

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y  
PETRÓLEOS**

**EVALUACIÓN DE LOS FACTORES QUE CONTROLAN LA  
EROSIÓN REGRESIVA EN EL RÍO COCA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERA GEÓLOGA**

**OPCIÓN: ARTÍCULO ACADÉMICO**

**MARILYN VALERIA MENESES CARRILLO**  
marilyn.meneses@epn.edu.ec

**DIRECTOR: PhD. ISABEL CAROLINA BERNAL CARRERA**  
isabel.bernal@epn.edu.ec

**Quito, octubre 2022**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Yo Marilyn Valeria Meneses Carrillo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mí autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Marilyn Valeria Meneses Carrillo

## **CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Marilyn Valeria Meneses Carrillo, bajo mi supervisión.

---

PhD. Isabel Carolina Bernal  
**DIRECTORA**

## DEDICATORIA

A mis amados padres Vicente y Marcia

A mis hermanos Esteban y Sebastián

A mi cariñoso novio Jefferson

Y a Benjamín el amor y luz de mi vida.

## **AGRADECIMIENTO**

Mi gratitud infinita a mis padres quienes siempre han estado a mi lado, gracias por creer en mí, por su paciencia, dedicación y amor.

A la PhD. Isabel Carolina Bernal quien confió en mi para la realización de este trabajo y quien con su conocimiento y apoyo me guio a través de este proceso.

Al PhD. Pedro Reyes por sus consejos, apoyo y enseñanzas.

A mis hermanos, familiares, amigos y a todos quienes de alguna manera aportaron a la realización de este trabajo.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....</b>	<b>II</b>
<b>CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR .....</b>	<b>III</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO.....</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XII</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
Pregunta de investigación.....	3
Objetivos.....	3
Objetivo General .....	3
Objetivos Específicos.....	3
Hipótesis.....	3
<b>CAPÍTULO I: REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
1.1. Ubicación del área de estudio.....	4
1.2. Marco Geológico .....	4
1.2.1. Geología Regional.....	4
1.2.1.1. Zona Subandina .....	6
1.2.2. Geología Local .....	7
1.2.3. Actividad volcánica .....	9
1.2.4. Actividad Tectónica.....	10
1.2.5. Cascada de San Rafael.....	11
1.2.5.1. Génesis de la Cascada San Rafael .....	11
1.2.5.2. Colapso de la Cascada de San Rafael .....	12
1.3. Geomorfología Fluvial.....	13
1.3.1. Cuenca Hidrográfica .....	14

1.3.1.1.	Características.....	14
1.3.1.2.	Clasificación .....	14
1.3.2.	Sistema Fluvial .....	16
1.3.2.1.	Zonas de un sistema fluvial .....	16
1.3.2.2.	Variables de Control y de Respuesta.....	17
1.3.2.3.	Alteración de variables del sistema fluvial.....	17
1.3.3.	Trabajo Geológico en los ríos. ....	19
1.3.3.1.	Ley de Poder de la Corriente “Stream Power Law” .....	19
1.3.3.2.	Erosión Regresiva .....	20
1.3.3.3.	Transporte de Sedimentos.....	20
1.3.3.4.	Sedimentación.....	21
1.3.4.	Parámetros físicos de un río .....	22
1.3.4.1.	Perfil longitudinal del río .....	22
1.3.4.2.	Pendiente media del cauce principal .....	23
1.3.4.3.	Knickpoints .....	24
<b>CAPÍTULO II: ASPECTOS METODOLÓGICOS .....</b>		<b>25</b>
2.1.	Recopilación de datos .....	25
2.2.	Elaboración del perfil longitudinal del río Coca .....	26
2.3.	Cálculo de la pendiente media del cauce principal.....	28
2.4.	Determinación de la Tasa de erosión .....	28
2.5.	Poder Erosivo .....	30
<b>CAPÍTULO III: RESULTADOS .....</b>		<b>31</b>
3.1.	Proceso Erosivo en el río Coca.....	31
3.1.1.	Erosión Regresiva .....	31
3.1.1.1.	Perfiles Longitudinales del río Coca.....	31
3.1.1.2.	Pendiente del Cauce Principal.....	34
3.1.2.	Erosión Vertical y Lateral.....	36
3.2.	Poder Erosivo del río Coca .....	43
<b>CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN.....</b>		<b>47</b>

<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>49</b>
5.1. Conclusiones .....	49
5.2. Recomendaciones .....	50
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>51</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>54</b>
Anexo I. ....	54
Anexo II. ....	70



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Antes y después de la desaparición de la Cascada San Rafael el 2 de febrero de 2020. a) Antigua vista de la cascada San Rafael. Fuente: Ministerio de Turismo Ecuador. b) Vista desde aguas abajo del arco natural de la ex Cascada San Rafael. El hilo de agua que se ve es de un riachuelo cercano, el agua del río Coca cae detrás del arco de roca. Fuente: MAE Ecuador. ....	2
<b>Figura 2.</b> Ubicación del área de estudio mostrando: a) la ubicación de la CHRC con respecto al Ecuador; b) la CHRC con sus principales drenajes, volcanes y poblados; y, c) el área de estudio, de color rojo las Obras de Captación y la Cascada de San Rafael (CSR), en naranja el Poblado de San Luis y la ubicación del volcán El Reventador. ....	5
<b>Figura 3.</b> Sección de los Andes Ecuatoriano Latitud 2°, mostrando las 5 regiones morfotectónicas del Ecuador. (Modificado de Jaillard et al., 2002).....	6
<b>Figura 4.</b> Mapa mostrando las unidades morfo-tectónicas de la Zona Subandina y los principales volcanes que amenazan la CHRC. ....	7
<b>Figura 5.</b> Mapa Geológico de la zona de estudio (Modificado de Meneses et al., 2020) .....	9
<b>Figura 6.</b> Principales Fallas del área de estudio. (Modificado de Egüez et al., 2003 e INECEL, 1988).....	10
<b>Figura 7.</b> Perfil Longitudinal esquemático de la Cascada de San Rafael antes del colapso de la cascada el 02 de febrero 2020 (Modificado de Micheli, 2021).....	11
<b>Figura 8.</b> Modelo conceptual para la evolución de la ex Cascada San Rafael. (a) Avalancha 2 y El Reventador. (b) Emplazamiento del flujo de lava. (c) Represamiento del río Coca y formación de un lago. (d) Nacimiento de la cascada. (e) Retroceso de la cascada. (f) Formación de una cueva. (g) Formación de un sumidero (sinkhole). (h) Colapso del sumidero y desvío del río. (i) Erosión y desplazamiento hacia aguas arriba. (Tomado de Reyes et al., 2021).....	12
<b>Figura 9.</b> Modelo conceptual de los procesos que llevaron al colapso de la Cascada de San Rafael el 02 de febrero de 2020. (a) Socavación basal. (b) Filtración y tubificación. (c) Formación de un socavón. (d) Erosión y cambio en la pendiente. (Tomado de Micheli, 2021) .....	13
<b>Figura 10.</b> Clasificación de Cuencas Hidrográficas por su desembocadura. (Modificado de CONAGUA: <a href="https://www.gob.mx/conagua">https://www.gob.mx/conagua</a> ) .....	15
<b>Figura 11.</b> Zonas del sistema fluvial subdivididas en base a los procesos dominantes que operan dentro de cada zona (Charlton, 2008).....	16

<b>Figura 12.</b> Representación esquemática de la respuesta compleja en un sistema de drenaje como resultado de una caída en el nivel base (Modificado de Charlton, 2008). .....	19
<b>Figura 13.</b> Tipos de transporte de sedimentos. (Tomado de geomorfologiadegerman.blogspot.com).....	21
<b>Figura 14.</b> Esquema mostrando el perfil longitudinal del río. ....	23
<b>Figura 15.</b> Diagrama esquemático que muestra los factores desencadenantes más comunes para la formación de knickpoints a lo largo del perfil longitudinal (Tomado de Ahmed M., et al., 2019).....	24
<b>Figura 16.</b> Mapa mostrando una vista en planta del trazo del perfil longitudinal del río Coca. ....	31
<b>Figura 17.</b> Perfiles Longitudinales mostrando la evolución del perfil y cambios en la pendiente del río Coca. ....	32
<b>Figura 18.</b> Perfiles Longitudinales del río Coca junto a su Perfil Teórico de Equilibrio. .....	33
<b>Figura 19.</b> Ubicación de los perfiles longitudinales por MDT. ....	34
<b>Figura 20.</b> Perfiles Longitudinales correspondiente a las MDT proporcionador por CELEC.....	35
<b>Figura 21.</b> Isla aguas abajo de la Captación de la HCCS asociada a los sedimentos finos presentes en el caudal ecológico. ....	37
<b>Figura 22.</b> Mapa mostrando la ubicación de las secciones transversales a lo largo del río Coca. ....	38
<b>Figura 23.</b> Secciones Transversales del río Coca .....	39
<b>Figura 24.</b> Secciones Transversales del río Coca .....	40
<b>Figura 25.</b> Secciones Transversales del río Coca .....	41
<b>Figura 26.</b> Secciones Transversales del río Coca .....	42
<b>Figura 27.</b> Gráfica del Caudal (m <sup>3</sup> /s) & Avance acumulado de la erosión (km) vs Tiempo.....	44
<b>Figura 28.</b> Gráfica del Poder Erosivo (kW/m) & Avance acumulado de la erosión (km) vs Tiempo. ....	44
<b>Figura 29.</b> Gráfica de Litología, Poder Erosivo (kW/m) y Tasa de erosión (km/año) vs Tiempo.....	45
<b>Figura 30.</b> Gráfica de Litología y Avance acumulado del avance de la erosión (km) vs Tiempo.....	45
<b>Figura 31.</b> Litologías por las que avanzo la ERF. ....	46
<b>Figura 32.</b> Gráfica del Caudal (m <sup>3</sup> /s) y Poder erosivo (kW/m) vs Tiempo. ....	46

## RESUMEN

Se cree que el inicio de la Cascada de San Rafael (CSR) empezó después de la depositación de la avalancha de escombros: *Avalancha 2* asociada al colapso del Paleo-Reventador y el posterior emplazamiento de un flujo de lava que brotó del volcán El Reventador. El 2 de febrero de 2020 el colapso de un sumidero “sinkhole” desvió el cauce del río Coca por debajo del flujo de lava que formaba la CSR, provocando la desaparición de la cascada y un agresivo Proceso de Erosión Regresiva (PER) que ha cambiado la morfología del alto Coca.

Este estudio se enfoca en la determinación de los principales parámetros que controlan el PER entre la Captación de la Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair y la extinta Cascada San Rafael, con este objetivo se elaboró perfiles longitudinales y secciones transversales, así como también se calculó la tasa de erosión y el poder erosivo a partir de los datos proporcionados por CELEC, IIGE, IGM y SIGTIERRAS.

El perfil del río Coca está cambiando constantemente tratando de acercarse al perfil de equilibrio teórico a través de procesos de agradación, suavizando su pendiente adaptándose a su nuevo Nivel Base Local. Se determinó que el PER es tridimensional por lo que existe Erosión Vertical (EV), Erosión Lateral (EL) y Erosión Regresiva Frontal (ERF). Los valores obtenidos para las tasas de erosión y poder erosivo permiten afirmar que el principal parámetro que controla la ERF en el río Coca es el caudal ya que con caudales altos el poder erosivo aumenta y se reinicia el PER, aunque no es el único control. La ERF como se observó en los perfiles longitudinales se detiene por determinados periodos de tiempo y reinicia su avance con caudales mayores a 1000 m<sup>3</sup>/s; sin embargo, la litología presenta mayor resistencia en ciertos puntos del río por lo que se necesita un mayor poder erosivo para que se reinicie el PER. La EV y la EL son continuas durante todo el año hidrológico y están asociadas a la litología del área de estudio que corresponde principalmente a depósitos aluviales, avalanchas de escombros y sedimentos recientes los cuales son de poca resistencia y favorecen la erosión, por lo tanto, la EV constantemente esta incisando el cauce del río Coca volviéndolo más profundo y quitándole estabilidad a los taludes provocando números deslizamientos (EL).

**Palabras Clave:** Erosión Regresiva, río Coca, Nivel Base, Poder Erosivo, Tasa Erosión.

## ABSTRACT

It is believed that the initiation of the San Rafael Waterfall (SRW) began after the deposition of the debris avalanche: *Avalanche 2* associated with the collapse of the Paleo-Reventador and the subsequent emplacement of a lava flow that erupted from the El Reventador volcano. On February 2, 2020, the collapse of a sinkhole diverted the Coca River bed below the lava flow that formed the SRW, causing the disappearance of the waterfall and an aggressive Regressive Erosion Process (REP) that has changed the morphology of the river.

This study focuses on the determination of the main parameters that control the REP between the catchment of the Coca Codo Sinclair Hydroelectric and the extinct San Rafael Waterfall, with this objective longitudinal profiles and cross sections were elaborated as well as the erosion rate and the erosive power were calculated from the data provided by CELEC, IIGE, IGM and SIGTIERRAS.

The profile of the Coca River is constantly changing trying to get closer to the theoretical equilibrium profile through aggradation processes, decreasing its slope adapting to its new Local Base Level. It was determined that the PER is three-dimensional so there is Vertical Erosion (VE), Lateral Erosion (LE) and Frontal Regressive Erosion (FRE). The values obtained for the erosion rates and stream power allow us to affirm that the main parameter controlled by the FRE in the Coca River is the discharge, since with high discharges the stream power increases and the REP restarts, although it is not the only control. The FRE, as observed in the longitudinal profiles, stops for certain periods of time and restarts its advance with discharges greater than  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ; however, the lithology presents greater resistance at certain points of the river, so a greater stream power is needed for the REP to restart. VE and LE are continuous throughout the hydrological year and are associated to the lithology of the study area, which corresponds mainly to alluvial deposits, debris avalanches and recent sediments which are of little resistance and favor erosion, therefore the VE is constantly incising the Coca River bed, making it deeper and reducing the stability of the slopes, causing numerous landslides (LE).

**Keywords:** Regressive Erosion, Coca River, Base Level, Stream Power, Erosion Rate.

# EVALUACIÓN DE LOS FACTORES QUE CONTROLAN LA EROSIÓN REGRESIVA EN EL RÍO COCA

## INTRODUCCIÓN

La Cuenca Hidrográfica del río Coca (CHRC) forma parte de la cuenca alta del río Napo, cubre un área de 5283.74 km<sup>2</sup> y está ubicada al nororiente del Ecuador (Figura 2a) en la Zona Subandina, en el Levantamiento Napo, que es un área de transición entre los Andes y la Amazonía. La CHRC se caracteriza por un régimen climático cálido húmedo en la zona media baja y clima frío seco en las partes altas de las montañas (Andrade, 2016; Báez, 2018). El río Coca se forma de la unión del río Quijos y el río Salado, el mismo que describe una curva denominada Codo Sinclair que tiene un desnivel de 620 metros, en cuyo tramo se localizaba la extinta Cascada de San Rafael (CSR), (Andrade, 2016; IIGE, 2021).

La CSR con una caída de 132m (Figura 1a), fue uno de los principales sitios turísticos del Ecuador y tuvo su origen hace aproximadamente 19 000 años, cuando un flujo de lava procedente del volcán El Reventador interrumpió el cauce original del río Coca, creando una cascada que actuaba como una barrera natural o “knickpoint”, que represaba todo el material a lo largo del cauce aguas arriba de esta (Reyes et al., 2021; Micheli, 2021; Observatorio de Ríos Andinos, 2021). Sin embargo, el 2 de febrero de 2020 la cascada desapareció (Figura 1b) desencadenando así un Proceso de Erosión Regresiva (PER) (Herrera et al., 2020; IIGE, 2021; Reyes et al., 2021). Al perder su “knickpoint” (CSR), que había sido reconocida como nivel base local del río Coca (Báez, 2018), el río empezó un reajuste para encontrar nuevamente su equilibrio dinámico erosionando hacia aguas arriba, lo que le da su nombre al PER (Bernal, 2020). Un proceso erosivo como el actual no ha sido reportado nunca antes en la literatura científica y hasta la fecha ha avanzado a un ritmo alarmante de aproximadamente 11 km en 2 años y 5 meses desde su inicio en 2020 (CELEC, 2021).

En el río Coca, la Erosión Regresiva en el transcurso de este tiempo ha provocado un cambio profundo en el paisaje del alto Coca, socavando el cauce del río, erosionando sus orillas, formando gargantas y taludes sub-verticales que se erosionan lateralmente provocando movimientos en masa y extendiendo su acción aguas arriba del punto inicial en la CSR. Además, el desequilibrio fluvial del río Coca ha afectado infraestructura estratégica para la economía ecuatoriana, la cual había sido construida en las márgenes del río Coca: el Oleoducto de Crudos Pesados (OCP), el Sistema de Oleoductos

Transecuatorio (SOTE), Poliducto Shushufindi – Quito, la autopista E-45 Quito - Lago Agrio y el Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair, así como también a las comunidades del sector. En este contexto, anteriores investigaciones documentaron las características litoestratigráficas y estructurales de la zona influencia de la erosión regresiva. En donde, la sedimentación y erosión fluvial del río Coca interactúan con depósitos volcánicos y volcanoclásticos, del volcán El Reventador (Bernal, 2020; Herrera, et al., 2020; Reyes, et al., 2021; IIGE, 2021; Micheli, 2021).

La Erosión Regresiva no ha sido reconocida como una amenaza geomorfológica en la literatura científica y se ha limitado a estudiar este tipo de fenómenos desde un punto de vista estratigráfico y sedimentológico, por lo que su desarrollo hoy en día en el río Coca nos ha permitido observar su evolución. El ritmo de la erosión no ha sido permanente ni sostenido en el tiempo (Observatorio Ríos Andinos, 2021), por lo que es importante realizar un estudio de los factores que han acelerado o frenado el avance de la erosión. Por esta razón esta investigación analiza los principales factores que controlan el PER en el río Coca, considerando la ley de potencia de la corriente “Stream power law” (Harel et al., 2016), el perfil longitudinal y secciones transversales del río Coca. El área de estudio definida se ubica en la cuenca hidrográfica media del río Coca, entre las obras de Captación de la Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair (HCCS) y la extinta Cascada San Rafael (CSR).



**Figura 1.** Antes y después de la desaparición de la Cascada San Rafael el 2 de febrero de 2020. a) Antigua vista de la cascada San Rafael. Fuente: Ministerio de Turismo Ecuador. b) Vista desde aguas abajo del arco natural de la ex Cascada San Rafael. El hilo de agua que se ve es de un riachuelo cercano, el agua del río Coca cae detrás del arco de roca. Fuente: MAE Ecuador.

## **Pregunta de investigación**

¿Cuáles son los principales factores que controlan la erosión regresiva del río Coca?

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Determinar los principales parámetros que controlan la erosión regresiva en la cuenca hidrográfica media del río Coca, entre las obras de Captación de la Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair y la extinta Cascada San Rafael.

### **Objetivos Específicos**

- Recopilar y analizar información del caudal máximo ( $Q_{max}$ ) de los monitoreos diarios publicados por CELEC desde mayo de 2020 hasta diciembre de 2021.
- Calcular la tasa de erosión mediante la aplicación de la Ley de potencia de corriente "Stream Power Law".
- Evaluar la tasa de erosión en función del caudal y la litología.
- Analizar la evolución del perfil longitudinal y secciones transversales del río Coca en el área de estudio.

## **Hipótesis**

Los factores que controlan la erosión regresiva en el río Coca son el caudal y la litología del fondo del lecho.

# **CAPÍTULO I: REFERENCIAL TEÓRICO**

## **1.1. Ubicación del área de estudio**

El área de estudio se ubica en las provincias de Napo y Sucumbíos, entre el cantón El Chaco y la parroquia El Reventador (Figura 2b), desde las obras de Captación de la HCCS hasta la extinta CSR (Figura 2c), y comprende un área de 184,32 km<sup>2</sup>.

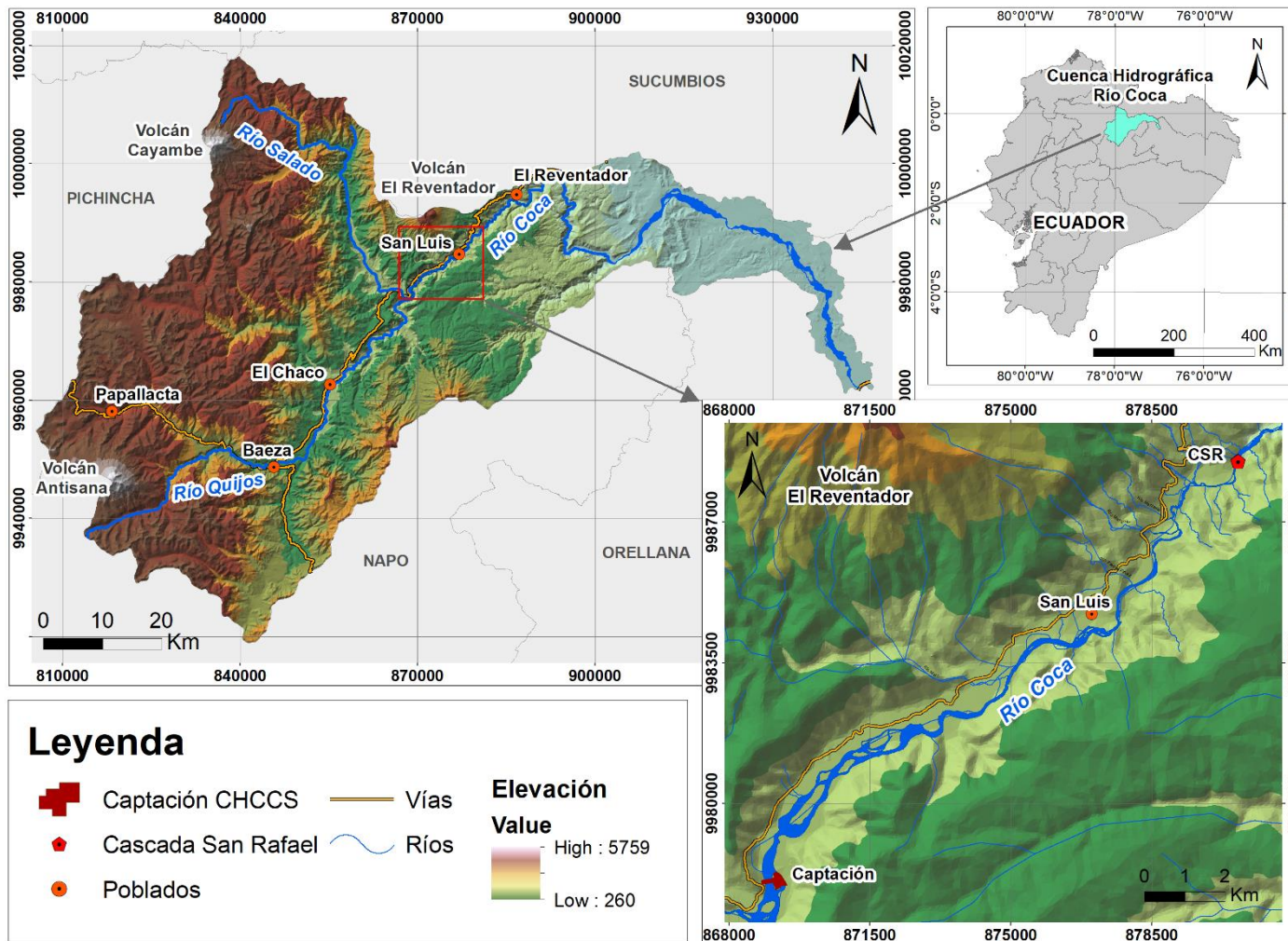
Para acceder al área de estudio desde el Distrito Metropolitano de Quito se puede realizar por vía terrestre siguiendo la carretera E-20 hasta la Y de Baeza y posteriormente por la Autopista E-45 que comunicaba las ciudades de Quito y Lago Agrio (Figura 2b).

## **1.2. Marco Geológico**

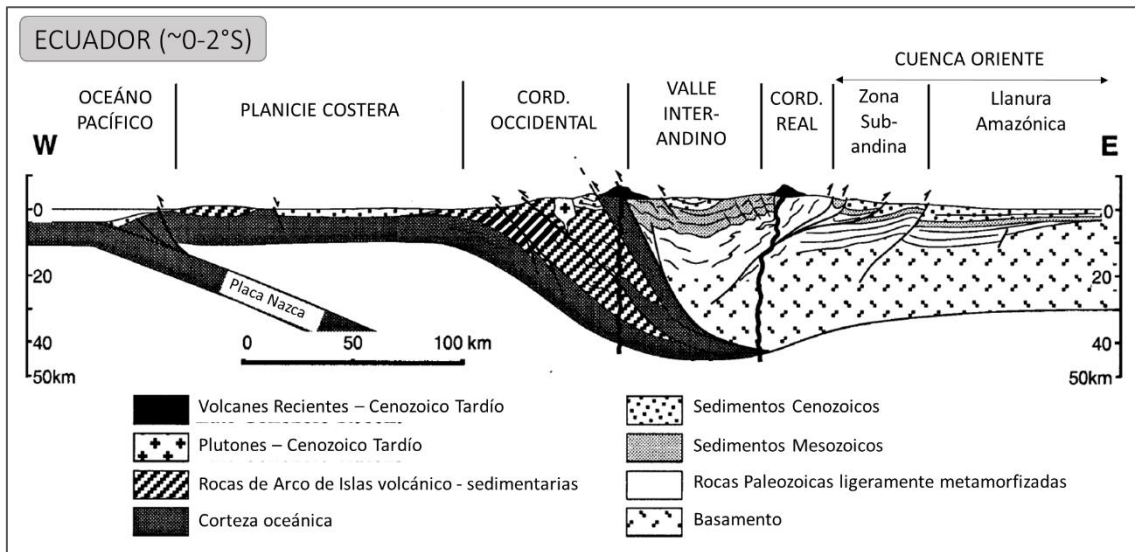
### **1.2.1. Geología Regional**

El Ecuador se encuentra ubicado al Noroeste de Sudamérica, en un margen convergente activo, lo que ha influenciado el desarrollo de actividad sísmica, volcánica y tectónica. La margen ecuatoriana está caracterizada por: la subducción de la placa Nazca hacia el Este por debajo de la placa Sudamericana, la entrada en la subducción de la Cordillera de Carnegie y el escape lateral del bloque Norandino (Spikings et al., 2001; Tibaldi et al., 2007). En este contexto Ecuador comprende 5 regiones morfotectónicas paralelas con dirección SW – NE, separadas por zonas de sutura, límites de terrenos o sistemas de fallas principales (Egüez et al., 2003; Vallejo et al., 2009) (Figura 3). De oeste a este las regiones morfotectónicas comprenden: 1) una Cuenca de Antearco que corresponde a la Planicie Costera, cuyos depósitos de antearco del Paleógeno al Neógeno yacen sobre un basamento cristalino máfico (Egüez et al., 2003; Vallejo et al., 2009), 2) la Cordillera Occidental incluye un basamento mesozoico acrecionado de afinidad oceánica y de arco volcánico, unidades volcano-clásticas y sedimentarias (Tibaldi et al., 2007; Gutiérrez et al., 2019), 3) el Valle Interandino constituido por gruesos depósitos volcánicos del Plioceno al Pleistoceno y por pequeños basamentos internos de rocas metamórficas y máficas que ocurren esporádicamente a lo largo de la depresión (Aspden & Litherland, 1992; Winkler, et al., 2005); 4) la Cordillera Oriental (Cordillera Real) está compuesta por rocas metamórficas Paleozoicas intruidas por granitoides Mesozoicos (Aspden & Litherland, 1992; Tibaldi et al., 2007); y por último 5) la Cuenca Oriente que incluye a la Zona Subandina, es una cuenca de antepaís de trasarco del Cretácico Superior al Holoceno que se desarrolló en respuesta al crecimiento de la Cordillera Real (Vallejo et al., 2009; Gutiérrez et al., 2019).





**Figura 2.** Ubicación del área de estudio mostrando: a) la ubicación de la CHRC con respecto al Ecuador; b) la CHRC con sus principales drenajes, volcanes y poblados; y, c) el área de estudio, de color rojo las Obras de Captación y la Cascada de San Rafael (CSR), en naranja el Poblado de San Luis y la ubicación del volcán El Reventador.

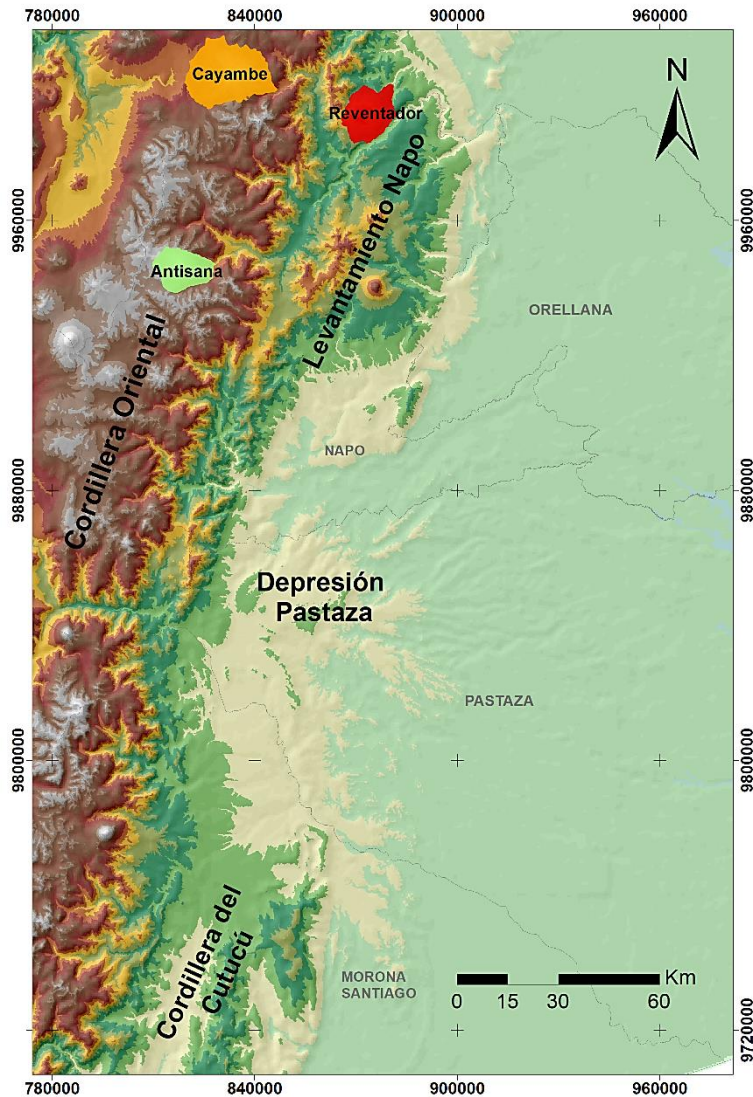


**Figura 3.** Sección de los Andes Ecuatoriano Latitud 2°, mostrando las 5 regiones morfotectónicas del Ecuador. (Modificado de Jaillard et al., 2002)

#### 1.2.1.1. Zona Subandina

La Zona Subandina es la zona de transición entre la Cordillera Real y la Cuenca Oriente y corresponde a la parte deformada de la Cuenca Oriente, resultado de la inversión tectónica de estructuras pre-existentes extensivas pre-cretácicas (Baby et al., 2004; Gutiérrez et al., 2019). Se divide de norte a sur en tres unidades morfo-tectónicas: el Levantamiento Napo; la Depresión Pastaza y la Cordillera del Cutucú (Figura 4). Esta zona incluye rocas sedimentarias mesozoicas plegadas y está delimitada por sistemas de fallas de cabalgamiento al Este que muestran un movimiento neógeno significativo (Egüez et al., 2003; Baby et al., 2004).

La Zona Subandina está influenciada por: 1) actividad tectónica asociada a sistemas de fallas activas que atraviesan la zona (Hall et al., 2004 ; Egüez et al., 2003); 2) actividad volcánica asociada a los volcanes Antisana, Cayambe y Reventador (Figura 4) que representan un riesgo volcánico permanente, siendo el volcán Reventador uno de los volcanes más activos del País (Reyes et al., 2021; IG-EPN 2021) y que ha interactuado durante miles de años con el río Coca (Reyes et al., 2021) y 3) importantes procesos de erosión reflejados en la fuerte incisión que presentan los valles de la Zona Subandina (Baby et al., 2004).



**Figura 4.** Mapa mostrando las unidades morfo-tectónicas de la Zona Subandina y los principales volcanes que amenazan la CHRC.

### 1.2.2. Geología Local

El área de estudio se encuentra al norte de la Zona Subandina en el Levantamiento Napo, al pie del volcán El Reventador dentro de la Cuenca Hidrográfica media del río Coca por lo que el relieve del valle está dominado por depósitos de origen volcánico como: avalanchas de escombros y flujos de lava, que coexisten con depósitos fluvio-lacustres (Meneses et al., 2020; IIGE 2021; Reyes et al., 2021).

El basamento del área de estudio está constituido por secuencias de rocas volcánicas y volcano-clásticas que corresponden a lavas basálticas y brechas de la Formación Misahuallí de edad Jurásica, intruidas por múltiples cuerpos de composición ácida (granitos y granodioritas) del Cretácico Inferior, cubiertos en discordancia angular por secuencias sedimentarias gruesas del Cretácico Superior: fluviales-costeras de la Formación Hollín y marinas de la Formación Napo, que se encuentran sobreyacidas por

las capas rojas continentales de la Formación Tena (Figura 5) (Meneses et al., 2020; IIGE 2021; Reyes et al., 2021).

Este basamento se encuentra cubierto por depósitos cuaternarios asociados a la actividad volcánica del volcán El Reventador y secuencias de relleno de la CHRC (Figura 5). Ocasionalmente, las rocas volcánicas de la Formación Misahuallí quedan cubiertas por un depósito cuaternario delgado y sin estructura que consiste en arena, limo y arcilla de color amarillo a marrón (Meneses et al., 2020; Reyes et al., 2021).

- **Depósitos de avalancha de escombros**

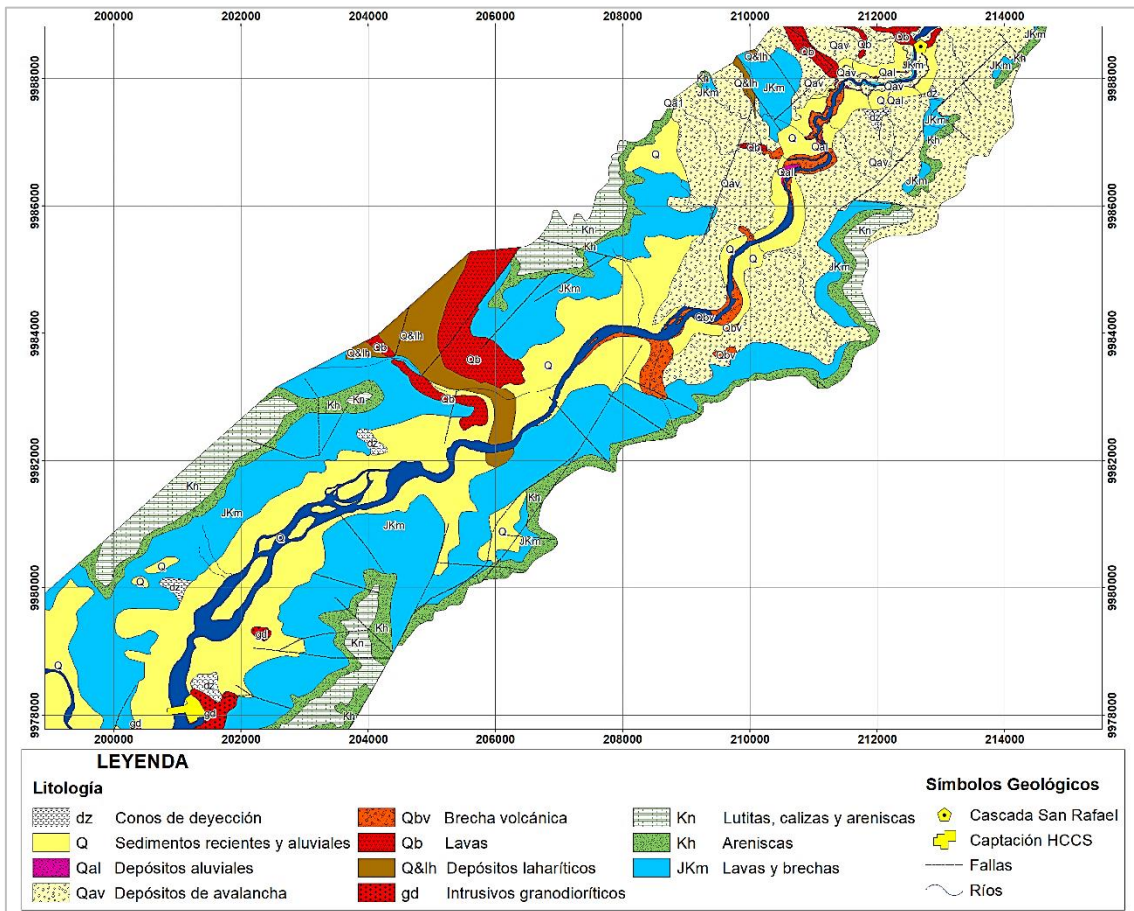
Son depósitos asociados al volcán Reventador corresponden 1) al Complejo Volcánico Basal (Reventador 1) conformado por ignimbritas, lavas andesítico-basálticas, brechas y flujos piroclásticos asociados al colapso del edificio volcánico basal, lo que dio lugar a un primer depósito de avalancha de escombros conocido como *Avalancha 1* (Meneses et al., 2020; IIGE 2021 ; Reyes et al., 2021), 2) al Volcán Paleo-Reventador (Reventador 2), que está dominado por una intercalación de depósitos de lavas andesíticas y flujos piroclásticos, producidos por el colapso sectorial del Paleo-Reventador originando un segundo depósito de avalancha de escombros conocido como *Avalancha 2* (Meneses et al., 2020; IIGE 2021 ; Reyes et al., 2021) y 3) al actual edificio El Reventador (Reventador 3) conformado por bloques de andesita basáltica, coladas de lava, brechas y lahares (Meneses et al., 2020; Reyes et al., 2021).

- **Depósitos fluvio-lacustres**

La presencia de estos depósitos se debe a la depositación ocurrida cuando, en diferentes épocas, se represó el valle del río Coca debido a la irrupción de materiales volcánicos de El Reventador (Meneses et al., 2020; Reyes et al., 2021). Estos depósitos consisten en capas horizontales de limo finamente estratificadas de color café a gris, con intercalaciones de arena rica en materia orgánica, morfológicamente forman terrazas inundadas, con relieves suaves (Meneses et al., 2020; IIGE 2021; Reyes et al., 2021).

- **Depósitos coluviales, aluviales**

Los depósitos coluviales generalmente se componen de bloques y fragmentos angulosos de las rocas subyacentes mezclados con la capa de suelo o del mismo material rocoso meteorizado, mientras que los depósitos aluviales se caracterizan por una mezcla de arena, grava y cantos rodados con algo de limo, aflora en morfologías de terrazas aluviales y en todo lo ancho del fondo del valle del río Coca (Meneses et al., 2020; IIGE 2021).



**Figura 5.** Mapa Geológico de la zona de estudio (Modificado de Meneses et al., 2020)

### 1.2.3. Actividad volcánica

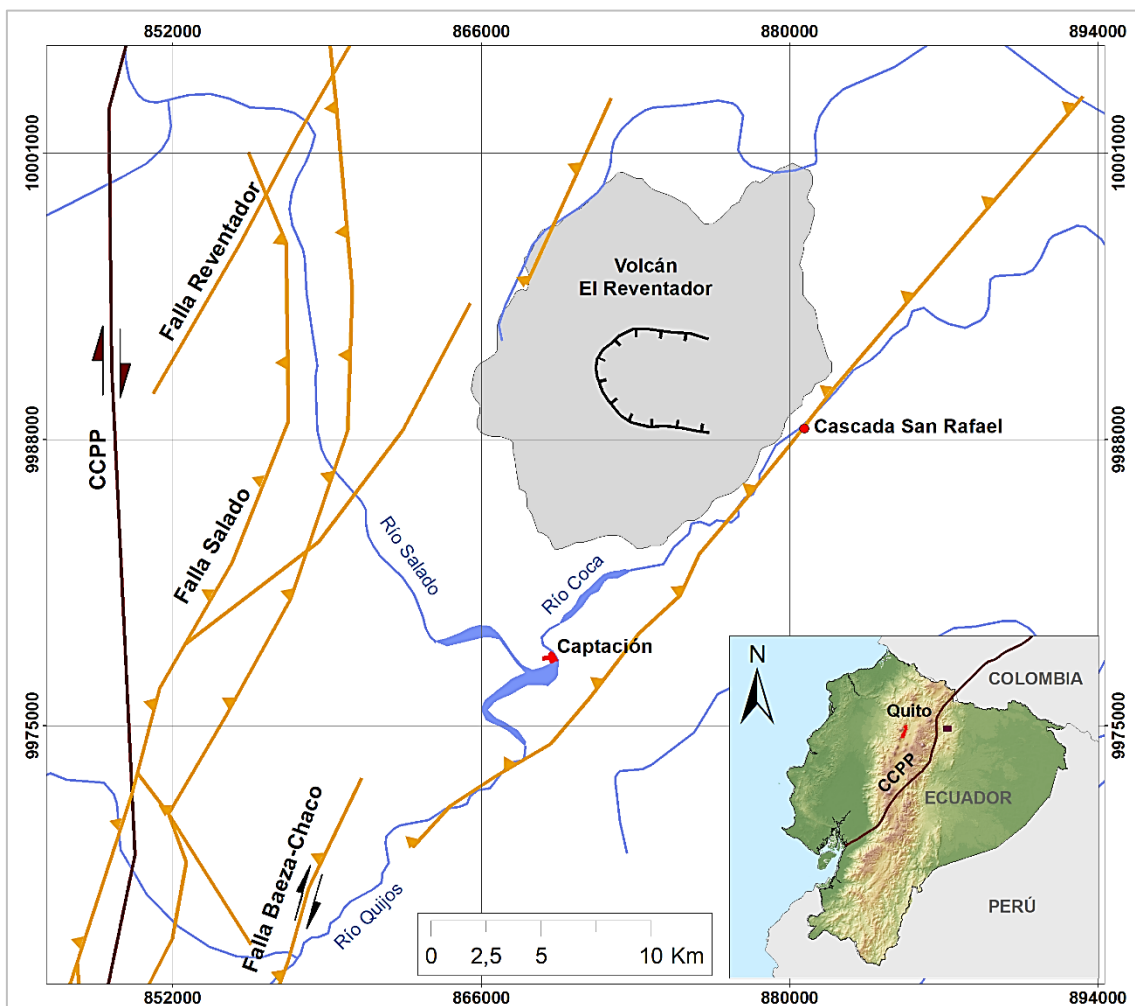
La actividad volcánica directa del área de estudio está determinada principalmente por el volcán El Reventador, el cual desde el año 2002 reinició su actividad eruptiva que se mantiene hasta la actualidad (Hall et al., 2004; IG-EPN 2021). El Reventador es un estratovolcán andesítico ubicado a 90 km al este de la ciudad de Quito y es uno de los volcanes que mayor actividad registra desde el periodo histórico en Ecuador (Tibaldi, 2005; IG-EPN 2021). Tras su reactivación en 2002, se caracteriza por la emisión de ceniza, lavas y flujos piroclásticos en eventos eruptivos de actividad alternante (Hall et al., 2004).

Geográficamente forma parte de una fila de volcanes junto con el Pan de Azúcar, el Sumaco y los Conos de Puyo, los cuales están todos ubicados en la Zona Subandina del Ecuador. Este complejo volcánico está constituido por dos edificios, uno antiguo que ha sufrido dos colapsos laterales que produjeron enormes avalanchas de escombros (*Avalanchas 1 y 2*), (Hall et al., 2004; IG-EPN 2021), dejando un gran escarpe de deslizamiento; y el cono actual que ha crecido dentro del anfiteatro dejado por dichos deslizamientos (IG-EPN 2021).

#### 1.2.4. Actividad Tectónica

La actividad tectónica a lo largo del valle del río Coca podría estar ligada a fallas locales que provienen del sistema a gran escala conocido como el sistema de fallas Chingual-Cosanga-Pallatanga-Puná (CCPP) que incluye la falla Baeza-Chaco (Figura 6) de rumbo noreste cuya prolongación se encuentra bajo el edificio Reventador (Egüez et al., 2003; Reyes et al., 2021).

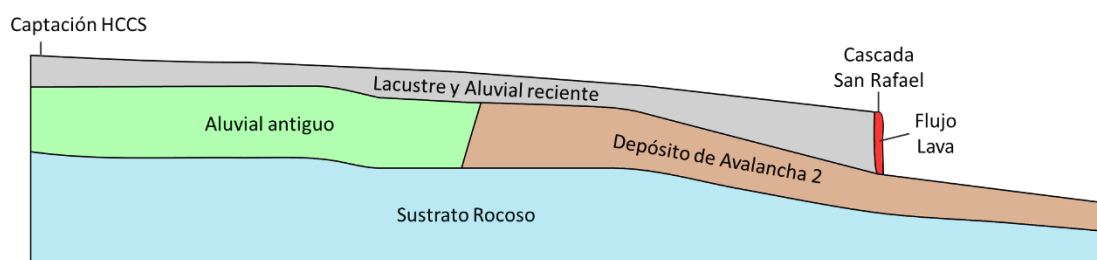
El sistema de fallas CCPP representa el sistema de fallas mejor desarrollado en Ecuador, constituye el límite tectónico oriental del Bloque Norandino y conecta tres subsistemas transpresivos e inversos diferentes: Su geomorfología se expresa por uno o más segmentos de falla paralelos con dirección N-S a NE-SW (Alvarado A. et al., 2016; Vaca S. et al., 2019).



**Figura 6.** Principales Fallas del área de estudio. (Modificado de Egüez et al., 2003 e INECEL, 1988).

### 1.2.5. Cascada de San Rafael

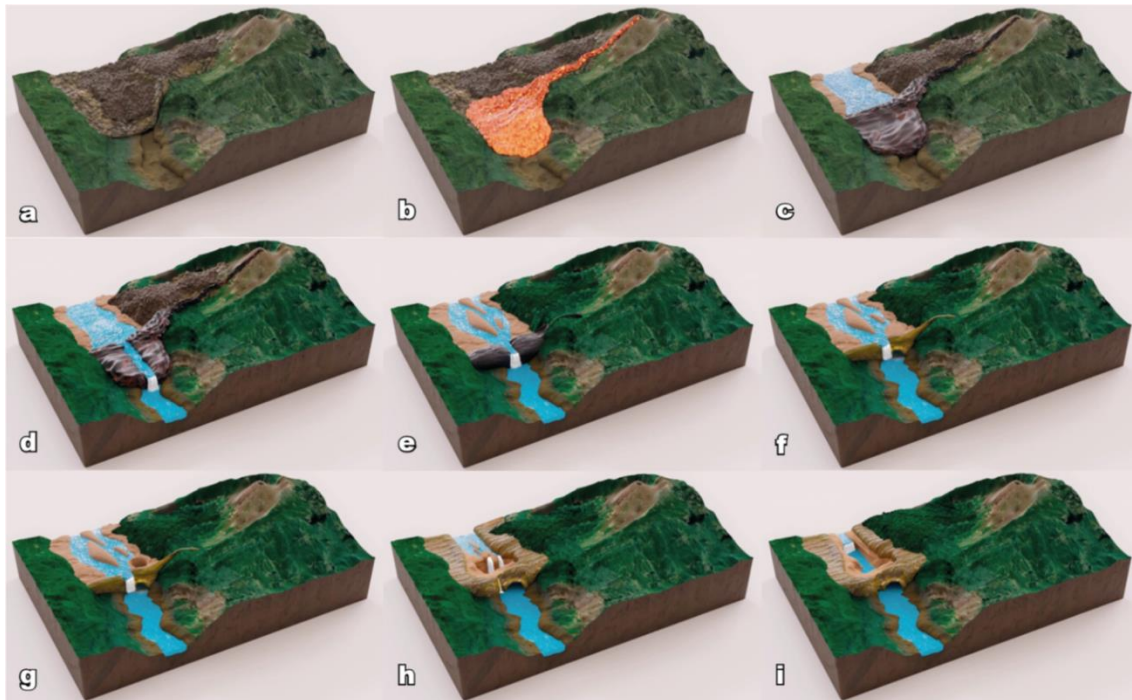
La extinta Cascada de San Rafael (CSR) era la cascada más grande y un símbolo turístico del Ecuador, por lo que significaba un ingreso económico importante para el país. Se encontraba sobre el río Coca aproximadamente a 9 km al este del edificio más joven del volcán Reventador, y representaba un “knickpoint” de 132 m de altura que se identificaba claramente en el perfil Longitudinal del río Coca, (Figura 7) (Andrade, 2016, Báez, 2018; Herrera et al., 2020; IIGE, 2021; Reyes et al., 2021).



**Figura 7.** Perfil Longitudinal esquemático de la Cascada de San Rafael antes del colapso de la cascada el 02 de febrero 2020 (Modificado de Micheli, 2021).

#### 1.2.5.1. Génesis de la Cascada San Rafael

Se cree que el inicio de la ex CSR empezó después de la depositación de la avalancha de escombros: *Avalancha 2* (Figura 8a) y el posterior emplazamiento de un flujo de lava que brotó del volcán El Reventador (Figura 8b), el cual fluía hacia el este y represó al río Coca. El emplazamiento del flujo de lava generó una presa de lava de alta resistencia, impidiendo el flujo de agua del río Coca y rellenando la cuenca aguas arriba con la formación de un lago (Figura 8c). Posteriormente la cima del flujo de lava fue sobrepasada por agradación fluvial del río Coca en la zona dando nacimiento a la ex CSR (Figura 8d) con un retroceso lento hacia aguas arriba sobre el flujo de lava. (Micheli, 2021; Reyes et al., 2021). La composición del flujo de lava varía de una andesita a una andesita basáltica y dado que la avalancha de escombros (*Avalancha 2*) fue fechada por radiocarbono en 19 mil años asumimos una edad menor a 19 mil años para el flujo de lava (Meneses et al., 2020; Micheli, 2021; Reyes et al., 2021).

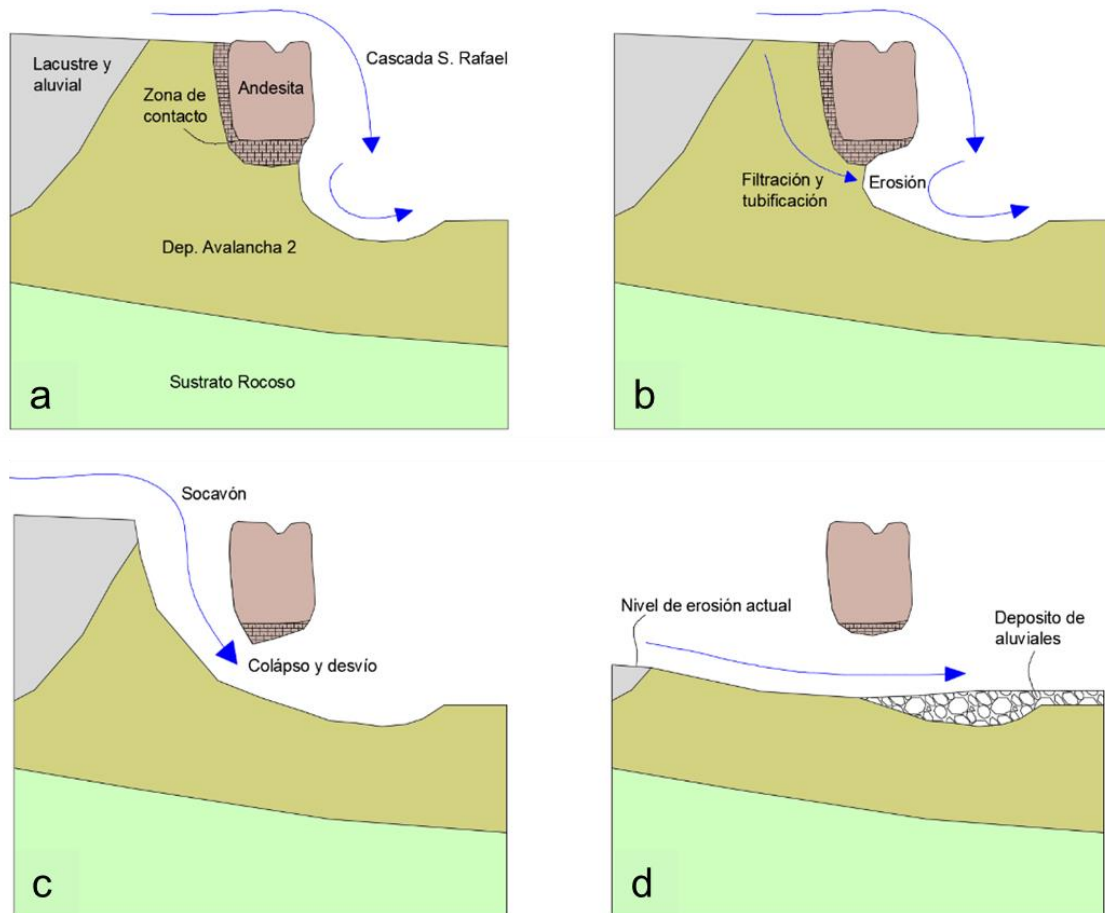


**Figura 8.** Modelo conceptual para la evolución de la ex Cascada San Rafael. (a) Avalancha 2 y El Reventador. (b) Emplazamiento del flujo de lava. (c) Represamiento del río Coca y formación de un lago. (d) Nacimiento de la cascada. (e) Retroceso de la cascada. (f) Formación de una cueva. (g) Formación de un sumidero (sinkhole). (h) Colapso del sumidero y desvío del río. (i) Erosión y desplazamiento hacia aguas arriba. (Tomado de Reyes et al., 2021)

#### 1.2.5.2. Colapso de la Cascada de San Rafael

Como todas las cascadas que evolucionan debido a una erosión regresiva, la ex CSR desde el emplazamiento del flujo de lava que la formó, sufrió la erosión basal de una capa de material poco resistente presente bajo dicho flujo (Figura 8e). Con el pasar del tiempo, la caída de agua de la cascada originó una cueva debajo del contacto entre la lava y los depósitos de *Avalancha 1 o 2* (Figura 8f y 9a), esta cueva se extendió progresivamente hacia el interior y favoreció el desarrollo de tubificación (piping) por las filtraciones de agua superficial en los depósitos de avalancha (Figura 9b). Estos procesos continuos de socavación y tubificación permitieron un flujo de agua discreto debajo de la presa de lava y la formación de un sumidero (sinkhole) (Figura 9g) el 29 de septiembre de 2019 (Herrera et al., 2020; Micheli, 2021; Reyes et al., 2021). Posteriormente el colapso del sumidero formó un socavón y desvió el río el 02 de febrero de 2020 (Figura 8h y 9c). La desaparición de la CSR, como Nivel Base Local del río Coca, desencadenó el inicio de una rápida erosión de los sedimentos con un progresivo desplazamiento hacia aguas arriba de la cascada (erosión regresiva) modificando rápidamente la pendiente anterior del cauce del río Coca (Figura 8i y 9d) (Micheli, 2021; Reyes et al., 2021).





**Figura 9.** Modelo conceptual de los procesos que llevaron al colapso de la Cascada de San Rafael el 02 de febrero de 2020. (a) Socavación basal. (b) Filtración y tubificación. (c) Formación de un socavón. (d) Erosión y cambio en la pendiente. (Tomado de Micheli, 2021)

### 1.3. Geomorfología Fluvial

La geomorfología fluvial es el estudio de las interacciones entre las geoformas y los procesos que existen en los cauces de los ríos en una variedad de escalas espaciales y temporales (Charlton, 2008). El clima, la geología, la cobertura vegetal y la topografía son solo algunos de los factores que influyen en las geoformas de los sistemas fluviales, las cuales son los elementos dominantes en las superficies continentales.

Los ríos son sistemas en equilibrio dinámico (Bravard & Petite., 2000) y uno de los principales agentes modeladores de la superficie, capaces de efectuar incisión vertical de los lechos, erosión lateral y frontal. Además, los ríos son grandes agentes de transporte de sedimentos de distinto tamaño y producen distintas formas de acumulación, ajustando continuamente sus cauces en respuesta a las fluctuaciones en el flujo y el suministro de sedimentos (Charlton, 2008).

### 1.3.1. Cuenca Hidrográfica

La cuenca hidrográfica, cuenca de drenaje, o cuenca de captación es considerada como una unidad geomorfológica fundamental y es el área que drena un río, la cual es alimentada por una red de canales, que transportan agua y sedimentos.

Los elementos de una cuenca hidrográfica son: divisoria de aguas, río principal, thalweg (línea que une los puntos de menor elevación en un valle) y afluentes (Charlton, 2008; Vásconez M., et al 2019).

#### 1.3.1.1. Características

Las características de una cuenca hidrográfica son importantes para poder prever el comportamiento de la cuenca y realizar un manejo adecuado de la misma.

- **Área de drenaje:** es la proyección horizontal de la cuenca limitada por la línea divisoria de aguas.
- **Forma:** es determinada por factores geológicos.
- **Sistema de drenaje:** depende de dos factores 1) el grado de ramificación que viene dado por el orden de los ríos en una cuenca y 2) la densidad de drenaje que se define como la relación de la longitud total de los cursos de agua de una cuenca y su área total.
- **Relieve:** es la forma que presenta la parte superficial de la corteza terrestre.
- **Vegetación:** es importante puesto que influye en el comportamiento de la cuenca a un evento de precipitación.

#### 1.3.1.2. Clasificación

Las cuencas hidrográficas se pueden clasificar de diversas formas. A continuación, se presenta una clasificación considerando los parámetros geomorfológicos más utilizados, sin embargo, su clasificación puede variar dependiendo de su aplicación (Vásconez M., et al 2019).

- **Por su tamaño**

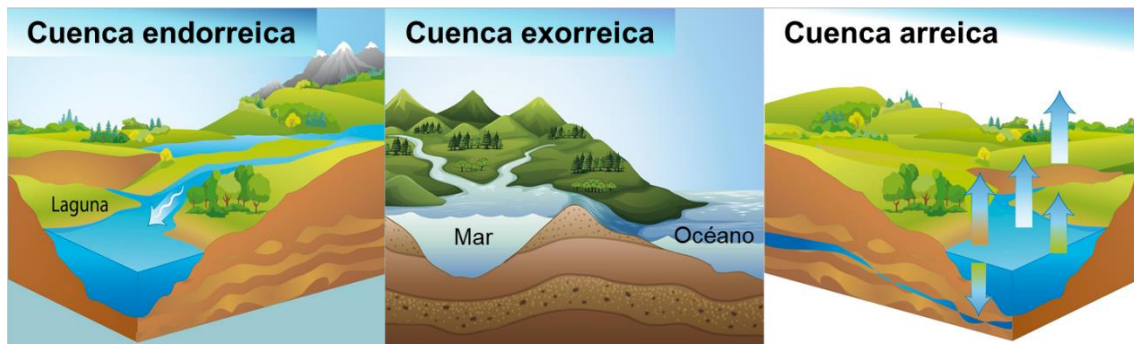
Las cuencas se clasifican considerando su área superficial, pueden ser:

Tipo de Cuenca	Área superficial (km2)
Muy grande	> 5000
Grande	2500 - 5000
Intermedia grande	500 - 2500
Intermedia pequeña	250 - 500
Pequeña	25 - 250
Muy pequeña	< 25

- **Por su desembocadura**

Las cuencas se clasifican dependiendo de donde es su desembocadura (Figura 10).

- **Cuenca endorreica:** su punto de salida de aguas superficiales se encuentra en la misma cuenca pudiendo ser un mar interior, lago o laguna (Figura 10).
- **Cuenca exorreica:** su punto de salida de aguas superficiales es un río principal que desemboca en el mar o el océano (Figura 10).
- **Cuenca arreica:** se denomina así a la cuenca cuya agua se filtra en el subsuelo o se evapora.



**Figura 10.** Clasificación de Cuencas Hidrográficas por su desembocadura. (Modificado de CONAGUA: <https://www.gob.mx/conagua>)

- **Por su uso**

De acuerdo a su uso principal las cuencas pueden ser:

- Hidroenergéticas
- Para agua poblacional
- Agua para riego
- Agua para navegación

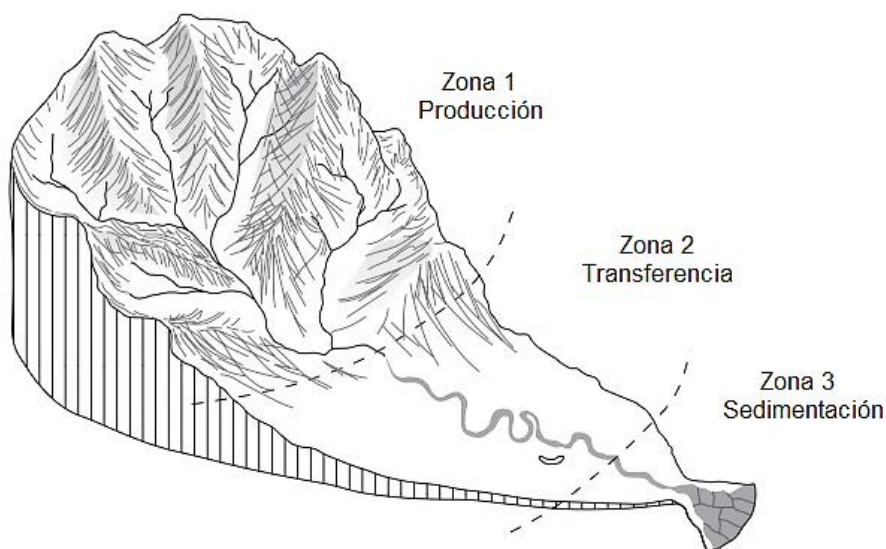
### 1.3.2. Sistema Fluvial

En escalas de tiempo geológicas, los sistemas fluviales registran el equilibrio entre las fuerzas estructurales y destructivas. Un sistema fluvial es el conjunto de redes de drenaje y zonas de sedimentación, cuya unidad básica es la cuenca de drenaje o cuenca hidrográfica. Además, los sistemas fluviales son sistemas abiertos, lo que significa que la energía y los materiales se intercambian con el entorno circundante.

#### 1.3.2.1. Zonas de un sistema fluvial

Para examinar los componentes del sistema fluvial se divide el sistema en 3 zonas o subsistemas (Figura 11) que operan dentro de un todo integrado, cada una es un sistema de proceso-respuesta y dentro de cada zona dominan ciertos procesos.

- **Zona 1: Zona de producción**, en las regiones de cabecera es donde se origina la mayor parte de los sedimentos, siendo suministrados a la red de canales desde las laderas aledañas por procesos de erosión y el movimiento masivo de material rocoso meteorizado.
- **Zona 2: Zona de transferencia**, los sedimentos se mueven a través de la red de canales, en esta zona la producción de sedimentos no es tan fuerte.
- **Zona 3: Zona de sedimentación** o de depósito de sedimentos, a medida que el río se acerca al océano, su pendiente disminuye y la energía disponible para el transporte de sedimentos se reduce considerablemente por lo que los sedimentos tienden a depositarse.



**Figura 11.** Zonas del sistema fluvial subdivididas en base a los procesos dominantes que operan dentro de cada zona (Charlton, 2008).

### 1.3.2.2. Variables de Control y de Respuesta

Dentro de los sistemas fluviales existe una distinción importante entre variables Control y Respuesta (Degoutte, 2001).

- **Las variables de Control:** son las que operan dentro del sistema fluvial y están influenciadas por la geología y el clima. Estas variables comprenden: el caudal sólido y líquido de un río, la geometría del valle aluvial (pendiente), la cobertura vegetal de la cuenca aportante, las características granulométricas mecánicas de los materiales del lecho del río y de sus orillas, así como la cobertura vegetal rivereña.
- **Las variables de Respuesta:** son más bien grados de libertad que posee el río y que le permiten cumplir con sus funciones de base, es decir transportar una carga sólida y una carga líquida. Estas variables son: los parámetros geométricos del río (ancho, profundidad del cauce, sinuosidad); tamaño de los sedimentos transportados; y, velocidad de la corriente.

### 1.3.2.3. Alteración de variables del sistema fluvial

Las respuestas de los Sistema Fluviales al cambio en variables de control como el clima, tectónica, nivel base y la actividad humana que afectan el flujo de agua y sedimentos, modifican la forma del canal (Charlton, 2008).

Un ejemplo de esto puede ser la alteración del Nivel Base de un río por cualquier razón, sea climática o geológica (factores geológicos externos). Si hay una caída en el nivel del mar en relación con la superficie terrestre, hay más energía disponible para impulsar el flujo y el movimiento de sedimentos. Por el contrario, un aumento relativo en el Nivel Base significa que hay menos energía disponible, lo que da como resultado una deposición neta en los tramos inferiores del canal. Con el tiempo, estos efectos pueden propagarse aguas arriba a través de una secuencia compleja de ajustes internos y retroalimentaciones.

Existen dos tipos de nivel de base (Tarbuck E. & Lutgens F., 2005):

1. Nivel base principal o absoluto: se considera como nivel base principal el nivel del mar.
2. Nivel base local o temporal: se usa para propósitos locales o transitorios, el nivel base local tiene la capacidad de limitar una corriente a un cierto nivel, son los lagos, las capas de roca resistentes y muchas corrientes fluviales que actúan como niveles de base para sus afluentes.

Otro ejemplo de la respuesta de los sistemas fluviales ante la modificación de las variables de control, es lo que sucede con la irrupción de la actividad humana en la cuenca de drenaje: deforestación, agricultura, operaciones mineras, obras de ingeniería, entre otras que afectan de manera directa o indirecta el flujo de agua, la producción de sedimentos, la morfología del canal y en general al sistema fluvial en ocasiones de una forma sin precedentes.

➤ **Retroalimentación**

Una retroalimentación inicia cuando un cambio en una variable conduce a un cambio en una o más variables del sistema, lo que actúa para contrarrestar o reforzar los efectos del cambio original. Se observan dos tipos de retroalimentación:

1. **La retroalimentación negativa:** conduce a una secuencia de ajustes que eventualmente contrarrestan el efecto del cambio original.
2. **La retroalimentación positiva:** mejoran o refuerzan los efectos del cambio original.

Cuando hay un cambio en uno de los controles externos, las retroalimentaciones negativas permiten que el sistema se recupere, amortiguando el efecto del cambio (Charlton, 2008).

➤ **Respuesta compleja:**

La respuesta del sistema fluvial a un cambio suele ser compleja debido a las múltiples interrelaciones que existen entre los diferentes componentes del sistema (Charlton, 2008).

Un ejemplo es la respuesta compleja de un afluente a una disminución en la elevación del nivel base en su desembocadura. Aquí el río principal, en el que desemboca el afluente ha bajado la elevación de su cauce por la erosión. Esto conduce a una secuencia compleja de erosión y deposición episódica en el afluente a medida que el sistema busca un nuevo equilibrio. En los extremos del canal es decir aguas arriba y aguas abajo, ocurrirán diferentes eventos los cuales se ilustran en la Figura 12.

Etapas de Tiempo	Aguas arriba	Aporte Sedimentos	Aguas abajo
1	No cambia	No cambia	Caída del nivel base - Incisión
2	Incisión	Incrementa	Incisión se extiende aguas arriba
3	Incisión	Incrementa	Agradación
4	Agradación	Disminuye	Agradación se extiende aguas arriba
5	Agradación	Disminuye	Incisión
6	Incisión	Incrementa	Incisión se extiende aguas arriba
7			Agradación

**Figura 12.** Representación esquemática de la respuesta compleja en un sistema de drenaje como resultado de una caída en el nivel base (Modificado de Charlton, 2008).

### 1.3.3. Trabajo Geológico en los ríos.

Las interacciones entre el flujo y el canal conducen a ajustes en la forma del canal, que resultan del desarrollo de 3 tipos de trabajos: erosión, transporte y sedimentación, los cuales dependen de la cantidad de energía del flujo y el tamaño del sedimento.

#### 1.3.3.1. Ley de Poder de la Corriente “Stream Power Law”

La erosión, el transporte y la deposición de sedimentos implican la interacción de fuerzas. El trabajo se lleva a cabo cuando una fuerza mueve un objeto, la cantidad de trabajo se define por el tamaño de la fuerza y la distancia sobre la que se mueve el objeto. El trabajo está involucrado en el movimiento del agua a través del canal y en la erosión y el transporte de sedimentos. La energía es la capacidad o habilidad para realizar un trabajo, y la potencia define la velocidad a la que se realiza el trabajo (Charlton, 2008).

La Potencia de la Corriente o Poder Erosivo “Stream Power” determina la capacidad de un flujo dado para transportar agua y sedimentos, y se puede expresar como potencia total,  $\Omega$  (Charlton, 2008).

$$\Omega = \rho g Q S$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $Q$  es el caudal de la corriente y  $S$  es la pendiente del canal.

El cálculo de la tasa de erosión fluvial es considerablemente difícil porque existen muchos factores que se producen naturalmente, como la litología, el caudal y las precipitaciones, o las actividades antrópicas. Como resultado de ello, los modelos, ya

sean empíricos o científicos, son forzosamente complejos si se quiere que incluyan el efecto de todos los factores. La Ley de potencia de la corriente “stream power law” (Ferrier et al., 2013; Harel et al.,2016), es el modelo más ampliamente utilizado para analizar e interpretar conjuntos de datos y proporciona una expresión matemática para la tasa de erosión de los sistemas fluviales. Se basa en la suposición de que la tasa de incisión del río  $E$ , escala con la tasa a la que el flujo gasta energía en el lecho del río por unidad de potencia de la corriente,  $\omega$ :

$$E = k_b \omega^a$$

donde  $k_b$  es un coeficiente dimensional y  $a$  es un exponente adimensional. La potencia de la corriente determina la capacidad de un flujo dado para transportar sedimentos y para un flujo constante y uniforme,  $\omega = \Omega/W$ , donde  $\Omega$  es la potencia total y  $W$  es el ancho del canal (Charlton, 2008; Ferrier et al., 2013).

Para facilitar la aplicación a los datos topográficos, la ley de potencia de la corriente a menudo se reformula suponiendo que  $W$  escala con  $Q$  y que  $Q$  escala con el área de drenaje aguas arriba. Se formula como:

$$E = KA^m S^n$$

donde:  $E$  es la tasa de erosión ( $[LT^{-1}]$ );  $K$  es un coeficiente de erosionabilidad ( $[T^{-1}L^{1-2m}]$ ) que abarca la influencia del clima, la litología y el transporte de sedimentos;  $A$  es el área de drenaje aguas arriba ( $[L^2]$ );  $S$  es la pendiente del canal ( $[L/L]$ ) y  $m$  y  $n$  son constantes empíricas (Ferrier et al., 2013; Harel et al.,2016).

### 1.3.3.2. Erosión Regresiva

Merz et al., (2010) define a la **erosión regresiva** como el proceso de propagación de la erosión fluvial hacia la parte alta de ríos. En los ríos se da de forma tridimensional distinguiendo así 3 tipos de erosión:

1. Erosión Regresiva Frontal (ERF). - es la que avanza hacia aguas arriba.
2. Erosión Lateral (EL). - es la que avanza hacia los márgenes del río.
3. Erosión Vertical (EV). - es la que incisa el cauce del río.

### 1.3.3.3. Transporte de Sedimentos

El transporte es el traslado de un lugar a otro de los materiales erosionados y meteorizados para ser sedimentados. Todo el material que lleva una corriente es su carga. Las corrientes transportan su carga de sedimentos de tres maneras (Figura 13):

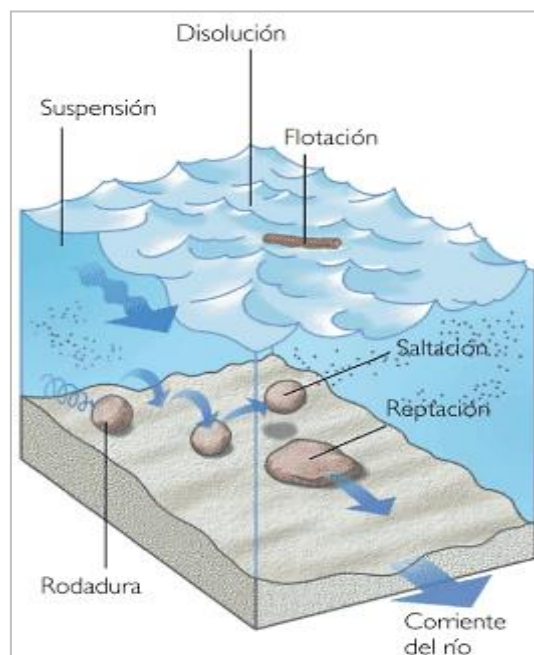
1. **Transporte en disolución** (carga disuelta): los materiales se transportan disueltos en el agua, comprende iones y moléculas derivadas de la



meteorización química más algunas sustancias orgánicas disueltas (Charlton, 2008; Tarbuck E. J. & Lutgens F. K., 2005).

2. **Transporte en suspensión** (carga suspendida): se trata de sólidos en suspensión constituidos principalmente por arcillas, limos y arenas, que se distribuyen heterogéneamente en los tramos del curso de agua, se mantienen en suspensión gracias a los remolinos turbulentos que se producen en el agua y permanecerán en suspensión mientras su peso sea soportado por la componente ascendente de los remolinos turbulentos (Charlton, 2008; Bernal C., 2009).
3. **Transporte de carga de fondo** (carga de fondo): ocurre cuando a altas velocidades, los materiales sólidos demasiado grandes para estar suspendidos se desplazan por el fondo rodando, deslizándose o dando saltos sucesivos por saltación (Bernal C., 2009; Huggett R. J., 2017).

Además de estas tres cargas, la carga suspendida y la carga de fondo a veces se denominan colectivamente carga de sólidos a lo largo del fondo del cauce partículas.



**Figura 13.** Tipos de transporte de sedimentos. (Tomado de geomorfologiadegerman.blogspot.com)

#### 1.3.3.4. Sedimentación

La sedimentación es el proceso por el cual se depositan los sedimentos transportados por diversos agentes. Siempre que la velocidad de una corriente disminuye, su competencia y capacidad de flujo disminuye, y las partículas de sedimento se depositan

en un orden definido por tamaños. Por tanto, el transporte de la corriente proporciona un mecanismo por medio del cual se separan las partículas sólidas de diversos tamaños. Este proceso, denominado **selección**, explica por qué las partículas de tamaño similar se depositan juntas.

#### **1.3.4. Parámetros físicos de un río**

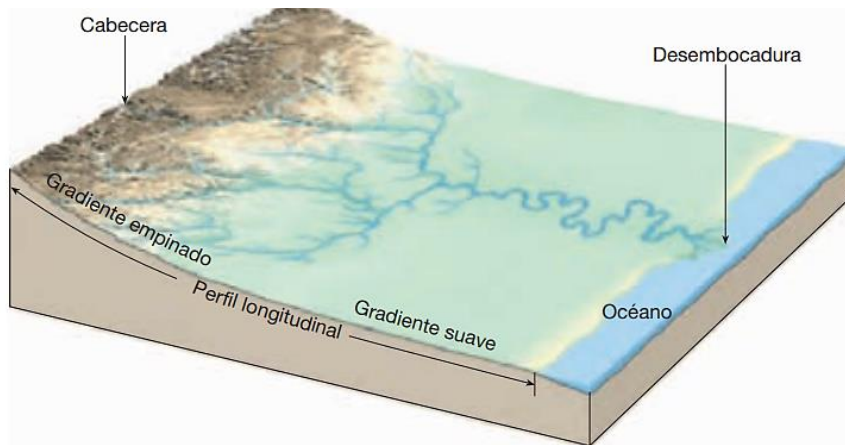
##### **1.3.4.1. Perfil longitudinal del río**

El perfil longitudinal de un río representa las distintas elevaciones del fondo del río desde su nacimiento hasta su nivel base, así como las particularidades del relieve de la cuenca a la que pertenece, especialmente cuando predomina un régimen erosivo (Jiménez et al., 2017).

La característica más relevante de un perfil longitudinal típico es un gradiente (pendiente) decreciente constante y cuando un río se encuentra en equilibrio generalmente el perfil es una suave curva cóncava en sentido ascendente con un gradiente más inclinado aguas arriba y un gradiente más suave aguas abajo (Figura 14) (Tarbuck E. J. & Lutgens F. K., 2005).

El perfil de equilibrio del río representa un nivel de referencia y en sistemas fluviales se refiere a un estado en el que las variables que actúan y el nivel base son constantes, el río ni erosiona ni produce depositación, es decir, la energía es justa para transportar la carga de materiales. Este concepto es solo teórico ya que los ríos nunca alcanzan su perfil de equilibrio ya sea porque cambian las condiciones climáticas o bien porque se producen movimientos de origen tectónico que alteran el curso, sin embargo, el perfil de equilibrio nos puede ayudar a establecer qué aspectos del perfil real de un río son anomalías y qué representan (Báez, 2019; Jiménez et al., 2017). En la forma del perfil longitudinal pueden quedar registrados los efectos de la deformación de la corteza, variaciones eustáticas, cambios en el clima o procesos propios de la evolución del drenaje (Jiménez et al., 2017).

En los ríos jóvenes, los perfiles longitudinales inicialmente son muy irregulares con tramos relativamente poco inclinados y otros muy inclinados cuando hay rápidos y cascadas, este perfil se va regularizando con el tiempo y cuanto más significativas sean las modificaciones del perfil, mayor será el tiempo requerido para ajustarse al perfil de equilibrio (Báez, 2019).



**Figura 14.** Esquema mostrando el perfil longitudinal del río.

El cálculo del perfil de equilibrio teórico se puede realizar por el método desarrollado por Hack (1973), el cual se basa en la relación que existe entre la distribución de la pendiente y su longitud y nos permite evaluar en qué medida un río se aproxima al equilibrio (Jiménez et al., 2017). La ecuación propuesta por Hack para este método es:

$$H = H_0 - SL * \ln(L)$$

Donde:

$H$  es la altitud de cada punto del perfil,

$H_0$  es la cota de la cabecera (punto más alto por encima del cual existe un área mínima denominada crítica),

$SL$  es el índice de gradiente y

$L$  es la distancia de cada punto del perfil respecto de la cabecera, medida hacia aguas abajo

#### **1.3.4.2. Pendiente media del cauce principal**

La pendiente del cauce es la variación de la inclinación y es uno de los factores que inciden en la capacidad que tiene el flujo para transportar sedimentos, por lo que está relacionada directamente con la velocidad del agua y la erosión que produce.

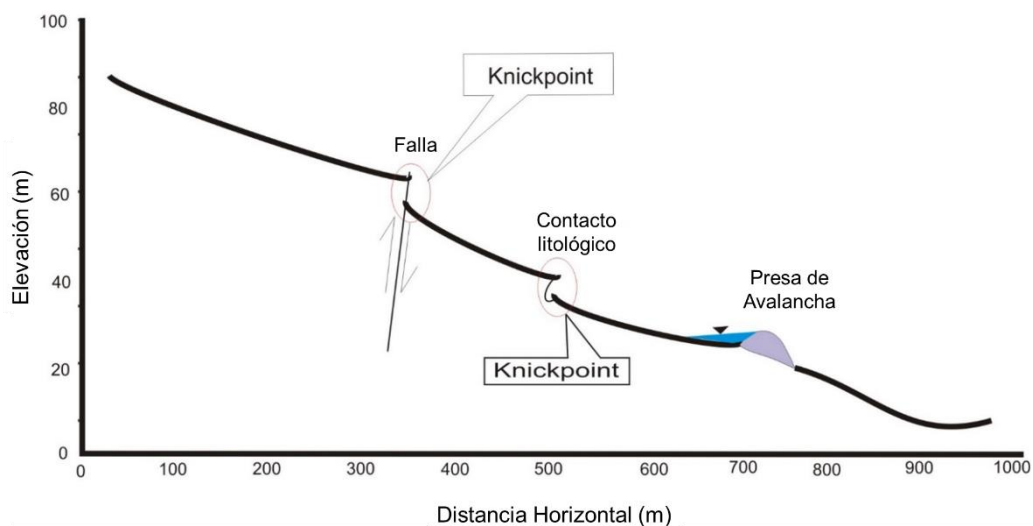
En los tramos de pendiente fuerte las velocidades de flujo resultan tan altas que pueden erosionar y transportar carga de fondo. Cuando el cauce pasa de un tramo de pendiente alta a otro de pendiente baja, su capacidad de erosión y transporte se reduce y comienza a depositar los materiales que recibe del tramo anterior. En este proceso forma islas y brazos y puede tomar una conformación trezada, con cauce divagante. Además, el material que se deposita eleva el fondo del cauce y disminuye su capacidad a cauce lleno (Reyes A., Ulises F. & Carvajal Y., 2011).

### 1.3.4.3. Knickpoints

Se denomina “knickpoint” al lugar donde ocurre un cambio abrupto en la pendiente a lo largo del perfil longitudinal de un río.

Las causas de la formación de un knickpoint son numerosas, sin embargo, las más comunes según Ahmed M., et al., 2019 ocurren debido a variables como son (Figura 15):

- **Actividad tectónica (fallas activas):** las fallas desarrollan un knickpoint empinado a lo largo del perfil longitudinal debido al movimiento de los bloques sobre los cuales fluye la corriente del río.
- **Contactos litológicos:** las rocas resistentes que subyacen a secciones de canales empinados a menudo pueden generar knickpoints notables, los mismos que varían en función de la resistencia, disposición y grado de fractura que presentan las rocas frente a la erosión de la corriente.
- **Represamiento por deslizamientos:** cuando ocurre un deslizamiento su material se interpone en el camino del río perturbando el flujo del río e interrumpiendo su dirección. Si el deslizamiento es masivo la corriente del río podría bloquearse por completo en un punto fijo y dar paso a la formación de un lago. Además, el represamiento por deslizamientos también cambia el nivel base del río.



**Figura 15.** Diagrama esquemático que muestra los factores desencadenantes más comunes para la formación de knickpoints a lo largo del perfil longitudinal (Tomado de Ahmed M., et al., 2019).

## **CAPÍTULO II: ASPECTOS METODOLÓGICOS**

### **2.1. Recopilación de datos**

En este estudio se consideró información reportada por CELEC a través de la Comisión Ejecutora río Coca (<https://www.celec.gob.ec/index.php/108-comisiones/972-resoluciones-comision-riococa>) a partir de sus monitoreos diarios desde mayo de 2020 hasta diciembre de 2021. De estos informes se obtuvieron los valores del caudal máximo diario (Qmax), información de litología por la cual atraviesa el río Coca durante el avance del frente de erosión, tomando como origen o punto 0 la cresta del vertedero de la HCCS. La información de litología no se reporta en todos los informes diarios de CELEC por lo que esta información se complementó con la información geológica publicada por: INECCEL, en su estudio técnico para la creación de la HCCS de 1988; la consultora KAWSSUS en su reporte final del río Coca de 2020; y, por el IIGE en su informe técnico sobre el río Coca de 2021.

Adicional se utilizó modelos digitales de terreno (MDT) y ortofotografías proporcionados por CELEC, el Instituto Geográfico Militar (IGM) y por el Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS) correspondientes a diferentes fechas y detallados en la Tabla 1.

Los MDT proporcionados por CELEC y el IGM no abarcan toda el área de estudio y no están tomados en la misma fecha; cada MDT abarca un área específica por lo que se realizó un análisis por tramos del río Coca. También se utilizó curvas de nivel cada 5 [m] proporcionadas por el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) en 2 fechas a partir de los cuales se elaboró los respectivos MDT (Tabla 1) y se recopiló información bibliográfica disponible como estudios previos, artículos, mapas y demás información que aporte al presente estudio.

Para el estudio de la ERF se realizó perfiles longitudinales y se calculó la tasa de erosión, pendiente media del cauce principal y poder erosivo, mientras que para el estudio de la EL y EV se realizó secciones transversales y se calculó la tasa de erosión para ambos tipos de erosión.

**Tabla 1.** Modelos digitales de terreno utilizados en este estudio.

Nombre Archivo	Fecha	Tamaño Pixel (m)
SIGTIERRAS	1/1/2011	5
IGM Erosión Río Quijos 1	17/12/2020	0,3
IGM Erosión Río Quijos 2	26/2/2021	0,4
POL 1 CELEC	2/5/2021	1
POL 13 CELEC	29/5/2021	1
POL 16 CELEC	9/6/2021	1
POL 17 CELEC	9/6/2021	1
POL 18 CELEC	12/6/2021	1
POL 19 CELEC	22/6/2021	1
POL 20 CELEC	22/6/2021	1
POL 9 CELEC	9/8/2021	1
POL 8 CELEC	5/9/2021	1
POL 2 CELEC	16/9/2021	1
POL 11 CELEC	14/10/2021	1
POL 21 CELEC	16/10/2021	1
POL 22 CELEC	16/10/2021	1
POL 12 CELEC	27/10/2021	1
POL 3 CELEC	31/10/2021	1
POL 4 CELEC	31/10/2021	1
POL 5 CELEC	24/11/2021	1
POL 7 CELEC	26/11/2021	1
POL 6 CELEC	27/11/2021	1
POL 14 CELEC	27/11/2021	1
POL 15 CELEC	12/12/2021	1
POL 10 CELEC	22/12/2021	1
IIGE 1	10/06/2021	5
IIGE 2	11/02/2021	5

## 2.2. Elaboración del perfil longitudinal del río Coca

Para la elaboración de perfiles longitudinales y secciones transversales del río Coca se utilizó los modelos digitales del terreno proporcionados por CELEC de tamaño de pixel 1 [m], IGM de tamaño de pixel 0,3 y 0,4 [m], SIGTIERRAS de tamaño de pixel 5 [m] y los MDT obtenidos de las curvas de nivel proporcionadas por el IIGE de resolución 5 [m], cada uno correspondiente a diferente fecha detallados en la Tabla 1.

Los pasos seguidos para la realización de los perfiles del río principal y secciones transversales fueron los siguientes:

Para los perfiles se creó un archivo shapefile de polilínea siguiendo el thalweg del río (línea que une los puntos de más bajo nivel) desde la Captación de la HCCS (cota más alta) hasta la ex CSR (cota más baja), mientras que para las secciones transversales se

creó un archivo shapefile de polilínea con varias secciones transversales, las cuales se trazaron 1) desde los bordes de la erosión en los márgenes del río y tratando mantener un ángulo de 90° con el cauce del río en zonas de mayor erosión y 2) de margen a margen abarcando la planicie de inundación en zonas de menor erosión. Para lograr un mejor trazado del río en la elaboración de perfiles se modificó las propiedades de color en la simbología del DEM, logrando así distinguir de mejor manera cual era el thalweg (valores de pixel más bajos) por diferencia de color.

Una vez obtenidos los archivos shapefile del río y las secciones transversales, se los interpoló con los diferentes MDT para obtener valores de altura y distancia; para ello se utilizó la herramienta "Interpolate Shape" de ArcGis.

Posteriormente se seleccionó el shapefile interpolado y haciendo uso de la herramienta "Profile Graph" de ArcGis se obtuvo el perfil del río y las secciones transversales.

Para poder sobreponer y comparar los perfiles y secciones transversales obtenidos en diferentes fechas se exportó los datos a un archivo Excel, los datos obtenidos tanto para los perfiles como para las secciones transversales fueron X (distancia recorrida) y Y(altura).

En el caso de las secciones transversales con los datos del archivo Excel y las ortofotografías del área de estudio se procedió a medir la variación lateral y vertical, que nos indica el avance de la EL y EV.

Finalmente, para analizar el perfil longitudinal obtenido, se calculó el perfil de equilibrio teórico mediante el método desarrollado por Hack (1973), una vez exportados los datos del perfil longitudinal en X y Y se utilizó la ecuación 1 para obtener los valores de la altura en función de su logaritmo natural.

$$H = H_0 - SL * Ln(L) \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde:

$H$  es la altitud de cada punto del perfil,

$H_0$  es la cota de la cabecera (punto más alto por encima del cual existe un área mínima denominada crítica),

$SL$  es el índice de gradiente y

$L$  es la distancia de cada punto del perfil respecto de la cabecera, medida hacia aguas abajo

Obtenidos los nuevos valores de altura se procedió a graficar ambos perfiles para de esta forma evaluar la diferencia que existe con el perfil en equilibrio.

### 2.3. Cálculo de la pendiente media del cauce principal

Partiendo del perfil longitudinal del río principal este parámetro se puede estimar por algunos métodos, para este estudio se eligió el método de Taylor – Schwarz ya que este trata de ajustar una rasante al perfil del río (Reyes A., Ulises F. & Carvajal Y., 2011). Los proponentes de este método sugieren dividir el río en tramos de igual longitud, cada uno con pendiente uniforme de acuerdo a la ecuación 2:

$$S = \left[ \frac{L}{\frac{L_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{L_1}{\sqrt{S_1}} + \dots + \frac{L_n}{\sqrt{S_n}}} \right]^2 \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde:

$S$ : Pendiente media del cauce.

$L$ : Longitud del cauce principal de la cuenca (m).

$L_i$ : Longitud de cada tramo (m).

$S_i$ : Pendiente de cada uno de los tramos en que se subdivide la longitud del cauce Principal.

Para su cálculo se creó un archivo Excel y se utilizó los datos exportados del perfil longitudinal en X (longitud) y Y (altura). Las pendientes de cada tramo negativas y con valores menores a 0,000001 no se consideraron al igual que su respectiva longitud.

### 2.4. Determinación de la Tasa de erosión

Los informes diarios de CELEC reportan el caudal máximo en m<sup>3</sup>/s, el tipo de material, longitud de avance en km y la posición del frente de erosión. Desde el 1 de mayo de 2020 hasta el 31 de enero de 2021 CELEC reportó la longitud de avance en km considerando el punto de inicio la ubicación de la ex Cascada de San Rafael. A partir del 1 de febrero de 2021 CELEC reportó la localización del frente de erosión considerando el punto 0 la cresta del vertedero de la captación de la Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair. Con el objetivo de unificar los datos de longitud reportados por CELEC se calculó la longitud de avance considerando el punto 0 a la ex Cascada de San Rafael. Para calcular la longitud avanzada por la Erosión Regresiva (LA) se consideró que la distancia total (DT) desde la ex Cascada de San Rafael hasta el vertedero de la captación de la HCCS es de 18 km (medidos en ArgGis) y se siguieron los siguientes pasos:

Primero se expresó en km la ubicación del frente de erosión (FE), a continuación, se restó de la DT y se obtuvo la longitud avanzada desde la ex CSR hasta el frente de erosión para todos los datos (ecuación 3).



$$LA = DT - FE \quad (\text{ecuación 3})$$

LA: Longitud Avance (km)

DT: Distancia Total (km)

FE: Frente Erosión (km)

Posteriormente para el cálculo de la tasa de erosión se requiere calcular la longitud avanzada por día (LAD) la cual es expresada en metros. Por lo que se considera que la longitud avanzada por día es igual a longitud avanzada en un día (Laf) menos la longitud avanzada el día anterior (LAI) (ecuación 4).

$$LAD = Laf - LAi \quad (\text{ecuación 4})$$

LAD: longitud avanzada por día (m)

Laf: Longitud avanzada final (m)

LAI: Longitud avanzada inicial (m)

A partir de la Ley de Potencia de Corriente "Stream Power Law" se calculó la tasa de erosión E con unidades  $[LT^{-1}]$ , donde L es la longitud y T es el tiempo. Considerando lo anterior para el cálculo de la tasa de erosión se utilizó la LAD sobre el tiempo T y se expresó en m/año.

$$E = LAD/T \quad (\text{ecuación 5})$$

Utilizando los valores calculados para la tasa de erosión se procedió a calcular la tasa de erosión acumulada (Ea). La Ea se obtuvo de la suma de la tasa de erosión en una determinada fecha (Ei) más la tasa de erosión anterior (Ef).

$$Ea = Ei + Ef \quad (\text{ecuación 6})$$

El cálculo de la tasa de EV y EL se realizó a partir de los MDT proporcionados por CELEC mediante la Ley de Potencia de Corriente "Stream Power Law" en la que la tasa de erosión E es igual a  $LT^{-1}$ , la longitud utilizada se midió a partir de las secciones transversales realizadas a lo largo del río Coca y corresponde a la variación vertical y lateral entre 2 determinadas fechas.

## 2.5. Poder Erosivo

De acuerdo a la fórmula del Poder Erosivo “Stream Power” (ecuación 7), este es igual al producto de la densidad del fluido, la aceleración de la gravedad, el caudal y la pendiente.

$$\Omega = \rho g Q S \quad (\text{ecuación 7})$$

Para este estudio el Poder Erosivo se calculó a partir de los valores calculados de la pendiente media del cauce principal y los valores del caudal máximo ( $Q_{\max}$ ) obtenidos de los monitoreos diarios de CELEC, considerando la densidad del fluido como la del agua que es igual a  $1000 \text{ kg/m}^3$  y la aceleración de la gravedad igual a  $9,8 \text{ m/s}^2$ . Los cálculos se los realizo dentro un archivo Excel.

## CAPÍTULO III: RESULTADOS

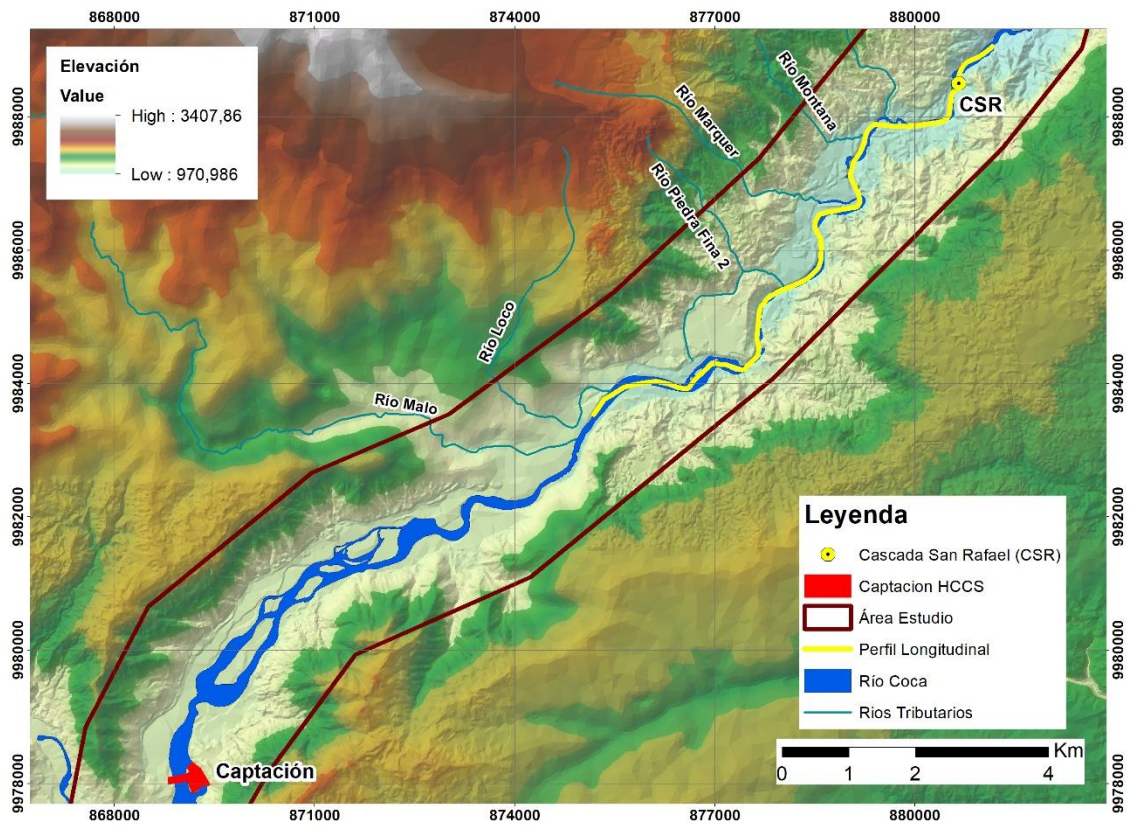
En este capítulo se presenta los resultados de los análisis realizados.

### 3.1. Proceso Erosivo en el río Coca

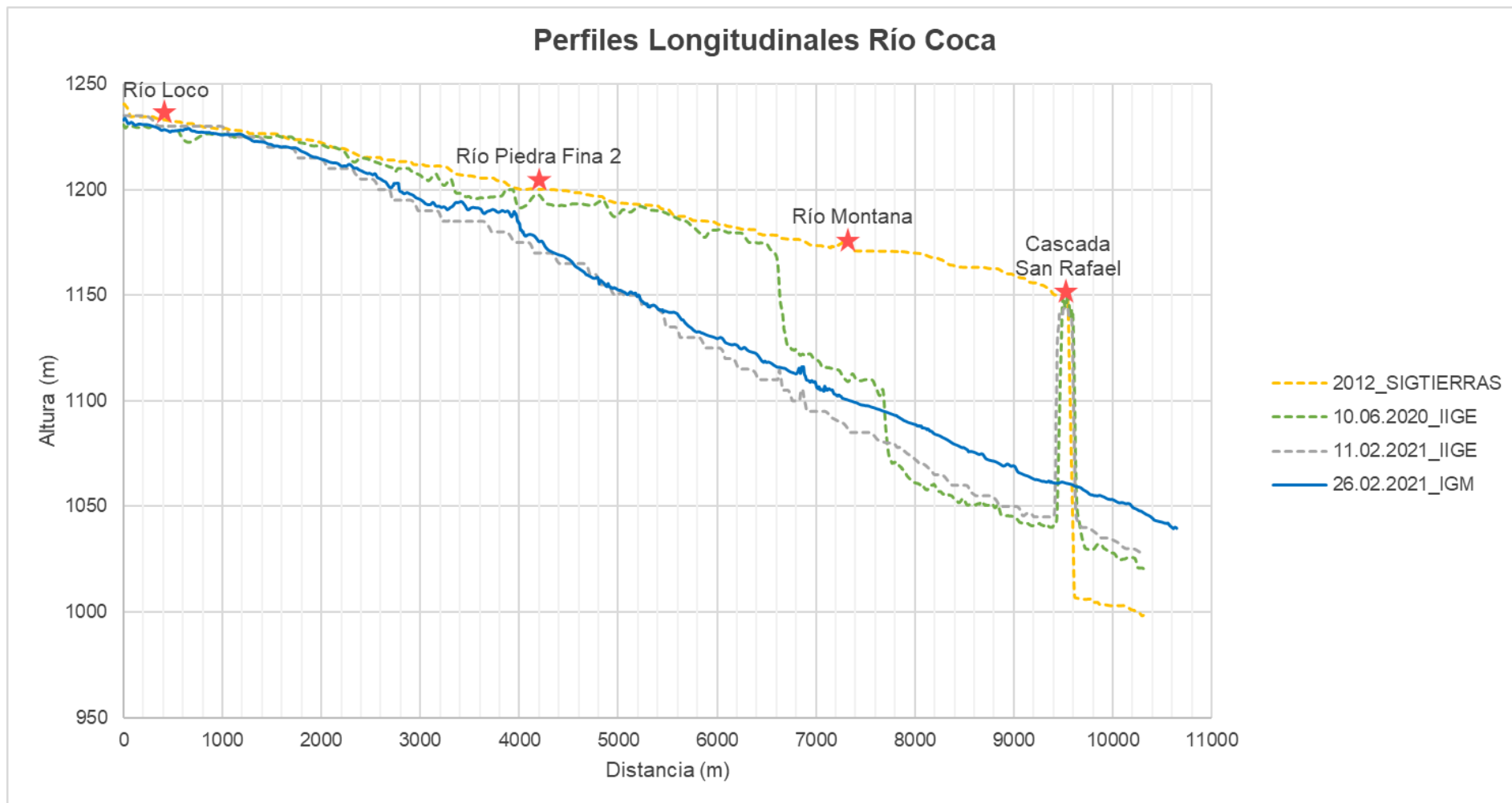
#### 3.1.1. Erosión Regresiva

##### 3.1.1.1. Perfiles Longitudinales del río Coca

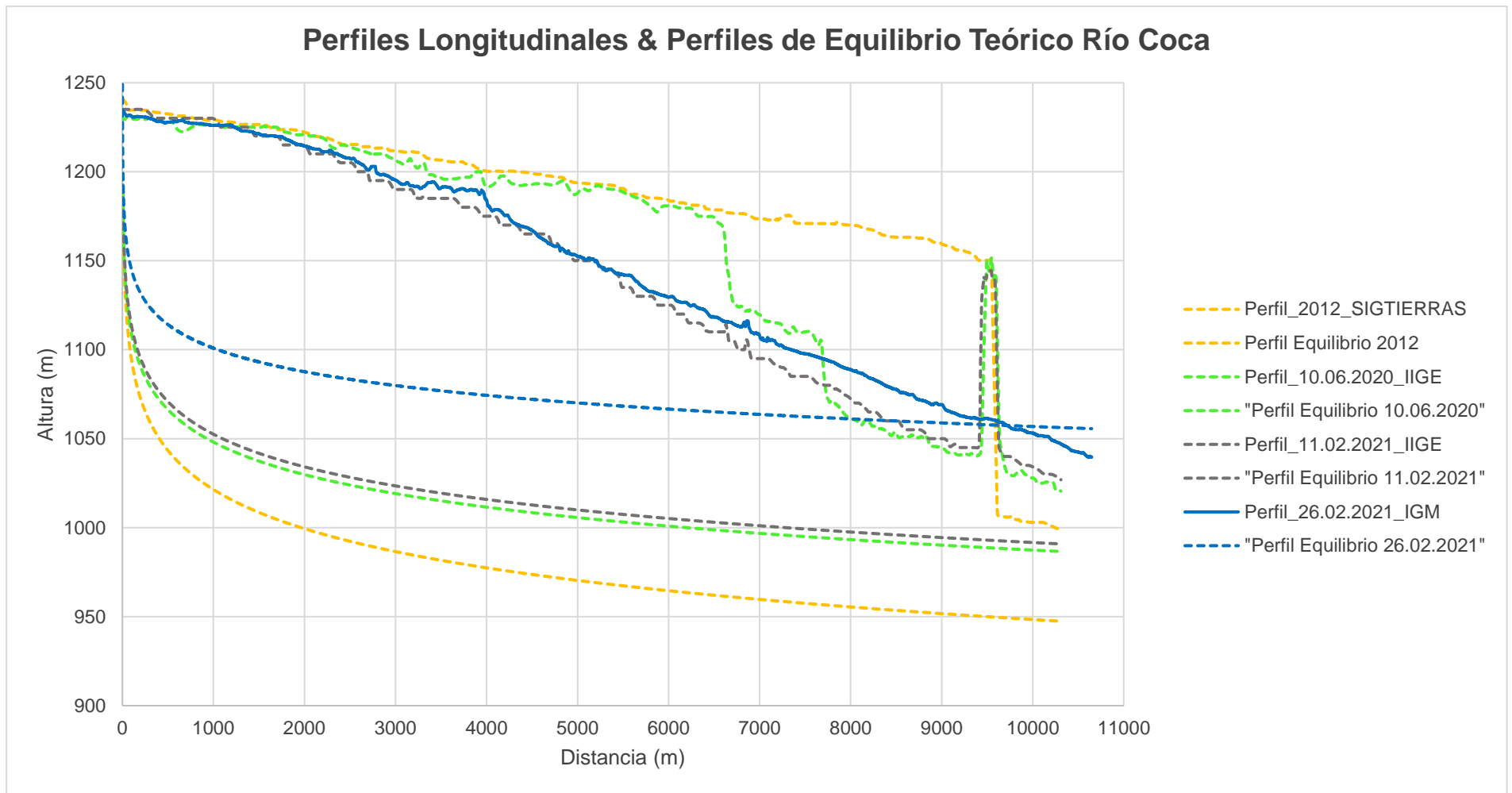
Los perfiles longitudinales del río Coca se realizaron desde el sector aguas abajo del río Malo hasta aguas abajo de la ubicación de la extinta CSR en 4 fechas diferentes (Figura 16), no se abarcó el área hasta la Captación de la HCCS debido a que los MDT disponibles solo cubren el área mencionada.



**Figura 16.** Mapa mostrando una vista en planta del trazo del perfil longitudinal del río Coca.



**Figura 17.** Perfiles Longitudinales mostrando la evolución del perfil y cambios en la pendiente del río Coca.



**Figura 18.** Perfiles Longitudinales del río Coca junto a su Perfil Teórico de Equilibrio.

En los perfiles mostrados se observa la evolución del perfil longitudinal del río Coca y el avance del Proceso de Erosión Regresiva, cuyo frente ha avanzado casi 11 km desde la ubicación de la ex CSR ubicándose aguas abajo de la confluencia con el río Malo, a la fecha de este trabajo. La Figura 18 muestra como el perfil longitudinal se va acercando al perfil de equilibrio teórico y la pendiente va disminuyendo reajustándose a las nuevas condiciones del río; sin embargo, la Figura 17 muestra que el perfil evoluciona también aguas abajo donde se ve agradación cerca del punto donde se encontraba la cascada.

### 3.1.1.2. Pendiente del Cauce Principal

El cálculo de la pendiente se realizó por tramos debido a que los MDT abarcaban determinadas áreas (Figuras 19 y 20), se calculó varias pendientes y se obtuvo un valor de 0,02 desde mayo hasta diciembre de 2021.

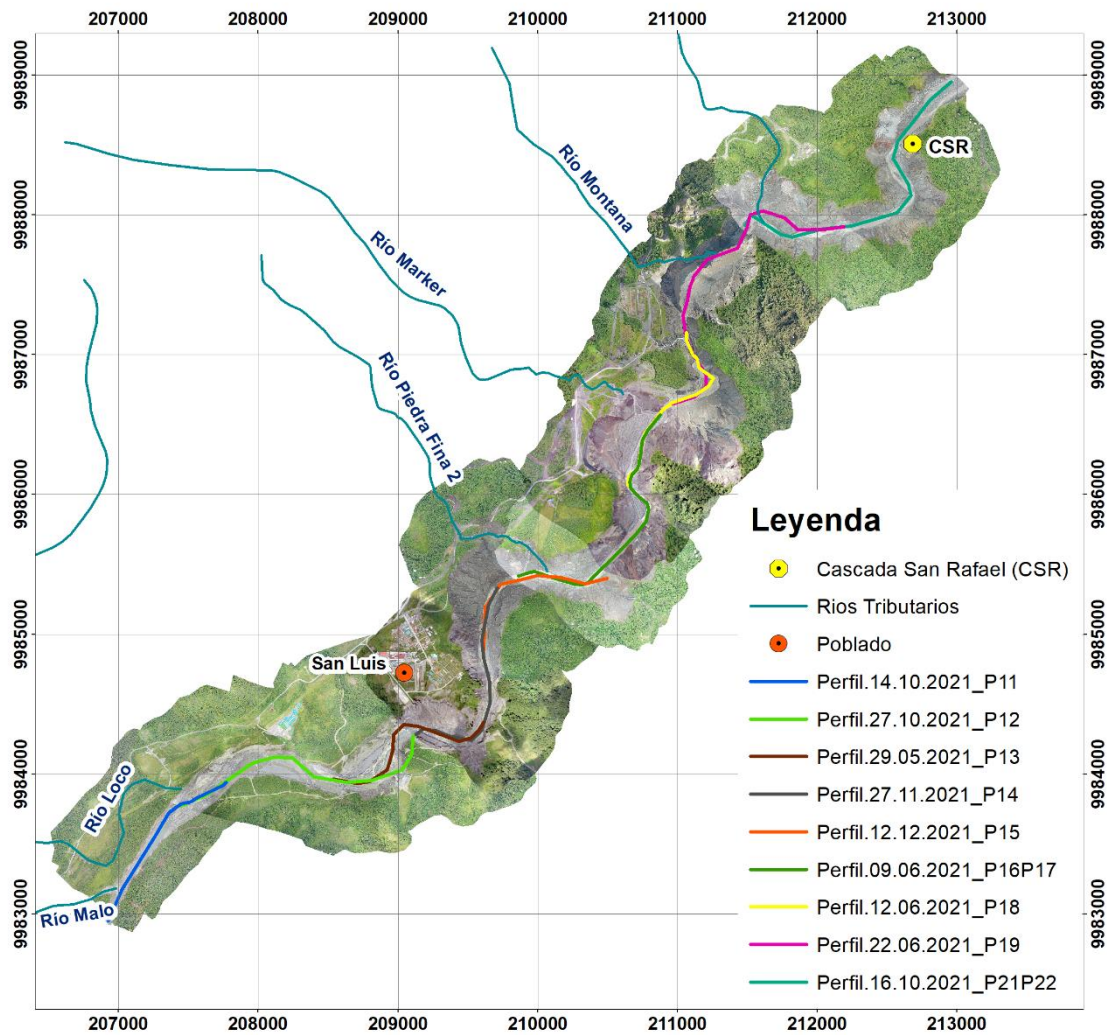
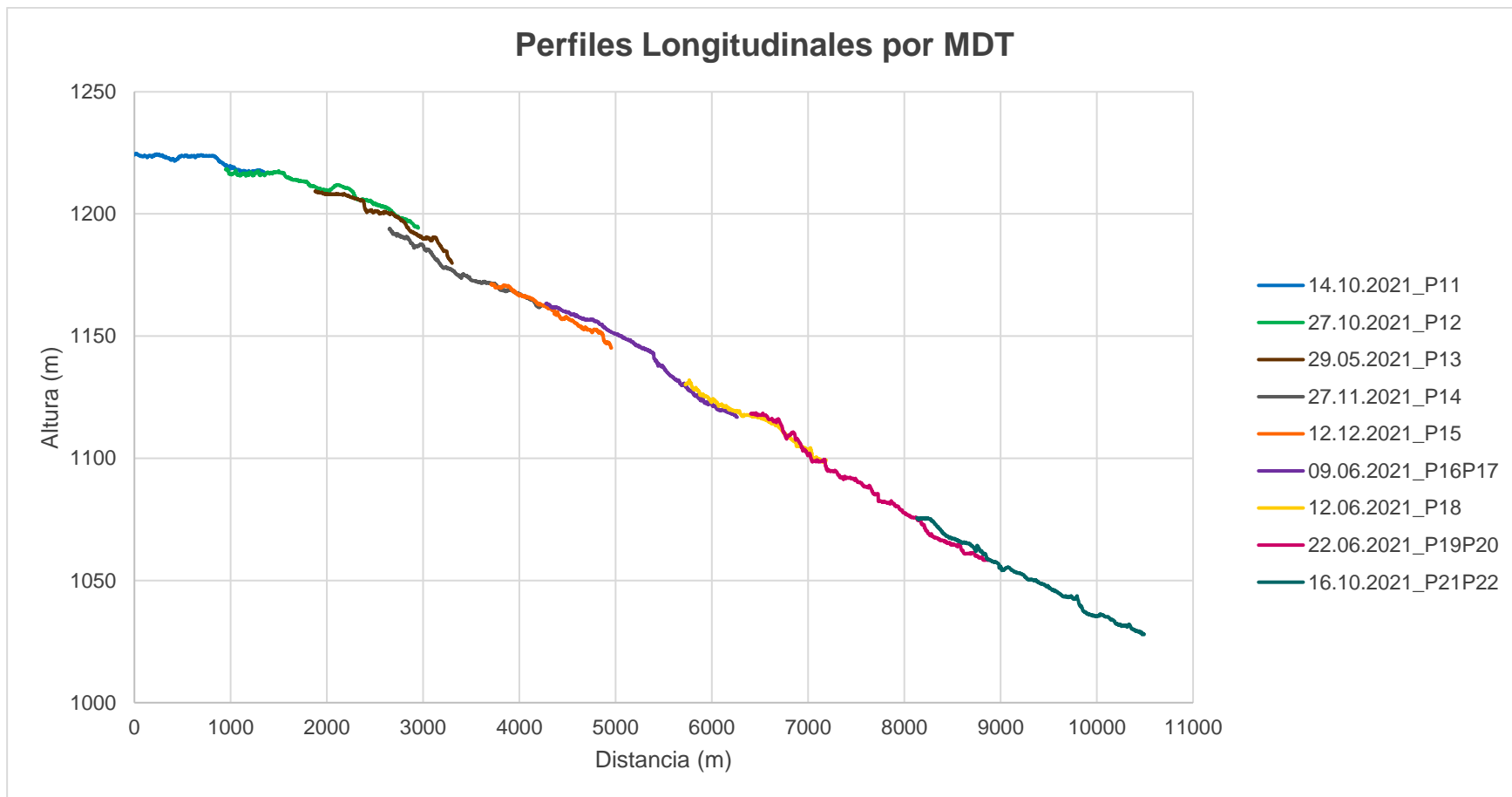


Figura 19. Ubicación de los perfiles longitudinales por MDT.



**Figura 20.** Perfiles Longitudinales correspondiente a las MDT proporcionador por CELEC.

### 3.1.2. Erosión Vertical y Lateral

Para un adecuado estudio de la Erosión Vertical (EV) y Lateral (EL) se seleccionó las Secciones Transversales (ST) que tengan la mejor calidad de datos. Se seleccionó 16 ST a lo largo del río Coca en la zona de estudio (Figura 22) y se midió la variación en la profundidad del cauce y la variación lateral en diferentes fechas (Tabla 2), a partir de los MDT proporcionados por CELEC. Posteriormente se calculó la tasa de erosión vertical y lateral para cada uno de ellos. Las ST realizadas a partir de los MDT proporcionados por SIGTIERRAS, IGM e IIGE fueron usadas únicamente para un análisis cualitativo.

En las Figuras 23a y 23b, ST 1 y 2 no se realizó una medición de la EV y EL debido a que no se dispone de más MDT en la zona proporcionados por CELEC. Cualitativamente, en la Figura 23a, ST 1 aguas abajo de la ex CSR se observa que la última medición reveló una morfología plana del cauce con un valle ancho debido al aumento en el aporte de sedimentos. Mientras que en la Figura 23b, ST 2, ubicada donde antes se encontraba la ex CSR se muestra la evolución de la sección desde antes de la desaparición de la cascada, se observa cómo se va profundizando el “sinkhole” o sumidero que luego colapso provocando el desvió del río hacia la margen izquierda de donde se ubicaba la cascada; posteriormente el thalweg se desplaza y profundiza hacia la margen derecha.

Las Figuras 23c, 24e, 25j y 25k, ST 3, 5, 10 y 11, muestran como la ocurrencia de deslizamientos obliga al río Coca a desviar su cauce hacia la margen contraria al deslizamiento (EL) aumentado también el nivel del fondo del cauce; sin embargo, como se observa en las Figuras 24e y 25k, ST 5 y 11, este aumento es temporal ya que la EV sigue incisando y con el tiempo este nivel disminuye.

Se constatan también las mayores tasas de erosión vertical (EV) y erosión lateral (EL) calculadas en las secciones aguas arriba de la ex CSR hasta aguas arriba del río Loco (Figuras 23,24 y 25, ST 3 a 9), en esta zona el retroceso de los taludes (EL) varía desde pocos metros hasta llegar en algunos sectores a más de 180 [m] en 6 meses (Figura 24e, ST 5), mientras que la incisión (EV) puede ser desde pocos metros hasta más de 20 [m] en 3 meses (Figura 23c, ST 3).

Las Figuras 25j, 25k y 25l, ST 10, 11 y 12, aguas arriba del río Malo muestran poca incisión hasta 3 [m] en 3 meses y solo en la sección 11 se observa cambio lateral asociado a un deslizamiento, en las siguientes secciones aguas arriba Figuras 26m, 26n y 26o, ST 13, 14 y 15 no se observa cambio en la morfología por lo que no se evidencia

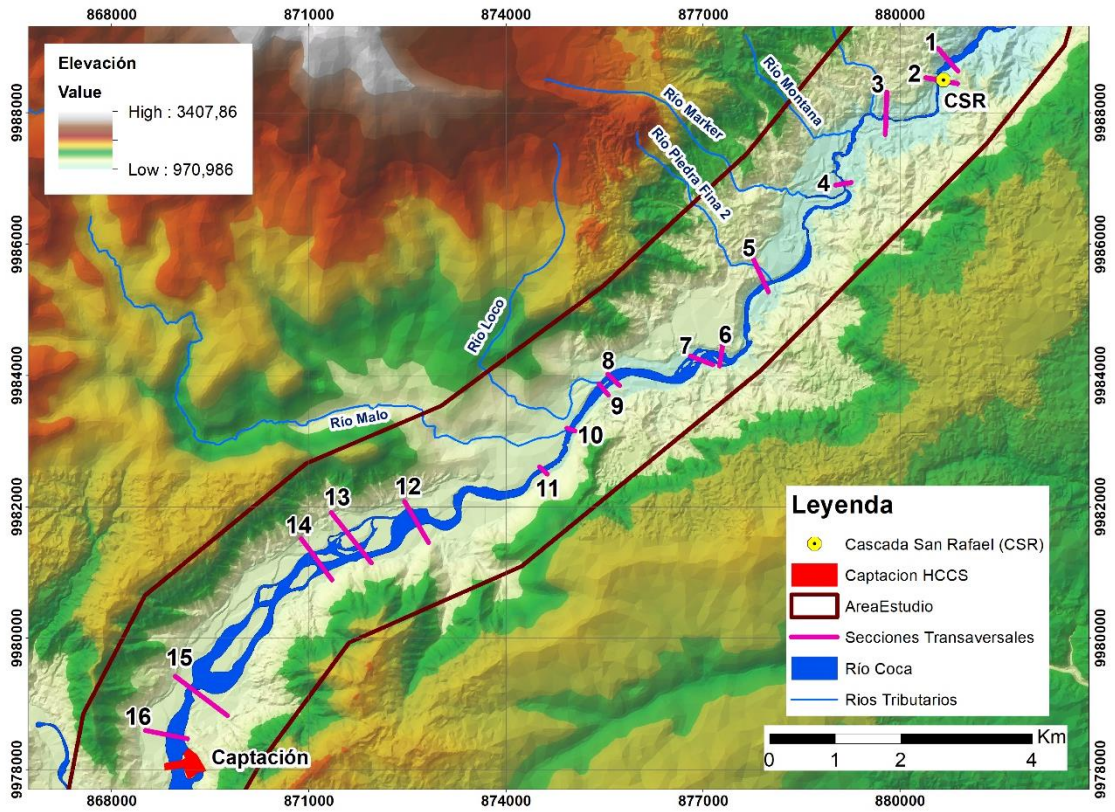


el PER en esos sectores. En la Figura 26p, ST 16, se observa un aumento en el fondo del cauce de 1 [m] en 1 mes y medio el cual estaría asociado a los sedimentos finos presentes en el caudal ecológico de la Captación de la HCCS. (Figura 21).

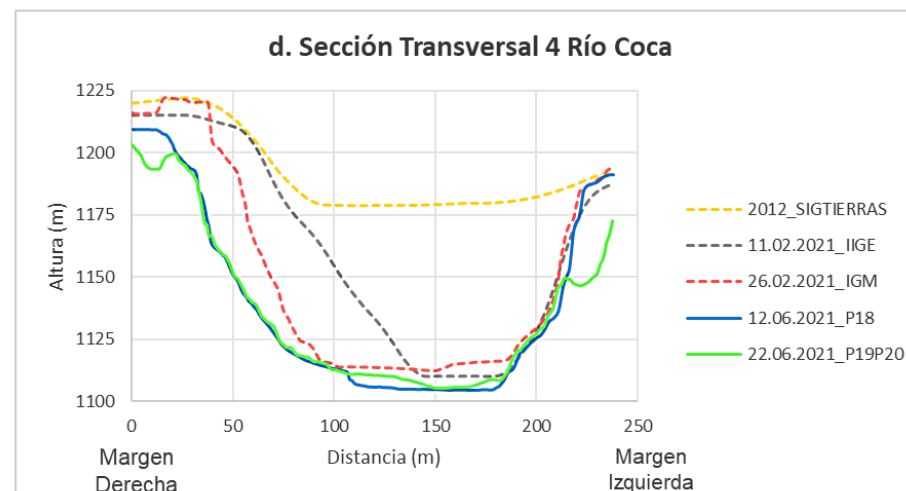
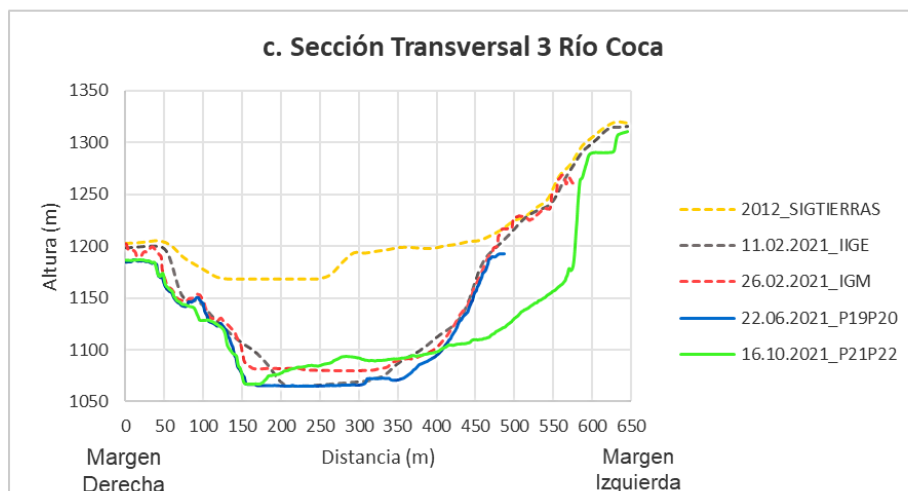
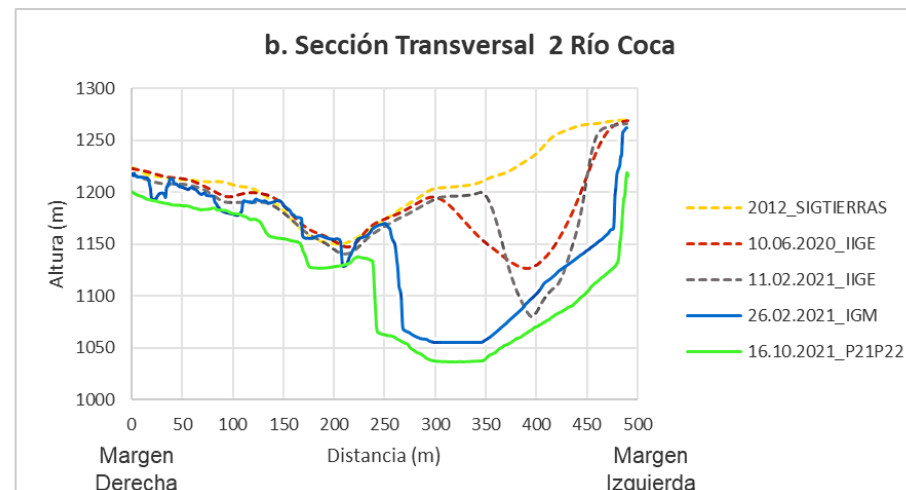
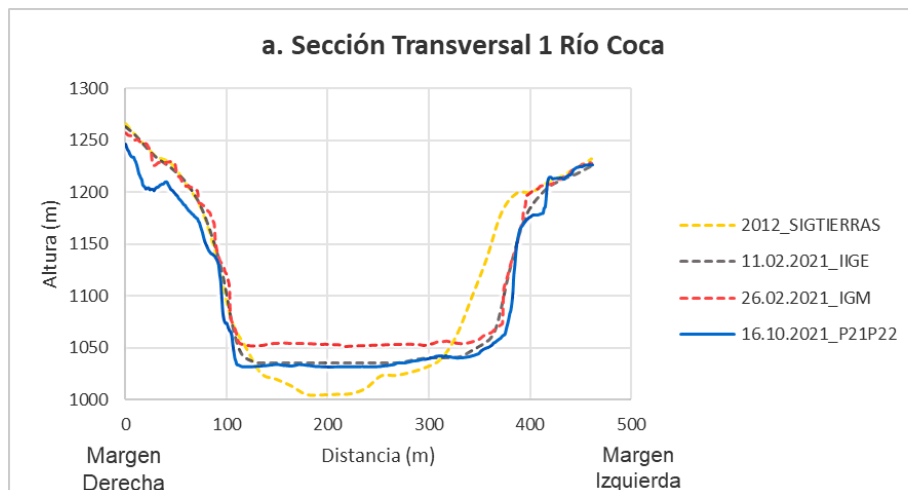


**Figura 21.** Isla aguas abajo de la Captación de la HCCS asociada a los sedimentos finos presentes en el caudal ecológico.

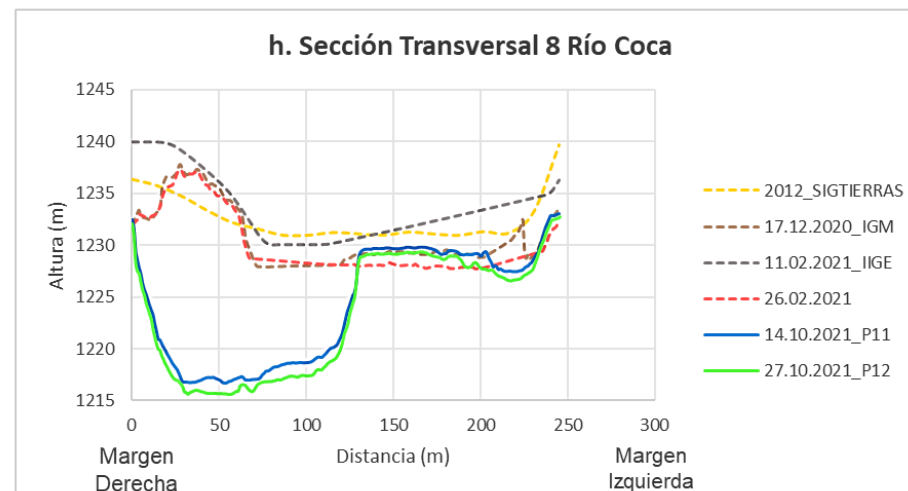
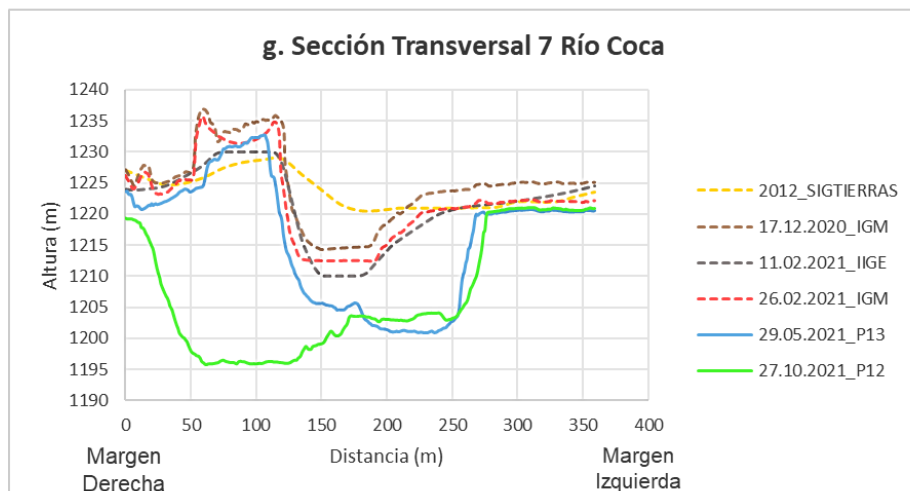
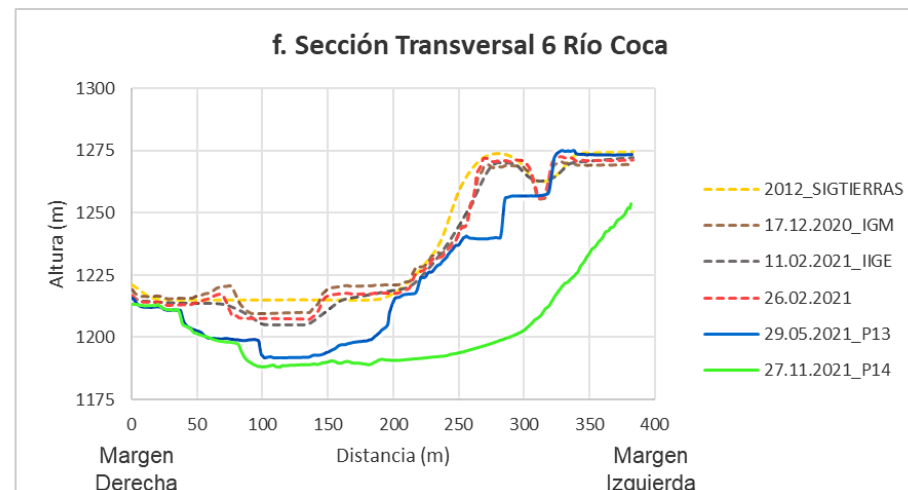
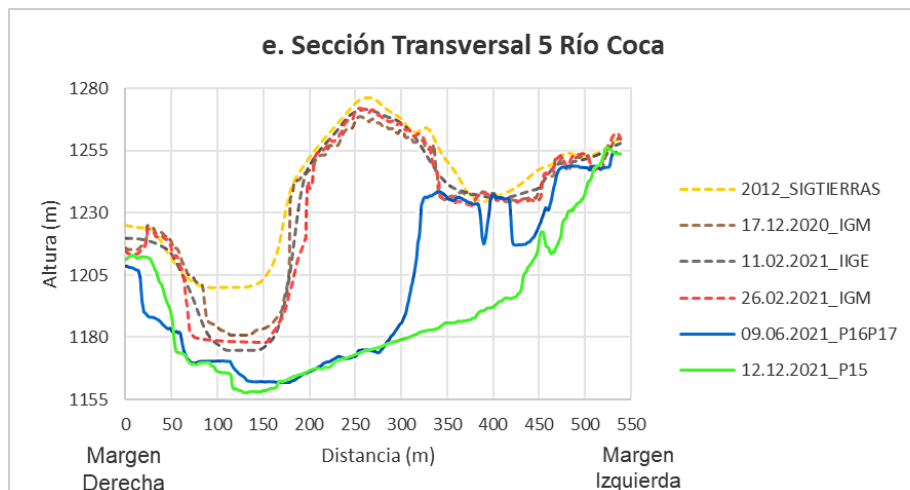
Las ST también muestran el movimiento del thalweg a lo largo del río Coca hacia sus márgenes a medida que va desplazando los sedimentos, como en el caso de la Figura 24g, ST 7 en la que el thalweg se encuentra primero hacia la margen izquierda y luego se profundiza y desplaza hacia la margen derecha.



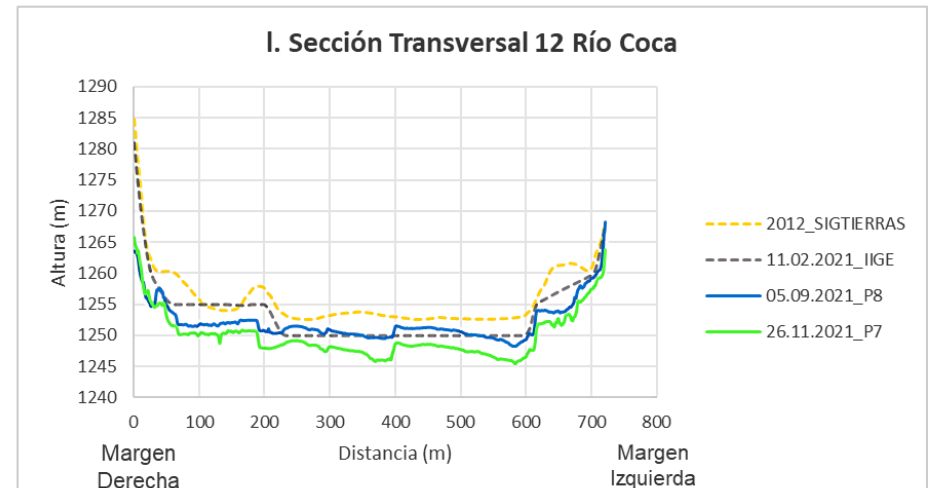
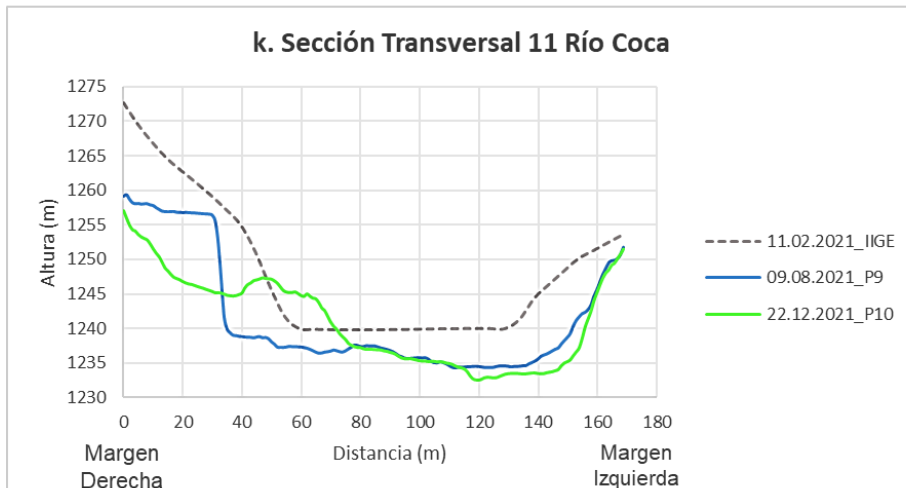
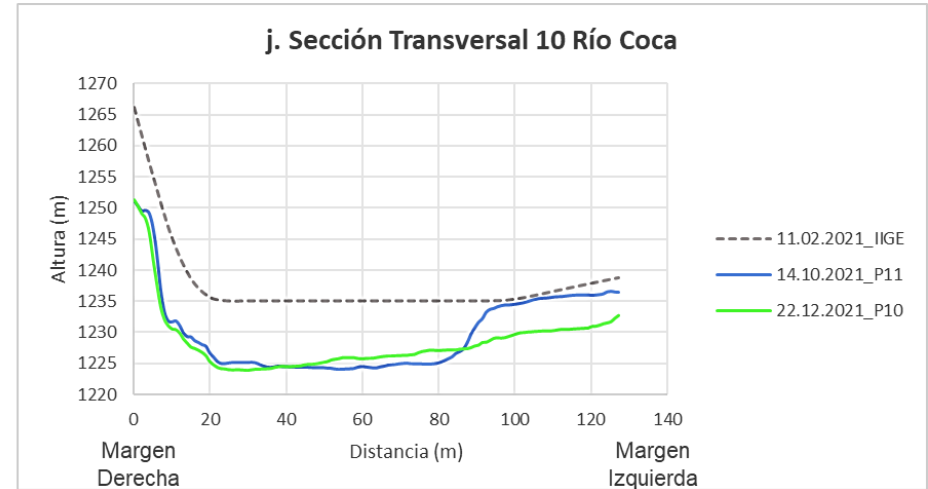
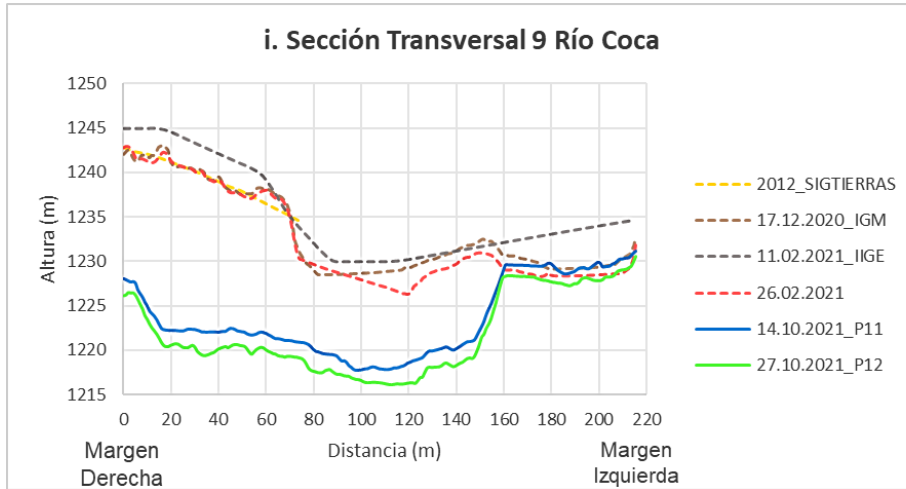
**Figura 22.** Mapa mostrando la ubicación de las secciones transversales a lo largo del río Coca.



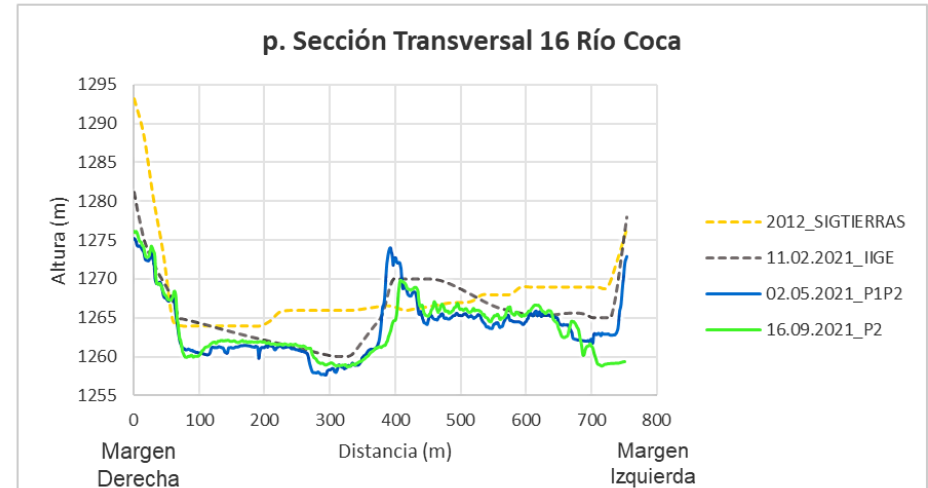
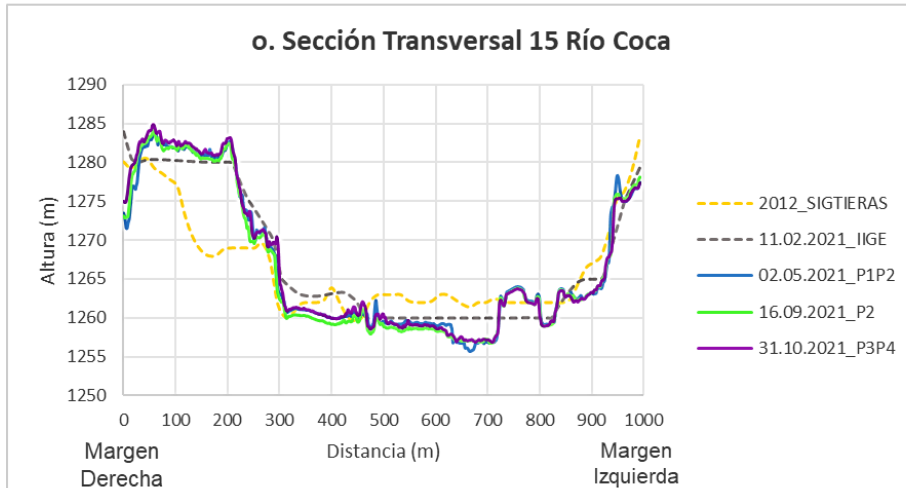
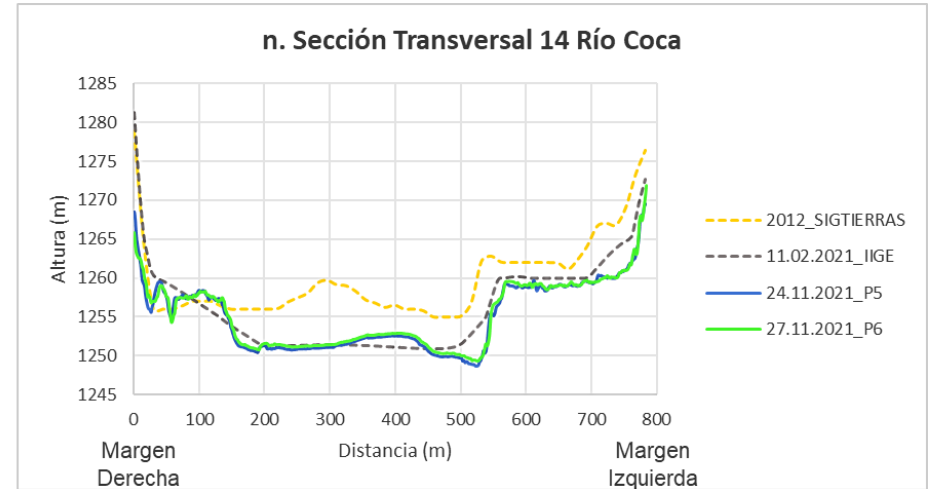
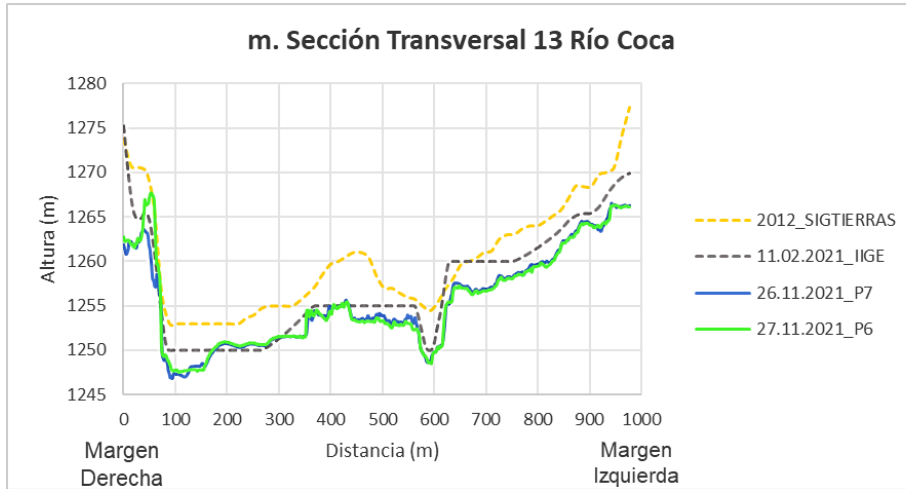
**Figura 23. Secciones Transversales del río Coca**



**Figura 24. Secciones Transversales del río Coca**



**Figura 25. Secciones Transversales del río Coca**



**Figura 26. Secciones Transversales del río Coca**

**Tabla 2.**Tasas de EV y EL para las secciones transversales en el río Coca.

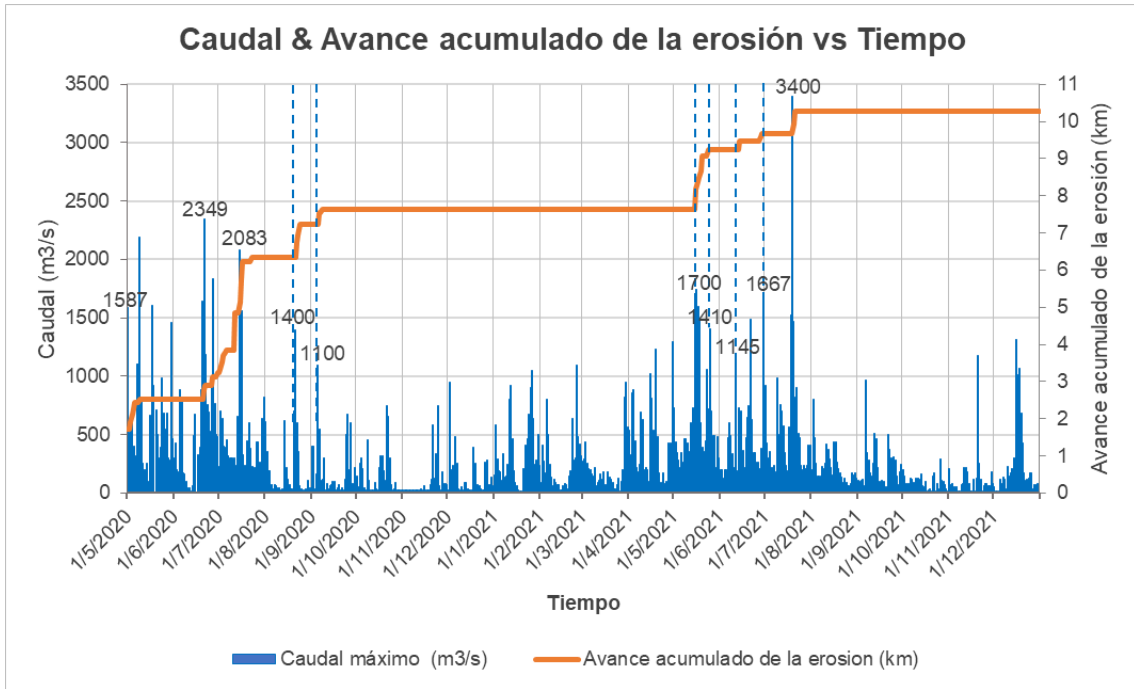
Sección Transv.	Erosión Vertical (m)	Erosión Lateral (m)	Fecha 1	Fecha 2	Tiempo (días)	Tasa Erosión Vertical (m/año)	Tasa Erosión Lateral (m/año)
3	20	109	22/6/2021	16/10/2021	116	62,93	342,97
4	5	1	12/6/2021	22/6/2021	10	182,50	36,50
5	5	185	9/6/2021	12/12/2021	186	9,81	363,04
6	4	169	29/5/2021	27/11/2021	182	8,02	338,93
7	6	105	29/5/2021	27/10/2021	151	14,50	253,81
8	2	0	14/10/2021	27/10/2021	13	56,15	0,00
9	2	0	14/10/2021	27/10/2021	13	56,15	0,00
10	1	0	14/10/2021	22/12/2021	69	5,29	0,00
11	2	26	9/8/2021	22/12/2021	135	5,41	70,30
12	3	0	5/9/2021	26/11/2021	82	13,35	0,00
13	0	0	26/11/2021	27/11/2021	1	0,00	0,00
14	0	0	24/11/2021	27/11/2021	3	0,00	0,00
15	0	0	16/9/2021	31/10/2021	45	0,00	0,00
16	1	5	2/5/2021	16/9/2021	137	2,66	13,32

En las tasas de erosión calculadas para la EV y EL mostradas en la Tabla 2 se observa valores altos por los lugares donde ya ha pasado el frente erosivo de la ERF, además se observa que cuando los valores de la tasa de EV son altos los valores de EL también son altos. En los casos que esto no se observa se ve que las fechas entre los MDT usados para el cálculo son muy cercanas.

### 3.2. Poder Erosivo del río Coca

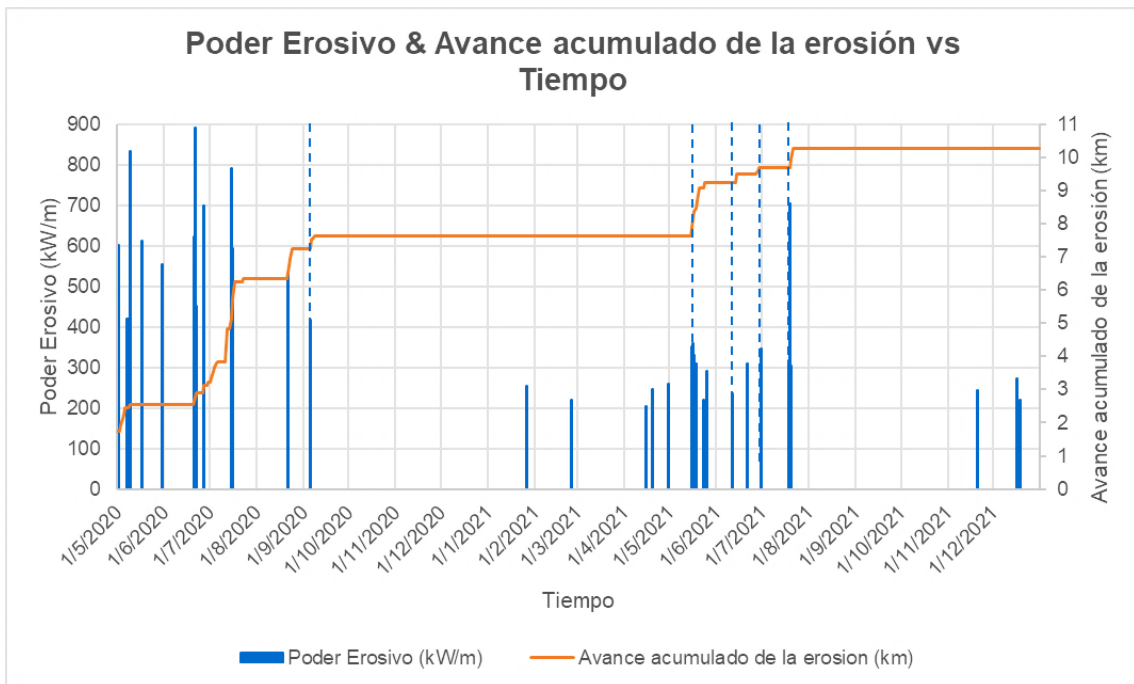
A partir de los datos reportados por CELEC y los cálculos realizados se elaboró una tabla en Microsoft Excel (Anexo 1) a partir de la cual se elaboró los Gráficos de:

- Caudal ( $m^3/s$ ) & Avance acumulado de la erosión (km) vs Tiempo,
- Poder Erosivo (kW/m) & Avance acumulado de la erosión (km) vs Tiempo,
- Litología, Poder Erosivo (kW/m) & Tasa de erosión (km/año) vs Tiempo,
- Litología y Avance acumulado de la erosión (km) vs Tiempo,
- Caudal ( $m^3/s$ ) & Poder Erosivo (kW/m) vs Tiempo.



**Figura 27.** Gráfica del Caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) & Avance acumulado de la erosión (km) vs Tiempo.

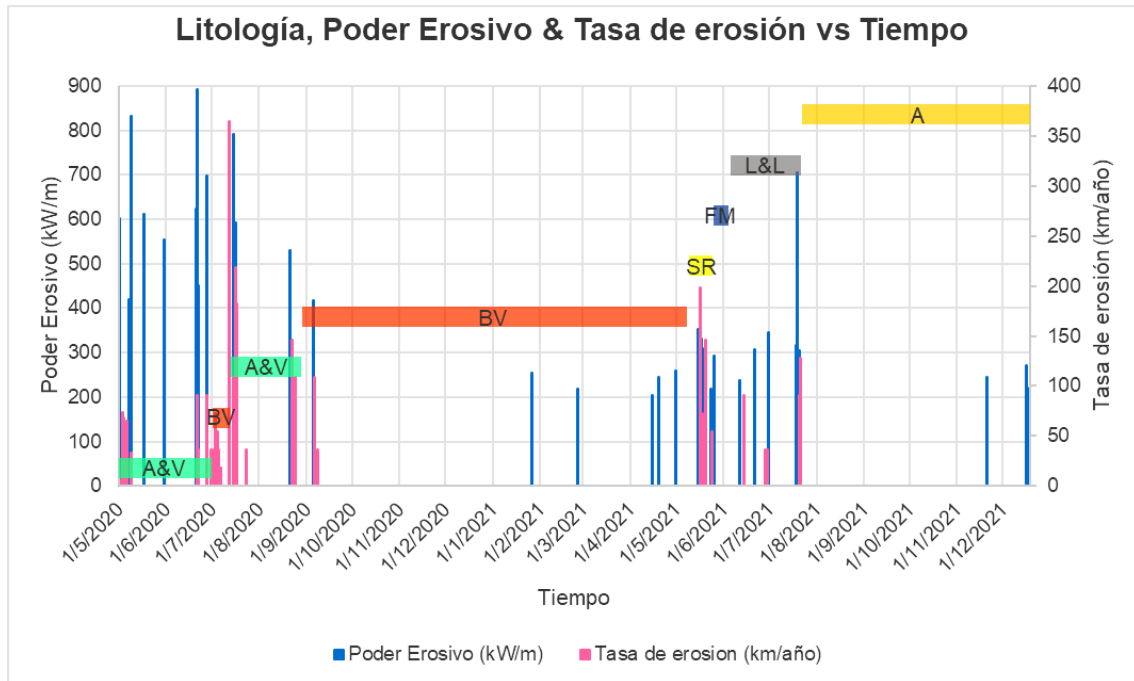
En la gráfica de la Figura 27 se observa que el PER se reinicia cuando los caudales sobrepasan los  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ , el caudal de  $3400 \text{ m}^3/\text{s}$  posiblemente sería el mayor caudal registrado en 10 años de recurrencia en el río Coca.



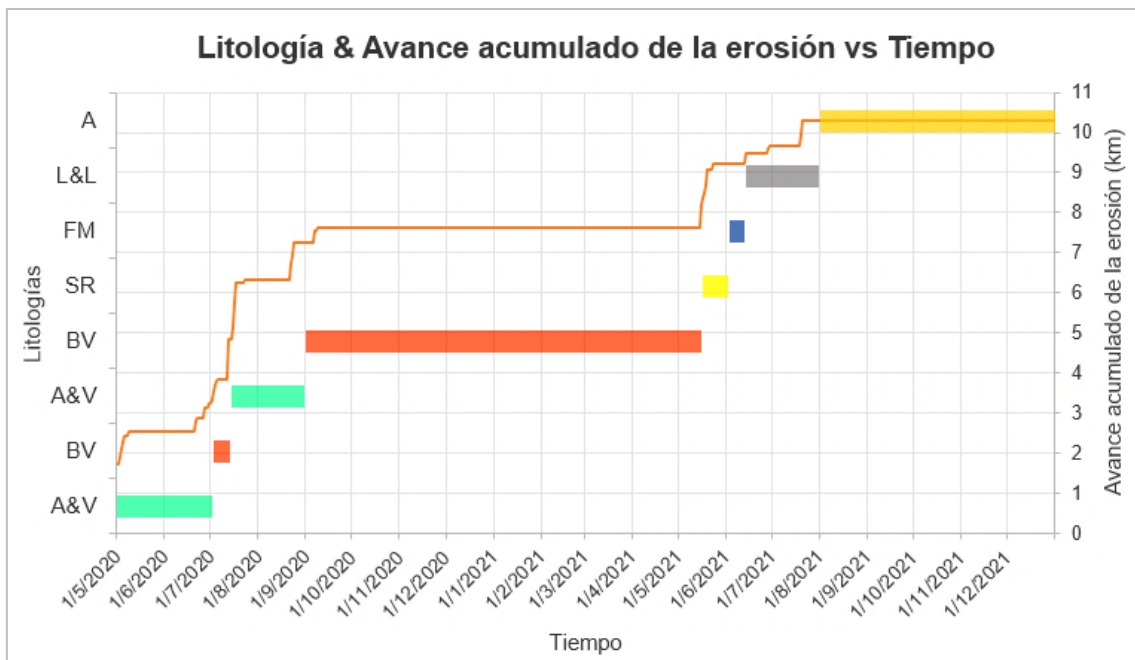
**Figura 28.** Gráfica del Poder Erosivo ( $\text{kW}/\text{m}$ ) & Avance acumulado de la erosión (km) vs Tiempo.



En la gráfica de la Figura 28 se observa como en los picos en los que el Poder Erosivo es alto se reinicia el PER, con el paso del tiempo este poder disminuye siendo en 2020 mayor que en 2021.



**Figura 29.** Gráfica de Litología, Poder Erosivo (kW/m) y Tasa de erosión (km/año) vs Tiempo.

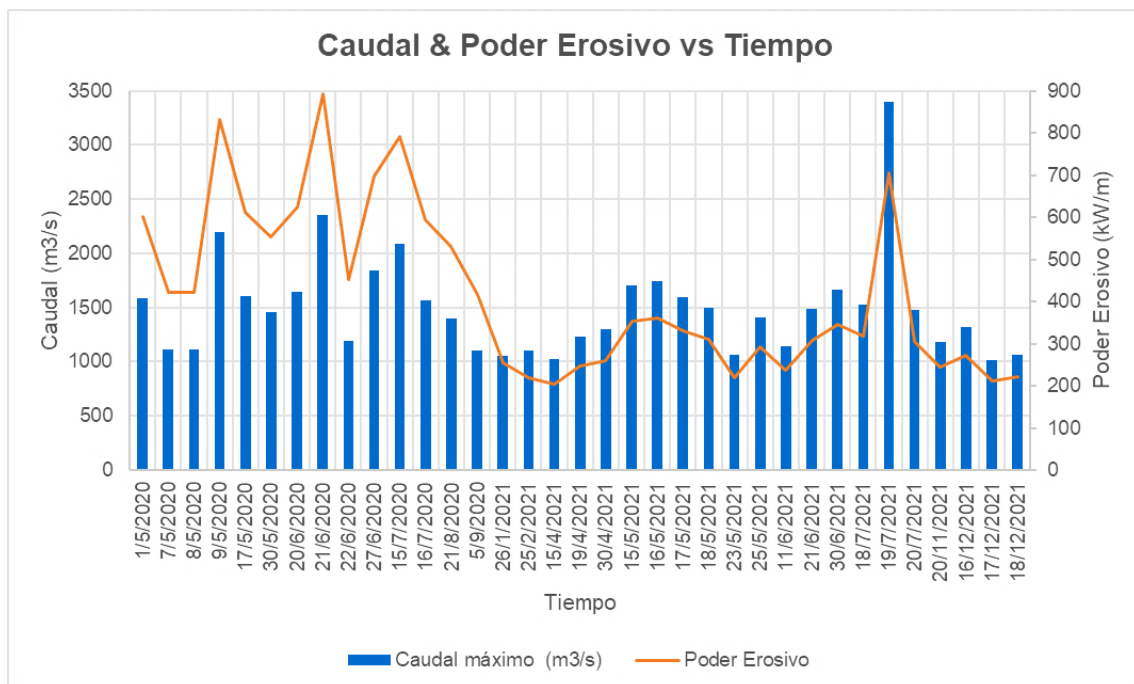


**Figura 30.** Gráfica de Litología y Avance acumulado del avance de la erosión (km) vs Tiempo.



**Figura 31.** Litologías por las que avanzo la ERF.

En las gráficas de la Figura 29, 30 y 31 se muestra la litología por la que ha avanzado la ERF y como esta varia a lo largo del cauce del río Coca. Se observa que son litologías poco resistentes dentro de las cuales se reinicia el PER, que coincide con los picos más altos de las tasas de erosión y el poder erosivo. Se observa que la litología es un factor determinante dentro del PER.



**Figura 32.** Gráfica del Caudal (m<sup>3</sup>/s) y Poder erosivo (kW/m) vs Tiempo.

La Figura 32 nos muestra la relación directa entre el Caudal y el Poder Erosivo, los picos en el Poder Erosivo coinciden con los mayores caudales mostrando la influencia del caudal, sin embargo, no es el único control.

## CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN

La erosión es una grave amenaza geomorfológica que ha cambiado de manera abrupta la morfología del río Coca; el seguimiento geomorfológico de este proceso es fundamental para comprender, cuantificar y analizar los procesos que allí ocurren.

Este proceso erosivo se desato en respuesta la desaparición de la ex CSR, la cual actuaba como Nivel Base Local del río Coca, por lo que no se detendrá hasta que el río encuentre nuevamente su perfil de equilibrio, esto lo muestra la Figura 18. Sin embargo, la evolución no es lineal y se ve como en fechas recientes hay tramos cercanos a la ex CSR donde se da un proceso de agradamiento que provoca un reajuste en el perfil de equilibrio (Figuras 17 y 23a). En los perfiles longitudinales del río (Figura 17) también se observa cambios abruptos en la pendiente (knickpoints) asociados posiblemente a cambios litológicos resultado de las diferentes génesis (volcánico y fluvio-lacustre) de las rocas que forman el lecho del río Coca, la formación de estos knickpoints en el río Coca dependerá de la resistencia, disposición y grado de fractura que presentan las rocas frente a la erosión de la corriente.

La respuesta del río Coca a la pérdida de su Nivel Base Local (CSR) es compleja y se da en tres ejes: Erosión Vertical (EV); Erosión Lateral (EL), y Erosión Regresiva Frontal (ERF). Según muestran las Figuras 17, 23, 24, 25 y 26. El río Coca empezó con un proceso de erosión profundizando su cauce (EV) lo que provocó que los taludes se desestabilicen, derrumbándose y ensanchando el valle de río (EL), producto del cambio en el estado de esfuerzos y deformaciones del material contiguo facilitando su desplome. Esto se observa en la tasa de EL que presenta valores altos cuando la tasa de EV también es alta (Tabla 2) debido a que la erosión se da en orden primero con incisión y luego con el colapso de los taludes. En las secciones transversales se observa que estos dos procesos, EV y EL, son continuos durante todo el año hidrológico y están relacionadas con la litología que corresponde principalmente a depósitos aluviales, avalanchas de escombros y sedimentos recientes los cuales son de poca resistencia a la erosión; a diferencia de la ERF que como se observó en los perfiles longitudinales y en las gráficas del avance acumulado de la erosión se detiene por determinados periodos de tiempo y reinicia su avance con caudales mayores a  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  como se ve en la Figura 27. Estos resultados nos permiten afirmar que el principal factor que controla el avance de la ERF es el caudal, que a pendientes menores a 0,02 es el único control del Poder Erosivo. El Poder Erosivo está directamente asociado al caudal y la pendiente por lo que un aumento en estos parámetros favorece el aumento del Poder

Erosivo. La litología también es determinante como se ve la Figura 29 ya que en ciertos periodos en los que el Poder Erosivo es alto no se reinicia el PER, lo que estaría asociado a un aumento en la resistencia de fondo del lecho del río.

En la zona ubicada entre el río Loco y la ex CSR se presentan altas tasas de EL y EV, en esta zona 1) la litología poco resistente corresponde principalmente a depósitos de avalancha (*Avalancha 2*) y sedimentos recientes (Figura 5), los cuales son materiales poco consolidados y 2) las pendientes pronunciadas producto del avance de la ERF favorecen la erosión.

El río Coca también muestra una gran capacidad para transportar sedimento desplazando su thalweg hacia cualquiera de sus márgenes a lo largo de su cauce como se ve en la Figura 24g, ST 7 en la que el thalweg primero se encuentra hacia la margen izquierda y luego se profundiza y cambia hacia la margen izquierda. En las Figuras 23 y 25, ST 3, 10 y 11 también se observa un desplazamiento del thalweg, en este caso asociado deslizamientos producto del colapso de los taludes que desplazan al thalweg hacia la margen contraria al deslizamiento, el material producido eleva el fondo del cauce temporalmente ya que la EV nuevamente profundiza el cauce.

Aguas arriba del río Loco no se ve cambios en la morfología del río Coca, Figura 26 por lo que a esta zona aun no habría llegado el PER, sin embargo en la ST 16 se observa un aumento en el fondo del cauce que está relacionado a un proceso de agradación que se desarrolla aguas abajo de la Captación de la HCCS, producto de los sedimentos finos presentes en el caudal ecológico, el cual purga los desarenadores de la hidroeléctrica, formando una isla (Figura 21).

El cálculo de la Tasa de erosión y el Poder Erosivo aplicando la Ley de potencia de corriente "Stream Power Law" han permitido en este estudio ver la alta capacidad erosiva del río Coca, al igual que las secciones transversales y perfiles longitudinales en los que se observa el transporte de una gran cantidad de sedimentos producto de la EL y EV, lo que modifica de gran manera la morfología del río Coca.

Los resultados obtenidos muestran que la hipótesis planteada es verdadera con relación al caudal ya que muestra que con valores altos se desencadena el proceso erosivo, en segundo orden de magnitud está la pendiente y con una participación más modesta esta la litología.

## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. Conclusiones**

La pérdida del Nivel Base Local tiene una respuesta compleja desencadenando una serie de procesos necesarios que le permiten al río Coca recuperar su equilibrio dinámico, entre ellos el PER que se da en 3 ejes: Erosión Vertical (EV); Erosión Lateral (EL), y Erosión Regresiva Frontal (ERF).

El PER se da en orden por lo que el río Coca empezó con un proceso de erosión profundizando su cauce (EV) lo que provocó que el colapso de los taludes (EL) y finalmente el avance de la ERF. El análisis de la EV y EL muestra que a pesar de que la ERF se detenga, ambos tipos de erosión son continuas durante todo el año hidrológico y están relacionadas con la litología del área de estudio poco resistente a la erosión, produciendo altas tasas de erosión.

La ERF se reinicia con caudales mayores a  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  los cuales se presentan en la época lluviosa (febrero-noviembre), por lo que la ERF se encuentra detenida hasta el momento que nuevamente se produzcan caudales suficientemente altos que la reactiven, siendo este el principal factor que controla la erosión.

El Poder Erosivo depende del caudal y la pendiente por lo que con una pendiente baja solo depende del caudal el cual en ocasiones no es suficiente para reactivar el PER.

La litología es un factor determinante ya que en zonas en las que las rocas del lecho del río presentan mayor resistencia (brecha volcánica) el PER no se reinicia, aunque el Poder Erosivo sea alto, por lo que encontrar una capa de resistente con un espesor importante detendría el avance del PER.

Las tasas de erosión son mayores en el año 2020 cuando la pendiente era más fuerte y los caudales altos lo que favorece el aumento del Poder Erosivo, sumado a una litología poco resistente. La pendiente ha ido disminuyendo como se muestra en los perfiles por lo que en 2021 el Poder Erosivo ha disminuido, disminuyendo así también las tasas de erosión.

Los perfiles longitudinales analizados del río Coca se encuentran lejos de las condiciones de equilibrio, no presentan una forma cóncava y además poseen fuertes

pendientes, sin embargo, se observa un proceso de agradamiento que provoca un reajuste en el perfil de equilibrio que con el tiempo lo acercaría al perfil de equilibrio teórico.

La ERF ha avanzado levemente aguas arriba del río Loco, sin embargo, no ha llegado a la Captación de la HCCS ya que en las secciones transversales no se observa cambio en morfología del río Coca.

Las secciones transversales muestran el movimiento del thalweg hacia ambos márgenes del río Coca, asociado a la capacidad del río a desplazar sedimentos y a la presencia de abundantes deslizamientos.

La sección transversal aguas abajo de la Captación de la HCCS muestra que existe un proceso de agradación formando una isla de sedimentos finos relacionado al caudal ecológico que purga los desarenadores de la hidroeléctrica.

En la realización del presente trabajo se ha contado con limitantes importantes: la ausencia de un MDT y ortofotografías que abarquen toda el área de estudio en la misma fecha y la no disponibilidad de MDT y ortofotografías del año 2020 de la misma institución. Sin embargo, se aporta un análisis cuantitativo por tramos y un análisis cualitativo mediante la utilización de MDT proporcionado por diferentes instituciones que nos permiten evidenciar el PER.

## **5.2. Recomendaciones**

Realizar más análisis y dar seguimiento al PER en el río Coca, así como un análisis y seguimiento de los ríos Tributarios ya que estos también serán afectados por el PER ya que cambiarán y algunos ya habrán cambiado su nivel base Local que era el río Coca.

Elaborar MDT de toda el área de estudio y no por tramos para tener una perspectiva más amplia de lo que sucede aguas arriba y aguas abajo de la ubicación de ex CSR.

Realizar un seguimiento y análisis aguas abajo de la ex CSR debido a que el aporte de sedimentos provenientes del PER provocara grandes cambios en la morfología del río, afectando a la fauna, flora, comunidades e incluso a la casa de máquinas de la HCCS.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, M. F., Ali, M. Z., Rogers, J. D., & Khan, M. S. (2019). A study of knickpoint surveys and their likely association with landslides along the Hunza River longitudinal profile. *Environmental Earth Sciences*, 78(5).
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J. M., Jaillard, E., Mothes, P., Jarrín, P., ... Cisneros, D. (2016). Partitioning of oblique convergence in the Northern Andes subduction zone: Migration history and the present-day boundary of the North Andean Sliver in Ecuador. *Tectonics*, 35(5), 1048–1065.
- Andrade, A. (2016). Análisis de la influencia de la geodinámica y los impactos antrópicos en la geomorfología fluvial del Río Coca. Caso de estudio: impactos fluviales del proyecto Coca Codo SINCLAIR – PHCCS. Quito: EPN.
- Aspden, J. A. & Litherland, M. (1992). The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera real, Ecuador. *Tectonophysics*, 205, 1787–204.
- Baby, P., Rivadeneira, M. & Barragán, R. (2004). La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo. Tercera ed. s.l.s.n
- Báez, C. (2018). Análisis geomorfológico y tectónico para la determinación de los factores condicionantes en la producción de sedimentos de la subcuenca hidrográfica del Río Salado (cuenca hidrográfica del río Coca). Quito, EPN.
- Bernal C. (2009). Contrôle géodynamique des transferts de masses entre une chaîne et son piémont: exemples du mégacône du Napo-Pastaza (Equateur-Pérou).
- Bernal I. C. (2020). Erosión en el cauce del Río Coca. Recuperado de: <https://www.epn.edu.ec/investigacion-muestra-erosion-en-cauce-del-rio-coca-en-el-sector-de-san-rafael/>
- Bravard, F. & Petite, J-P. (2000). Les Cours d'eau - Dynamique Du Systeme Fluvial. Armand Colin, 222 pp.
- Charlton R. (2008). Fundamentals of Fluvial Geomorphology.
- Corporación Eléctrica del Ecuador (2020-2021). Monitoreos diarios del Río Coca Recuperado de: <https://cecloud.celec.gob.ec/s/MtR99RQQQ2b2FRH>
- Degoutte, G. (2001). Cours d'Hydraulique, Dynamique et Morphologie Fluviale. Cours de Master Sciences et Technologies Paris VI.
- Egüez, A., Alvarado, A., Yopez, H., Machette M., & Costa C. (2003). Database and Map of Quaternary Faults and Folds of Ecuador and its offshore regions. Open-File Report 03-289.
- Ferrier, K., Huppert, K. & Perron, J. (2013). Climatic control of bedrock river incisión. *Nature* 496, 206–209.

- Gutiérrez, E. G., Horton, B. K., Vallejo, C., Jackson, L. J., & George, S. W. (2019). Provenance and geochronological insights into Late Cretaceous-Cenozoic foreland basin development in the Subandean Zone and Oriente Basin of Ecuador. In *Andean Tectonics* (pp. 237-268).
- Hall, M., Ramón, P., Mothes, P., Lepennec, J., García, A., Samaniego, P., Yepes, H. (2004). Volcanic Eruptions With Little Warning: The Case Of Volcán Reventador's Surprise November 3, 2002 Eruption, Ecuador. *Revista Geológica De Chile*, Vol. 31, No. 2, P. 349-358.
- Harel, M.-A., Mudd, SM y Attal, M. (2016). Análisis global de los parámetros de la ley de potencia del flujo basado en tasas de denudación 10 Be en todo el mundo. *Geomorfología*, 268, 184-196. doi: 10.1016 / j.geomorph.2016.05.035
- Hack, J. (1973). *Journal of Research of the U. S. Geological Survey* 1, 421- 429.
- Herrera, F., Álvarez, A., Asimbaya, D., & Romero, C. (2020). Visión Geológica y Morfológica del Proceso de Erosión Regresiva del Río Coca, Napo-Ecuador. Encuentro Internacional del ICES. Argentina: International Center for Earth Sciences.
- Huggett R. J. (2017). *Fundamentals of Geomorphology*.
- Instituto de Investigación Geológico y Energético (2021). Informe Técnico: Estudio Geológico entre la antigua Cascada de San Rafael y la obra de captación de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair. República del Ecuador.
- Instituto Ecuatoriano de Electrificación (1988). Mapa Geológico del volcán El Reventador. Consultoras del Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair.
- IG-EPN (2021). <http://www.igepn.edu.ec>, Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Jaillard, E., Hérial, G., Monfret, T., & Wörner, G. (2002). Andean geodynamics: main issues and contributions from the 4th ISAG. *Tectonophysics*, 1-15.
- Jiménez F., Antón L., Soria A., & Pastor C. (2017). Cálculo del perfil teórico de equilibrio de un río en función del índice de gradiente. *Geogaceta*, 62, 51-54.
- Meneses R., Granja J., Luzuriaga J., Lema L., y Correa A. (2020). Monitoreo del Cauce del Río Coca: Informe Final (KAWSUS-CCS-MCRC-01). KAWSUS CIA. LTDA.
- Merz, B., Hall, J., Disse, M., Schumann, A. (2010). Fluvial flood risk management in a changing world. - *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHES)*, 10, 3, 509-527.
- Micheli F. (6 de agosto de 2021). Diseño de obras de protección: Pantallas rígidas para controlar la erosión del Río Coca aguas abajo de la Captación de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair [Diapositiva Power Point]. Lombardi.



- Observatorio de Ríos Andinos (2021). Estudio de caso: La central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair & El proceso erosivo en el alto Coca.
- Reyes A., Ulises F., & Carvajal Y. (2011). Guía Básica para la Caracterización Morfométrica de Cuencas Hidrográficas. Universidad del Valle. Cali, Colombia.
- Reyes P., Procel S., Sevilla J., Cabero A., Orozco A., Cordova J., Lima F. & Vásconez F. (2021). Exceptionally uncommon overburden collapse behind a natural lava dam: Abandonment of the San-Rafael Waterfall in northeastern Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*. Volumen 110, 103353.
- Spikings, R., Winkler, A., Seward, D. & Handler, R. (2001). Along-strike variations in the thermal and tectonic response of the continental Ecuadorian Andes to the collision with heterogeneous oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.* 186, 57-73
- Tarbuck E. J. & Lutgens F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra, Una introducción a la geología física.*
- Tibaldi, Alessandro. (2005). Volcanism in compressional tectonic settings: Is it possible? *Geophysical Research Letters*, 32(6), 1–4.
- Tibaldi, A., Rovida, A., & Corazzato, C. (2007). Late Quaternary kinematics, slip-rate and segmentation of a major Cordillera-parallel transcurrent fault: The Cayambe-Afiladores-Sibundoy system, NW South America. *Journal of Structural Geology*, 29(4), 664–680.
- Vallejo, C., Winkler, W., Spikings, R. A., Luzieux, L., Heller, F., & Bussy, F. (2009). Mode and timing of terrane accretion in the forearc of the Andes in Ecuador. *The Geological Society of America. Memoir*, 204, Volumen 204, pp. 197- 216.
- Vaca S., Vallée M., Nocquet J., & Alvarado A. (2019). Active deformation in Ecuador enlightened by a new waveform-based catalog of earthquake focal mechanisms. *Journal of South American Earth Sciences*, Elsevier, 93, pp.449 - 461.
- Vásconez M., Mancheno A., Álvarez C., & Prehn C. (2019). *Cuencas Hidrográficas.* Quito, Universidad Politécnica Salesiana.
- Winkler, W., Villágomez, D., Spikings, R., Abegglen, P., & Egüez, A., (2005). The Chota basin and its significance for the inception and tectonic setting of the inter Andean depression in Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 19, 5–19.

## ANEXOS

**Anexo I.** Tabla mostrando los datos recopilados de los monitoreos diarios de CELEC y los resultados obtenidos del cálculo de la Tasa de Erosión, Acumulada del avance de la erosión y Poder Erosivo.

Fecha	Caudal máximo (m <sup>3</sup> /s)	Litología	Longitud de avance (km)	Tasa de erosión (km/año)	Avance acumulado de la erosión (km)	Poder Erosivo (kW/m)
1/5/2020	1587	Depósitos volcánicos y aluviales	1,727	7,1	1,727	602,6
2/5/2020	518	Depósitos volcánicos y aluviales	1,727	0,0	1,727	196,7
3/5/2020	628	Depósitos volcánicos y aluviales	1,929	73,7	1,929	238,4
4/5/2020	600	Depósitos volcánicos y aluviales	2,117	68,6	2,117	227,8
5/5/2020	402	Depósitos volcánicos y aluviales	2,267	54,8	2,267	152,6
6/5/2020	323	Depósitos volcánicos y aluviales	2,447	65,7	2,447	122,6
7/5/2020	1108	Depósitos volcánicos y aluviales	2,447	0,0	2,447	420,7
8/5/2020	1108	Depósitos volcánicos y aluviales	2,447	0,0	2,447	420,7
9/5/2020	2194	Depósitos volcánicos y aluviales	2,538	33,2	2,538	833,0
10/5/2020	819	Depósitos volcánicos y aluviales	2,538	0,0	2,538	311,0
11/5/2020	252	Depósitos volcánicos y aluviales	2,538	0,0	2,538	95,7
12/5/2020	202	Depósitos volcánicos y aluviales	2,538	0,0	2,538	76,7
13/5/2020				0,0	2,538	0,0
14/5/2020	252	Depósitos volcánicos y aluviales	2,538	0,0	2,538	95,7
15/5/2020	98	Depósitos volcánicos y aluviales	2,538	0,0	2,538	37,2
16/5/2020	667	Depósitos volcánicos y aluviales	2,538	0,0	2,538	253,3
17/5/2020	1610	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	611,3
18/5/2020	925	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	351,2
19/5/2020				0,0	2,538	0,0
20/5/2020	715	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	271,5
21/5/2020	502	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	190,6
22/5/2020	302	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	114,7
23/5/2020	393	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	149,2
24/5/2020	982	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	372,9
25/5/2020	686	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	260,5
26/5/2020	545	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	206,9
27/5/2020	686	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	260,5
28/5/2020	302	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	114,7
29/5/2020	280	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	106,3
30/5/2020	1458	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	553,6
31/5/2020	465	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	176,6
1/6/2020	302	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	114,7
2/6/2020	426	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	161,7

3/6/2020	201	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	76,3
4/6/2020	178	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	67,6
5/6/2020	883	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	335,3
6/6/2020	818	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	310,6
7/6/2020	174	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	66,1
8/6/2020	164	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	62,3
9/6/2020	98	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	37,2
10/6/2020	50	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	19,0
11/6/2020	42	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	15,9
12/6/2020	22	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	8,4
13/6/2020	60	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	22,8
14/6/2020	492	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	186,8
15/6/2020	677	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	257,0
16/6/2020				0,0	2,538	0,0
17/6/2020	326	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	123,8
18/6/2020	392	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	148,8
19/6/2020	883	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	335,3
20/6/2020	1643	Depósitos volcánicos y aluviales	2,500	0,0	2,538	623,8
21/6/2020	2349	Depósitos volcánicos y aluviales	2,750	91,3	2,788	891,9
22/6/2020	1188	Depósitos volcánicos y aluviales	2,850	36,5	2,888	451,1
23/6/2020	756	Depósitos volcánicos y aluviales	2,850	0,0	2,888	287,0
24/6/2020	695	Depósitos volcánicos y aluviales	2,850	0,0	2,888	263,9
25/6/2020	525	Depósitos volcánicos y aluviales	2,850	0,0	2,888	199,3
26/6/2020	984	Depósitos volcánicos y aluviales	2,850	0,0	2,888	373,6
27/6/2020	1840	Brechas volcánicas, m. derecha y aluviales	3,100	91,3	3,138	698,6
28/6/2020	767	Depósitos volcánicos y aluviales	3,100	0,0	3,138	291,2
29/6/2020	503	Depósitos volcánicos y aluviales	3,100	0,0	3,138	191,0
30/6/2020	487	Brecha volcánica,	3,200	36,5	3,238	184,9
1/7/2020	228	Depósitos volcánicos y aluviales	3,200	0,0	3,238	86,6
2/7/2020	700	Depósitos volcánicos y aluviales	3,300	36,5	3,338	265,8
3/7/2020	640	Brecha volcánica	3,500	73,0	3,538	243,0
4/7/2020	400	Brecha volcánica	3,650	54,8	3,688	151,9
5/7/2020	392	Brecha volcánica	3,750	36,5	3,788	148,8
6/7/2020	460	Brecha volcánica	3,800	18,2	3,838	174,7
7/7/2020	315	Brecha volcánica	3,800	0,0	3,838	119,6
8/7/2020	300	Brecha volcánica	3,800	0,0	3,838	113,9
9/7/2020	300	Brecha volcánica	3,800	0,0	3,838	113,9
10/7/2020	300	Brecha volcánica	3,800	0,0	3,838	113,9
11/7/2020	300	Brecha volcánica	3,800	0,0	3,838	113,9
12/7/2020	240	Brecha volcánica	4,800	365,0	4,838	91,1
13/7/2020	660	Brecha volcánica	4,800	0,0	4,838	250,6
14/7/2020	600	Brecha volcánica	4,800	0,0	4,838	227,8
15/7/2020	2083	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	5,100	109,5	5,138	790,9

16/7/2020	1561	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	5,700	219,0	5,738	592,7
17/7/2020	326	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,200	182,5	6,238	123,8
18/7/2020	240	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,200	0,0	6,238	91,1
19/7/2020	231	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,200	0,0	6,238	87,7
20/7/2020	446	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,200	0,0	6,238	169,3
21/7/2020	607	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,200	0,0	6,238	230,5
22/7/2020	387	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,200	0,0	6,238	146,9
23/7/2020	227	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	36,5	6,338	86,2
24/7/2020				0,0	6,338	0,0
25/7/2020	220	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	83,5
26/7/2020	441	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	167,4
27/7/2020	441	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	167,4
28/7/2020	261	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	99,1
29/7/2020				0,0	6,338	0,0
30/7/2020	636	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	241,5
31/7/2020	819	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	311,0
1/8/2020	608	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	230,9
2/8/2020	358	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	135,9
3/8/2020	196	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	74,4
4/8/2020	196	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	74,4
5/8/2020	70	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	26,6
6/8/2020	37	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	14,0
7/8/2020	75	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	28,5
8/8/2020	65	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	24,7
9/8/2020	45	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	17,1
10/8/2020	43	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	16,3
11/8/2020	30	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	11,4
12/8/2020	40	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	15,2
13/8/2020	30	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	11,4
14/8/2020	620	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	235,4
15/8/2020	220	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	83,5
16/8/2020	120	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	45,6
17/8/2020	70	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	26,6

18/8/2020	40	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	15,2
19/8/2020	40	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	15,2
20/8/2020	700	Depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	265,8
21/8/2020	1400	Aluvial y depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,300	0,0	6,338	531,6
22/8/2020	600	Aluvial y depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,700	146,0	6,738	227,8
23/8/2020	360	Aluvial y depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	6,900	73,0	6,938	136,7
24/8/2020	60	Aluvial y depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	7,200	109,5	7,238	22,8
25/8/2020	40	Aluvial y depósitos volcánicos (avalancha tipo brecha)	7,200	0,0	7,238	15,2
26/8/2020	30	Aluvial y depósitos volcánicos en el cauce (avalancha tipo brecha)	7,200	0,0	7,238	11,4
27/8/2020	30	Aluvial y depósitos volcánicos en el cauce (avalancha tipo brecha)	7,200	0,0	7,238	11,4
28/8/2020	40	Aluvial y depósitos volcánicos en el cauce (avalancha tipo brecha)	7,200	0,0	7,238	15,2
29/8/2020	110	Aluvial y depósitos volcánicos en el cauce (avalancha tipo brecha)	7,200	0,0	7,238	41,8
30/8/2020	30	Aluvial y depósitos volcánicos en el cauce (avalancha tipo brecha)	7,200	0,0	7,238	11,4
31/8/2020	50	Aluvial y depósitos volcánicos en el cauce (avalancha tipo brecha)	7,200	0,0	7,238	19,0
1/9/2020	400	Brecha volcánica	7,200	0,0	7,238	151,9
2/9/2020	400	Brecha volcánica	7,200	0,0	7,238	151,9
3/9/2020	40	Brecha volcánica	7,200	0,0	7,238	15,2
4/9/2020	160	Brecha volcánica	7,200	0,0	7,238	60,8
5/9/2020	1100	Brecha volcánica	7,200	0,0	7,238	417,7
6/9/2020	550	Brecha volcánica	7,500	109,5	7,538	208,8
7/9/2020	110	Brecha volcánica	7,500	0,0	7,538	41,8
8/9/2020	120	Brecha volcánica	7,600	36,5	7,638	45,6
9/9/2020	300	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	113,9
10/9/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	11,4
11/9/2020	80	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	30,4
12/9/2020	40	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	15,2
13/9/2020	60	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	22,8
14/9/2020	70	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	26,6
15/9/2020	100	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	38,0
16/9/2020	100	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	38,0
17/9/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	11,4
18/9/2020	50	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	19,0
19/9/2020	70	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	26,6
20/9/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	11,4
21/9/2020	50	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	19,0
22/9/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	9,5
23/9/2020	120	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	45,6
24/9/2020	500	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	189,8
25/9/2020	680	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	258,2
26/9/2020	200	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	75,9

27/9/2020	600	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	227,8
28/9/2020	80	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	30,4
29/9/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	11,4
30/9/2020	220	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	83,5
1/10/2020	150	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	36,3
2/10/2020	55	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	13,3
3/10/2020	258	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	62,4
4/10/2020	300	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	72,6
5/10/2020	210	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	50,8
6/10/2020	50	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	12,1
7/10/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	7,3
8/10/2020	460	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	111,3
9/10/2020	105	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	25,4
10/10/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	7,3
11/10/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	7,3
12/10/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	7,3
13/10/2020	90	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	21,8
14/10/2020	40	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	9,7
15/10/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	7,3
16/10/2020	220	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	53,2
17/10/2020	320	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	77,4
18/10/2020	320	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	77,4
19/10/2020	190	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	46,0
20/10/2020	110	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	26,6
21/10/2020	750	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	181,4
22/10/2020	660	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	159,6
23/10/2020	300	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	72,6
24/10/2020	70	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	16,9
25/10/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	7,3
26/10/2020	32	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	7,7
27/10/2020	90	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	21,8
28/10/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	7,3
29/10/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	7,3
30/10/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	7,3
31/10/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	7,3
1/11/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	7,3
2/11/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
3/11/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	7,3
4/11/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
5/11/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
6/11/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
7/11/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
8/11/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
9/11/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
10/11/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0

11/11/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
12/11/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
13/11/2020	35	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	8,5
14/11/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	7,3
15/11/2020	60	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	14,5
16/11/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	7,3
17/11/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
18/11/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
19/11/2020	70	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	16,9
20/11/2020	120	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	29,0
21/11/2020	580	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	140,3
22/11/2020	130	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	31,4
23/11/2020	340	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	82,2
24/11/2020	750	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	181,4
25/11/2020	60	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	14,5
26/11/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
27/11/2020	180	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	43,5
28/11/2020	80	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	19,3
29/11/2020	85	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	20,6
30/11/2020	70	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	16,9
1/12/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
2/12/2020	950	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	229,8
3/12/2020	200	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	48,4
4/12/2020	240	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	58,0
5/12/2020	180	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	43,5
6/12/2020	481	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	116,3
7/12/2020	260	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	62,9
8/12/2020	40	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	9,7
9/12/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	7,3
10/12/2020	55	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	13,3
11/12/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
12/12/2020	95	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	23,0
13/12/2020	87	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	21,0
14/12/2020	40	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	9,7
15/12/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
16/12/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
17/12/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
18/12/2020	390	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	94,3
19/12/2020	260	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	62,9
20/12/2020	40	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	9,7
21/12/2020	70	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	16,9
22/12/2020	65	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	15,7
23/12/2020	35	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	8,5
24/12/2020	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
25/12/2020	30	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	7,3

26/12/2020	266	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	64,3
27/12/2020	280	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	67,7
28/12/2020	70	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	16,9
29/12/2020	70	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	16,9
30/12/2020	140	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	33,9
31/12/2020	60	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	14,5
1/1/2021	155	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	37,5
2/1/2021	580	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	140,3
3/1/2021	290	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	70,1
4/1/2021	190	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	46,0
5/1/2021	180	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	43,5
6/1/2021	110	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	26,6
7/1/2021	340	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	82,2
8/1/2021	140	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	33,9
9/1/2021	150	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	36,3
10/1/2021	245	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	59,3
11/1/2021	800	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	193,5
12/1/2021	925	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	223,7
13/1/2021	470	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	113,7
14/1/2021	190	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	46,0
15/1/2021	90	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	21,8
16/1/2021	65	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	15,7
17/1/2021	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
18/1/2021	20	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	4,8
19/1/2021	20	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	4,8
20/1/2021	210	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	50,8
21/1/2021	70	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	16,9
22/1/2021	415	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	100,4
23/1/2021	470	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	113,7
24/1/2021	680	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	164,5
25/1/2021	900	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	217,7
26/1/2021	1050	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	253,9
27/1/2021	640	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	154,8
28/1/2021	250	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	60,5
29/1/2021	280	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	67,7
30/1/2021	500	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	120,9
31/1/2021	240	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	58,0
1/2/2021	90	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	21,8
2/2/2021	410	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	99,2
3/2/2021	270	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	65,3
4/2/2021	170	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	41,1
5/2/2021	800	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	193,5
6/2/2021	500	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	120,9
7/2/2021	250	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	60,5
8/2/2021	140	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	33,9



9/2/2021	65	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	15,7
10/2/2021	120	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	29,0
11/2/2021	95	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	23,0
12/2/2021	75	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	18,1
13/2/2021	70	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	16,9
14/2/2021	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
15/2/2021	25	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	6,0
16/2/2021	60	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	14,5
17/2/2021	80	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	19,3
18/2/2021	75	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	18,1
19/2/2021	40	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	9,7
20/2/2021	150	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	36,3
21/2/2021	190	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	46,0
22/2/2021	640	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	154,8
23/2/2021	280	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	67,7
24/2/2021	300	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	59,8
25/2/2021	1100	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	219,3
26/2/2021	480	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	95,7
27/2/2021	420	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	83,8
28/2/2021	320	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	63,8
1/3/2021	270	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	53,8
2/3/2021	290	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	57,8
3/3/2021	440	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	87,7
4/3/2021	260	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	51,8
5/3/2021	210	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	41,9
6/3/2021	205	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	40,9
7/3/2021	160	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	31,9
8/3/2021	150	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	29,9
9/3/2021	220	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	43,9
10/3/2021	63	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	12,6
11/3/2021	90	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	17,9
12/3/2021	105	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	20,9
13/3/2021	165	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	32,9
14/3/2021	115	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	22,9
15/3/2021	180	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	35,9
16/3/2021	70	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	14,0
17/3/2021	45	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	9,0
18/3/2021	185	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	36,9
19/3/2021	133	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	26,5
20/3/2021	122	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	24,3
21/3/2021	90	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	17,9
22/3/2021	40	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	8,0
23/3/2021	40	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	8,0
24/3/2021	70	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	14,0
25/3/2021	125	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	24,9

26/3/2021	20	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	4,0
27/3/2021	100	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	19,9
28/3/2021	200	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	39,9
29/3/2021	820	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	163,5
30/3/2021	950	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	189,4
31/3/2021	570	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	113,7
1/4/2021	540	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	107,7
2/4/2021	330	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	65,8
3/4/2021	860	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	171,5
4/4/2021	890	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	177,5
5/4/2021	450	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	89,7
6/4/2021	220	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	43,9
7/4/2021	185	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	36,9
8/4/2021	250	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	49,9
9/4/2021	695	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	138,6
10/4/2021	630	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	125,6
11/4/2021	200	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	39,9
12/4/2021	215	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	42,9
13/4/2021	200	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	39,9
14/4/2021	100	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	19,9
15/4/2021	1024	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	204,2
16/4/2021	811	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	161,7
17/4/2021	540	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	107,7
18/4/2021	290	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	57,8
19/4/2021	1233	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	245,9
20/4/2021	480	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	95,7
21/4/2021	170	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	33,9
22/4/2021	90	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	17,9
23/4/2021	85	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	16,9
24/4/2021	170	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	33,9
25/4/2021	80	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	16,0
26/4/2021	100	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	19,9
27/4/2021	430	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	85,7
28/4/2021	405	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	80,8
29/4/2021	430	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	85,7
30/4/2021	1300	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	259,2
1/5/2021	730	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	151,3
2/5/2021	435	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	90,1
3/5/2021	350	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	72,5
4/5/2021	285	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	59,1
5/5/2021	220	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	45,6
6/5/2021	345	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	71,5
7/5/2021	265	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	54,9
8/5/2021	470	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	97,4
9/5/2021	470	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	97,4

10/5/2021	425	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	88,1
11/5/2021	357	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	74,0
12/5/2021	600	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	124,3
13/5/2021	466	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	96,6
14/5/2021	730	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	151,3
15/5/2021	1700	Brecha volcánica	7,600	0,0	7,638	352,3
16/5/2021	1740	Brecha volcánica	8,143	198,2	8,181	360,6
17/5/2021	1600	Sedimentos recientes	8,343	73,0	8,381	331,6
18/5/2021	1500	Sedimentos recientes	8,443	36,5	8,481	310,8
19/5/2021	600	Sedimentos recientes	8,643	73,0	8,681	124,3
20/5/2021	390	Sedimentos recientes	9,043	146,0	9,081	80,8
21/5/2021	360	Sedimentos recientes	9,043	0,0	9,081	74,6
22/5/2021	450	Sedimentos recientes	9,043	0,0	9,081	93,3
23/5/2021	1060	Sedimentos recientes	9,043	0,0	9,081	219,7
24/5/2021	720	Sedimentos recientes	9,193	54,8	9,231	149,2
25/5/2021	1410	Sedimentos recientes	9,193	0,0	9,231	292,2
26/5/2021	700	Sedimentos recientes	9,193	0,0	9,231	145,1
27/5/2021	490	Sedimentos recientes	9,193	0,0	9,231	101,5
28/5/2021	490	Sedimentos recientes	9,193	0,0	9,231	101,5
29/5/2021	223	Sedimentos recientes	9,193	0,0	9,231	46,2
30/5/2021	482	Sedimentos recientes	9,193	0,0	9,231	99,9
31/5/2021	303	Sedimentos recientes	9,193	0,0	9,231	62,8
1/6/2021	200	Sedimentos recientes	9,193	0,0	9,231	41,4
2/6/2021	200	Sedimentos recientes	9,193	0,0	9,231	41,4
3/6/2021	130	F. Misahualli	9,193	0,0	9,231	26,9
4/6/2021	200	F. Misahualli	9,193	0,0	9,231	41,4
5/6/2021	200	F. Misahualli	9,193	0,0	9,231	41,4
6/6/2021	471	F. Misahualli	9,193	0,0	9,231	97,6
7/6/2021	607	F. Misahualli	9,193	0,0	9,231	125,8
8/6/2021	492	F. Misahualli	9,193	0,0	9,231	102,0
9/6/2021	340	F. Misahualli	9,193	0,0	9,231	70,5
10/6/2021	223	F. Misahualli	9,193	0,0	9,231	46,2
11/6/2021	1145	F. Misahualli	9,193	0,0	9,231	237,3
12/6/2021	193	F. Misahualli	9,193	0,0	9,231	40,0
13/6/2021	731	F. Misahualli	9,193	0,0	9,231	151,5
14/6/2021	260	Depósitos lacustres, limos color café en la margen izquierda	9,443	91,3	9,481	53,9
15/6/2021	701		9,443	0,0	9,481	145,3
16/6/2021	362	Rocas volcánicas en la margen derecha y los sedimentos lacustres en la margen izquierda	9,443	0,0	9,481	75,0
17/6/2021	215	Rocas volcánicas en la margen derecha y los sedimentos lacustres en la margen izquierda	9,443	0,0	9,481	44,6
18/6/2021	476	Rocas volcánicas en la margen derecha y los sedimentos lacustres en la margen izquierda	9,443	0,0	9,481	98,6

19/6/2021	648	Rocas volcánicas en la margen derecha y los sedimentos lacustres en la margen izquierda	9,443	0,0	9,481	134,3
20/6/2021	746	Rocas volcánicas en la margen derecha y los sedimentos lacustres en la margen izquierda	9,443	0,0	9,481	154,6
21/6/2021	1489	Rocas volcánicas en la margen derecha	9,443	0,0	9,481	308,6
22/6/2021	630	Rocas volcánicas en la margen derecha	9,443	0,0	9,481	130,6
23/6/2021	343	Rocas volcánicas en la margen derecha	9,443	0,0	9,481	71,1
24/6/2021	348	Rocas volcánicas en la margen derecha	9,443	0,0	9,481	72,1
25/6/2021	268	Rocas volcánicas en la margen derecha	9,443	0,0	9,481	55,5
26/6/2021	264	Rocas volcánicas en la margen derecha	9,443	0,0	9,481	54,7
27/6/2021	211	Rocas volcánicas en la margen derecha	9,443	0,0	9,481	43,7
28/6/2021	386	Rocas volcánicas en la margen derecha	9,543	36,5	9,581	80,0
29/6/2021	294	Sedimentos lacustres yacen bajo el depósito aluvial reciente	9,643	36,5	9,681	60,9
30/6/2021	1667		9,643	0,0	9,681	345,4
1/7/2021	919	Depósitos aluviales, remanentes de la brecha volcánica y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida en la margen izquierda	9,643	0,0	9,681	190,4
2/7/2021	425	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida en la margen izquierda	9,643	0,0	9,681	88,1
3/7/2021	298	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida en la margen izquierda	9,643	0,0	9,681	61,8
4/7/2021	353	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida en la margen izquierda	9,643	0,0	9,681	73,1
5/7/2021	219	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida en la margen izquierda	9,643	0,0	9,681	45,4
6/7/2021	219	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida en la margen izquierda	9,643	0,0	9,681	45,4
7/7/2021	240	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida en la margen izquierda	9,643	0,0	9,681	49,7
8/7/2021	178	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida en la margen izquierda	9,643	0,0	9,681	36,9
9/7/2021	990	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	9,643	0,0	9,681	205,2
10/7/2021	503	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	9,643	0,0	9,681	104,2

11/7/2021	762	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	9,643	0,0	9,681	157,9
12/7/2021	706	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	9,643	0,0	9,681	146,3
13/7/2021	573	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	9,643	0,0	9,681	118,7
14/7/2021	348	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	9,643	0,0	9,681	72,1
15/7/2021	235	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	9,643	0,0	9,681	48,7
16/7/2021	192	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	9,643	0,0	9,681	39,8
17/7/2021	562	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	9,643	0,0	9,681	116,5
18/7/2021	1529	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	9,643	0,0	9,681	316,8
19/7/2021	3400	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	9,643	0,0	9,681	704,6
20/7/2021	1473	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	9,893	91,3	9,931	305,2
21/7/2021	824	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	10,243	127,8	10,281	170,8
22/7/2021	902	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	10,243	0,0	10,281	186,9
23/7/2021	513	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	10,243	0,0	10,281	106,3
24/7/2021	471	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	10,243	0,0	10,281	97,6
25/7/2021	239	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	10,243	0,0	10,281	49,5
26/7/2021	200	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	10,243	0,0	10,281	41,4
27/7/2021	240	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior	10,243	0,0	10,281	49,7

		depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida				
28/7/2021	208	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	10,243	0,0	10,281	43,1
29/7/2021	235	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	10,243	0,0	10,281	48,7
30/7/2021	411	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	10,243	0,0	10,281	85,2
31/7/2021	414	Depósitos aluviales en la parte superior y en la parte inferior depósitos fluvio lacustres de arcilla endurecida	10,243	0,0	10,281	85,8
1/8/2021	200	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	41,4
2/8/2021	805	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	166,8
3/8/2021	471	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	97,6
4/8/2021	252	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	52,2
5/8/2021	149	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	30,9
6/8/2021	142	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	29,4
7/8/2021	143	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	29,6
8/8/2021	229	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	47,5
9/8/2021	213	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	44,1
10/8/2021	260	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	53,9
11/8/2021	421	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	87,2
12/8/2021	372	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	77,1
13/8/2021	295	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	61,1
14/8/2021	220	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	45,6
15/8/2021	156	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	32,3
16/8/2021	440	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	91,2
17/8/2021	440	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	91,2
18/8/2021	264	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	54,7
19/8/2021	208	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	43,1
20/8/2021	170	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	35,2
21/8/2021	136	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	28,2
22/8/2021	92	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	19,1
23/8/2021	128	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	26,5
24/8/2021	95	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	19,7
25/8/2021	60	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	12,4
26/8/2021	64	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	13,3
27/8/2021	86	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	17,8
28/8/2021	170	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	35,2
29/8/2021	159	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	32,9
30/8/2021	170	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	35,2
31/8/2021	129	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	26,7
1/9/2021	113	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	23,4

2/9/2021	97	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	20,1
3/9/2021	110	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	22,8
4/9/2021	116	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	24,0
5/9/2021	64	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	13,3
6/9/2021	970	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	201,0
7/9/2021	348	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	72,1
8/9/2021	286	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	59,3
9/9/2021	170	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	35,2
10/9/2021	149	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	30,9
11/9/2021	260	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	53,9
12/9/2021	509	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	105,5
13/9/2021	461	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	95,5
14/9/2021	219	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	45,4
15/9/2021	98	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	20,3
16/9/2021	97	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	20,1
17/9/2021	106	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	22,0
18/9/2021	103	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	21,3
19/9/2021	50	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	10,4
20/9/2021	59	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	12,2
21/9/2021	503	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	104,2
22/9/2021	377	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	78,1
23/9/2021	299	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	62,0
24/9/2021	251	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	52,0
25/9/2021	307	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	63,6
26/9/2021	281	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	58,2
27/9/2021	146	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	30,3
28/9/2021	70	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	14,5
29/9/2021	181	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	37,5
30/9/2021	248	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	51,4
1/10/2021	200	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	41,4
2/10/2021	146	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	30,3
3/10/2021	78	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	16,2
4/10/2021	62	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	12,8
5/10/2021	83	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	17,2
6/10/2021	129	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	26,7
7/10/2021	122	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	25,3
8/10/2021	87	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	18,0
9/10/2021	52	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	10,8
10/10/2021	132	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	27,4
11/10/2021	129	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	26,7
12/10/2021	122	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	25,3
13/10/2021	163	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	33,8
14/10/2021	67	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	13,9
15/10/2021	54	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	11,2
16/10/2021	103	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	21,3

17/10/2021	20	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	4,1
18/10/2021	27	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	5,6
19/10/2021	36	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	7,5
20/10/2021	20,5	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	4,2
21/10/2021	142	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	29,4
22/10/2021	175	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	36,3
23/10/2021	20	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	4,1
24/10/2021	78	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	16,2
25/10/2021	32	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	6,6
26/10/2021	294	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	60,9
27/10/2021	110	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	22,8
28/10/2021	98	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	20,3
29/10/2021	73	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	15,1
30/10/2021	40	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	8,3
31/10/2021	20	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	4,1
1/11/2021	208	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	43,1
2/11/2021	77	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	16,0
3/11/2021	86	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	17,8
4/11/2021	59	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	12,2
5/11/2021	20	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	4,1
6/11/2021	53	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	11,0
7/11/2021	20	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	4,1
8/11/2021	20	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	4,1
9/11/2021	76	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	15,7
10/11/2021	84	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	17,4
11/11/2021	220	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	45,6
12/11/2021	220	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	45,6
13/11/2021	185	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	38,3
14/11/2021	79	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	16,4
15/11/2021	20	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	4,1
16/11/2021	20	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	4,1
17/11/2021	123	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	25,5
18/11/2021	20	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	4,1
19/11/2021	125	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	25,9
20/11/2021	1180	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	244,5
21/11/2021	252	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	52,2
22/11/2021	116	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	24,0
23/11/2021	20	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	4,1
24/11/2021	62	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	12,8
25/11/2021	83	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	17,2
26/11/2021	86	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	17,8
27/11/2021	62	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	12,8
28/11/2021	68	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	14,1
29/11/2021	181	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	37,5
30/11/2021	80	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	16,6



1/12/2021	52	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	10,8
2/12/2021	20	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	4,1
3/12/2021	20	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	4,1
4/12/2021	20	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	4,1
5/12/2021	120	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	24,9
6/12/2021	85	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	17,6
7/12/2021	138	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	28,6
8/12/2021	123	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	25,5
9/12/2021	40	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	8,3
10/12/2021	227	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	47,0
11/12/2021	146	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	30,3
12/12/2021	174	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	36,1
13/12/2021	207	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	42,9
14/12/2021	299	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	62,0
15/12/2021	178	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	36,9
16/12/2021	1316	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	272,7
17/12/2021	1018	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	211,0
18/12/2021	1067	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	221,1
19/12/2021	689	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	142,8
20/12/2021	425	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	88,1
21/12/2021	174	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	36,1
22/12/2021	113	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	23,4
23/12/2021	116	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	24,0
24/12/2021	128	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	26,5
25/12/2021	169	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	35,0
26/12/2021	170	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	35,2
27/12/2021	40	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	8,3
28/12/2021	69	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	14,3
29/12/2021	70	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	14,5
30/12/2021	80	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	16,6
31/12/2021	20	Depósitos aluviales	10,243	0,0	10,281	4,1

**Anexo II.** Imágenes satelitales multiespectrales Sentinel-2 que utilizan la combinación de bandas 8, 4, 3. Estas imágenes fueron descargadas de <https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground/>. a) El 27 de mayo de 2019, la cascada San-Rafael está activa. b) El 29 de septiembre de 2019 ocurre un colapso que origina un sumidero (sinkhole) junto a la cascada San-Rafael que continúa activa. c) El 27 de enero de 2020, el hundimiento continúa aumentando el tamaño del sumidero. d) El 6 de febrero de 2020, el sumidero ya ha comenzado a extenderse durante al menos cuatro días producto de un segundo colapso ocurrido el 2 de febrero de 2020, este colapso fue el que provocó el abandono y desaparición de la Cascada San Rafael.

