

ANÁLISIS DE RIESGO CLIMÁTICO PARA EL SECTOR HIDROCARBUROS, MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MODELO DE IMPACTOS BIOFÍSICOS Y ESCENARIOS PLAUSIBLES

Borbor-Cordova Mercy, Moreno Maria E, Caiza-Quinga Rommel, Iñiguez Jose, Muñoz Luis, Salazar Maria E, Valdiviezo-Ajila Angel.

¹Ecuambiente Consulting Group Cia. Ltda

Noviembre, 2022

Resumen

El sector de hidrocarburos es un sector estratégico que representa el principal producto del PIB del Ecuador, siendo también la principal fuente de energía térmica de muchas actividades productivas del país. El análisis de impacto climático desarrollado en este estudio establece que el 47.5% de los 497.7 km del Sistema de Oleoducto Transecuatoriano, está expuesto a amenazas climáticas como precipitaciones que, en el contexto del cambio climático, aumentará en intensidad y frecuencia. Este estudio tiene como objetivo cuantificar y calificar los riesgos climáticos en el sector de Hidrocarburos a través del uso de modelos hidrológico e hidráulico que permitan estimar los caudales máximos, escorrentías, zonas de inundación y susceptibilidad ante deslizamientos para diferentes periodos de retorno. Aplicando los modelos HEC-HMS, HEC RAS y Heurístico de Combinación de Mapas de Factores Ponderados se analizó el 47% del SOTE, determinándose los sitios críticos a las amenazas climáticas, sus tendencias históricas y el potencial impacto para los 5 años típicos de cambio climático definidos por la autoridad ambiental (2020-2050). Se encontró que la zona de la costa está más expuesta a impactos de inundación, mientras que los deslizamientos están preferentemente en la zona interandina y cordillera oriental y occidental por donde atraviesa el SOTE. Se concluye que además de las precipitaciones de alta intensidad, también son importantes las lluvias de baja intensidad, pero acumuladas en aquellas zonas con condiciones de suelo desfavorable, ya que pueden provocar suelos saturados y deslizamientos que impactan a la infraestructura crítica del SOTE. Se recomienda pasar de un enfoque de respuesta al de prevención y reducción de riesgo climático a través de un mayor conocimiento de la amenaza, exposición y la aplicación de modelos de impactos biofísicos que generan importante información para la toma de decisiones.

Abstract

The oil sector is a strategic sector that represents the main product of Ecuador's GDP, being also the main source of thermal energy for many productive activities in the country. And the climate impact analysis developed in this study establishes that 47.5% of the 497.7 km of the Trans-Ecuadorian Pipeline System is exposed to climatic threats such as rainfall that, in the context of climate change, will increase in intensity and frequency. The objective of this study is to quantify and qualify the climatic risks in the Hydrocarbons sector through the use of hydrological and hydraulic models that allow estimating maximum flows, runoff and flood zones for different return periods. Applying the HEC-HMS and HEC RAS models, 47% of the SOTE was analyzed, determining the critical sites for climate threats, their historical trends, and the potential impact in 5 typical scenarios. It was found that the coastal area is more exposed to flood impacts, while landslides are preferentially in the inter-Andean zone and the eastern and western mountain range that surrounds SOTE. The biophysical impacts were also determined for 5 typical Year scenarios for the period (2020-2050). It is concluded that in addition to high-intensity rainfall, low-intensity rains are also important, but accumulated in those areas with unfavorable soil conditions, they can cause saturated soils and landslides that impact SOTE's critical infrastructure. It is recommended to move from a response approach to climate risk prevention and reduction through greater knowledge of the threat, exposure, and the application of biophysical impact models that generate important information for decision-making.

Palabras Clave: Impacto biofísico, hidrocarburos, cambio climático, inundación, deslizamiento, HEC HMS, HEC RAS, Heuristic Model System

1. Introducción

El sector hidrocarburífero es un sector estratégico que representa el principal producto del PIB del Ecuador, siendo también la principal fuente de energía térmica de muchas actividades productivas del país. Estudios como el del proyecto [EU-CIRCLE \(2018\)](#) concluye que el cambio climático afectará con un deterioro acelerado y degradación de los procesos de la infraestructura crítica como la del sector hidrocarburos ([Katopodis et al., 2021](#)). El impacto del cambio climático puede afectar desde la extracción, operaciones en la fase inicial, almacenamiento, y en los procesos de distribución y refinación, reduciendo

el ciclo de vida de la infraestructura de hidrocarburos y el nivel de servicio de sus operaciones ([Katopodis & Sfetos, 2019](#)). Las temperaturas extremas, vientos, sequías, inundaciones rápidas se esperan aumenten globalmente en intensidad y frecuencia, debido al cambio climático, ([Forzieri et al. 2018, IPCC, 2021](#)) generando potenciales impactos en la infraestructura crítica como roturas de oleoductos, derrames de petróleo, incendios, explosiones. Considerando las operaciones del sector es importante considerar las interacciones con otros sectores como el de vías y el de energía, ya que estos son críticos para la logística y el control automatizado de las operaciones del SOTE que requieren energía permanentemente. Siendo

necesario asegurar la resiliencia de la infraestructura del sector de hidrocarburos, la inversión en la industria del petróleo, además de proteger al ambiente y a la seguridad de las personas ([Petroecuador, 2014](#)). La [Figura 1.](#), muestra un diagrama del Sistema de Oleoducto Ecuatoriano (SOTE) desde la zona de extracción en la Amazonía, atravesando la cordillera de los Andes para llegar a la zona de la refinería en Esmeraldas, indicando la infraestructura crítica potencialmente expuesta a eventos climáticos. Ecuador, a través del Ministerio de Agua y Ambiente y Transición Ecológica (MAATE) se reconoce la urgencia de preparar a este sector estratégico ante la amenaza del cambio climático, y como parte del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PLANACC) se ha desarrollado el análisis de los riesgos climáticos para el sector de Hidrocarburos (HC) presentado en este reporte.

El enfoque aplicado para el análisis de los riesgos climáticos denominados de nivel 3, considera la aplicación de modelos hidrológicos, hidráulicos, y de susceptibilidad de deslizamientos para determinar sitios priorizados por el potencial impacto en la infraestructura hidrocarburífera. Para esto, se desarrollaron 4 etapas: **I)** análisis climático histórico (1985-2015) considerando periodos de retorno (Pr), tendencias climáticas que permite evaluar las amenazas climáticas; **II)** modelación hidrológica usando el “Hydrologic Engineering Center’s Hydrologic Modeling System” (HEC-HMS) y modelado hidráulico aplicando “Hydrologic Engineering Center’s River Analysis System” (HEC-RAS) para generar información hidrológica y mapas de inundación en diferentes escenarios climáticos y Pr; **III)** método Heurístico de Combinación de Mapas de Factores Ponderados para obtener mapas de susceptibilidad a deslizamientos ([Carrara et al. \(2015\)](#), [INGEMMET \(2013\)](#) y [PMA: GCA \(2007\)](#)); y, **IV)** Análisis de impactos biofísicos considerando los escenarios de los diferentes años típicos de cambio climático (2010-2050).

El objetivo de estos modelos es identificar sitios priorizados en la infraestructura del SOTE y elaborar escenarios plausibles de eventos climáticos con potenciales impactos en la infraestructura del sector hidrocarburos basados en las tendencias históricas y en los años típicos para el periodo 2020-2050.

HEC HMS y HEC RAS son los modelos hidrológico e hidráulico más usados exhaustivamente, estos modelos computacionales creados por USACE (United States Army Corps of Engineers) por sus siglas en

ingles. **HEC HMS** está diseñado para simular procesos mediante relación precipitación-escorrentía referente a una cuenca hidrográfica transformando sus características intrínsecas en flujos de crecidas de agua ([Hydrologic Engineering Center, 2022b, 2022a;](#) [Knebl et al., 2005](#)). HEC RAS está diseñado a realizar cálculos unidimensionales para canales naturales y artificiales, mediante las características del canal y caudales se genera simulaciones de inundación ([Castro & Maidment, 2020](#)).

Ambos modelos en contexto de variabilidad climática impactan en diferentes magnitudes a infraestructuras de desarrollo, dependiendo de las proyecciones en que los sectores estén involucrados. Como proyectos de urbanización alrededor de un río, durante un proceso de tormenta, las crecidas de agua en los canales fluviales son críticos siendo resultado el aumento de escorrentía por deterioro del suelo ([Adeyemi & Fashae, 2018](#)). La simulación de una inundación permite identificar sectores expuestos a diferentes niveles de amenaza, siendo el de mayor amenaza las áreas inundadas con mayor profundidad a una velocidad de inercencia menor en planicies ([Quirogaa et al., 2016](#)). Existen varios estudios aplicados en riesgo de daños a infraestructuras por inundación, potenciados por el aumento de probabilidad de ocurrencia de tormentas severas e inundaciones ([Castillo, 2019](#)).

2. Materiales y Métodos

El marco metodológico aplicado considera varios pasos del proceso para llegar a determinar los sitios críticos de los riesgos, en el escenario presente basado en datos históricos (1985-2015), y en escenarios futuros considerando años típicos identificados como patrones plausibles para el periodo 2020-2050. Los pasos desarrollados en este proceso incluyeron:

- Paso 1. Pre-priorización de sitios a modelar.
- Paso 2. Modelación de sitios pre-priorizados.
- Paso 3. Validación y retroalimentación de sitios priorizados.
- Paso 4. Análisis de impactos biofísicos en sitios priorizados en escenarios para varios periodos de retorno y Años típicos representativos para el 2020-2050.

Los pasos integran procesos cuantitativos y cualitativos, que incluyen modelación de inundaciones, susceptibilidad a deslizamientos, inventario de eventos de inundación y deslizamientos ocurridos, así como el proceso de validación con los actores y expertos del sector de hidrocarburos.

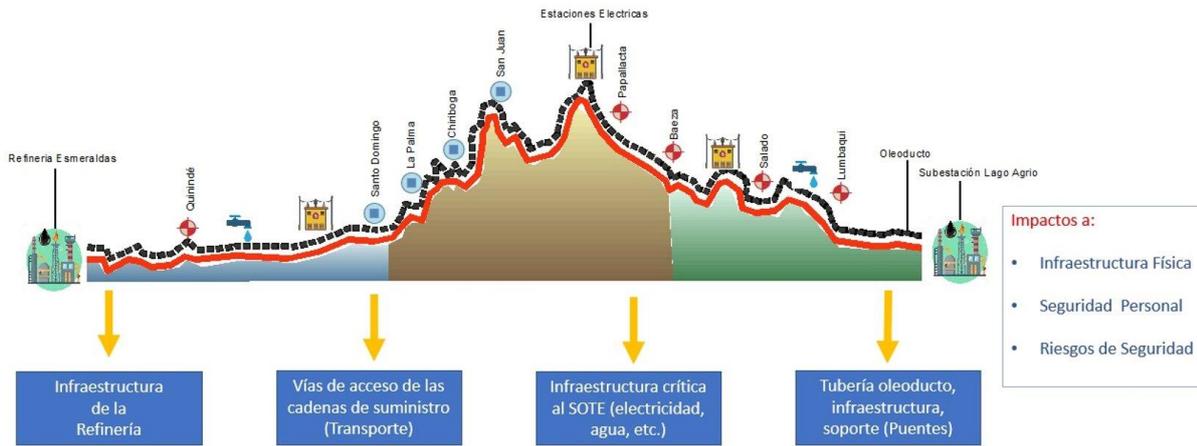
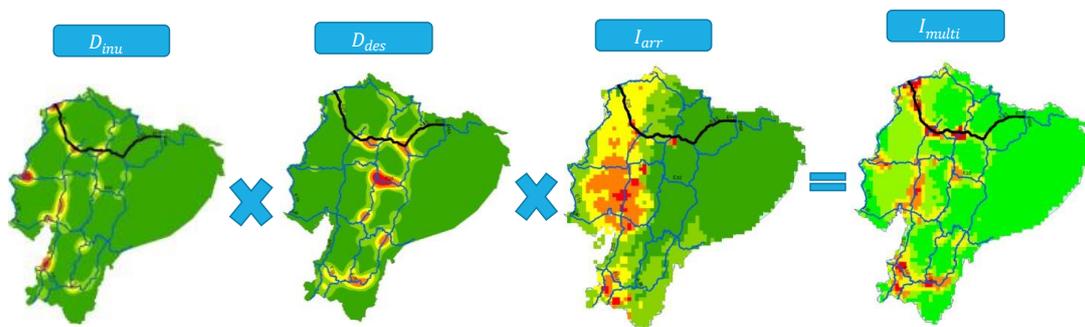


Figura 1. Diagrama del Sistema de Oleoducto Transecuatoriano y su infraestructura crítica en el territorio.

Datos Observados		Evidencia de Eventos
<p>Probabilidad de ocurrencia</p> <ul style="list-style-type: none"> • Períodos de retorno en la serie histórica de precipitación anuales acumuladas (1985-2015) 	<p>Intensidad de precipitación</p> <ul style="list-style-type: none"> • Análisis de precipitación extrema diaria del periodo histórico (1985-2015). • Anomalías de precipitación diaria asociado a severidad del impacto 	<p>Eventos Adversos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eventos de inundaciones (2010-2021) • Eventos de deslizamientos (2010-2021)

Figura 2. Criterios de priorización para identificar eventos climáticos que han generado impactos en la infraestructura de los sectores estratégicos I) Datos Observados y II) Evidencia de Eventos Climáticos

Procedimiento para la generación de los escenarios de priorización.



$$I_{multi} = D_{inu} (cat: 1 - 5) \times D_{des} (cat: 1 - 5) \times I_{arr} (cat: 1 - 5)$$

- I_{arr} = anomalías precipitación
- D_{inu} = Densidad inundación
- D_{des} = Densidad deslizamiento

Figura 3. Diagrama del procedimiento para la selección de sitios priorizados; álgebra de mapas que integra mapa de sitios de inundaciones, sitios de deslizamientos y un mapa de anomalías de precipitación, produciendo un mapa integrador con los sitios priorizados por amenazas múltiples

2.1. Pre-priorización de sitios a modelar

El objetivo de este paso fue identificar los sitios donde se han producido eventos climáticos que han impactado a la infraestructura del SOTE y donde se realizó subsecuentemente la modelación de los impactos biofísicos. En la [Figura 2.](#), se muestra los criterios aplicados en la pre-priorización que incluyen los datos observados y la evidencia de eventos climáticos adversos.

Se usaron los datos de precipitación del periodo histórico 1985-2015 ([PLANACC, 2021](#)) y se determinó la probabilidad de ocurrencia de eventos de alto impacto, asociados a un periodo de retorno (T_r) y a la intensidad de los eventos, identificando los años con precipitaciones extremas y los sitios donde ocurrieron a lo largo del SOTE. Se calcularon las anomalías de precipitación, que corresponde a la variación del evento extremo respecto al promedio de las precipitaciones de todo el periodo 1985-2015. Por otro lado, se mapearon los eventos adversos de inundaciones y deslizamiento del periodo 2010-2020 que determinan sitios expuestos y el real impacto de la amenaza climática. La base de datos de eventos adversos proviene del Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE). En la [Figura 3.](#), se muestra el procedimiento para operar todos los mapas en un proceso multiplicativo de álgebra de mapas (Booleana), los cuales fueron categorizados de 1 a 5, siendo 5 el valor más alto asignado a las máximas precipitaciones y mayor número de eventos adversos.

2.2. Área de Estudio del Sistema de Oleoducto (SOTE)

El área de estudio corresponde al sector por donde atraviesa el SOTE, conformado por cuatro cuencas hidrográficas: Río Aguarico, Río Papallacta - Quijos, Río Toachi – Blanco, y Esmeraldas. La longitud total del SOTE es de 497.7 km, y la zona priorizada para las modelaciones es de 236.17 km, la cual se definió con la retroalimentación de los actores del sector de hidrocarburos en base a información y experiencia experta. Se afinaron finalmente los sitios para la modelación definitiva, y se inició desde la región Amazónica con un total de 6 tramos, definidos en la [Tabla 1.](#) En la [Figura 4.](#), se presenta la infraestructura del SOTE que inicia en la subestación Lago Agrío, atravesando tres regiones; Amazónica, Interandina y Costa, hasta llegar a la refinería en la costa de Esmeraldas. A través de la compleja topografía del terreno, el oleoducto atraviesa tramos en forma

soterrada o área, siendo los tramos aéreos los de mayor exposición a las condiciones climáticas de precipitación y temperatura, especialmente en la época lluviosa, que se describirá en la sección de amenazas climáticas.

2.3. Análisis de las amenazas climáticas

La metodología aplicada para el análisis de las amenazas climáticas es a través de índices climáticos que permitan identificar sitios críticos por intensidad de precipitación o por frecuencia de eventos considerados extremos. Los índices climáticos aplicados son: a) Anomalías de precipitación, que representa la diferencia que existe entre un evento de precipitación en una zona específica con respecto al promedio histórico de los 31 años analizados, en el mismo sector, b) Número de días con precipitaciones sobre el percentil 95%, que indica el número de eventos extremos ocurridos en un sector específico en cada año; y c) Precipitación acumulada anual para el periodo 1985-2015. Adicionalmente, se consideran las d) Tendencias de incremento de la precipitación para el periodo 1985-2015 y la tendencia del número de días con precipitación sobre el percentil 95%. Los índices fueron aplicados a los datos diarios en formato ráster de 10 km de resolución para todo el Ecuador.

El cálculo de las anomalías de precipitación se lo obtuvo restando la precipitación diaria en cada píxel de la grilla menos la precipitación promedio de los datos diarios del periodo histórico. ([CIIFEN \(2022\)](#), [Guzman et al., \(2019\)](#), [Guachami et al., \(2013\)](#), [Mormeneo et al., \(2003\)](#), [González & Buitrago, 2012](#)).

Ecuación 1: precipitación promedio.

$$\overline{RR}_{i,j} = \frac{\sum_{t_0=1}^{t_f=11322} rr_{i,j}[t]}{11322}$$

Donde: $\overline{RR}_{i,j}$ es la precipitación promedio de todo el país en cada píxel de la grilla i, j [mm/día]

t_0 y t_f son el primer y último día del periodo histórico [días/año]

$rr_{i,j}$ es la precipitación diaria del periodo histórico en cada píxel de la grilla i, j [mm/día]

Ecuación 2: Cálculo de las anomalías

$$arr_{i,j} = \frac{\sum_{t_0=1}^{t_f=11322} (RR_{i,j}[t] - \overline{RR}_{i,j})}{11322}$$

Donde: $arr_{i,j}$ es la anomalía promedio en cada píxel de la grilla i, j [mm/año]

t_0 y t_f son el primer y último día del periodo 1985 – 2015 [días/año]

$RR_{i,j}[t]$ es la precipitación diaria en cada píxel de la grilla i, j [mm/día]

$\overline{RR}_{i,j}$ es la precipitación promedio en cada píxel de la grilla i, j [mm/día]

Los cálculos se realizaron usando el lenguaje de programación R, y los resultados fueron llevados a formato ráster para ser presentados en un Sistema de Información Geográfica.

Tabla 1 Sitios priorizados para la modelación hidrológica y de susceptibilidad de deslizamientos

Tramo	Provincia o Cuenca	Tipo de amenaza	Longitud (km)	Observación
T1: Cascales - Lumbaqui	Napo (Río Aguarico)	Deslizamiento	8.68	Recomendación actores
T2: Reventador – San Rafael – Quijos	Napo (Río Napo)	Erosión regresiva	35.53	Recomendación actores
T3: Santa Rosa – Baeza – Papallacta	Napo (Río Papallacta)	Deslizamiento	66.22	Proceso pre-priorización
T4: La Pala – Alluriquín – Peaje Santo Domingo	Santo Domingo	Deslizamiento, Inundación	62.24	Proceso pre-priorización
T5: Quinindé	Río Esmeraldas	Inundación	5.96	Proceso pre-priorización
T6: Viche – San Mateo	Río Esmeraldas	Inundación	57.54	Proceso pre-priorización
		Total	236.17	47.5% de los 497.7 km que son total del SOTE



Figura 4. Los 6 tramos priorizados del SOTE para la modelación de impactos biofísicos, con una longitud de 236.17 km, que corresponde al 47.5% de los 497.7 km del SOTE.

2.4. Modelación de sitios priorizados

En la [Figura 5.](#), se muestra el diagrama del proceso de la modelación en los sitios priorizados; primero se aplicó la modelación hidrológica usando el HEC-HMS para calcular los caudales picos y escorrentías en diferentes periodos de retornos de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Luego, los resultados del modelo hidrológico se

utilizaron de entrada para la modelación hidráulica usando el HEC-RAS, que permite desarrollar mapas de inundaciones con niveles y velocidades para los diferentes periodos de retorno. Finalmente, se modelan los escenarios futuros en base a los años típicos obtenidos del reporte de Clima Futuro para el periodo 2020-2050 usando el mismo procedimiento que para los años históricos.

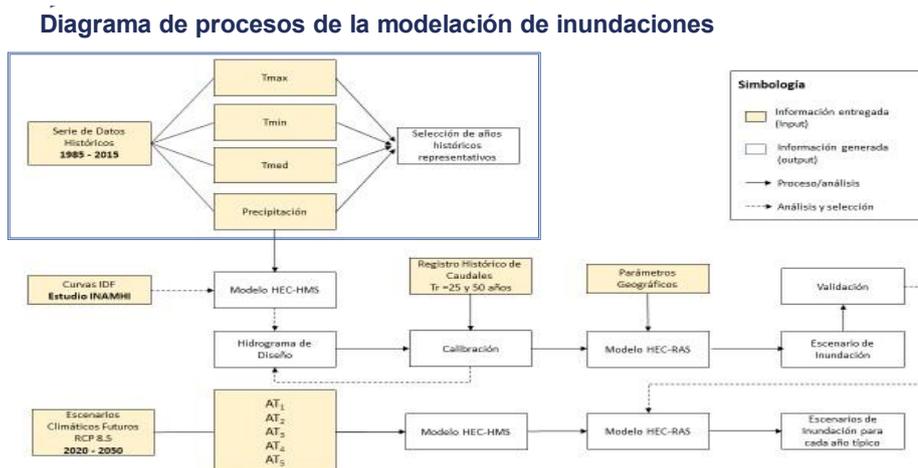


Figura 5. Diagrama de procesos de la modelación hidrológica (usando el HEC-HMS) y HEC-RAS para obtener escenarios de inundación en base a diferentes periodos de retorno y escenarios futuros en base a Años Típicos obtenidos a partir de los datos históricos.

2.5. Modelación hidrológica aplicando el HEC-HMS

Para determinar el impacto de las inundaciones en el SOTE se desarrollaron un modelo hidrológico y uno hidráulico. Para el modelo hidrológico se aplicó el HEC-HMS versión 4.10 que permite simular los procesos de transporte de agua en una cuenca determinada, a partir de la precipitación y en función de las condiciones biofísicas de la cuenca, como tipo y uso de suelo, cobertura vegetal, rugosidad del suelo, pendiente, entre otras (Castro & Maidment, 2020). Los datos de entrada usados en el HEC-HMS se describen a continuación:

- Modelo de Elevación Digital, resolución de 12.5 m, obtenido del satélite ALOS de la Agencia Japonesa de Exploración Espacial. Los productos de este satélite pueden obtenerse por Alaska Satellite Facility en el siguiente enlace: <https://search.asf.alaska.edu>.
- Modelo de Elevación Digital, resolución de 5m, obtenido del proyecto SIGTIERRAS del Ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador (sector Cascales – Lumbaqui).
- Coeficiente del Número de Curva (NC), es un parámetro adimensional cuyos valores oscilan entre 0 y 100, siendo 100 la capacidad máxima de retención de la cuenca (Carillo & Mejía, 2016).
- Delimitación de las cuencas de estudio a lo largo de la ruta del SOTE.
- Intensidad de lluvia, a partir de las precipitaciones máximas para los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años. Estos datos provienen del “Estudio de intensidades máximas de precipitación” del INAMHI (INAMHI, 2019).
- Tc tiempo de concentración, es el tiempo que requiere el escurrimiento en viajar desde el punto

más alejado de la cuenca hasta su salida. Su cálculo depende principalmente de la pendiente y la longitud del cauce principal.

- La abstracción inicial; es un número adimensional, que representa la capacidad del suelo en retener agua antes de producirse la escorrentía directa, está asociada a los factores morfométricos y la humedad propia del tipo de suelo (Prieto Villarroya et al., 2020).
- Se combinó el modelo de la cuenca con el modelo meteorológico, determinado por la distribución diaria en bases a las curvas de Huff (Dunkerley, 2022) y de la precipitación máxima para los periodos de retorno, considerando el método de diseño de tormenta (hietogramas) en base a la intensidad, duración y frecuencia de un evento de lluvia a partir de las curvas IDF generadas por el INMAHI (INAMHI, 2019).

Con estas condiciones se corre el modelo y se obtienen las simulaciones que determinan caudales máximos (Q_{max} , m^3/s) y escorrentía (mm^3). Se obtienen visualizaciones de los hidrogramas y una tabla resumen de las series de tiempo obtenidas. Para los escenarios plausibles se analizaron los periodos de retorno usados para el diseño de infraestructura (50 y 100 años) con las variaciones de cada año típico en su percentil 95th y la media (Olaya et al., 2020).

2.6. Modelación hidráulica aplicando el HEC – RAS (River Analysis System)

La modelación hidráulica se la realizó con el HEC – RAS (River Analysis System 6.2), un software que permite realizar cálculos hidráulicos y resuelve las ecuaciones de Saint Venant en una dimensión, de un flujo inestable unidimensional en función de las variables

morfométricas de la cuenca, modelos digitales de terreno y la resistencia del flujo de agua en un “canal”. El modelo utiliza representaciones comunes de datos geométricos y rutinas de cálculos geométricos e hidráulicas comunes. La modelación incluye las siguientes fases:

- a) Recopilación de la Información necesaria para el modelamiento Hidráulico, estableciendo las características del lugar, la rugosidad del medio (Coeficiente de Manning). En este estudio se utilizaron imágenes el modelo digital de elevación (MDE) de ALOSPALSAR a una resolución 12.5 m y del proyecto SIGTIERRAS con una resolución de 5 m para la Amazonía.
- b) Fase de preprocesamiento – requiere aplicar QGIS para la determinación de las características de la cuenca, y mediante la extensión HEC-geoRAS se dibuja la geometría del cauce.
- c) Modelamiento del flujo inestable – Se introducen los parámetros de entrada para el modelo como los hidrogramas y los coeficientes de rugosidad del medio.
- d) Post-procesamiento. - Mediante el MDE, y la delimitación de la cuenca, se guarda las profundidades resultantes en formato .tif y se visualizan en Qgis para definir simbología y niveles.

2.7. Método de susceptibilidad a deslizamientos, proceso Heurístico de Combinación de Mapas de Factores Ponderados (HCM)

El modelado de la susceptibilidad ante deslizamientos se realizó mediante los siguientes pasos: (1) descomposición del terreno en los factores que lo vuelven susceptible a deslizamientos. En este estudio se eligieron 12 de los 14 condicionantes de deslizamientos propuestos por Ozdemir (2020); (2) cada factor (Figura 6) se estandariza en una escala de 1 a 5 en función de su influencia (susceptibilidad) relativa en los deslizamientos. (3) la importancia relativa de cada clase de los factores se determina cuantitativamente a través de una comparación por pares de acuerdo con la escala fundamental de Saaty que se presenta en la Tabla 2 y cuyos resultados de la matriz de ponderación de presenta a continuación:

Tabla 2 Escala fundamental para la comparación por pares.

Nivel de importancia	Descripción
1	Igual importancia
2	Débil
3	Moderada importancia
4	Moderadamente más importante
5	Fuerte importancia
6	Fuertemente más importante
7	Muy fuerte o importancia demostrada
8	Muy, muy fuerte
9	Extremadamente importante

(4) Luego, se calculan los pesos de cada clase sobre cada factor (Wi) con base en la metodología desarrollado por Thomas L. Saaty (1980) de acuerdo con la ecuación 3.

Ecuación 3:

$$W_i = \frac{\sum_j^n b_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}}, i, j = 1, 2, 3, \dots, n$$

Finalmente, (5) El índice de susceptibilidad a deslizamientos (ISD) se calcula a través de la sumatoria de cada factor previamente multiplicado por su ponderación (Ecuación 4). Los pesos obtenidos de los factores condicionantes (Wj) y los pesos (wij) de las variables utilizadas se presentan en la Tabla 3. El mapa de susceptibilidad a deslizamiento (MSD) se establece de acuerdo con la Ec.4. Para el HCM realizada se calculó una taza crítica (CR) de 0.09, una relación que indica un nivel razonable de consistencia en la comparación por pares que fue lo suficientemente buena para reconocer los pesos de los factores.

Ecuación 4:

$$ISD = \sum_{i=1}^n (W_i \cdot xR_i)$$

Tabla 3 Matriz de comparación por pares de los 12 factores utilizados para el cálculo del ISD. (P) Pendiente, (CP) Curvatura en planta, (Pf_C) curvatura de perfil, (STI) Transporte de sedimento, (SPI) Potencial de corriente, (TWI) Humedad topográfica, (DD) Densidad de drenaje, (Dis_D) Distancia a Drenaje, (Geo) Litología, (DF) Densidad de falla geológica, (Dis_F) Distancia a falla geológica, (US) Uso de suelo

	P	CP	Pf_C	STI	SPI	TWI	DD	Dis_D	Geo	DF	Dis_F	US
P	1.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	7.00	7.00	3.00	9.00	8.00	3.00
CP		1.00	1.00	0.20	0.25	0.25	2.00	2.00	0.13	2.00	2.00	0.13
Pf_C			1.00	0.20	0.25	0.25	2.00	2.00	0.13	2.00	2.00	0.13
STI				1.00	1.00	1.00	2.00	1.00	0.20	3.00	3.00	0.14
SPI					1.00	2.00	2.00	1.00	0.20	3.00	3.00	0.11
TWI						1.00	2.00	1.00	0.20	5.00	5.00	0.33
DD							1.00	1.00	0.33	2.00	2.00	0.33
Dis_D								1.00	0.25	2.00	1.00	0.33
Geo									1.00	7.00	5.00	2.00
DF										1.00	0.50	0.20
Dis_F											1.00	0.20
US												1.00
Sum	2.8	41.0	41.0	25.6	27.2	22.4	26.0	24.5	6.3	43.0	37.5	7.9

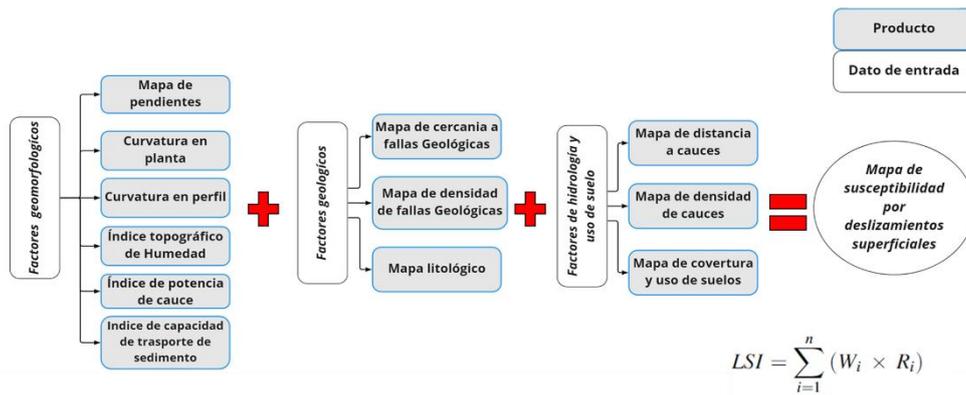


Figura 6. Diagrama de procesos con los factores utilizados para obtener el mapa de susceptibilidad ante deslizamientos superficiales.

3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados en 4 subsecciones: a) los patrones y tendencias de las amenazas climáticas considerando la precipitación y la temperatura máxima y mínima, analizando la información histórica y luego los cinco (5) escenarios futuros denominados Años Típicos (AT). Los AT son escenarios plausibles de un clima futuro del periodo 2020-2050 basados en el estudio realizado por Clima Futuro. La siguiente sección, muestra los 2) resultados del modelo hidrológico HMS e hidráulico, y 3) los resultados de la modelación hidráulica con los respectivos mapas de inundación para periodos de retorno y clima futuro. 4) Se presentan los resultados del modelo de susceptibilidad a deslizamientos.

3.1. Análisis de las Amenazas climáticas

Patrones y tendencias históricas de la precipitación y sus anomalías

En general, aunque las precipitaciones son mayores en la Amazonía, las anomalías del primer trimestre del año son mayores en la zona de la costa hacia Esmeraldas (10 - 16mm/día), indicando mayor recurrencia en el número de eventos extremos (> 20mm), característicos de la época lluviosa en la costa de Ecuador (Diciembre – Abril). En el sector de El Chaco en la provincia de Napo, sitio cercano al Río Coca que sufre un proceso de erosión regresiva con el potencial de afectar a la infraestructura del sector. En la [Figura 7.](#), se observa que las precipitaciones

promedio fueron mayores en la Amazonía con promedios de hasta 12 mm/día y acumulados anuales superiores a los 3000 mm/año, esta región está constantemente influenciado por altas precipitaciones, pero sus características naturales les permiten una mayor resiliencia a los eventos de precipitación. Se observa que el número de días con precipitaciones sobre el percentil 95% (eventos extremos) está alrededor de 50 en gran parte de la zona que cubre el SOTE, con mayor recurrencia en la región Interandina y algunas zonas de estribaciones.

En la [Figura 8.](#), se aprecia la serie mensual de precipitación con una tendencia de cambio positiva y eventos de gran intensidad, especialmente entre los años 2010 y 2013, alcanzando valores de hasta 1200 mm por mes. Las anomalías alcanzaron intensidades de 200 mm/mes o superiores, que denotan la ocurrencia de eventos de precipitación extrema que pueden haber provocado una saturación del suelo y procesos de deslizamientos en zonas de quebradas, siendo un factor que dispara procesos de erosión en dicha zona que puede afectar a la tubería del oleoducto y a sus vías de acceso (E-45). Se observa de forma general, que la tendencia de la precipitación diaria, acumulada y del número de días con precipitación sobre el percentil 95 es positiva (va en aumento) especialmente en la región litoral, con mayor pendiente, y en la región amazónica. Esta tendencia positiva, indica que, en gran parte de las zonas priorizadas para el SOTE, se tengan eventos de mayor intensidad y en promedio, mayor cantidad de precipitación.

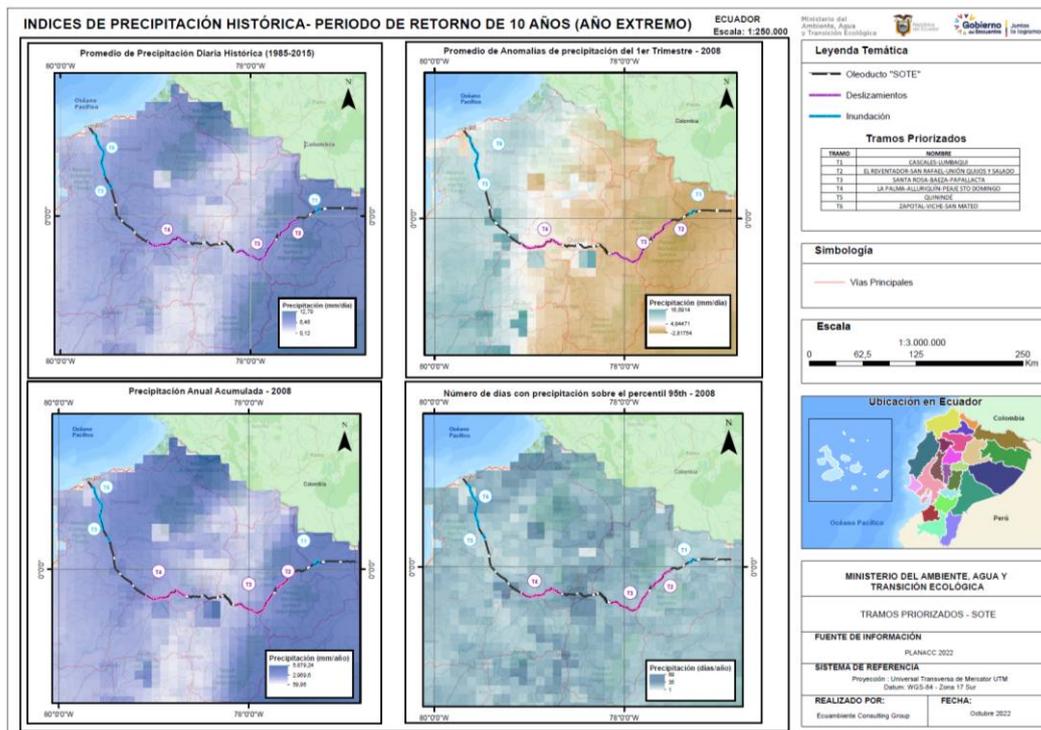


Figura 7. Índices de precipitación histórica: a) Promedio de precipitaciones diarias en mm/día, b) Anomalías de precipitación en mm/día, c) Precipitación anual acumulada en mm/año y d) Número de días con precipitaciones superiores al percentil 95, indicando un evento extremo.

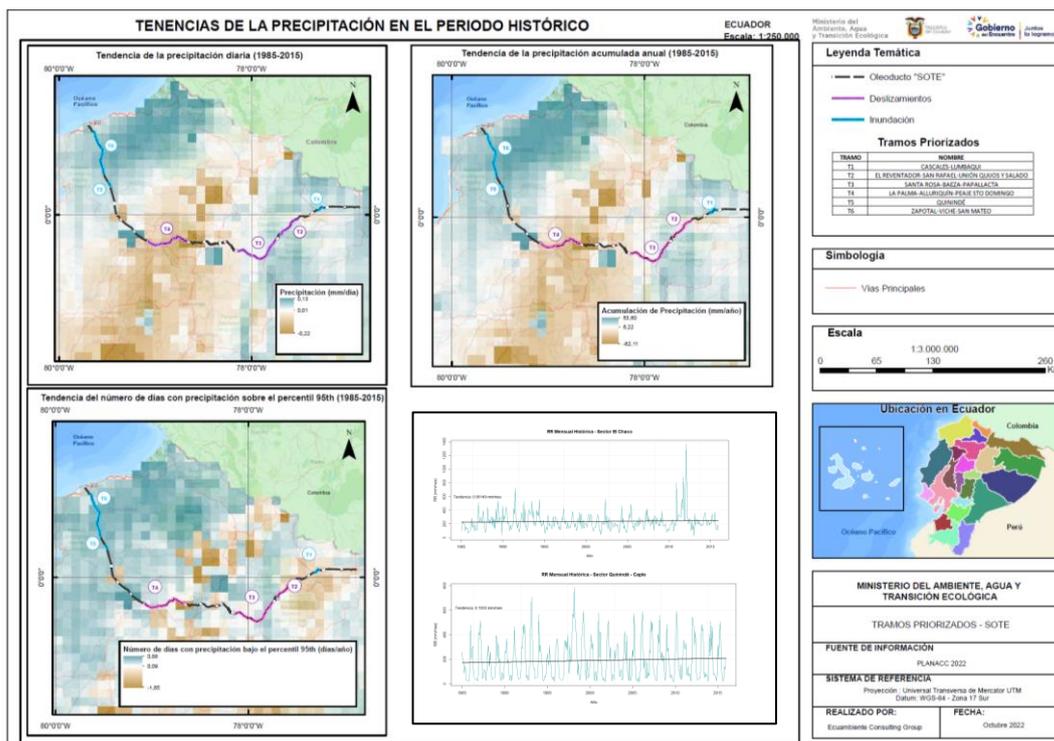


Figura 8. Tendencias de la precipitación en el periodo histórico: a) Tendencia de la precipitación diaria, se observa incremento en la precipitación de la zona costera, y disminución de la precipitación en la zona interandina, b) Tendencia de la precipitación acumulada, denota patrones anuales de incremento en la cantidad de precipitación en las regiones litoral y amazónica, c) Número de días con precipitación sobre el percentil 95th, se observan incrementos focalizados en la región litoral, y en la zona del Tramo 3; d) Series de precipitación mensual en las zonas priorizadas, El Chaco (Amazonía), Quinindé (Costa), se observa la presencia de un evento extremo en la zona de El Chaco entre los años 2012-2013.

Análisis de patrones y tendencias de las temperaturas máximas y mínimas

El estudio de los efectos de las temperaturas máximas ha sido históricamente concentrado en los efectos a la salud, sin embargo, y aunque de forma menos notoria, los cambios de temperatura también podrían afectar a la infraestructura a largo plazo. En la [Figura 9](#), se observan los índices de temperaturas máximas para el periodo histórico. Se seleccionó el índice del número de días sobre el percentil 90th y el percentil 90th de temperaturas máximas. Las temperaturas más altas tienen mayor ocurrencia en las regiones litoral y amazónica, por lo que son zonas donde se debería evaluar con más profundidad los efectos de las temperaturas máximas y los incrementos. Sin embargo, es importante notar que en años con precipitaciones más bajas ($Tr = 5$ años), existe una mayor incidencia de temperaturas extremas, como es el caso del año 2015. En este caso se observa que el número de días con temperaturas extremas es generalizado en gran parte del país.

Los eventos de temperatura mínima han provocado en los últimos años paralizaciones y daños, principalmente en las vías, pero sus efectos tienen el potencial de afectar también la infraestructura del SOTE, es por eso que es importante empezar a analizar los efectos de esta variable, especialmente relacionado a la resistencia de materiales y el choque térmico. En la [Figura 10](#), se presenta el número de días bajo el percentil 10th bajo diferentes periodos de retorno. Se observa que la región interandina es la que tiene valores más bajos de temperatura histórica, por lo que, en un futuro, el análisis de la influencia de las temperaturas mínimas debería centrarse en la zona entre el Tramo 3 y Tramo 4, incluyendo una de las zonas más críticas históricamente conocidas, el tramo de Papallacta-Baeza, lugar donde se han presentado

eventos de nevadas con impacto especialmente en las vías.

El análisis de los efectos de las temperaturas en la infraestructura no se ha estudiado a profundidad, por lo que no se tiene un registro histórico de afectaciones. En la [Figura 11](#), se observan las tendencias de la temperatura máxima y mínima en el periodo histórico y la tendencia del número de días con temperaturas extremas, sobre el percentil 90th para temperatura máxima y bajo el percentil 10th para temperatura mínima. Para las temperaturas máximas podemos observar que las tendencias se centran más en la región interandina, con incrementos de temperaturas máximas y días con temperaturas máximas más pronunciados, en la región litoral y amazónica, las variaciones son menos notorias. En temperatura mínima se observa que las tendencias son a temperaturas más frías en la región amazónica, e incrementos de temperaturas mínimas principalmente en la región interandina. La combinación de temperaturas máximas y mínimas sugiere que las temperaturas en la región interandina tienden a ser más cálidas, mientras que en la región amazónica existirían variaciones más grandes entre las máximas y las mínimas.

Tendencias de los años típicos (AT) escenarios 2020-2050

Los AT representan un escenario plausible de eventos climáticos futuros basados en la información histórica de los 31 años. La [Figura 12](#), muestra mapas de variación porcentual del percentil 95 en cada Año Típico con respecto al percentil 95 del periodo histórico. Las variaciones son ligeras, pero todas tienen un valor superior a 1, lo que indica que, en los escenarios de los AT, los eventos de precipitación extrema tienden a incrementar especialmente en tramo T4 y prácticamente en todos los AT se presenta el mismo patrón de evento extremo.

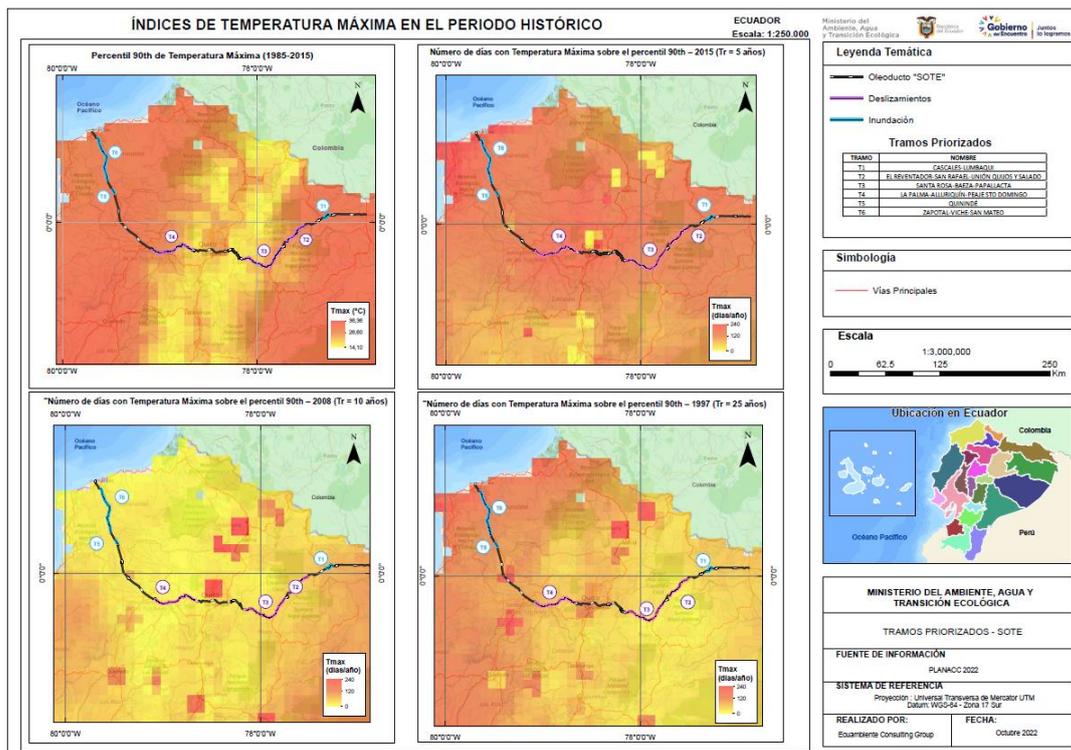


Figura 9. Índices de temperatura máxima en el periodo histórico: a) Percentil 90th de temperatura máxima, b) Número de días con temperatura máxima sobre el percentil 90th en un año con un periodo de retorno de 5 años (2015), c) Número de días con temperatura máxima sobre el percentil 90th en un año con un periodo de retorno de 10 años (2008); d) Número de días con temperatura máxima sobre el percentil 90th en un año con un periodo de retorno de 25 años (1997).

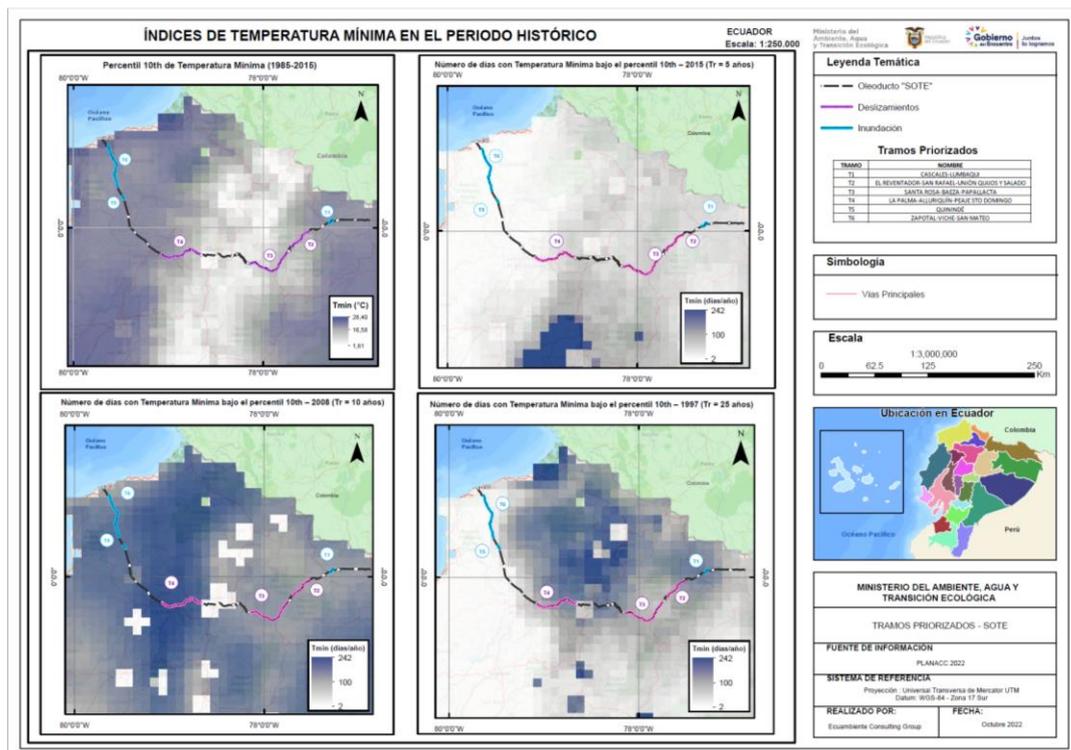


Figura 10. Índices de temperatura mínima en el periodo histórico: a) Percentil 10th de temperatura mínima, b) Número de días con temperatura mínima bajo el percentil 10th en un año con un periodo de retorno de 5 años (2015), c) Número de días con temperatura mínima bajo el percentil 10th en un año con un periodo de retorno de 10 años (2008); d) Número de días con temperatura mínima bajo el percentil 10th en un año con un periodo de retorno de 25 años (1997).

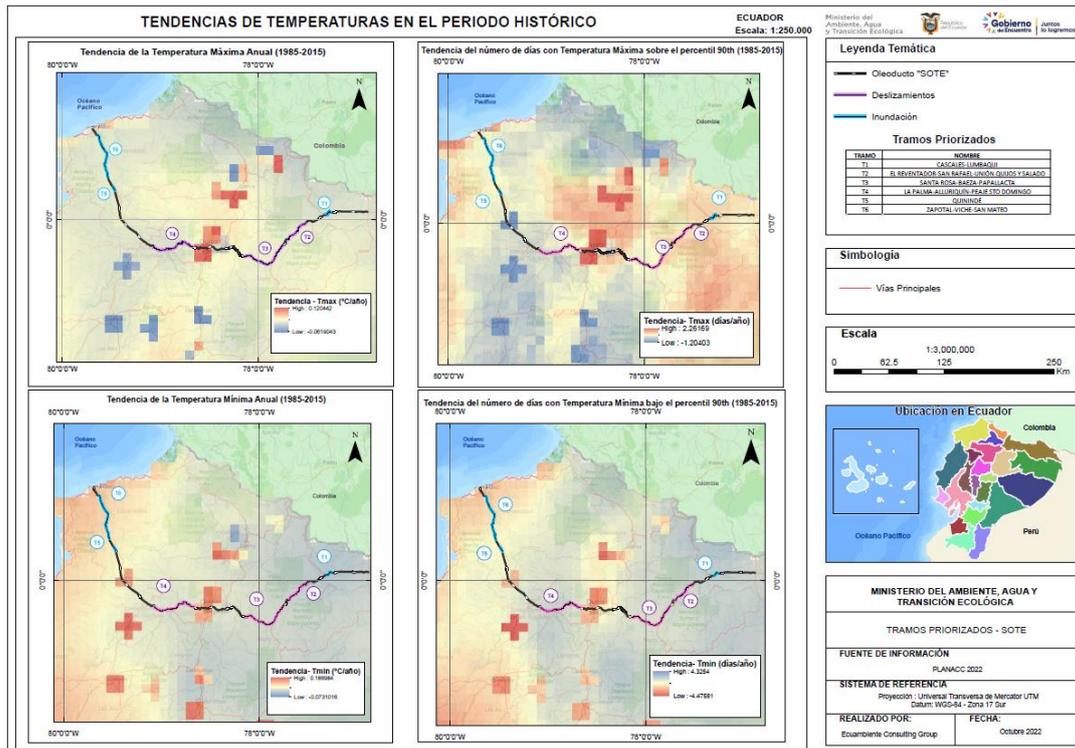


Figura 11. Tendencias de la temperatura en el periodo histórico: a) Tendencia de la temperatura máxima, se observan fuertes incrementos en la temperatura máxima en zonas puntuales de la región interandina, que se pueden relacionar a las manchas urbanas de las principales ciudades, b) Tendencia de la precipitación acumulada, denota patrones anuales de incremento en la cantidad de precipitación en las regiones litoral y amazónica, c) Número de días con precipitación sobre el percentil 95th, se observan incrementos focalizados en la región litoral, y en la zona del Tramo 3; d) Series de precipitación mensual en las zonas priorizadas, El Chaco (Amazonía), Quinindé (Costa), se observa la presencia de un evento extremo en la zona de El Chaco entre los años 2012-2013.

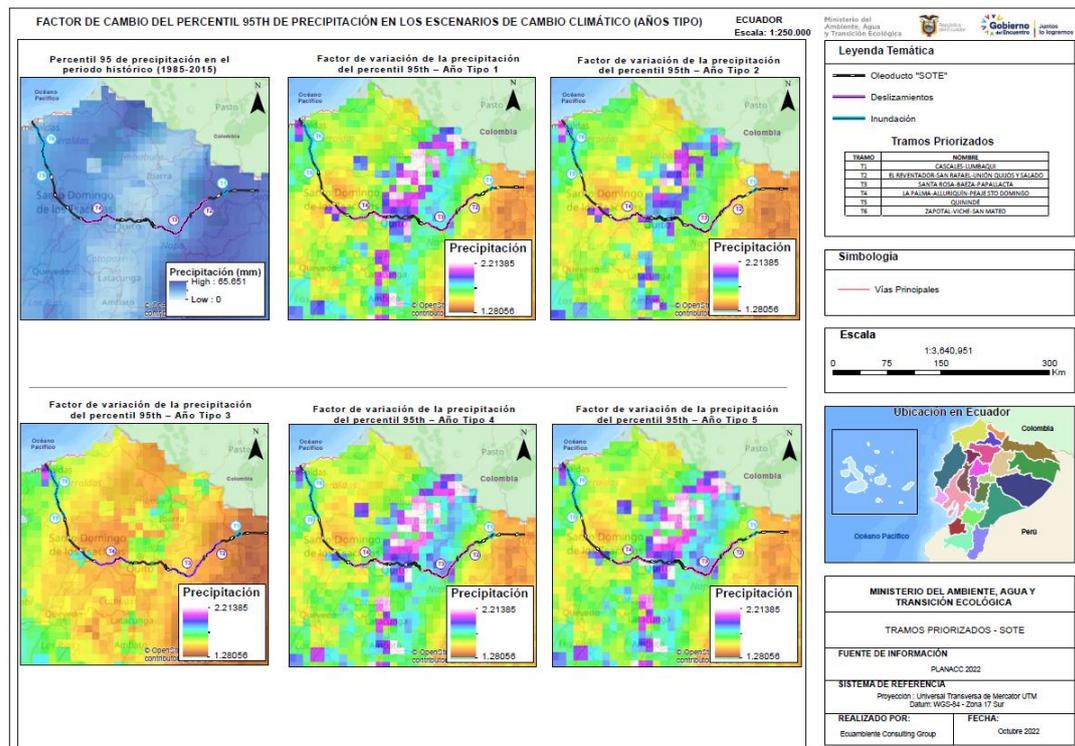


Figura 12. Tendencias de la precipitación en el periodo histórico: a) Tendencia de la precipitación diaria, se observa incremento en la precipitación de la zona costera, y disminución de la precipitación en la zona interandina, b) Tendencia de la precipitación acumulada, denota patrones anuales de incremento en la cantidad de precipitación en las regiones litoral y amazónica, c) Número de días con precipitación sobre el percentil 95th, se observan incrementos focalizados en la región litoral, y en la zona del Tramo 3; d) Series de precipitación mensual en las zonas priorizadas, El Chaco (Amazonía), Quinindé (Costa), se observa la presencia de un evento extremo en la zona de El Chaco entre los años 2012-2013.

3.2. Resultados Modelación Hidrológica

La modelación hidrológica permite relacionar los niveles de precipitación con los caudales máximos (Qmax) y los niveles de inundación en la zona de interés en escenarios de periodo de retorno histórico de 5, 10, 25, 50 y 100 años. En la [tabla 4](#) se puede observar que el sector de San Mateo-Quinindé (T6) tiene una mayor tendencia a aumento de precipitación (66-119%) que el sector de Cascales-Lumbaqui (T1) (7%-38%) para los diferentes periodos de retorno (Ver [Figura 13](#)). Se evidencia que la cuenca de San Mateo-Quinindé tiene procesos de mayor intensidad de la precipitación, mayor variabilidad en los caudales obtenidos, y una escorrentía grande comparado con las variables en el sector de Cascales.

Se encontró que los caudales máximos tienen una mayor variabilidad en el sector de San Mateo-Quinindé, aumentando entre un 66% a 119% para periodos de retorno entre 10 y 100 años. Por lo tanto, la infraestructura crítica del SOTE que se encuentra en la Cuenca del Esmeraldas estará más expuesta a eventos de mayor magnitud y con mayor frecuencia. Siendo relevante considerar los procesos de cambio en el uso de suelo, cobertura vegetal y posible procesos erosivos debido al socavamiento del río. En el caso de Cascales-Lumbaqui, se presenta como una cuenca más pequeña con menores variaciones de

caudales y escorrentías más bajas, estos datos sugieren que las condiciones de uso de suelo y cobertura vegetal mantiene más bajos los flujos de caudales y escorrentías en la cuenca. Sin embargo, considerando los riesgos de deslizamientos hay que tener en cuenta los niveles de saturación de los suelos en función de las lluvias acumuladas y el tipo de suelo presente.

Modelación Hidrológica en el contexto de los Años Típicos para periodo (2020-2050)

En forma similar se analizaron escenarios históricos en base a los periodos de retorno en el periodo 2020-2050, se analizaron los cinco AT propuestos como escenarios plausibles. Para cada Año Típico se comparó los escenarios de un evento histórico de 50 años, con variaciones que corresponden a un escenario de valores medios futuro con periodo de retorno de 50 años, el percentil 95th de 50 años, y otro escenario de periodo de retorno de 100 años y el 95th de los 100 años ([Tabla 5](#)). Se encontró que la cuenca costera del Quinindé se mantiene mucho más variable que la cuenca del Tramo 1, y además con los diagramas del Boxplot ([Figura 14](#)) se evidencia que el AT3 es el que tiene los valores más altos entre todas sus variaciones en la estación Quinindé -San Mateo. Mientras que en la estación de Cascales, todos los diferentes escenarios son bastante similares.

Tabla 4 Resultados del modelo hidrológico estableciendo los caudales máximos (Qmax m3/s) en cada sitio priorizado para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 años.

Sector Cascales -Lumbaqui – Cuenca del Aguarico : 343 km ² – long 65 km					
Tiempo de Concentración (min)		217		Tramo 1	
Curva Numero (CN)		51			
Periodo de retorno	RR Max (mm/día)	% cambio RR	Qmax (m3/s)	%cambio Qmax	Escorrentía (mm)
5	88		733		3
10	94	7%	784	7%	4
25	104	18%	872	19%	9
50	112	27%	949	29%	14
100	121	38%	1040	42%	23

Sector San Mateo -Quinindé - Cuenca Esmeraldas : 636.5 km ² –Long 94 km					
Tiempo de Concentración (min)		420 Tramo 5			
Curva Numero (CN)		63			
Periodo de retorno	RR Max (mm/día)	% cambio RR	Qmax (m ³ /s)	%cambio Qmax	Escorrentía (mm ³)
5	131		1223		41
10	146	66%	1457	19%	53
25	165	88%	1779	45%	78
50	179	103%	2018	65%	82
100	193	119%	2256	84%	98

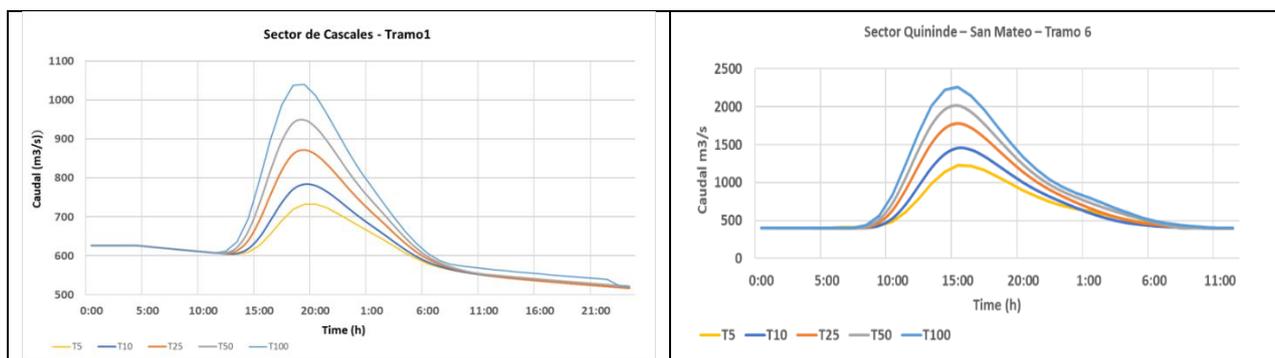


Figura 13. Caudales máximos en el sector de Cascales (T1) y Quinindé -San Mateo (T6) para diferentes periodos de retorno Tr: 5,10, 25, 50, 100 años.

Tabla 5 Tramo 1: Sector Cascales – Lumbaqui y Tramo 5: Quinindé – San Mateo

Qmax (m ³ /s) periodos de retorno	T1: Cascales - Lumbaqui				
	AT 1	AT 2	AT 3	AT 4	AT 5
TR_50 histórico	969	969	969	969	969
AT_50_Medio	1110.31	1081.86	1020.04	1127.25	1122.42
AT_50_95%	1058.94	1057.99	1052.99	1061.79	1061.79
TR_100 años	1064.63	1064.63	1064.63	1064.63	1064.63
AT_100_M	1426.34	1386.8	1300.35	1449.3	1442.97
AT_100_95%	1174.28	1172.98	1166.52	1177.78	1177.78
Qmax (m ³ /s) periodos de retorno	T5: Quinindé - San Mateo				
	AT 1	AT 2	AT 3	AT 4	AT 5
TR_50 histórico	2017.7	2017.7	2017.7	2017.7	2017.7
AT_50_Medio	1697.60	1803.00	2012.40	1648.30	1673.10
AT_50_95%	2169	2174.9	2186.7	2162.6	2165.8
TR_100 años	2256.4	2256.4	2256.4	2256.4	2256.4
AT_100_M	1881.9	1999.2	2232.5	1828.2	1854.8
AT_100_95%	2419.3	2425.4	2438.1	2411.9	2415.8

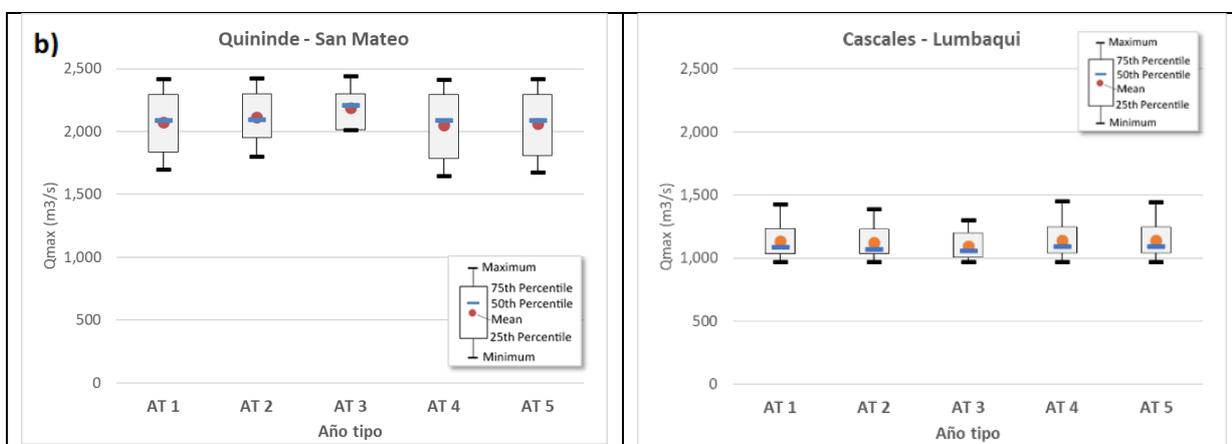
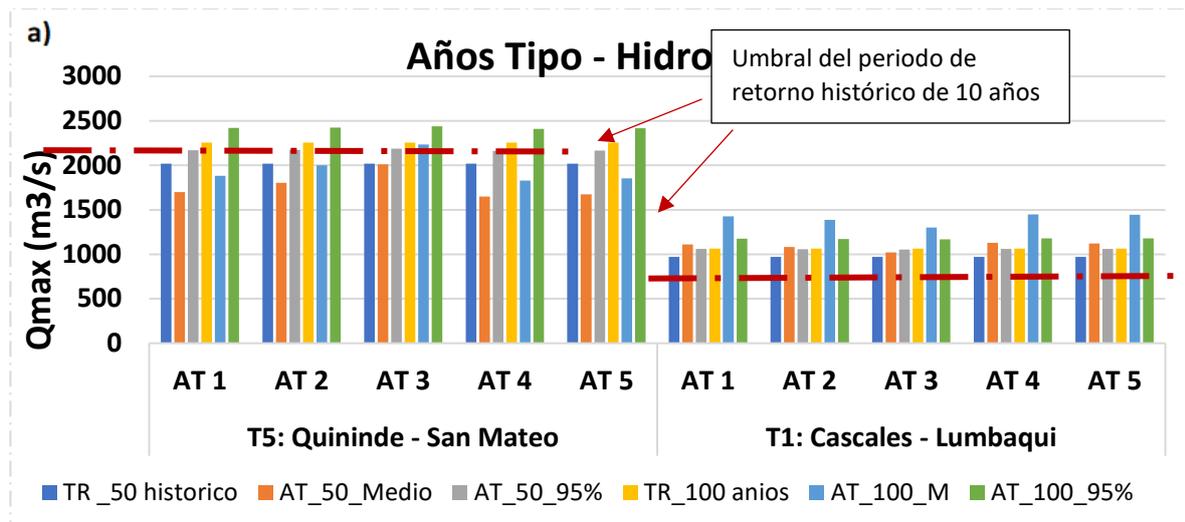


Figura 14. a) Qmax de las proyecciones realizadas a los TR de 50 y 100 años para cada Año Típico. b) Diagrama boxplot de la proyección de los Años Típicos para los TR de 50 y 100 años. Los valores de Qmax para cada Año Típico y periodo de retorno con sus variaciones, siendo los valores más altos en el escenario AT3 en Quinindé -San Mateo, y en AT1 Cascales Lumbaqui no hay mucha variación entre los diferentes escenarios. La línea roja punteada representa el umbral del histórico de un periodo de retorno de 10 años.

3.3. Resultados de la modelación hidráulica para un escenario histórico y AT con periodos de retorno de 50 y 100 años.

El escenario del Año típico AT3 es similar a los años históricos 1998, 2005, 2010, 2011, 2013 y 2014 con una probabilidad de ocurrencia del 19.35%. Usamos este año y sus periodos de retorno de 50 y 100 años, como escenarios plausibles de eventos futuros para el periodo 2020-2050. Dichos periodos de diseños son los que se recomiendan para estudios hidrológicos de cambio climático para infraestructura crítica como la del oleoducto.

En el tramo (1) Cascales -Lumbaqui los resultados de la modelación hidráulica no presentaron eventos de inundación en las proyecciones de cambio climático, sin embargo, al encontrarse en la estribación oriental de la cordillera de los Andes, las velocidades

generadas durante un evento extremo de precipitación pueden generar impactos en la infraestructura analizada. En la [Figura 15](#), se puede observar los escenarios generados para los años típicos considerando un impacto a la infraestructura, por procesos de socavamiento, erosión -corrosión en velocidades superiores a los 3m/s (Wang et al. 2021, Bischof et al. 2010). En el sector de la desembocadura del río Puchuchoa (tramo 1, [Figura 15](#)) presenta un aumento de la velocidad entre el 1 y 3% en relación con su periodo base, de acuerdo al modelo hidráulico las velocidades no superan los 2.1 m/s. El sector de Aguarico (sector 2, [Figura 15](#)) los escenarios de la modelación hidráulica para el año típico determinan velocidades entre 3.5 y 3.9 m/s, esto representa un incremento de entre el 9 al 11% de la velocidad en relación con su periodo de retorno base de análisis.

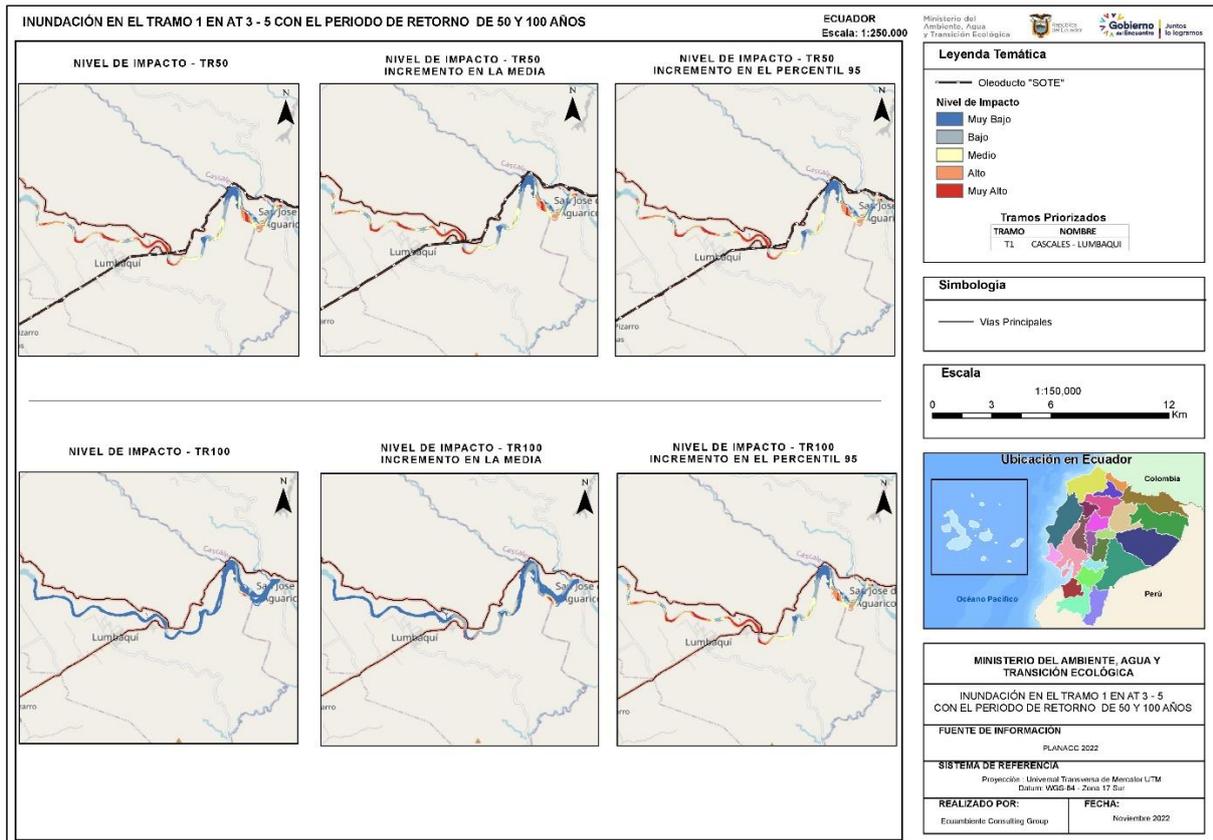


Figura 15. Mapas de inundación en el Tramo 1: Cascales – Lumbaqui en AT 1 – 5 con periodos de retorno de 50 y 100 años.

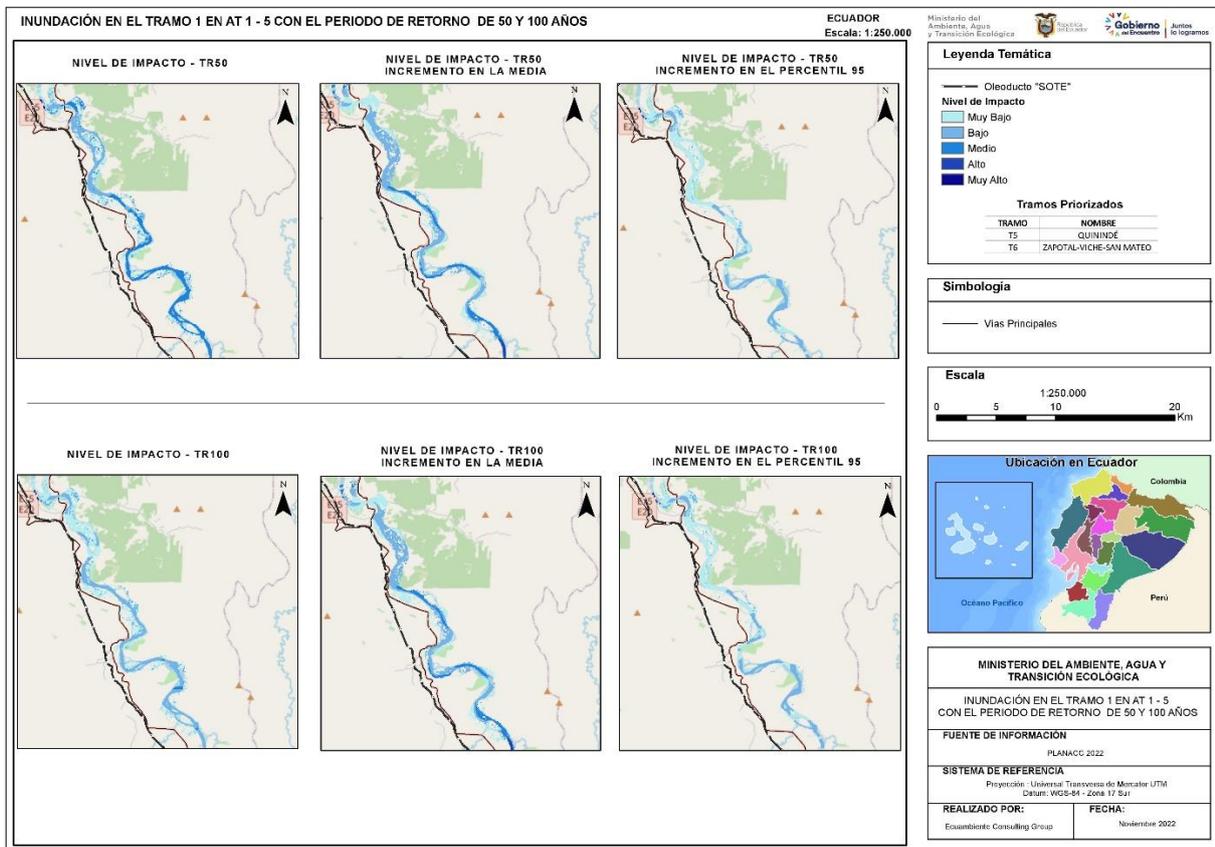


Figura 16. Mapas de inundación en los Tramos 5 - 6: Quinindé – San Mateo en AT 1 - 5 con periodos de retorno de 50 y 100 años.

Los resultados obtenidos en el tramo 5 y el tramo 6 correspondiente a la zona de Quinindé – San Mateo presentan áreas de inundación cercanas al SOTE que no inciden por niveles de inundación o velocidad en la infraestructura (oleoducto). El sector de San Mateo (sector 1, [Figura 16](#)) presenta un área aproximada de inundación de 0.87 km² con niveles de inundación de entre 1 a 3 m, el sector aledaño a Santa Rosa (sector 2, [Figura 16](#)) presenta un área de inundación de 1.14 km² con niveles de inundación de 0.5 a 1.5m, en el sector de la isla del muerto (sector 3, [Figura 16](#)) presenta un área de inundación de 1.12 km² con niveles de inundación entre 0.3 y 2m. El incremento del nivel entre los escenarios realizados para los años típicos es de aproximadamente 11% en relación a su periodo de retorno base. Las velocidades determinadas en esta zona no superan los 2m/s.

3.4. Resultados del análisis de susceptibilidad a deslizamientos en las zonas críticas alrededor del SOTE

Análisis de susceptibilidad a deslizamientos en las zonas críticas alrededor del SOTE

Con el objetivo de evaluar el potencial espacial de que ocurran deslizamientos en los tramos de tubería priorizados del SOTE se elaboró un mapa de susceptibilidad ante deslizamientos superficiales (MSDS) con una resolución de 12.5 m en aproximadamente el 40% del trazado del SOTE con un buffer de 20 km ([Figura 17](#)).

De acuerdo con el MSDS se observó que, los tramos 1, 3 y 4 que corresponden a los sectores Cascales – Lumbaqui, Santa Rosa – Baeza – Papallacta y La Pala – Alluriquín – Peaje Santo Domingo, son los más susceptibles a deslizamientos en relación con su longitud; teniendo respectivamente los siguientes porcentajes 48.72%, 37.67% y 40.81% de susceptibilidad entre alta y muy alta con respecto a su longitud total. La [Figura 18.](#), muestra la correspondencia en kilómetros lineales del nivel de susceptibilidad por tramo priorizado.

Análisis del impacto biofísico ante deslizamientos en las zonas críticas alrededor del SOTE

Para el análisis de los impactos de los deslizamientos se tomó como premisa principal que las lluvias fuertes y extremas son los principales factores disparadores de estos. Esto quiere decir que, mientras mayor sea la precipitación en las zonas de alta susceptibilidad será mayor la probabilidad de que un deslizamiento impacte la infraestructura del SOTE.

Para evaluar estas probabilidades se utilizó como referencia la metodología propuesta por The Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE) en 2019 para la predicción de la ocurrencia de deslizamientos y se generaron tres escenarios dinámicos de impacto por deslizamientos de acuerdo con las precipitaciones históricas y los años típicos para 2020-2050 en los 6 tramos priorizados: (1) Impactos por precipitaciones medias ([Figura 20 A](#)); (2) Impactos por precipitaciones en el percentil 95 ([Figura 20 B](#)) y (3) impactos en sectores con anomalías de precipitación ([Figura 20 C](#)).

La aplicación de este análisis permitió observar que, para periodos con precipitaciones dentro de la media histórica con sus respectivos escenarios de años típicos del 1 al 5, no se esperan impactos más allá de los de nivel medio, bajo y muy bajo en no más del 50% de la longitud de los tramos analizados y su tendencia de impacto es hacia la zona oriental predominantemente. Por el contrario, si hablamos de precipitaciones sobre el percentil 95 se esperan impactos de altos a muy altos en más del 80% en todos los tramos analizados ([Figura 19](#)), siendo el tramo 3 el de mayor probabilidad de ser impactado ([Figura 20 B](#)).

En lo que respecta a los escenarios con anomalías de precipitación histórica se ve una predominancia de casi el 70% de impactos altos y menos del 10% de impactos muy altos, este patrón se observa similar para los escenarios de los años típicos 2, 3 y 4 con ligeras diferencias.

Mientras que, para los escenarios de año típico 1 y 5 las tendencias de impactos altos a muy altos disminuyen drásticamente siendo predominantes los impactos bajos, sin embargo, estas tendencias de disminución se observan espacialmente solo hacia la zona centro y oriental del SOTE mientras que en las zonas litorales la tendencia de impacto se observa al alza.

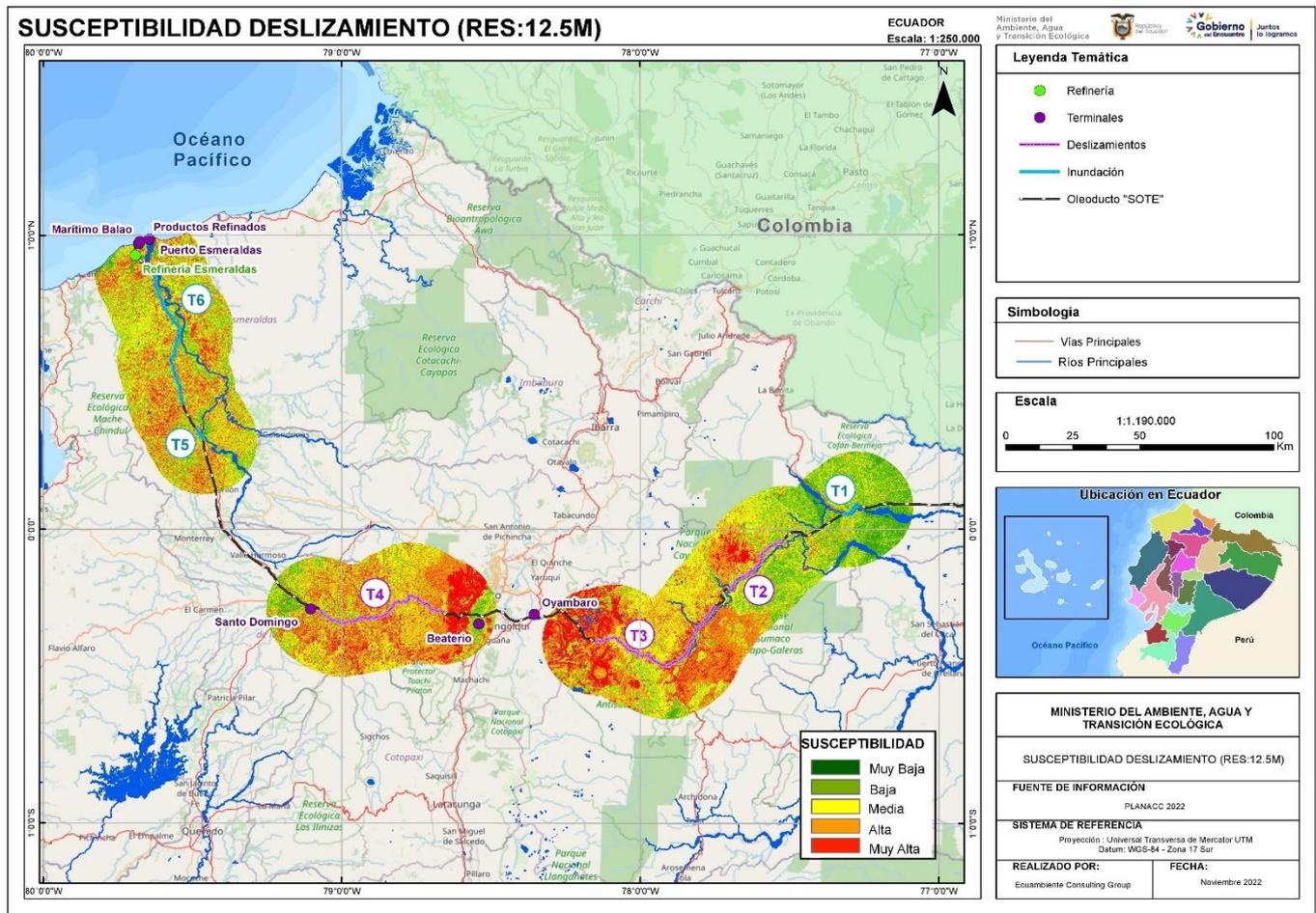


Figura 17. Mapas de susceptibilidad ante deslizamientos superficiales para los 6 tramos priorizados en el SOTE.

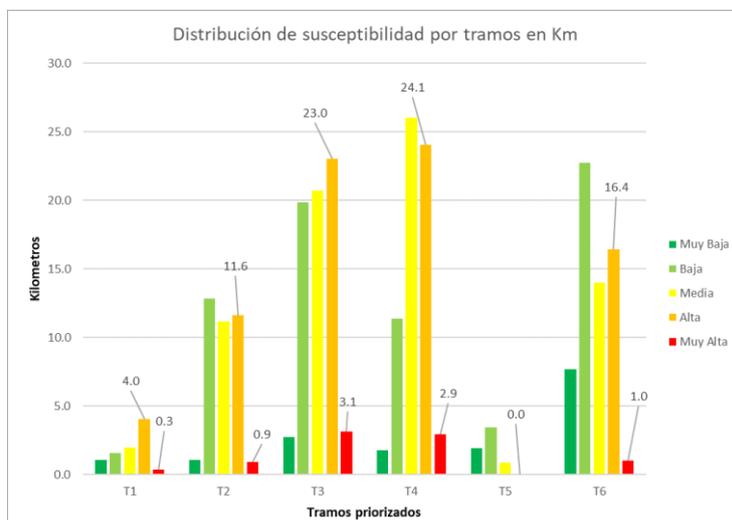


Figura 18. Nivel de susceptibilidad ante deslizamientos superficiales en kilómetros para los 6 tramos priorizado en el SOTE.

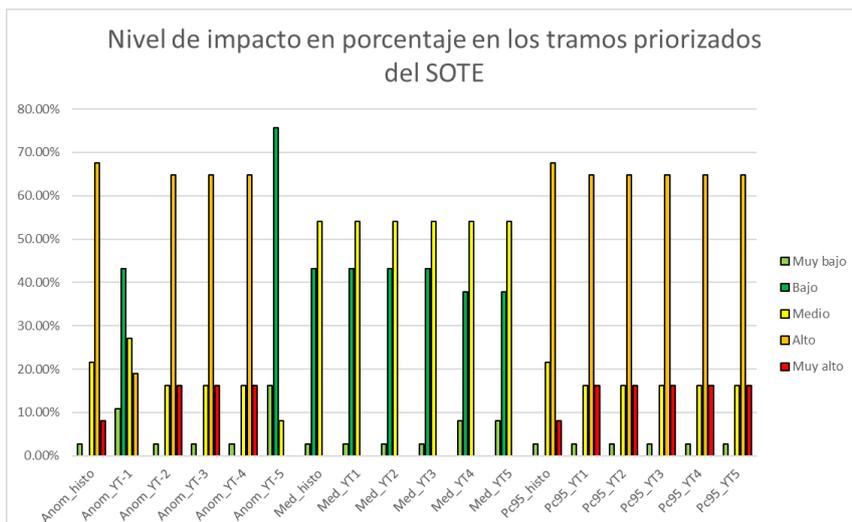


Figura 19. Distribución porcentual de los impactos esperados para los años típicos y periodos históricos para los 6 tramos priorizado en el SOTE.

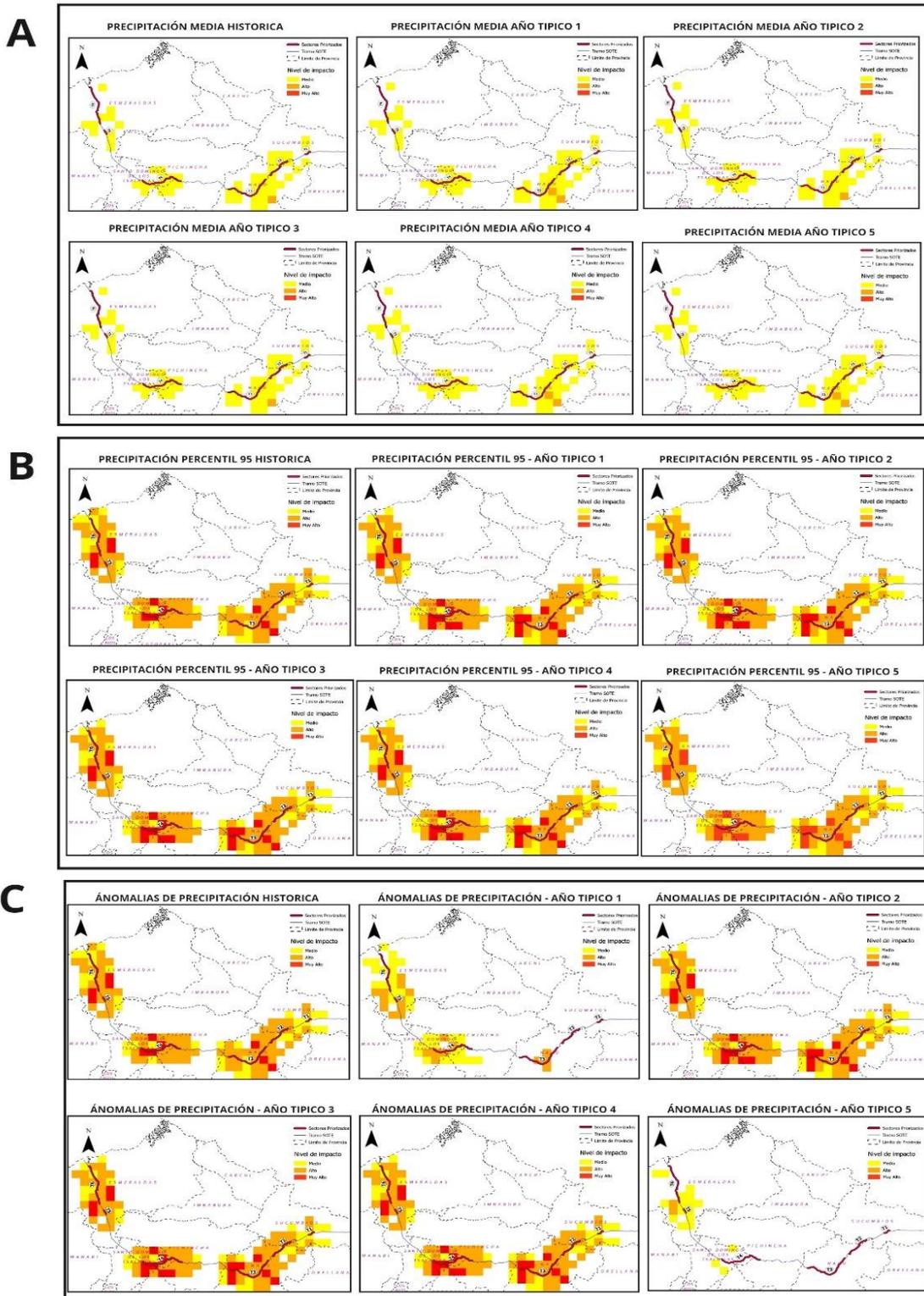


Figura 20. Escenarios dinámicos de impacto por deslizamientos para los distintos años típicos y periodos históricos en los 6 tramos priorizado en el SOTE. A. Precipitación media, B. Precipitación percentil 95 y C. Anomalías de precipitación.

4. Discusión: Análisis de los impactos biofísicos

Las precipitaciones pueden afectar al SOTE y sus operaciones debido a la intensidad de las precipitaciones y los deslizamientos asociados pueden producir daños o roturas en las tuberías que transportan el crudo (Tabla 6), pero también fallas en el suministro de energía, y en las vías de acceso para mantenimiento regular o en emergencias en eventos de inundaciones o deslizamientos. La relevancia del riesgo climático tiene 3 ideas principales : a) es necesario la identificación de zonas de alto riesgo climático y validarlo con una matriz histórica de eventos de inundación y deslizamientos con información de campo, mediciones y monitoreo, e impactos que permitan cuantificar no solo las amenazas climáticas sino los daños y paralizaciones; b) aplicar modelos hidrológicos e hidráulicos, que sean validados y que permitan la determinación de umbrales de factores disparadores (precipitación) relacionándolo con los caudales e inundaciones y zonas de deslizamiento; y, c) importancia del monitoreo de las condiciones hidrológicas y geotécnicas de las zonas identificadas como críticas e inclusive el desarrollo de Sistemas de Alerta Temprano (SAT) a inundaciones y a deslizamientos.

Una de las conclusiones de este estudio, es que los factores a considerarse en un análisis de riesgos climáticos deberían incluir -además de las características climáticas de precipitación y temperatura, y los factores biofísicos como uso de suelo, cobertura vegetal, pendientes, litología, entre otros factores que fueron aplicados en el análisis de susceptibilidad- la vulnerabilidad de la infraestructura y del sistema de hidrocarburos en este caso. Estos factores son intrínsecos a la infraestructura crítica analizada y están relacionados con su obsolescencia, tipo de material, forma de instalación, ubicación en el sitio (soterrada o aérea), por otro lado, la prevención del riesgo a partir de un inventario de eventos climáticos y sus características que permitan identificar sus tipologías y sus factores disparadores. Esto es fundamental en los procesos de deslizamiento, socavamiento y erosión.

De los 497.7 km el 47.5% fueron priorizados en los siguientes tramos de mayor impacto biofísico en el SOTE T1: Cascales – Lumbaqui, T2: Reventador – San Rafael – Quijos, T3: Santa Rosa – Baeza – Papallacta, T4: La Pala – Alluriquín – Peaje Santo Domingo, T5: Quinindé, T6: Viche – San Mateo.

- Los tramos T5 y T6 en la zona de la costa (Esmeraldas) se consideran como los más expuestos a impactos por inundaciones, mientras que los deslizamientos están preferentemente en la zona interandina y cordillera oriental y occidental correspondientes a los tramos T1, T2, T3 y T4.

- Los factores que inciden en un aumento en los impactos de las inundaciones están asociado al factor de la Curva Numero y coeficiente de Manning que están relacionados con el cambio del uso del suelo y la cobertura vegetal.

- Los factores que determinaron el aumento de la susceptibilidad a los deslizamientos fueron la pendiente, la litología del terreno y el cambio de uso de suelo.

- En la zona de erosión regresiva, aunque son de origen geomorfológico, las precipitación pueden ser un factor disparador de deslizamiento con precipitaciones de alta intensidad (>27mm día) o con precipitaciones acumuladas que pueden saturar el suelo en zonas susceptibles a deslizamientos.

- Considerando los escenarios de años típicos futuros los sectores de Quinindé y Viche- San Mateo son los de mayor impacto por inundaciones, con niveles de agua mayores a 1 metros y velocidad de corriente sobre los 4 m/s. Los años típicos de mayor impacto para estos sectores fueron los AT1 y AT3.

- Considerando los escenarios de años típicos futuros el sector La Pala – Alluriquín – Peaje Santo Domingo es el de mayor impacto por deslizamientos, con más del 50 % de su trazado con alta susceptibilidad (27 km) y precipitaciones diarias >27 mm. Los años típicos de mayor impacto para estos sectores fueron los AT2 y AT4.

- Para los escenarios futuro, se debe considerar las precipitaciones de alta intensidad, pero también las lluvias de baja intensidad, pero acumuladas en aquellas zonas con condiciones de suelo degradado, ya que pueden provocar suelos saturados, procesos erosivos, y deslizamientos que impactan directamente al SOTE.

Tabla 6 Análisis de los impactos biofísicos en sitios con eventos históricos, variables disparadoras

Región	Ejemplo de sector Tramo	Nivel de amenazas climáticas	Foto de evento inundación o de condiciones del sitio
Costa	<i>Esmeraldas:</i> Quinindé, San Mateo – Viche. El SOTE cruza sobre el Río Viche, actualmente se muestra estable, es un río de alto caudal que puede comprometer la integridad de la tubería.	Precipitaciones intensas, inundaciones en el sector. R > 21 mm/día Ranking: 4 Veloc > 3m/sec	 Quinindé, 01/03/2015 (Fuente: El Universo)
Costa-Sierra	Santo Domingo, cruce aéreo del SOTE en el Río Toachi, paso aéreo estable pero los soportes de la tubería cercanos al cuerpo de agua, podrían verse comprometidos en una crecida extrema.	Precipitaciones intensas, erosión y posible socavamiento en las riberas de los ríos R > 21 mm/día Ranking: 4 Veloc > 3m/sec	 Brasilia del Toachi, 2/07/2021 (Fuente: RADIO MACARENA)
Amazonía	Napo: Quijos, Papallacta-Baeza. El SOTE cruza en la desembocadura del Río Victoria, sus soportes están cercanos al cuerpo de agua y podrían verse comprometidos en una crecida extrema.	Lluvias moderadas a intensas. Geotécnicamente estable. Cobertura vegetal completa. Ranking: 3 Veloc < 2m/sec	 Baeza (Fuente: Ministerio de Trabajo y Obras Públicas)
Amazonía	Napo: Quijos-Lago Agrio El cuerpo de agua que cruza el oleoducto, presenta una corriente actualmente con poco caudal, pero que puede experimentar crecidas extremas. Zona donde la Troncal Amazónica (E-45) sufre procesos de erosión regresiva.	Precipitaciones moderadas y sostenidas, erosión hidráulica en la superficie anexas de la Troncal Amazónica, Cobertura vegetal completa. En febrero 2021, sobresaturación del terreno por altos niveles de escorrentías debido a intensas lluvias y acumuladas. R > 21 mm/día Ranking: 5 Veloc < 4m/s	 Río Coca, 12/01/2022 (Fuente: Vistazo)

En el siguiente cuadro se presenta un Caso de Estudio del evento de El Reventador del 31 de mayo del 2013, que muestra las condiciones geomorfológicas del sitio, y las condiciones climáticas específicas en el día del evento de inundación o del deslizamiento. Los factores biofísicos relacionados el nivel de impacto, son cambio de uso y cobertura vegetal, litología, y las pendientes del terreno, pero los modelos aplicados evidencian que el aumento de la intensidad de la precipitación aumentara el impacto sobre la infraestructura crítica en sitios identificados.

**Caso de estudio del evento de deslizamiento en la zona de El Reventador –
31 de mayo del 2013**



El sitio corresponde a la subcuenca del Río Quijos, con una litología arcilloso-arenoso y susceptibilidad a deslizamiento alta (este estudio) y la serie histórica de las precipitaciones del sector T1 revela que entre el año 2012-2013 hubo un gran evento de precipitación que pudo potencialmente disparar el evento de deslizamiento que ocurrió posteriormente en el sector de El Reventador en mayo 31 2013 (ver sección 3.1.1).

Este evento provocó la rotura del SOTE con un gran impacto al derramarse 11,480 barriles de petróleo liviano. Las condiciones meteorológicas durante el evento demostraron que llovió por varios días una precipitación de **106.5mm**, en el sitio las anomalías de precipitación llegaron a **42mm** (alta magnitud). La suma de estos factores desencadenó un deslizamiento de gran impacto debido a la saturación del terreno, ocasionada no solo por las constantes lluvias anteriores al evento, y posiblemente por ese gran evento registrado entre el 2012-2013. Se afectó aproximadamente 140 metros de tubería, rotura del oleoducto por la deformación y arrugamiento de la tubería en la superficie del terreno fallado.

Impactos:

- Paralización bombeo de crudo por 4 días
- Restricción vehicular por varios días
- Contaminación del agua de los ríos Quijos, Coca y Napo.
- Afectación a la captación de agua potable para la ciudad del Coca y desabastecimiento de agua.
- Afectación a las comunidades y atención en los medios internacionales.

Respuesta:

- Petroecuador invirtió 300K dólares en la reparación y soterramiento del tramo de tubería afectada.
- Costos de la atención de la contingencia, limpieza, remediación y compensación superaron varias decenas de millones (indicación actores sectoriales).
- Articulación interinstitucional para la respuesta y recuperación: Petroecuador, COE, MRNR, GAD locales, Cancillería.

Lecciones aprendidas:

- Monitoreo meteorológico, geotécnico y visitas de inspección.
- Análisis de vulnerabilidad de sitios con susceptibilidad.
- Modelos hidrológicos afinados con datos medidos en sitios.
- Planes de prevención articulados con otros sectores: transporte, energía.

En función del proceso desarrollado en este análisis de riesgo con los actores sectoriales se propone un esquema basado en algunas de las lecciones aprendidas durante el proceso y que considera también las recomendaciones para la adaptación al cambio climático.

5. Conclusiones

- El presente análisis ha encontrado que existe una tendencia histórica al aumento de la precipitación en la mayoría de los tramos de la infraestructura del SOTE, por lo tanto, en escenarios de cambio climático la magnitud y recurrencia de eventos extremos aumentará progresivamente.
- Los tramos en la zona del SOTE en Esmeraldas se consideran como los más expuestos a impactos por inundaciones, mientras que los deslizamientos están preferentemente en la zona interandina y

amazonia, en los sectores de Cascales – Lumbaqui, zona del Reventador – San Rafael – Quijos, Santa Rosa – Baeza – Papallacta, y el sector de La Pala – Alluriquín.

- Con un incremento del 7% al 38% de precipitación para un periodo de retorno de 10 a 100 años, se espera un incremento de entre el 7 al 42% en los caudales de las cuencas en la Amazonía. Y para las cuencas en la zona costera se esperan mayores incrementos en la precipitación entre un 66% a un 119%, que aumentará los caudales máximos entre un 19% y 64%. En conclusión, mayores caudales y escorrentías pueden desencadenar inundaciones o procesos de deslizamientos o erosión mayores a los conocidos.
- En los escenarios futuros el de mayor impacto para las zonas de Esmeraldas, corresponden a los AT 3 y AT4. Con precipitaciones diarias > 27 mm, velocidades > 4m/s y niveles de inundación de 1m o mas, siendo estos valores considerados de alto impacto.
- Las lluvias de baja intensidad, pero acumuladas, en zonas con condiciones de suelo desfavorable (por ejemplo, limo- arcillosa), pueden provocar suelos saturados y deslizamientos en zonas que ya son susceptibles a estos eventos, por lo cual son de atención relevante al igual que las precipitaciones de alta intensidad..
- Se ratifica la importancia de generar matrices de eventos con información climática, geotécnica y de impacto para poder validar, monitorear y evaluar las medidas de respuesta y de prevención, es necesario pasar de una respuesta a una contingencia a un enfoque de gestión de riesgo y prevención.

6. Recomendaciones

- El sector de El Reventador es una zona de alta susceptibilidad a deslizamiento y con las condiciones actuales de erosión, hace necesario pensar en una reubicación de la infraestructura del SOTE por el riesgo inminente de varios deslizamientos
- Realizar el mapeo de las zonas soterradas, pasos aéreos y puentes en la ruta del oleoducto, que permitan realizar análisis de exposición y de vulnerabilidad de la infraestructura.
- Incluir en una base de datos los trabajos geotécnicos realizados por EP Petroecuador y OCP Ecuador S.A., con el objetivo de poder

migrar a análisis de estabilidad de taludes con modelos físicos en los sectores priorizados.

- Realizar un levantamiento topográfico lidar de alta resolución (1 m o inferior) sobre al menos el derecho de vía de los poliductos y oleoductos. Esto permitirá generar modelos más detallados de las amenazas biofísicas en la infraestructura de hidrocarburos.
- Incluir algunas variables climáticas adicionales como: velocidad del viento, velocidad del agua, humedad del suelo, flujos de detritus, procesos de subsidencia, temperatura, presencia de nieve, así como número de días sin lluvia (sequia) para manejo de inundaciones y deslizamientos.

7. Bibliografía

- Adeyemi, O., & Fashae, O. A. (2018). Urbanisation and hydraulic geometry response: a model approach. *International Journal of Water*, 12(2), 103. <https://doi.org/10.1504/ijw.2018.10012407>
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. and Reichenbach, P. (1995) GIS Technology in Mapping Landslide Hazard. In: Carrara, A. and Guzzetti, F., Eds., *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 135-176. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8404-3_8
- Carillo, C., & Mejía, N. (2016). Utilización del modelo Hec-HMS en sistemas de pronóstico hidrológico y verificación de los datos obtenidos por el modelo CPMORH, en la cuenca del río sucio. El Salvador: Universidad de El Salvador
- Castillo, J. (n.d.). *Quantitative risk analysis of transportation infrastructure affected by river flooding: A Case Study considering Climate Change*. <https://repository.tudelft.nl/>
- Castro, C. v., & Maidment, D. R. (2020). GIS preprocessing for rapid initialization of HEC-HMS hydrological basin models using web-based data services. *Environmental Modelling & Software*, 130, 104732. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2020.104732>.
- CIIFEN. (2022). *Climatología y Anomalía*. CIIFEN. <https://ciifen.org/climatologia-y-anomalia/>
- Dunkerlye, D. (2022). Huff quartile classification of rainfall intensity profiles ('storm patterns'): A modified approach employing an intensity threshold. *CATENA*, 216, 106371. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2022.106371>
- EU-CIRCLE. (2018). A pan-European framework for strengthening Critical Infrastructure resilience to climate change. www.eu-circle.eu
- Forzieri, G.; Bianchi, A.; Silva, F.B.; Marin Herrera, M.A.; Leblois, A.; Lavalle, C.; Aerts, J.C.J.H.; Feyen, L. Escalating impacts of climate extremes on critical

- infrastructures in Europe. *Glob. Environ. Chang.* **2018**, 48, 97–107.
- González, O., & Buitrago, C. (2012). *Hoja metodológica del indicador Anomalía de precipitación*. chrome-extension://efaidnbmnmbpcjpcglclefindmkaj/http://www.ideam.gov.co/documents/24155/123679/18-1.08_HM_Anomalia_precipitacion_3_Fl.pdf/c60552b2-0808-4a1c-9c29-d34b3bb7662d
- Guzmán, A., Gaspari, F., de Antueno, L., & Montealegre, F. (2019). Identificación de Anomalías Climáticas a través de precipitación satelital, en el sistema Serrano Bonaerense - Argentina. *Desarrollo Sustentable y Desafíos Ambientales*.
- Guachamín, García, Arteaga, Cadena, E. (2015). *Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación instituto nacional de meteorología e hidrología equipo técnico 2015 determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación*.
- Hydrologic Engineering Center. (2022a). HEC-RAS River Analysis System - User's Manual.
- Hydrologic Engineering Center. (2022b). Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual.
- INGEMMET. (2013). ZONAS CRITICAS POR PELIGROS GEOLOGICOS EN LA REGIÓN PUNO. In *Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico*.
- INAMHI. (2019). Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación. Actualización del estudio de lluvias intensas. Versión 2. Quito, Ecuador.
- IPCC. (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.
- Katopodis, T., Adamides, E. D., Sfetsos, A., & Mountouris, A. (2021). Incorporating future climate scenarios in oil industry's risk assessment: A greek refinery case study. *Sustainability (Switzerland)*, 13(22). <https://doi.org/10.3390/su132212825>
- Katopodis, T., & Sfetsos, A. (2019). A review of climate change impacts to oil sector critical services and suggested recommendations for industry uptake. In *Infrastructures* (Vol. 4, Issue 4). MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/infrastructures4040074>
- Knebl, M. R., Yang, Z. L., Hutchison, K., & Maidment, D. R. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/ RAS: A case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75(4 SPEC. ISS.), 325–336. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.024>
- Mormeneo, I., & Díaz, R. (2003). Método para clasificar la anomalía de lluvias. *Revista Brasileira de Agronometeorología*, 11(1), 159–167.
- Olaya, J., Dewez, R., Guerrero, P., Benoit, L., Nalesso, M., & Zuloaga, D. (2020). Incluir el cambio climático en el análisis hidrológico para el trazado y diseño de infraestructura de transporte.
- Ozdemir, A. (2020). A Comparative Study of the Frequency Ratio, Analytical Hierarchy Process, Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic Methods for Landslide Susceptibility Mapping: Taşkent (Konya), Turkey. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(4), 4129–4157. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01284-8>
- PLANACC. (2021). Generación de información de clima futuro a nivel nacional para el periodo 2020 –2050 a partir de un análisis de circulación atmosférica y el empleo de modelos climáticos del CMIP6.
- Petroecuador. (2014) Plan de Manejo Ambiental, SOTE
- Prieto Villarroya, J., Farias, H. D., & Amarilla, M. E. (n.d.). *Estimación del parámetro hidrológico del Número de Curva NC: Automatización del cálculo mediante S.I.G. y nuevas fuentes de información cartográfica. Caso del área urbana de Pozo Hondo*. Publicación Geológica Multinacional (PMA: GCA). (2007). "Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. Grupo de Estándares para Movimientos en Masa (GEMMA).
- Quirogoa, V. M., Kurea, S., Udoa, K., & Manoa, A. (2016). Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *RIBAGUA - Revista Iberoamericana Del Agua*, 3(1), 25–33. <https://doi.org/10.1016/J.RIBA.2015.12.001>
- Saaty, T. L., (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.