraordinarias sin sobrepasar la corona; mantener francos libres (freeboard) amplios para prevenir desbordes incluso bajo tormentas más intensas. • Emplear diseños con taludes con factores de seguridad altos, materiales adecuados y considerar métodos constructivos más seguros frente a climas extremos (*aguas abajo* en lugar de *aguas arriba)* • Realizar análisis de estabilidad bajo condiciones extremas combinadas (p.ej. lluvia máxima coincidente con sismo) y prever refuerzos (bermas, muros secundarios) si el análisis lo indica. • Revisar el diseño regularmente a lo largo del ciclo de vida e implementar mejoras (ej.: elevar el dique preventivamente, aumentar capacidad de embalse).	• El estándar GISTM (2020) requiere un *diseño* que integre contexto técnico, climático y la clasificación de consecuencias. Exige implementar un modelo de balance de aguas que considere el clima futuro, *cambio climático* y proteja contra descargas no intencionales. • Mejores prácticas internacionales (ej.: guía CDA 2019 de Canadá, manuales ICOLD) recomiendan diseñar instalaciones de categoría de riesgo "Extrema" para eventos con probabilidad de excedencia casi nula (p.ej. Inundación Máxima Probable, máximo sismo creíble), aplicando márgenes de seguridad adicionales por incertidumbre climática.

Tabla 4. Clasificación de Consecuencias y Criterios Mínimos de Evento de Diseño Hidrológico

Fuente: Adaptado de GISTM y ANCOLD.

Clasificación de Consecuencia (GISTM/ANCOLD)	Consecuencia Potencial	Fase Operacional (AEP)	Fase Post-Cierre (AEP)	Criterio Mínimo de Aliviadero de Emergencia (Spillway Capacity)
Baja (Low)	Daño limitado; Sin pérdida de vidas.	1:200 años	1:10,000 años	1:100 AEP
Significativa (Significant)	Daño económico y ambiental apreciable; Riesgo potencial para vidas.	1:1,100 años	1:10,000 años	1:1,000 AEP
Alta A/Extrema (High A/Extreme)	Daño catastrófico; Alta probabilidad de pérdida de vidas.	Probable Maximum Precipitation (PMP)	Probable Maximum Precipitation (PMP)	PMF (Probable Maximum Flood)

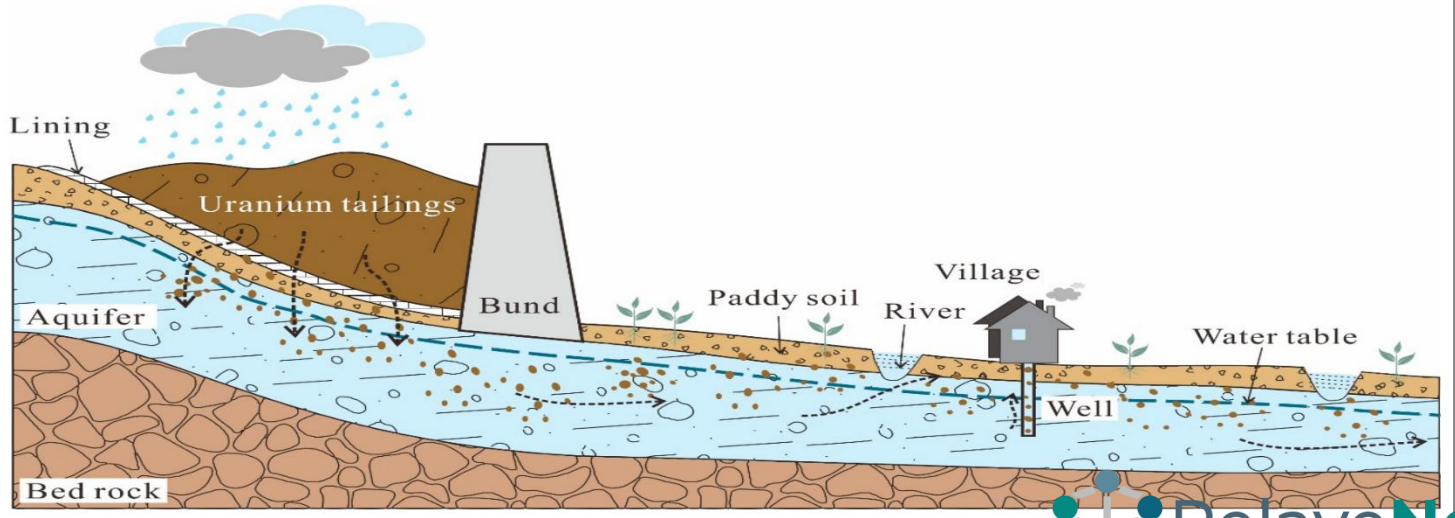

Figura 2. Ejemplo de las corrientes de agua en el depósito de relaves

RelaveNet
A Community of Excellence

GESTIÓN

Tabla 5. Directrices para la Gestión

PLANIFICACIÓN	Acciones Recomendadas	Estándares y buenas prácticas
Gestión y Modelación La gestión proactiva requiere identificar cómo y por qué puede ocurrir una falla catastrófica Imprescindible contar con una modelación determinista y estocástica	• Implementar un plan integral de manejo de aguas: mantener actualizado el balance hídrico de la instalación, considerando escenarios de lluvias extremas y cambios estacionales (p.ej. temporadas más húmedas). • Controlar el nivel de agua en el depósito de relaves, operar con volumen mínimo; antes de eventos climáticos pronosticados, reducir el nivel (mediante bombeo o liberación controlada a sistemas de tratamiento) para aumentar capacidad de amortiguamiento. • Infraestructura de drenaje: asegurar que los canales, cunetas y sistemas de captación de aguas lluvias estén limpios y dimensionados para caudales excepcionales; incluir piscinas de sedimentación o diques auxiliares para contener sobreflujos. • Construir canales o bermas de desviación para evitar que aguas de escorrentía ajenas (p.ej. de cuencas arriba) ingresen al depósito durante tormentas. • Nunca operar al límite de la capacidad del freeboard. Definir margen de seguridad de nivel (freeboard) basado en la máxima lluvia esperada más un factor de seguridad, evitando el sobrepaso aun en caso de eventos mayores a los históricos.	•Norma Global de Relaves (GISTM, 2020) exige contar con un plan de manejo y balance de aguas que *tenga en cuenta el cambio climático* en toda la vida del depósito. • ICMM e ICOLD destacan que el manejo del agua es crítico ya que muchas fallas de relaves ocurrieron por *overtopping* (desborde) tras lluvias. De hecho, se ha observado que los eventos de lluvia extrema son cada vez más frecuentes y complican la gestión de niveles de agua en los relaves; algunas rupturas han coincidido con períodos de lluvias inusuales. • Algunas empresas como BHP y Teck reportan que sus instalaciones pueden almacenar la Inundación Máxima Probable + margen de cambio climático sin falla. También se tiende a adoptar depósitos de relaves secos o filtrados en climas húmedos para eliminar el riesgo de desborde.

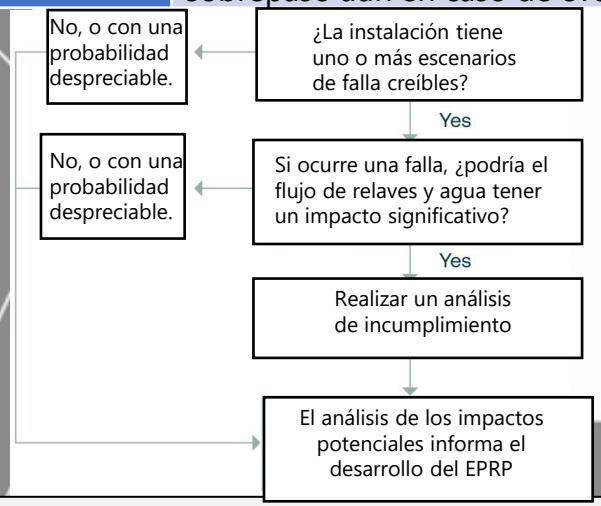

Figura 2. Ejemplo de un árbol de decisión para evaluar consecuencias

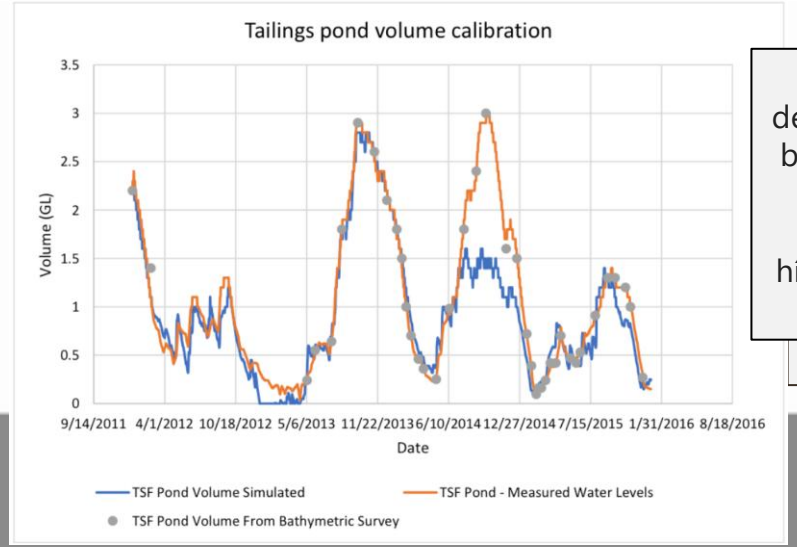

Figure 3. volumen de agua en el depósito de relaves, calculado mediante batimetría e nivel de agua, junto con la comparación de los volúmenes simulados en el modelo de balance hídrico calibrado (ajuste de coeficientes de escorrentía de playa).

Fuente: Strand (IMWA, 2020)

RelaveNet
A Community of Excellence

MONITOREO

Tabla 6. Directrices para el Monitoreo

PLANIFICACIÓN	Acciones Recomendadas	Estándares y buenas prácticas
Monitoreo	• Instalar un sistema de monitoreo en la presa y el entorno. Incluir piezómetros (para presión de poros), inclinómetros o estaciones GPS (para detectar movimientos o deformaciones del muro), pluviómetros y estaciones meteorológicas, sensores de nivel de agua en el embalse. • Implementar telemetría y alarmas en tiempo real. Los datos de sensores sean transmitidos continuamente a un centro de control; establecer umbrales críticos (p.ej. elevación de nivel, presión interna, tasa de lluvia) que disparen alertas automáticas a los operadores. • Desarrollar un plan de vigilancia 24/7 durante eventos extremos: personal debe inspeccionar visualmente el dique antes, durante y después de tormentas para detectar erosión, filtraciones inusuales o deformaciones; combinar esto con cámaras, drones, satélites. • Definir acciones de mitigación si el monitoreo muestra desviaciones de comportamiento esperado (ej.: si se eleva la presión de poros, reforzar o bajar nivel de agua). Esto con el fin de ajustar el manejo del depósito sobre la marcha ante condiciones cambiantes. • Analizar periódicamente los datos de monitoreo (con apoyo de un Ing. de Registro y un Panel Técnico Independiente), revisar tendencias de niveles, porosidad, deformaciones, correlacionándolas con eventos meteorológicos, para anticipar riesgos.	• Norma GISTM: implementar un programa de monitoreo integrado para todas las fases del ciclo de vida. Se estipula adoptar completamente el *Método Observacional* para ciertos modos de falla, ajustando el manejo según datos medidos. • Empresas como Teck utilizan *"centros GPS, piezómetros, inclinómetros, sensores remotos"* y otros dispositivos para vigilar la estabilidad de sus tranques, taludes y niveles de agua en tiempo real. Además, minas en zonas tropicales incorporaron radares de lluvia y satélites para alerta temprana. • Tras incidentes, países como Brasil implementaron monitoreo obligatorio con inspección externa; el *Mining Association of Canada* exige auditorías anuales y revisión independiente cada ~3 años de los datos de seguridad del depósito.

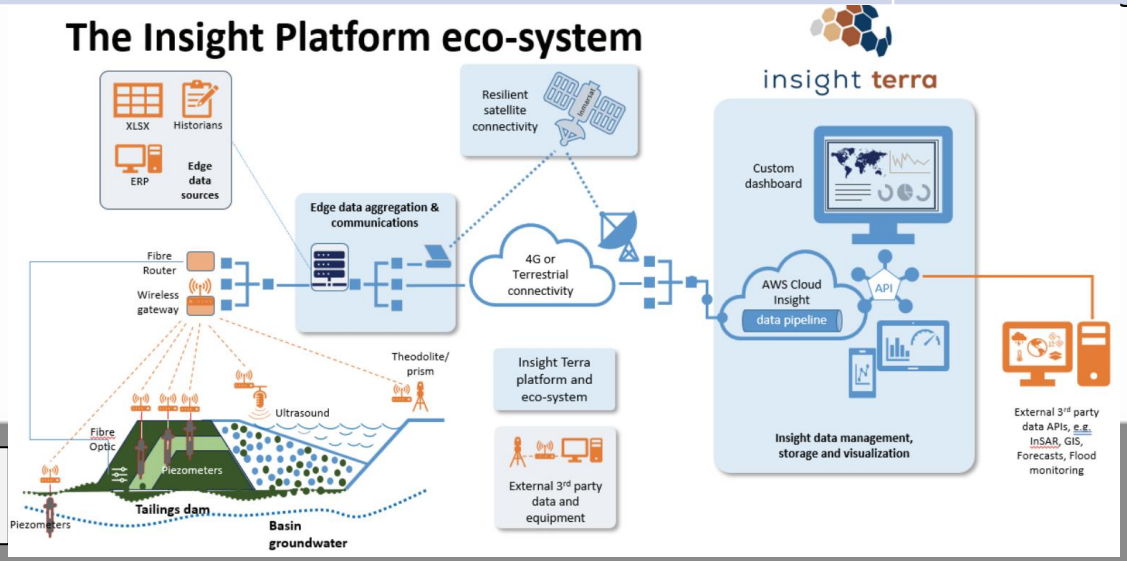

Figura 4. Ejemplo de un ecosistema de sistema de monitoreo

RelaveNet
A Community of Excellence

PLANES DE RESPUESTA A EMERGENCIAS

Tabla 7. Directrices para Planes de Respuesta a Emergencias

PLANIFICACIÓN	Acciones Recomendadas	Estándares y buenas prácticas
Planes de emergencia y respuesta La preparación ante emergencias es la última línea de defensa, enfocada en limitar el daño y salvar vidas	• Desarrollar un Plan de Preparación y Respuesta a Emergencias para el depósito de relaves, enfocado en escenarios de falla catastrófica (p. ej. rotura del dique por lluvia extrema). Incluir mapas de inundación con el área potencialmente afectada río abajo, estimando tiempos de arribo de la ola y profundidades. • Establecer un sistema de alerta a la población: sirenas, mensajes u otros medios para advertir a comunidades aguas abajo en caso de emergencia inminente; coordinar la red de comunicaciones entre mina, autoridades locales y equipos de respuesta. • Definir procedimientos de evacuación y refugio: señalizar rutas de evacuación seguras, puntos de encuentro en zonas altas y simulacros con las comunidades locales. Asegurar que se conozcan las señales de alarma y las acciones a tomar. • Coordinar con autoridades: el plan debe ser elaborado en conjunto con autoridades de protección civil, bomberos, etc., y alinearse con planes de respuesta regionales. Proveer a las autoridades la información técnica necesaria (mapas de riesgo, población vulnerable) para facilitar la planificación de desastres. • Revisar el plan anualmente (más frecuente si cambia condiciones); realizar simulacros periódicos (mínimo cada 1-3 años para depósitos de alto riesgo) involucrando a todos los actores, y corregir las deficiencias identificadas en estos ejercicios.	• El estándar GISTM (2020) exige un *Plan de Preparación y Respuesta a Emergencias* para depósitos de relaves, basado en escenarios creíbles de falla. Este plan debe involucrar a expertos en respuesta de emergencias y *"medidas de preparación enfocadas en la comunidad"*, desarrolladas junto con la población potencialmente afectada. • Buenas prácticas recomiendan pruebas y simulacros: GISTM sugiere simulacros al menos cada 3 años en depósitos con posible pérdida de vidas, y la participación de autoridades locales en estos ejercicios. • Normativas nacionales: En Chile, por ejemplo, se exige por ley que cada depósito cuente con un plan de emergencia y que los operadores conozcan este plan a cabalidad. Empresas como Teck ya *"revisan y actualizan periódicamente"* sus planes de emergencia en conjunto con comunidades locales. • Post-evento: Además de la respuesta inmediata, GISTM enfatiza la preparación para recuperación a largo plazo tras una falla catastrófica (restauración ambiental, compensación a afectados, etc.), lo cual también debe planificarse anticipadamente.

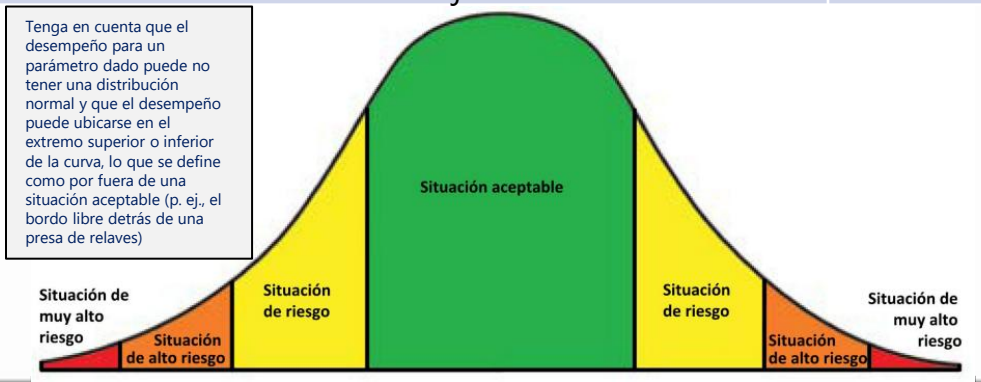

Figura 5. Ilustración del concepto de definición de niveles de riesgo para establecer un Plan de respuesta a acción o comportamiento crítico.

Los mapas de inundación, derivados del análisis de rotura de presa, deben ser proporcionados a las autoridades para la planificación efectiva de desastres

RelaveNet
A Community of Excellence

CONCLUSIONES

La gestión del riesgo climático en depósitos de relaves no depende de una sola medida, sino de un enfoque integral.

1) La **evaluación** del riesgo climático permite entender cómo eventos extremos pueden afectar la instalación en el presente y en el futuro.

2) El **diseño hidrológico** debe adaptarse a escenarios climáticos más severos, incorporando márgenes de seguridad considerando la incertidumbre.

3) La **gestión** operacional asegura que las decisiones diarias mantengan el depósito dentro de parámetros seguros.

4) El **monitoreo** continuo transforma datos en alertas tempranas, permitiendo reaccionar antes de que un evento crítico ocurra.

5) El **plan de respuesta a emergencias** existe para el peor escenario posible, con un solo objetivo: proteger vidas y minimizar daños.“En síntesis, un depósito de relaves resiliente es aquel que combina ingeniería sólida, gestión informada, monitoreo inteligente y preparación comunitaria. Ninguno de estos elementos funciona solo; la seguridad se construye en capas.”

RelaveNet
A Community of Excellence

Módulo 5 – Tema 2 –
Planificación y preparación para eventos climáticos extremos.

RelaveNet
A Community of Excellence

- **Ing. Danny Flores Cruz**