

Resiliencia Climática en Corredor Viario Xochi, Guatemala



Nuria Mesonero Picazo

[Coordinadora Sección Cambio Climático/ TYPESA

ST-3 Evaluación de riesgos climáticos. Análisis de la adaptación al cambio climático de las infraestructuras





1 - Introducción

2 – Análisis de Vulnerabilidad y Riesgos Climáticos

3 – Medidas de Adaptación. Coste-Beneficio

4 – Conclusiones



01

INTRODUCCIÓN





CORREDOR XOCHI, GUATEMALA

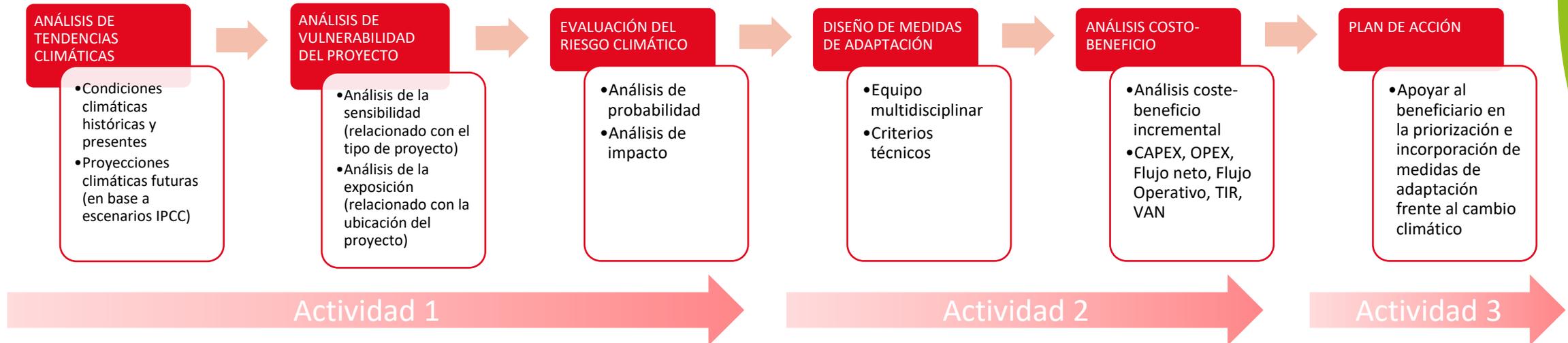
- Carretera de circunvalación de 30,5 km para descongestionar la CA-2.
- El trazado incluirá 24 puentes: 15 sobre ríos, 8 sobre rutas de la red vial y 1 puente sobre una línea férrea
- Atraviesa varios municipios del departamento de Suchitepéquez y de Retalhuleu





ALCANCE DE LOS TRABAJOS

- Cliente: BID Invest (2023). Beneficiario: Grupo IDC
- Plazo 6 meses de ejecución
- Equipo multidisciplinar CC (Madrid), Especialidades Técnicas (geotecnia, hidráulica, obras lineales (México)), Economista (Madrid)





02

ANÁLISIS DE TENDENCIAS CLIMÁTICAS





Tendencias climáticas

➤ Análisis de documentación existente a nivel nacional y específica del proyecto

➤ Recopilación de datos históricos (desde 1970).

➤ Modelizado de datos futuros (hasta 2100), visor de escenarios climáticos regionalizados

Centroamérica

- Temperatura
- Precipitaciones
- Fenómenos extremos

➤ Representación visual de datos

➤ Ubicación exacta del proyecto con las proyecciones climáticas

✓ Estudiar las tendencias climáticas históricas.

✓ Conocer el clima presente y futuro (basados en escenarios climáticos regionalizados IPCC)

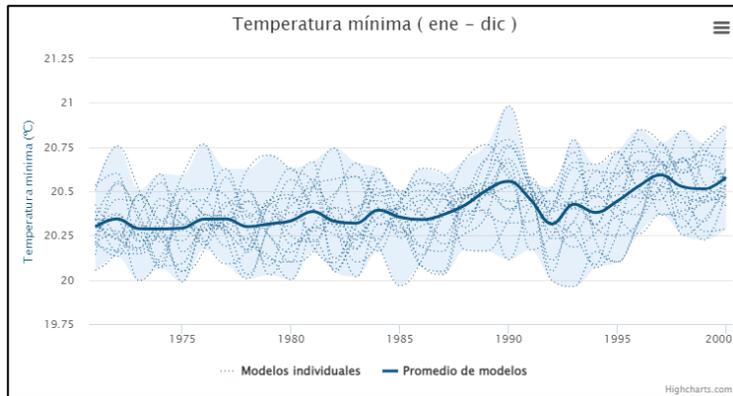
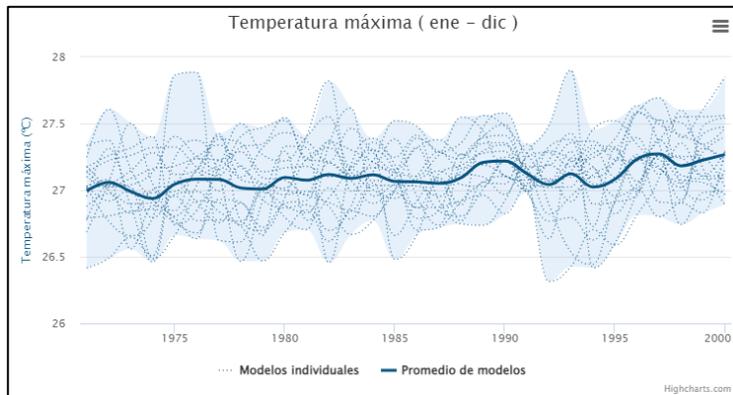


✓ Identificar las variables y peligros climáticos relevantes para el proyecto



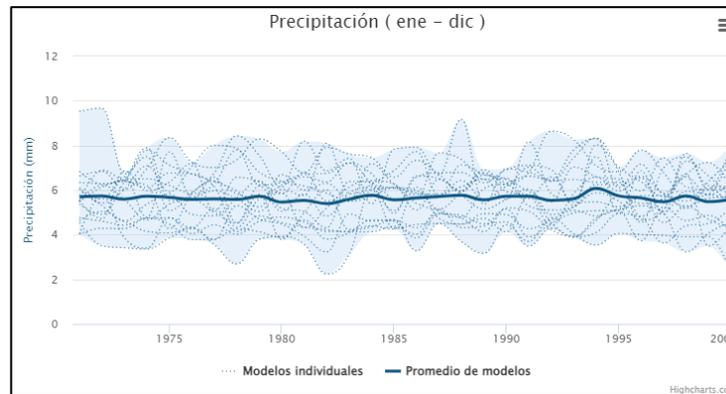
Tendencias climáticas históricas

TEMPERATURA



- Aumento de las T^a máximas y mínimas desde 1970
- Mayor aumento de las T^a mínimas (0,3°C, es decir, **1,5%** respecto a 1970), que de las máximas (0,3°C, es decir, **1,1%** respecto a 1970)

PRECIPITACIÓN

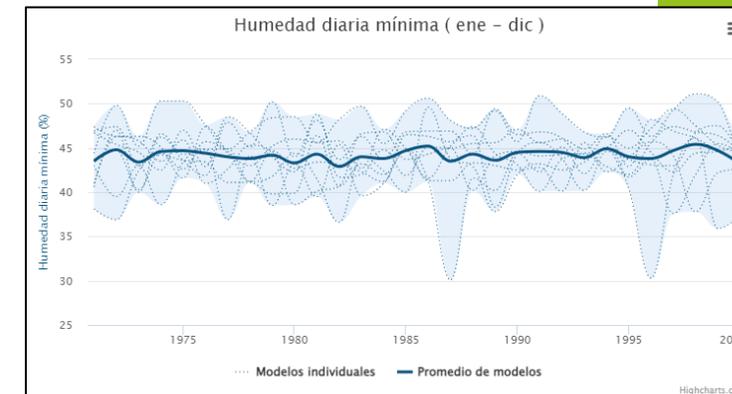
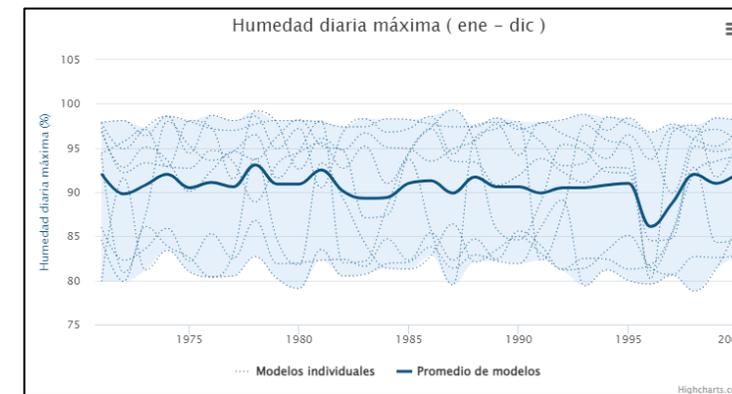


- Precipitaciones estables desde 1970
- Precipitación media Departamento Suchitepéquez entorno a 6 mm/día
- Departamento Retalhuleu: 5 mm/día
- Precipitación media cercana al Xochi 3000-4600 mm/año

(datos del proyecto)



HUMEDAD

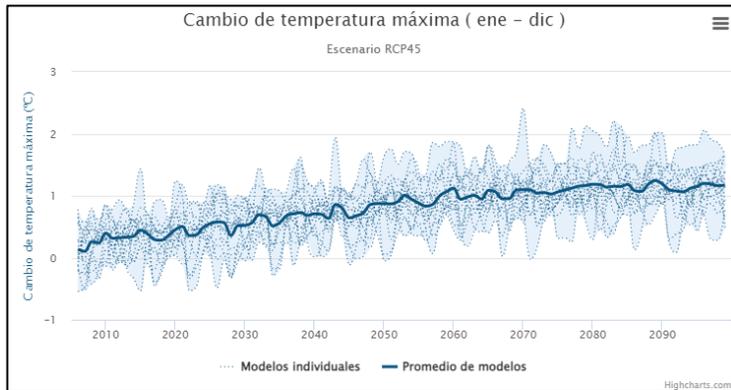


- No se puede apreciar una tendencia clara significativa



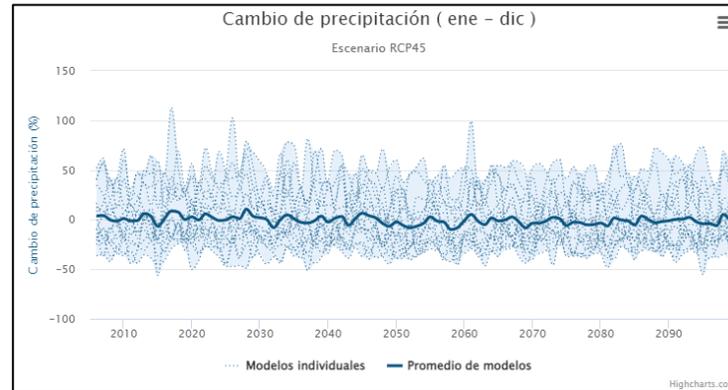
Proyecciones climáticas futuras. RCP 4.5

TEMPERATURA



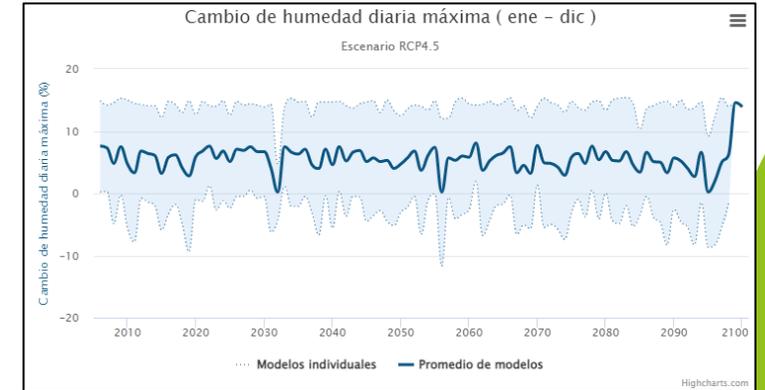
- Aumento de las T^a máximas desde el 2011 hasta el 2100 de **0,9°C**, es decir, de un 3,3%

PRECIPITACIÓN

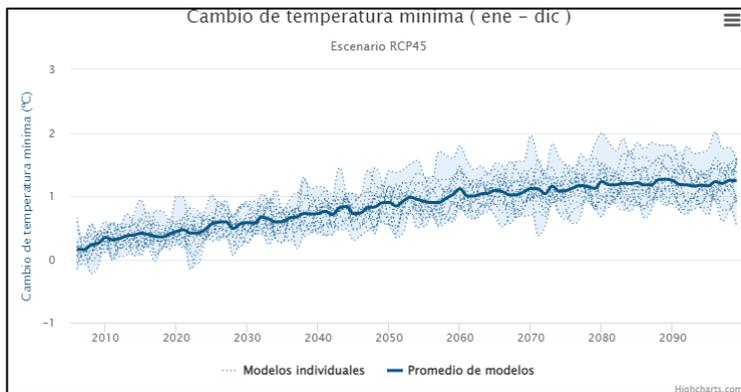


- No se ve variación significativa en relación a la cantidad de precipitaciones

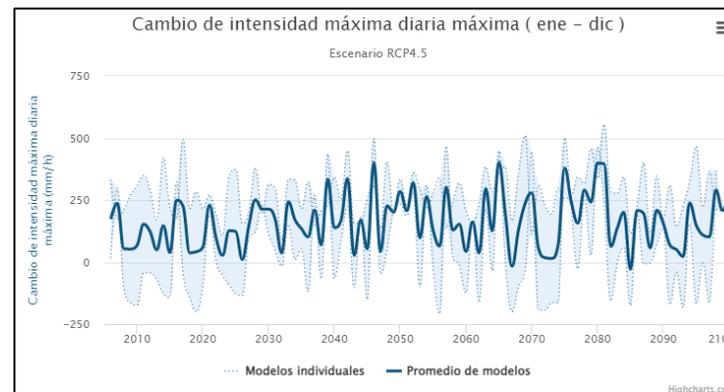
HUMEDAD



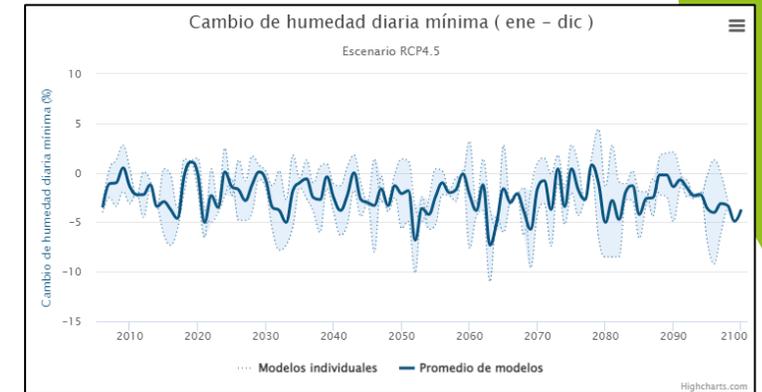
- No se puede sacar tendencia clara, aumento final ausencia de datos



- Aumento de las T^a mínimas desde el 2011 hasta el 2100 de **0,9°C**, es decir, de un 4,4%



- Se presenta gran oscilación aunque parece que existe ligera tendencia en aumento

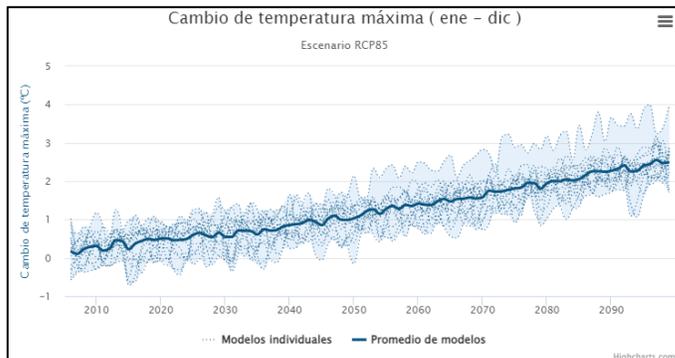


- No se puede ver la tendencia clara de la misma debido a la oscilación que presenta

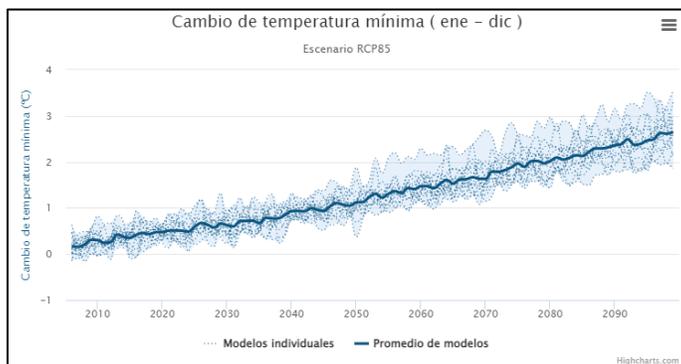


Proyecciones climáticas futuras. RCP 8.5

TEMPERATURA

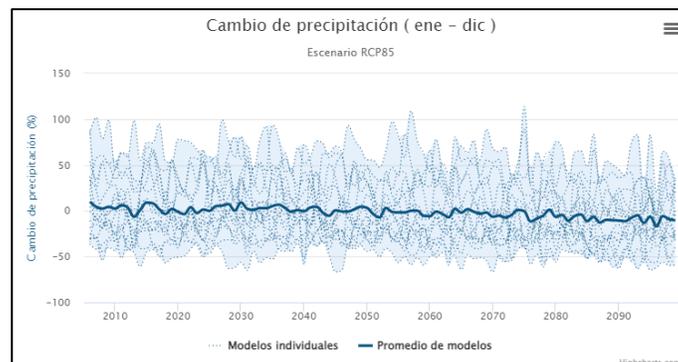


- Aumento de las T^a máximas desde el 2011 hasta el 2100 de **2,3°C**, es decir, un 8,4%

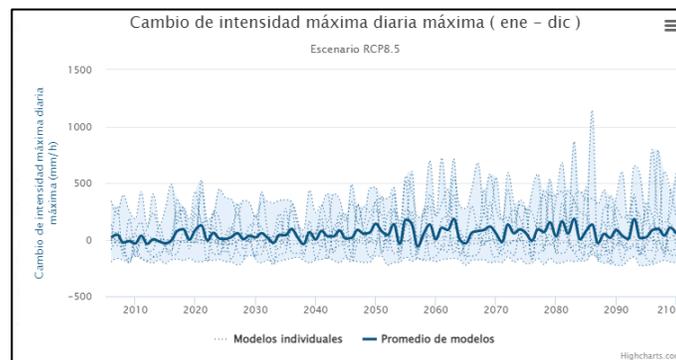


- Aumento de las T^a mínimas desde el 2011 hasta el 2100 de **2,4°C**, es decir, un 11,7%

PRECIPITACIÓN

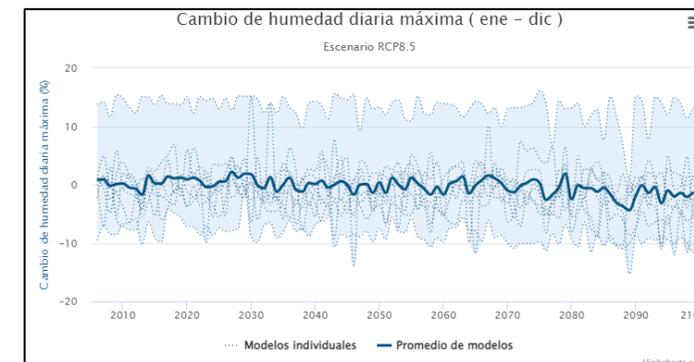


- No se ve variación significativa en relación a la cantidad media de precipitaciones

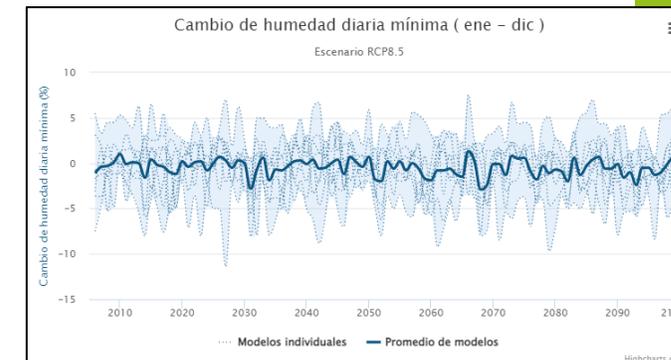


- Aumenta la intensidad de la precipitación

HUMEDAD



- No existe tendencia de aumento ni disminución



- Se mantiene una humedad diaria mínima similar



ANÁLISIS DE VARIABLES DEL VISOR DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO DE CENTROAMÉRICA

Temperaturas máximas

Todos los escenarios analizados muestran una tendencia creciente

Temperaturas mínimas

Todos los escenarios analizados muestran una tendencia creciente

Olas de calor

Todos los escenarios analizados muestran una tendencia creciente

Precipitaciones anuales

Todos los escenarios muestran un mantenimiento de la situación actual, sin tendencias incrementales

Precipitaciones máximas en 24 h

Todos los escenarios muestran un mantenimiento de la situación actual, sin tendencias incrementales

Percentil 90 de la precipitación máxima diaria

Se analizan los valores originales y se ve que todos los escenarios se encuentran en un valor por debajo de 20 mm

Viento

Variaciones de 1 km/h aproximadamente en las tendencias de las proyecciones

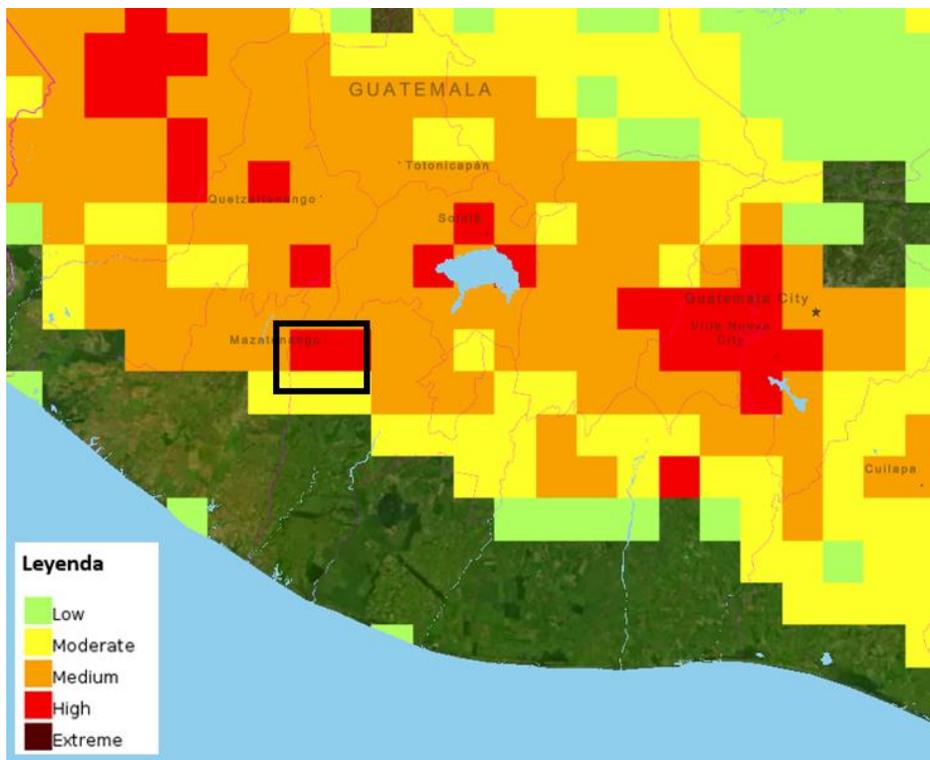
Humedad

Mantenimiento de la situación actual, sin tendencia incremental

Escorrentía

Tendencia creciente según las proyecciones analizadas

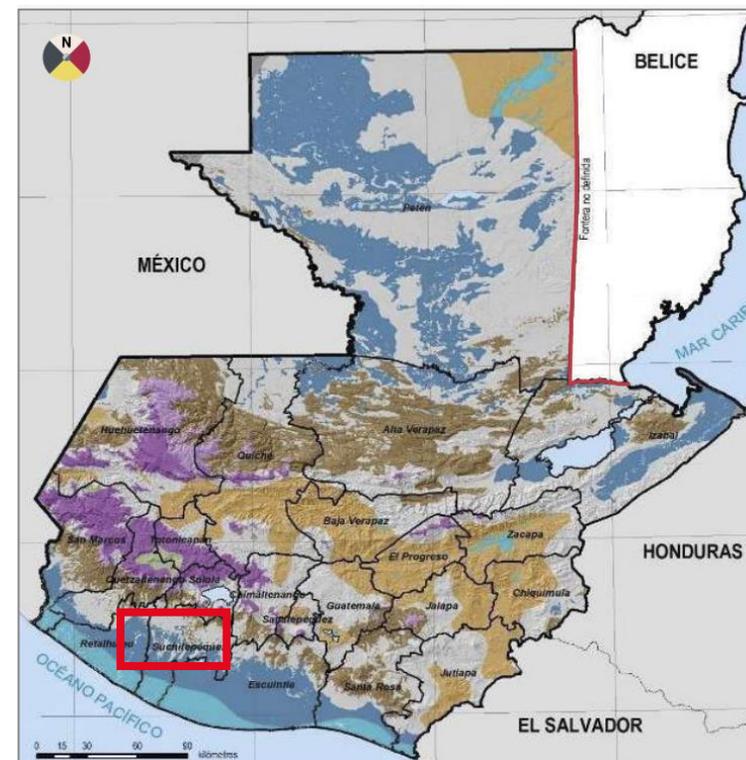
	AÑO	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Olas de Calor (días)	Precipit (%)	Precipit. 24h (%)	P 90 precipit.* (mm)	Hum. (%)	Viento (km/h)	Escorrentía* (mm)
RCP 4.5	2010	0,39	0,34	7,27	1,54	11,90	17,29	3,00	-16,10	36,40
	2020	0,44	0,43	7,44	2,86	-2,53	17,65	4,00	-1,10	9,30
	2030	0,51	0,56	9,59	2,30	4,74	17,43	5,00	-4,80	18,10
	2040	0,69	0,70	14,66	-3,02	-3,36	16,94	3,30	-5,60	19,80
	2050	0,85	0,88	23,52	-2,39	9,95	16,66	3,10	13,50	9,70
	2060	1,09	1,08	33,09	-2,02	14,29	16,94	4,10	-10,00	11,50
	2070	1,06	1,08	30,69	-3,49	0,85	16,84	6,00	-1,40	36,40
	2080	1,15	1,20	35,34	-3,87	4,51	16,62	5,10	-8,40	28,60
	2090	1,15	1,21	35,21	-1,64	9,38	16,97	4,70	-12,30	8,90
	2100	1,14	1,21	33,75	-1,09	7,99	17,02	11,30	9,70	27,60
RCP 6.0	2010	0,32	0,30	4,76	-0,07	4,15	16,29	-	-	-
	2020	0,32	0,36	3,60	-3,00	-5,58	16,41	-	-	-
	2030	0,40	0,43	7,66	6,10	22,67	17,51	-	-	-
	2040	0,47	0,56	10,59	4,99	-0,93	17,31	-	-	-
	2050	0,77	0,76	23,78	5,23	16,33	16,87	-	-	-
	2060	0,87	0,88	22,47	0,21	-7,21	16,25	-	-	-
	2070	0,98	1,04	28,68	-4,85	-7,19	16,21	-	-	-
	2080	1,26	1,27	46,09	-5,77	-13,20	16,02	-	-	-
	2090	1,39	1,52	44,37	-1,71	-6,23	16,03	-	-	-
	2100	1,31	1,41	41,12	4,72	0,96	16,95	-	-	-
RCP 8.5	2010	0,30	0,29	6,11	3,27	28,38	16,87	-0,40	3,40	27,30
	2020	0,49	0,47	8,69	-1,56	15,65	16,46	0,80	1,60	18,30
	2030	0,53	0,60	11,60	9,16	7,74	18,26	1,60	-0,30	14,40
	2040	0,83	0,91	19,26	-0,48	2,74	16,42	0,10	0,40	6,30
	2050	1,00	1,09	25,18	3,52	-3,74	16,97	0,60	7,00	20,00
	2060	1,38	1,44	45,76	-4,70	-5,89	16,21	-1,30	-7,50	9,50
	2070	1,54	1,59	51,16	-6,72	-0,53	15,60	-0,70	-1,10	16,80
	2080	1,89	1,96	73,92	-7,46	-4,83	15,79	-2,00	3,30	3,80
	2090	2,20	2,30	91,60	-10,95	-3,43	15,07	-1,30	2,90	5,80
	2100	2,42	2,58	107,50	-10,20	4,43	15,31	-1,20	1,00	10,60



Índice del riesgo global estimado para la amenaza de deslizamiento de tierras provocado por las precipitaciones en la zona de estudio. Fuente GAR.

INUNDACIONES

Mapa de amenazas inducidas por eventos ligados al cambio climático



Fuente: Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático Guatemala, 2021. Adaptado de Pérez y Gálvez (2020) y de INE (2003)

Nota: en el mapa se identifican los territorios bajo amenazas de:

D = deslizamientos	DS	H	N	SI
H = heladas	DHS	HI	S	
I = inundaciones	DI	DIS	I	HS
S = sequías				

La combinación de dos o tres letras representa la presencia de dos o tres amenazas (por ejemplo, DSH = deslizamientos, sequías y heladas).



03

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD Y RIESGOS CLIMÁTICOS





ORIENTACIONES TÉCNICAS SOBRE LA DEFENSA CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO DE LAS INFRAESTRUCTURAS PARA EL PERÍODO 2021-2027 DE LA COMISIÓN EUROPEA

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD

Sensibilidad x Exposición = Vulnerabilidad

El objetivo del **análisis de sensibilidad** es determinar qué peligros climáticos son relevantes para el tipo específico de proyecto, independientemente de su ubicación

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD					
Cuadro de sensibilidad indicativo: (ejemplo)		Variables y peligros climáticos			
		Inundación	Calor	...	Sequía
Temas	Activos sobre el terreno...	Alto	Bajo	...	Bajo
	Insumos (agua...)	Medio	Medio	...	Bajo
	Resultados (productos...)	Alto	Bajo	...	Bajo
	Enlaces de transporte	Medio	Bajo	...	Bajo
Puntuación más alta en cuatro temas		Alto	Medio	...	Bajo

El resultado del análisis de sensibilidad puede resumirse en un cuadro con la clasificación de la sensibilidad de las variables y los peligros climáticos pertinentes para un tipo de proyecto determinado, independientemente de la ubicación, incluidos los parámetros críticos, y divididos, por ejemplo, en los cuatro temas.

ANÁLISIS DE EXPOSICIÓN					
Cuadro de exposición indicativo: (ejemplo)		Variables y peligros climáticos			
		Inundación	Calor	...	Sequía
Clima actual		Medio	Bajo	...	Bajo
Clima futuro		Alto	Medio	...	Bajo
Puntuación más alta, actual+futuro		Alto	Medio	...	Bajo

El resultado del análisis de exposición puede resumirse en un cuadro con la clasificación de la exposición de las variables y los peligros climáticos pertinentes para la ubicación seleccionada, independientemente del tipo de proyecto y divididos, por ejemplo, en clima actual y futuro. Tanto para el análisis de sensibilidad como para el de exposición, el sistema de puntuación debe definirse y explicarse de forma cuidadosa y las puntuaciones otorgadas deben justificarse.

El objetivo del **análisis de exposición** es determinar qué peligros son pertinentes para la ubicación prevista del proyecto, independientemente del tipo de proyecto

El **análisis de vulnerabilidad** combina el resultado del análisis de sensibilidad y el análisis de exposición

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD					
Cuadro de vulnerabilidad indicativa: (ejemplo)		Exposición (clima actual + futuro)			Leyenda:
		Alto	Medio	Bajo	Nivel de vulnerabilidad
Sensibilidad (puntuación más alta en los cuatro temas)	Alto	Inundación	Calor	Sequía	Alto
	Medio				Medio
	Bajo				Bajo

El análisis de vulnerabilidad puede resumirse en un cuadro para el tipo de proyecto específico en la ubicación seleccionada. Combina el análisis de sensibilidad y el de exposición. Las variables y los peligros climáticos más pertinentes son los que tienen un nivel de vulnerabilidad alto o medio, que llevan a los pasos siguientes. Los niveles de vulnerabilidad deben definirse y explicarse cuidadosamente y las puntuaciones dadas deben justificarse.

Tiene como objetivo determinar los posibles peligros significativos y los riesgos conexos.



ANÁLISIS DE RIESGOS CLIMÁTICOS

Probabilidad x Impacto = Riesgo

Probabilidad de que los peligros climáticos detectados se materialicen en un plazo determinado

ANÁLISIS DE PROBABILIDAD		
Escala indicativa para evaluar la probabilidad de un peligro climático (ejemplo):		
Término	Cualitativo	Cuantitativo (*)
Raro	Muy poco probable que ocurra	5 %
Improbable	Poco probable que ocurra	20 %
Moderado	Misma probabilidad de ocurrir que de no ocurrir	50 %
Probable	Es probable que ocurra	80 %
Casi seguro	Es muy probable que ocurra	95 %

El resultado del análisis de probabilidad puede resumirse en una estimación cualitativa o cuantitativa de la probabilidad de cada una de las variables y los peligros climáticos esenciales. (*) La definición de las escalas requiere un análisis cuidadoso por varias razones, entre ellas, que la probabilidad y el impacto de los peligros climáticos esenciales podrían cambiar significativamente durante la vida útil del proyecto de infraestructura, entre otras razones, debido al cambio climático. En los estudios existentes se hace referencia a varias escalas.

ANÁLISIS DE IMPACTO					
Escala indicativa para evaluar el impacto probable de un peligro climático (ejemplo):					
	Insignificante	Leve	Moderado	Grave	Catastrófico
<i>Áreas de riesgo:</i>					
Daños a los activos, ingeniería, operativos					
Seguridad y salud					
Medio ambiente, patrimonio cultural					
Social					
Financiera					
Reputación					
Cualquier otra área de riesgo pertinente					
Global, para las áreas de riesgo mencionadas anteriormente					

El análisis de impacto proporciona una evaluación especializada del impacto potencial para cada una de las variables y los peligros climáticos esenciales.

Consecuencias derivadas del peligro climático en caso de que este se produzca

Representa el nivel de importancia de cada riesgo potencial

EVALUACIÓN DE RIESGOS							
Cuadro de riesgos indicativo: (ejemplo)		Impacto general de las variables y los peligros climáticos esenciales (ejemplo)				Leyenda:	
		Insignificante	Leve	Moderado	Grave	Catastrófico	Nivel de riesgo
Probabilidad	Raro						Bajo
	Improbable		Sequía				Medio
	Moderado		Calor	Inundación			Alto
	Probable						Extremo
	Casi seguro						

El resultado del análisis de riesgos puede resumirse en un cuadro que combine la probabilidad y el impacto de las variables y los peligros climáticos esenciales. Se requieren explicaciones detalladas para calificar y fundamentar las conclusiones de la evaluación. Los niveles de riesgo se deben explicar y justificar.



Vulnerabilidad del proyecto a las variables y peligros climáticos

RESULTADOS

Variables y peligros climáticos	Cuadro de exposición	Sensibilidad	Exposición	Vulnerabilidad
	Temperatura	4	4	16
	Olas de calor	4	4	16
	Precipitaciones	3	2	6
	Escorrentía	5	5	25
	Inundaciones	5	5	25
	Inestabilidad del suelo / deslizamientos de tierra / avalancha	5	5	25
	Viento ciclónico	5	4	25
	Humedad	4	4	16
	Incendios	4	4	16

Nivel de riesgo de los peligros climáticos

Variable y peligro climático	Probabilidad	Impacto	Resultado	Clasificación
Temperaturas y olas de calor	5	3	15	Extremo
Escorrentía	5	3	15	Extremo
Inundaciones	4	4	16	Extremo
Inestabilidad del suelo / deslizamientos de tierra / avalancha	5	4	20	Extremo
Viento ciclónico	4	4	16	Extremo
Humedad	5	2	10	Alto
Incendios	4	4	16	Extremo



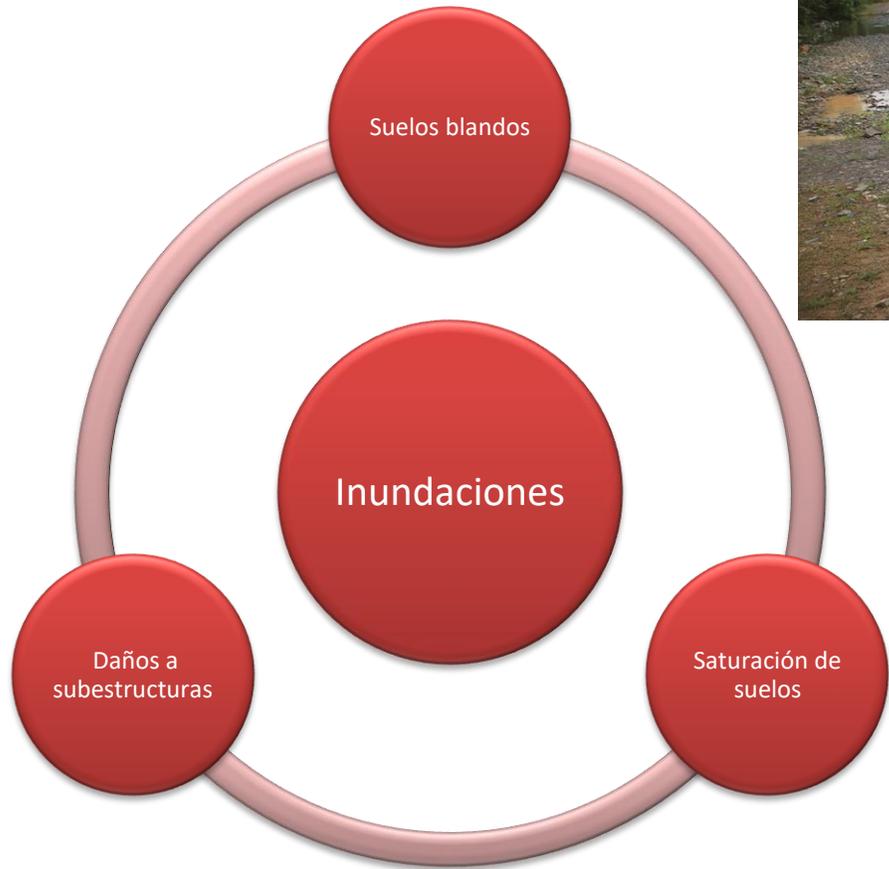
04

MEDIDAS DE ADAPTACIÓN. ANÁLISIS COSTE BENEFICIO



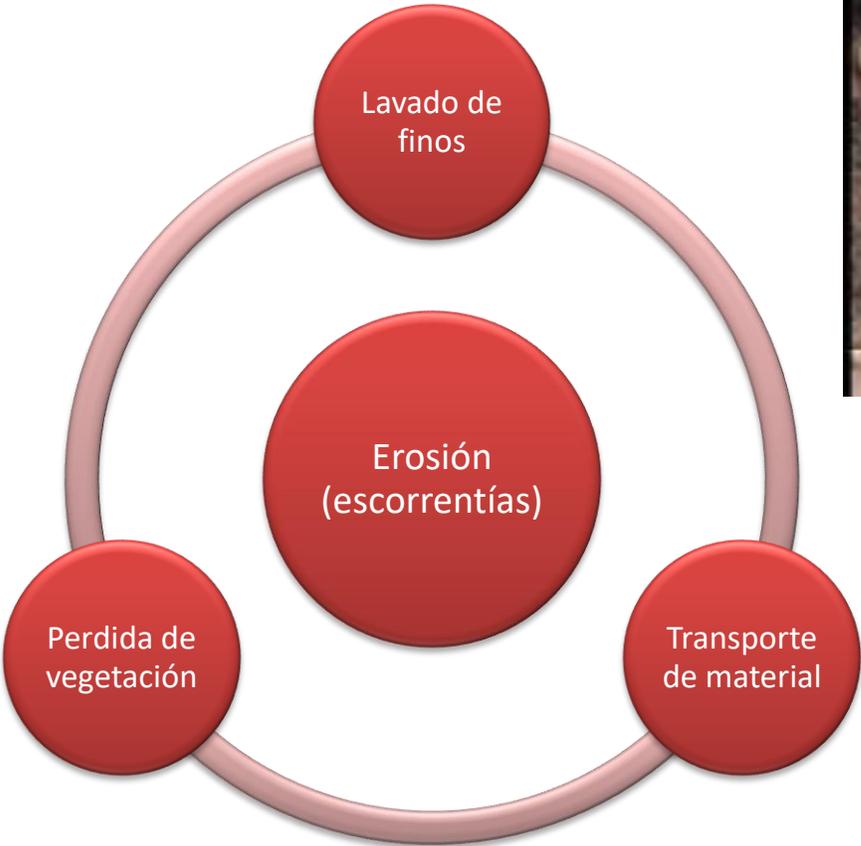


CONSECUENCIAS





CONSECUENCIAS





CONSECUENCIAS





Medidas propuestas (con alternativa SBN)

Medida de adaptación	Descripción	Opción convencional (gris)	Solución Basada en la Naturaleza (SBN)
Diques guía	Estructuras para conducir las aguas al acceso de un puente y disminuir en esta forma la socavación por la contracción junto a los estribos del puente	Diques hechos de concreto	Diques conformados por plantas.
Revestimiento de talud	Estructuras de refuerzo de la superficie o talud del río, construidas con el objeto de aislar el suelo de la corriente para evitar el desprendimiento.	Revestimiento de concreto	Revestimiento con rocas y capas de vegetación
Revestimiento del río			
Protección de taludes de vialidades con mampostería o geosintéticos	Obras para cubrir los taludes de la vialidad ante un escurrimiento.	Mampostería, geosintético.	Colocar vegetación en todo el talud
Cunetas vegetadas	Son estructuras lineales cubiertas de hierba, con una base superior a medio metro y taludes con poca pendiente. Están diseñadas para capturar y tratar el volumen de calidad de agua para que no aparezcan problemas de erosiones.	Cunetas de concreto, asbesto-cemento.	Cunetas vegetadas
Disipadores de velocidad de las obras de drenaje	Estructuras encargadas de reducir la gran energía cinética mencionada y de esa forma evitar las citadas grandes erosiones	Cubiertas de concreto	Cubiertas hechas con rocas del sitio y colocando vegetación

Medidas propuestas con alternativa de Solucion Basada en la Naturaleza Sbn (ordenados de manera prioritaria).



MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

Problemática	Propuesta de medida	Solución Basada en la Naturaleza (SBN)	Solución Convencional (Gris)
Zonas inundables o con riesgo de saturación de terraplenes y muros mecánicamente estabilizados (MME)	Sustitución de Terraplenes a la cota del TR por material permeable	Geo-costales rellenos de grava y geosintético que tenga la función de capa rompedora	<ul style="list-style-type: none"> Implementación de Pedraplén. Capa rompedora de capilaridad.
	Base permeable al desplante de Muros mecánicamente estabilizados.	<ul style="list-style-type: none"> Idem 	<ul style="list-style-type: none"> Muros Mecánicos con cara de gavión Muro escollera
	Prevención de desbordamiento	<ul style="list-style-type: none"> Uso de Geocostales rellenos de material granular (arena) Sistema Scourlok 	<ul style="list-style-type: none"> Gaviones en conjunto con geosintéticos.





MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

Problemática	Solución Basada en la Naturaleza (SBN)	Solución Convencional (Gris)
Socavación y/o erosión en puentes.	<ul style="list-style-type: none">• Geocostales rellenos de arenas (limitación en altura)	<ul style="list-style-type: none">• Colchonetas de gavión.• Barreras de protección con llantas recicladas.• Enrocado y aplicación de geosintéticos.





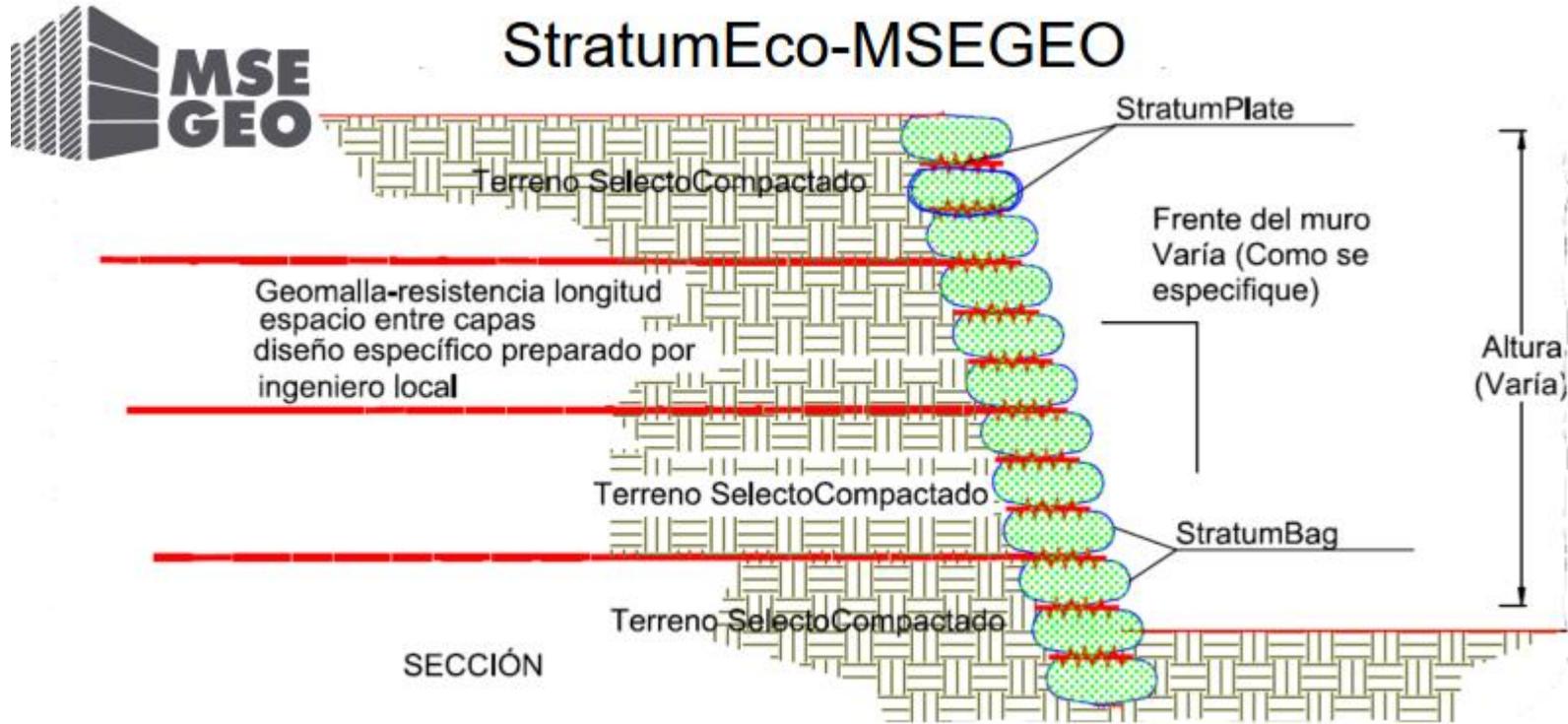
MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

Problemática	Solución Basada en la Naturaleza (SBN)	Solución Convencional (Gris)
Erosión de taludes en zonas de cimentación.	<ul style="list-style-type: none">• Colocar como protección sacos rellenos con arena.• Barreras de protección elaboradas con tronco (sin limitación en altura)• Sistema StratumEco.• Implementación de Malla anti-erosión de alta resistencia	<ul style="list-style-type: none">• Colchonetas de gavión





MEDIDAS DE ADAPTACIÓN



El Sistema Stratum-Eco es un método diseñado para mitigar la socavación en las laderas del cauce y evita el lavado de fino, dando estabilidad a los materiales que rodean las estructuras.



ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO

- Este análisis sirve para justificar un mayor coste inicial para implementar las medidas, considerando el ahorro en el futuro al implementarlas y para conseguir financiación.
- Aunque se llama Análisis Costo-beneficio, que habitualmente está relacionado con estudio CBA o estudio socioeconómico, lo que se hizo fue un estudio financiero de costes incrementales desde un punto de vista privado.
- Estudio incremental: consideramos un escenario base sin aplicar la medida y otro con medida, estudiando la diferencia entre ambos.
- Desde un punto de vista financiero: no se consideraron externalidades o efectos no contables.

Metodología

- Identificar las medidas
 - Aportadas por los miembros especialistas del equipo
- Definir los escenarios:
 - Escenario 0/sin proyecto – para comparación – escenario donde se aplica una solución estándar sin medida de adaptación
 - Escenario 1/con proyecto 1 – aplicación de la medida de adaptación 1
 - *Escenario 2/con proyecto 2 – aplicación de la medida de adaptación 2 (si hay más de 1 medida)*
- Establecer el CAPEX y OPEX para cada escenario
 - *Valoración a coste de mercado de las medidas*
 - *IMPORTANTE: valoración del escenario 0. Posibilidad de utilizar el presupuesto real para mejor estimación.*
- Estimación de:
 - *Perdidas extraordinarias (para el caso de desastres o eventos no previstos)*
 - *Costes en los que impacta (por ejemplo, precio de la electricidad, consumo combustibles, etc...)*



ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO

Metodología (continuación)

- Análisis de los flujos de caja incrementales descontados mediante una tasa de descuento previamente asignada.
- Los resultados a proporcionar para cada medida de adaptación fueron: CAPEX, OPEX, flujo neto, flujo operativo, TIR y VAN.
- Medidas destinadas a reducir la probabilidad de daños severos o su impacto económico:

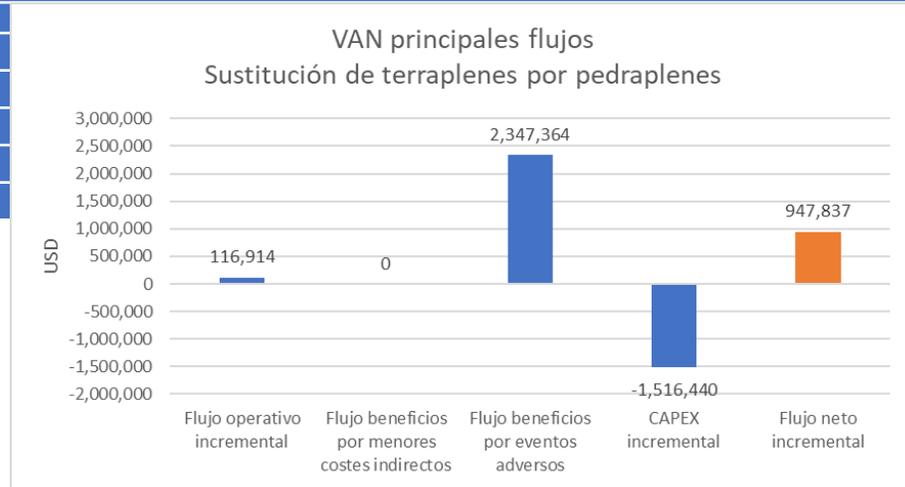
PROBABILIDAD x IMPACTO (económico) = COSTE ESTIMADO

- Algunas medidas pueden reducir la probabilidad (número de veces que ocurre el evento durante el periodo considerado)
- También puede reducir el impacto siendo menor

Ejemplo: lluvia torrencial que no cambia su probabilidad, pero sí el impacto si se incluyen medidas adecuadas

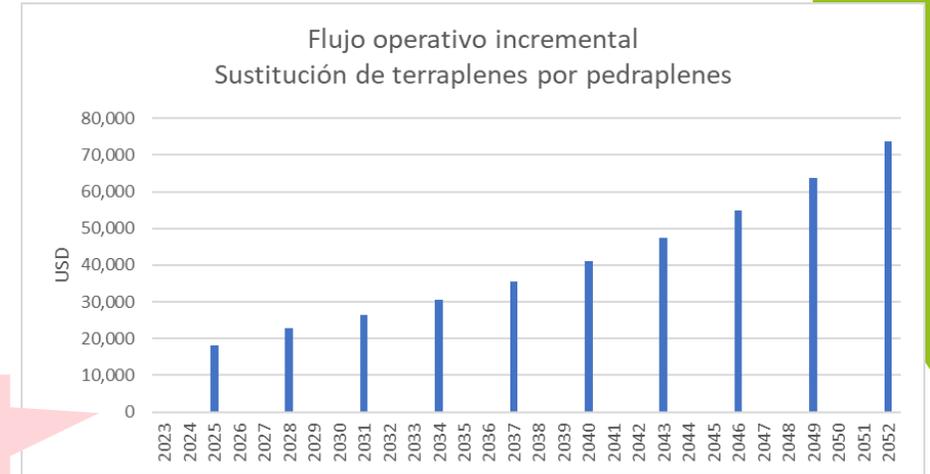
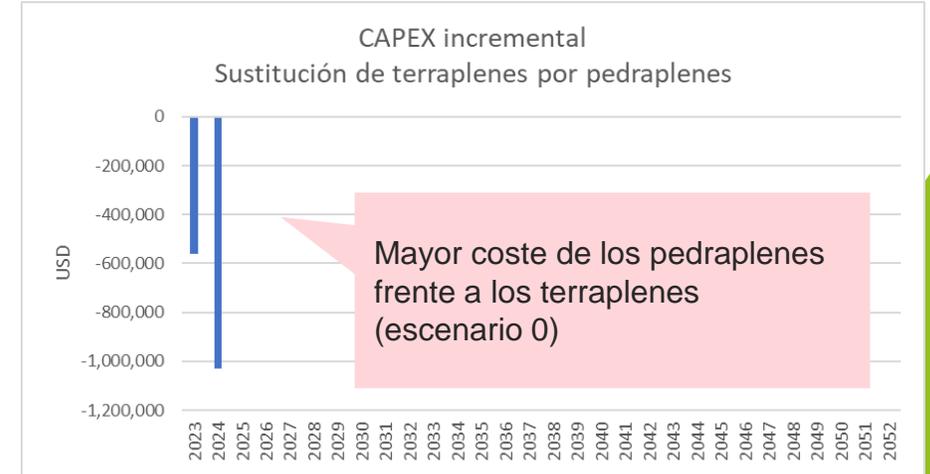


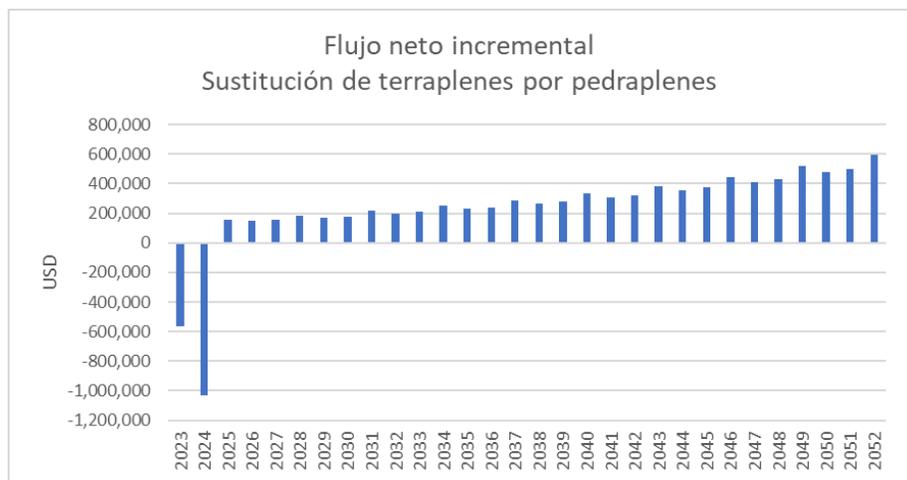
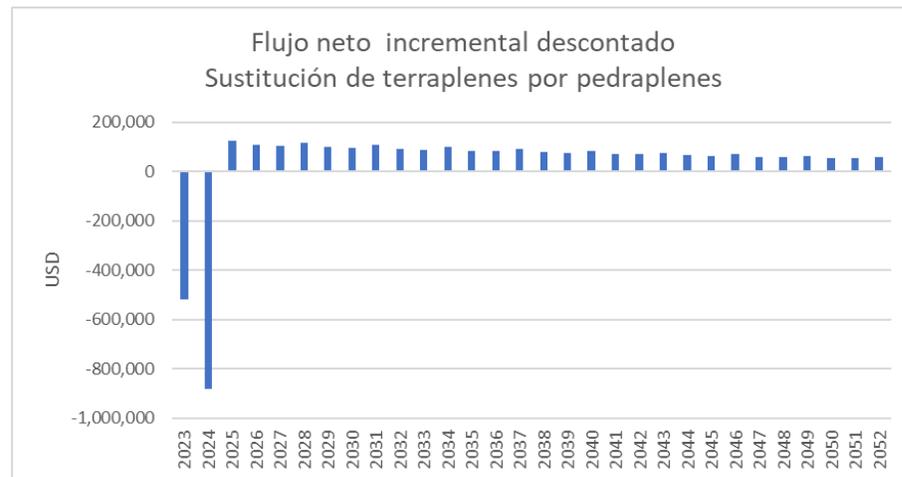
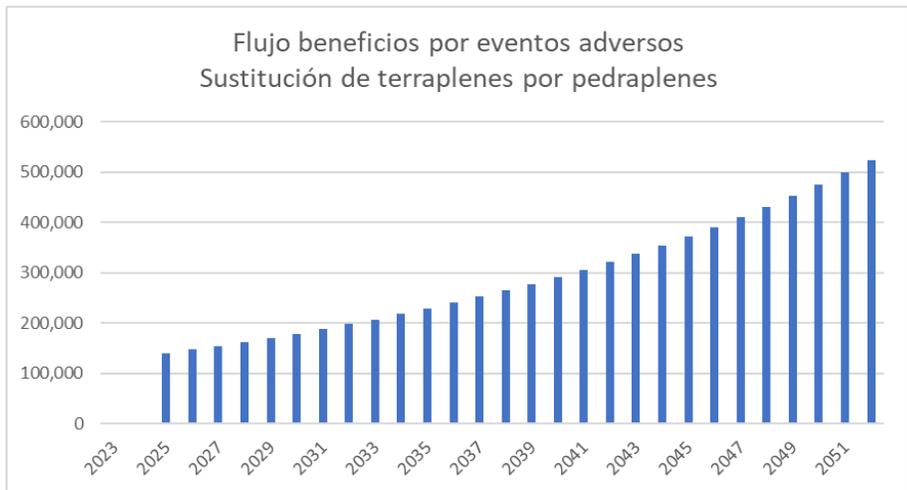
Medida:	Sustitución de terraplenes por pedraplenes		
Descripción:	Instalación de piedras.		
Mejora esperada:	Menor erosión, protección de los taludes, deformación de los accesos a los puentes...		
Opción escenario 0:	Terraplenes diseñados		
Resultados			
VAN [USD]	Escenario 0	Escenario con medida	Diferencia
CAPEX	-2,837,362	-4,353,803	-1,516,440
OPEX	-116,914	0	116,914
Ahorro por menores costes		0	0
OPEX probable por eventos adversos	-2,484,524	-137,161	2,347,364
	VAN	947,837	
	TIR	12.60%	



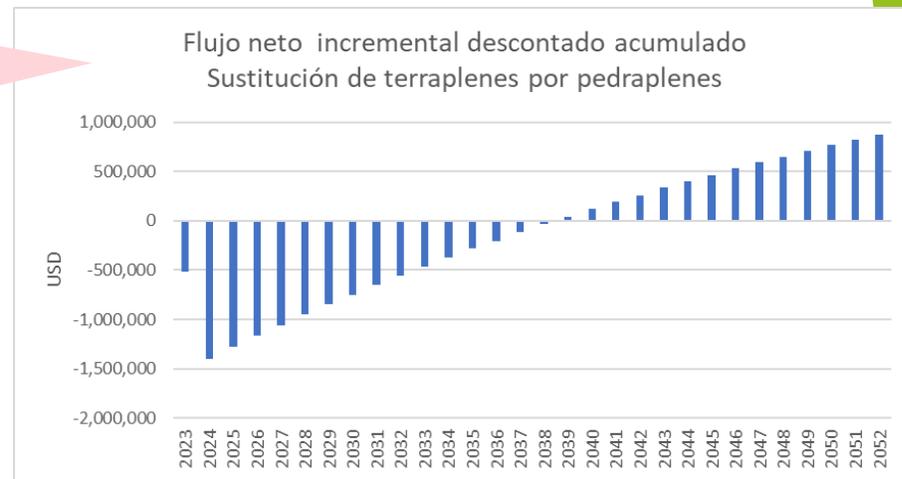
En caso de evento extraordinario, los costes de reposición con un terraplen son mucho mayores

Los pedraplenes requieren menos mantenimiento: beneficio por ahorro de costes





Con el tiempo la mayor inversión inicial en pedraplenes termina resultando positiva en términos contables





05

CONCLUSIONES





- Evaluación de riesgos climáticos basada en escenarios IPCC. Climate proofing. Herramienta temprana de adaptación al cambio climático.
- Cambio en criterios de diseño para conseguir esa adaptación al introducir las tendencias climáticas futuras (TR100 a TR500). Medidas de adaptación con incorporación de SBN.
- Con la información tanto técnica como económica el promotor vio los beneficios que tenía la implementación de las medidas de adaptación no solo en la reducción del riesgo climático sino también en el ahorro de costes.
- Involucramiento del banco multilateral en conseguir la adaptación al destinar la cantidad de CAPEX incremental en las medidas de adaptación con un blended finance aportando una tasa concesional mucho más ventajosa que cualquier banca comercial.
- Se produjo una implementación total de las medidas de adaptación.
- Ejemplo de adaptación climática desarrollado por un promotor privado pero incentivada por un banco multilateral.

¡Muchas Gracias! 