

Instituto Tecnológico de Costa Rica

**Campus Tecnológico Local San Carlos
Escuela de Ciencias Naturales y Exactas**

DIAGNÓSTICO DE SITUACIÓN CONELECTRICAS R.L.: ESTADO ACTUAL Y POSIBILIDADES DE COOPERACIÓN

Código del proyecto: 2161008

- Esteban Ballestero Alfaro
- Marcela Chaves Álvarez
- Dylana Freer Paniagua
- Danilo Porras Cajina

Santa Clara, Florencia, San Carlos, Alajuela, Costa Rica: diciembre de 2024

Contenido

- Nombre de la Actividad de Fortalecimiento de la Investigación: 2
- Equipo responsable:..... 2
- Resumen Ejecutivo 2
- Introducción 2
 - Contexto del Cambio Climático 2
 - Desafíos para la Generación Hidroeléctrica 3
 - 1. Variabilidad Hidrológica 3
 - 2. Impactos Operativos 3
 - 3. Vulnerabilidad de la Infraestructura 3
- Datos generales de la empresa 4
 - Historia 4
 - Ubicación geográfica 4
 - Servicios que ofrece la empresa 5
- Sobre la disponibilidad de información 6
 - Información hidrometeorológica 6
 - Caracterización de la cuenca del río San Lorenzo 8
- Medidas actuales de adaptación y mitigación ante el cambio climático adoptadas por CONELECTRICAS R.L..... 16
- Lo que se espera con el ITCR 18
- Visitas de campo 19
- Acuerdos logrados..... 20
- Referencias..... 21
- Anexos 22

Nombre de la Actividad de Fortalecimiento de la Investigación:

Identificación de acciones prioritarias para generar un plan de adaptación al cambio climático para las plantas hidroeléctricas San Lorenzo y Sigifredo Solís

Equipo responsable:

- Esteban Ballesteros Alfaro (coordinador)
- Marcela Chaves Álvarez
- Dylana Freer Paniagua
- Danilo Porras Cajina

Resumen Ejecutivo

El cambio climático representa un desafío significativo para la infraestructura hidroeléctrica, afectando la disponibilidad de recursos hídricos y la estabilidad operativa de las plantas.

En este contexto, el presente documento tiene como objetivo documentar el diagnóstico de la condición actual de las plantas hidroeléctricas San Lorenzo y Sigifredo Solís, propiedad del Consorcio de Empresas de Electrificación de Costa Rica (CONELECTRICAS, R.L.). En este se incluyen datos generales de la empresa, información hidrometeorológica y caracterización de la cuenca del río San Lorenzo. Además, se muestran las medidas actuales de adaptación y mitigación ante el cambio climático adoptadas por CONELECTRICAS R.L.

Finalmente se presenta los términos de la colaboración con el ITCR, los cuales incluyen: un Plan de Gestión Climática que le permita a CONELECTRICAS R.L. disponer de la capacidad de adaptación y mitigación ante los fenómenos climáticos tanto de eventos extremos o agudos, como eventos crónicos o por cambios de tendencias y patrones; modelo de uso del suelo de la cuenca, modelos estadísticos para datos climáticos, entre otros.

Introducción

El cambio climático incorpora un reto para las empresas dedicadas a la generación hidroeléctrica que dependen directamente de las condiciones climáticas y de los recursos hídricos (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2022). En este contexto, las plantas hidroeléctricas San Lorenzo y Sigifredo Solís, propiedad de CONELECTRICAS R.L., requieren una evaluación estratégica de su vulnerabilidad y potencial de adaptación ante los escenarios cambiantes del clima.

Contexto del Cambio Climático

El cambio climático se caracteriza por alteraciones significativas en los patrones climáticos globales, provocadas tanto por procesos naturales como por actividades humanas (Rockström et al., 2017). Mientras el sistema climático experimenta una variabilidad natural inherente, el cambio climático antropogénico ha intensificado estas transformaciones mediante:

- Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)
- Deforestación
- Actividades industriales que modifican la composición atmosférica

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) destaca que estas alteraciones tienen consecuencias directas en sistemas naturales y humanos, especialmente en sectores dependientes de recursos climático-sensibles como la generación hidroeléctrica (IPCC, 2014).

Desafíos para la Generación Hidroeléctrica

Las plantas hidroeléctricas enfrentan múltiples riesgos asociados al cambio climático, según estudios recientes estos riesgos se pueden agrupar en:

1. Variabilidad Hidrológica

- Cambios en los patrones de precipitación (Heim, 2015)
- Alteración de los regímenes de caudales
- Incremento en la frecuencia de eventos extremos

2. Impactos Operativos

- Reducción potencial en la generación de energía (Zarfl et al., 2015)
- Aumento en costos de mantenimiento
- Necesidad de adaptación tecnológica

3. Vulnerabilidad de la Infraestructura

- Riesgo de daños por eventos climáticos extremos (Soncini et al., 2019)
- Cambios en la disponibilidad del recurso hídrico
- Modificaciones en los ecosistemas circundantes

Con la ejecución de esta actividad de fortalecimiento se lograron identificar acciones prioritarias para desarrollar un plan de adaptación al cambio climático, específicamente para la planta hidroeléctrica San Lorenzo, que CONELECTRICAS R.L. estableció como prioritaria. Para ello, se propone la realización de un análisis integral que contemple:

- Evaluación de vulnerabilidades actuales
- Proyección de escenarios climáticos futuros
- Identificación de estrategias de mitigación y adaptación
- Desarrollo de herramientas de monitoreo y alerta temprana
- Uso de inteligencia artificial para la predicción de caudales u otras variables hidrometeorológicas.

La metodología que se desarrolle no solo pretende generar soluciones para CONELECTRICAS R.L., sino también crear un modelo replicable para otras infraestructuras hidroeléctricas del país, contribuyendo así a la resiliencia del sector energético ante los desafíos del cambio climático (Markoll & Patt, 2018).

Datos generales de la empresa

Historia

En 1964, en respuesta a la necesidad de propiciar el desarrollo económico, social y con el fin de electrificar las zonas rurales de Costa Rica, se inicia con la conformación de las cooperativas de electrificación rural.

El Consorcio Nacional de Empresas de Electrificación de Costa Rica R.L (CONELECTRICAS R.L) nace en Costa Rica en junio de 1989. El mismo se conforma a partir de la unión de cooperativas de electrificación quienes vieron la necesidad de la población de zonas rurales de obtener el servicio eléctrico, ya que en un principio no existía la distribución del servicio más que en cabeceras de cantón.

CONELECTRICAS R.L. reúne cuatro cooperativas de electrificación rural, las cuales, en orden cronológico respecto a su fundación son: la Cooperativa de Electrificación Rural de Guanacaste (COOPEGUANACASTE R.L) fundada el 10 de enero de 1965, Cooperativa de Electrificación Rural de los Santos (COOPESANTOS R.L) cuya fecha de fundación es el 17 de enero de 1965, Cooperativa de Electrificación Rural de San Carlos (COOPELESCA R.L) creada el 24 de enero de 1965, y Cooperativa de Electrificación Rural de Alfaro Ruiz (COOPEALFARORUIZ R.L) que dio inicio el 29 de noviembre del año 1972.

Finalmente, es importante mencionar que CONELECTRICAS RL es el actual representante empresarial de la Comisión Técnica Consultiva Nacional del Fenómenos ENOS (COENOS), reiterando su compromiso con el país para apoyar la previsión ante eventuales afectaciones que se deriven de los cambios en el clima.

Ubicación geográfica

En la empresa se cuenta con dos centrales hidroeléctricas: San Lorenzo y Sigifredo Solís, ubicadas en la zona norte del país en Bajo Rodríguez y Peñas Blancas, ambos del cantón de San Ramón.

En la primera de ellas se aprovechan las aguas de los ríos San Lorenzo y Jamaical, dando una capacidad de 17 000 kilovatios la cual es suficiente para abastecer a unos 145 000 habitantes de zonas rurales.

En la segunda se cuenta con el aporte de dos centrales: Pocosol y Agua Gata, las cuales toman aguas del Río Peñas Blancas.

Aunque las instalaciones de CONELECTRICAS se ubican en San Ramón, se puede mencionar que las poblaciones que albergan a los socios que reciben sus servicios se extiende a

consumidores del sector doméstico, comercial y turístico (asociados de las cooperativas) de los cantones de: Provincia de Alajuela: San Carlos, Sarapiquí, Río Cuarto y Zarcero; provincia de Guanacaste: Santa Cruz, Nicoya, Hojancha y Carrillo; Provincia de San José: Tarrazú, Dota y León Cortés. Para tener una idea visual, la Figura 1 muestra la zona de cobertura de las cooperativas, que conforma el consorcio de CONELECTRICAS R.L.

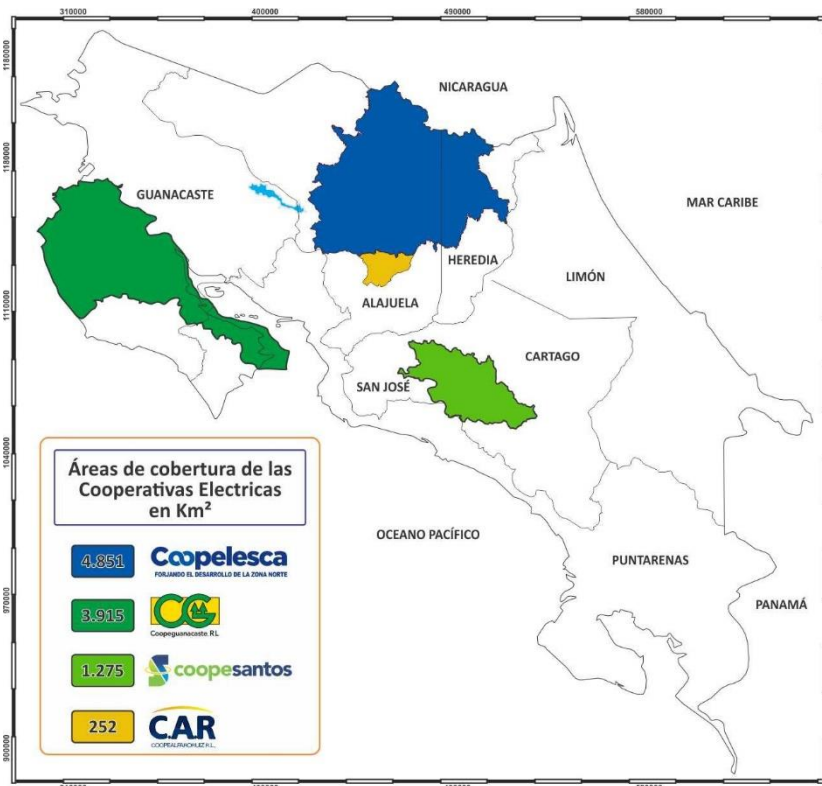


Figura 1. Áreas de cobertura de CONELECTRICAS R.L.

Fuente: CONELECTRICAS R. L

Servicios que ofrece la empresa

CONELECTRICAS R.L. ofrece una diversidad de servicios a sus asociados, los cuales surgen como iniciativas a petición de las cooperativas que conforman el consorcio. Además, se realizan innovaciones en los servicios a través del emprendimiento de distintos proyectos. Dentro de los servicios que brinda el consorcio se encuentran:

- Movilidad eléctrica: se cuenta con 14 centros de carga a lo largo de distintas zonas rurales del país donde se encuentran los servicios de las cooperativas asociadas. Además, se publican noticias con recomendaciones sobre el uso de los vehículos eléctricos.
- Genelectric: representa una solución “in house”, para gestionar el levantamiento de variables analógicas en las plantas de generación de la empresa, asegurando la calidad de los datos, la rapidez en la visualización de históricos e información y los

recorridos de inspección, lectura en tiempo y detalle. Ya se encuentra como servicio a 6 plantas externas a la empresa.

- Ecovivero el Gavilán: en él se siembran árboles de distintas especies que año a año son donados a empresas privadas, ASADAS e instituciones públicas.
- Termografía y ultrasonido: es un servicio que se le brinda a las cooperativas asociadas para mantener bajo vigilancia los equipos y velar por el buen funcionamiento sin necesidad de contacto físico ni de interrupciones en los servicios del fluido eléctrico. Con ello se garantiza el control de calidad y el mantenimiento proactivo de cada una de las cooperativas.
- Defensa conjunta: mediante el consorcio y de forma conjunta las cooperativas asociadas se defienden de las frecuentes amenazas al sector eléctrico y de telecomunicaciones. De este modo y con el análisis de leyes o normas regulatorias se protegen de los interesados en cambiar el modelo solidario que históricamente ha predominado en ellas.
- Centro de despacho conjunto: bajo un criterio económico dentro del sector eléctrico, se pretende potenciar un despacho de energía que proteja los intereses de las asociadas.
- Infocomunicaciones: brinda desarrollo de infraestructura de telecomunicaciones fortaleciendo la calidad de los servicios mediante nuevos proyectos.

Además de los servicios, el consorcio y sus asociadas desarrollan proyectos que fortalecen la calidad en el servicio y los distintos procesos. Entre ellos se puede citar el proyecto AMI que instala medidores inteligentes en distintas zonas rurales favoreciendo lecturas más precisas y confiables. También el proyecto fotovoltaico ubicado en Santa Rosa de Pocosol, mediante el cual se genera energía solar para servir a 5 000 familias de la zona. Cabe mencionar que CONELECTRICAS cuenta con la distinción Carbono Neutral Plus, como reflejo de su compromiso con el cuidado del medio ambiente.

Sobre la disponibilidad de información

Información hidrometeorológica

La empresa CONELÉCTRICAS R.L. se ha preocupado por mantener un registro de algunas variables desde hace varios años, bajo el modelo de recolección mostrado en la Figura 2. Se cuenta con información de la generación eléctrica de más de 13 años en intervalos de 15 minutos, comportamiento del caudal natural de los ríos con registros de cada 15 minutos por los últimos 4 años, caudales máximos durante avenidas máximas, precipitación acumulada, humedad y velocidad de viento. Además, CONELÉCTRICAS R.L., mantiene comunicación constante con el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), ente que se ocupa de la medición y registro de datos históricos de precipitación y temperatura, entre otros.

Para las cuencas afectadas, la empresa cuenta con registros y base de datos tales como:

- ✓ Gráficos, promedios mensuales y anuales del caudal de producción.

- ✓ Registro constante y verificación del caudal ambiental.
- ✓ Gráficos, promedios mensuales y anuales del caudal de vertido y de descarga.
- ✓ Gráficos, promedios mensuales y anuales del caudal natural de los ríos.
- ✓ Medición anual (en época seca), informes e historial de seguimiento del caudal de aporte.
- ✓ Comparación de los datos de generación real con los caudales respectivos.
- ✓ Datos promedios de precipitación y otros adicionales que aporta la estación meteorológica.

Los datos asociados al caudal del río y producción eléctrica han sido registrados por años como anteriormente se dijo, pero para variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa, precipitación y presión atmosférica solo se cuenta con un registro de 6 meses a partir de 5 estaciones meteorológicas propias que han sido instaladas en diferentes puntos de las cuencas. De requerir más datos se deberá buscar otras fuentes de información como el IMN o la estación meteorológica del Tecnológico de Costa Rica, Campus Tecnológico Local San Carlos, que es la estación más cercana a las cuencas que suministra datos al IMN.

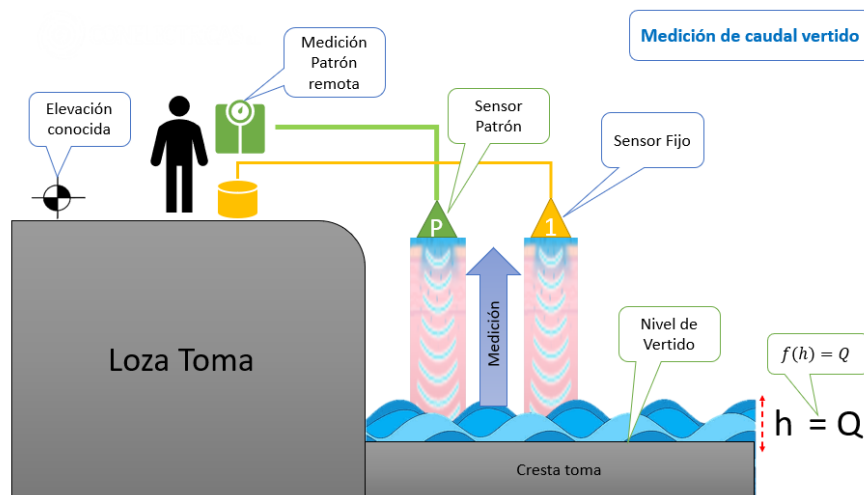


Figura 2. Modelo utilizado para la recolección de datos asociados a la medición del caudal del río.

Fuente: CONELECTRICAS R.L.

De acuerdo con la Figura 3, el caudal natural corresponde a la totalidad de agua del río, la cual se distribuye de la siguiente manera:

- Turbinado: es la porción de agua utilizada para la generación eléctrica.
- Vertido: es agua sucia que arrastra sedimentos que no es apta para el turbinado y es devuelta al río.
- Ecológico: corresponde a la cantidad de agua que por ley la compañía debe dejar pasar en el río para el mantenimiento de su biodiversidad.

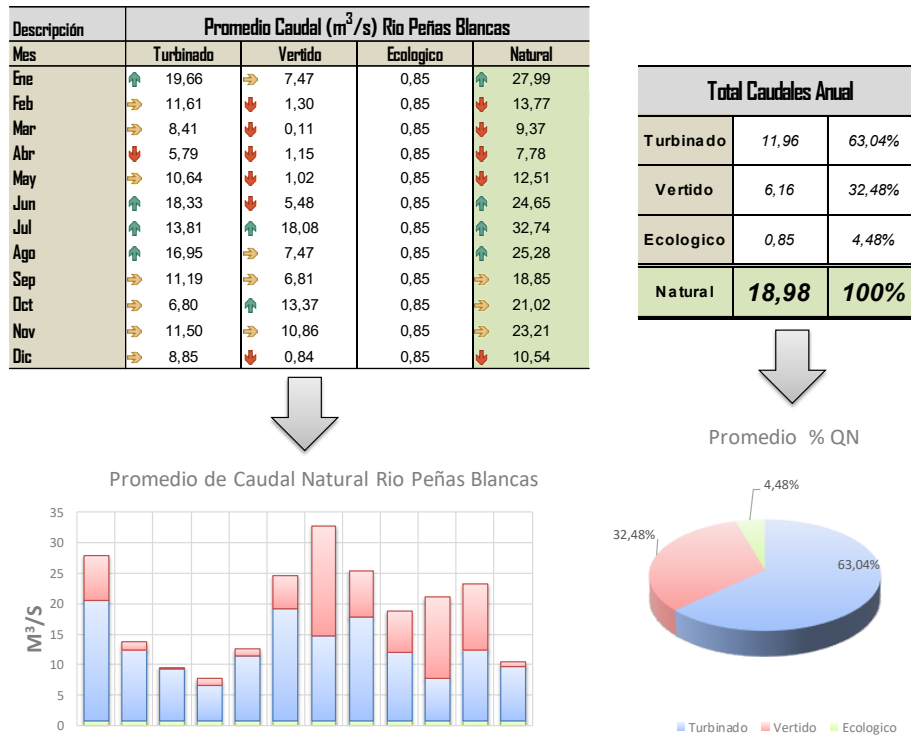


Figura 3. Ejemplo de distribución de caudal del río Peñas Blancas según su uso.

Fuente: CONELECTRICAS R. L.

Caracterización de la cuenca del río San Lorenzo

La cuenca se encuentra debidamente delimita con un área de 160.19 km², un perímetro de 69.79 km, con curvas de nivel cada 200 m y se estiman las áreas de cada franja de dichas curvas. Se usan algunos indicadores para conocer la región de impacto de los diferentes afluentes de la cuenta:

1. Índice de compacidad o de Gravelius: es un modelo hidrológico propuesto por Gravelius en 1914, el cual permite describir una geometría de la cuenca relacionada con el tiempo de concentración del sistema hidrológico, es decir, indica la tendencia a concentrar volúmenes importantes de aguas de escurrimiento. El modelo se basa en comparar la forma de una cuenca con un círculo.
2. Rectángulo equivalente: este modelo es un parámetro que, a diferencia de índice de compacidad, usa rectángulos para caracterizar la forma de la cuenca (ver Figura 4).
3. Curva hipsométrica: es un gráfico que muestra la relación entre el área y la elevación del terrero, se usa para representar la distribución de zonas altas, medias y bajas de una cuenca (ver Figura 5).
4. Polígonos de Thiessen: son figuras geométricas que delimitan áreas de influencia alrededor de un conjunto de puntos de muestra, muy utilizado en los Sistemas de

Información Geográfica. Para efectos de uso de CONELECTRICAS R.L se utiliza este modelo a partir de los puntos donde están ubicadas las 5 estaciones meteorológicas que se encuentran operando, de manera que se pueda extrapolar la precipitación en cada uno de estos puntos de muestreo.

5. Análisis por Isoyetas: son curvas que representan la precipitación media anual en un área determinada. Se utilizan para mostrar la precipitación de un lugar en un mapa.

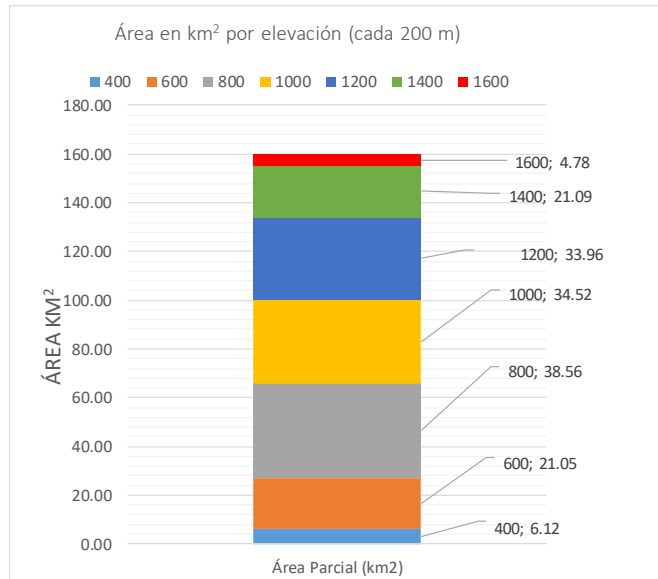


Figura 4. Modelo gráfico de rectángulo equivalente.

Fuente: CONELECTRICAS R. L.

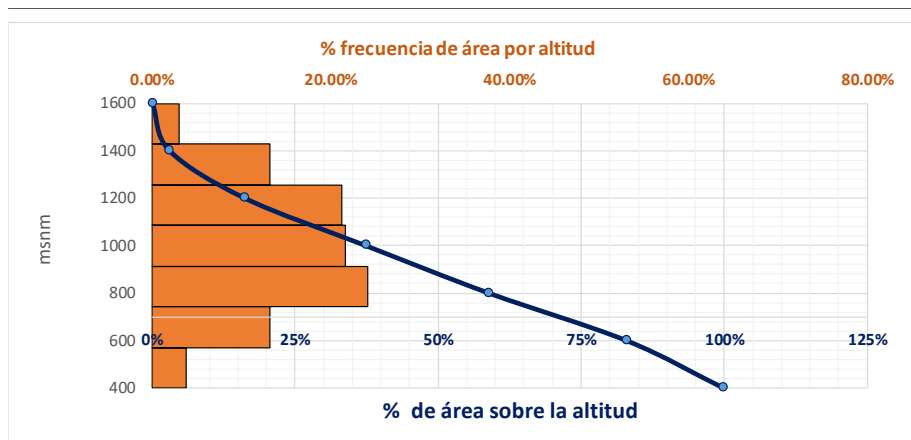


Figura 5. Modelo de curva hipsométrica y frecuencias de altitudes.

Fuente: CONELECTRICAS R. L.

En la siguiente tabla se muestran algunas medidas indirectas que también son relevantes en la descripción de la cuenca.

Tabla 1. Medias indirectas de descripción de la cuenca del Río San Lorenzo

Variable	Modelo	Valor (%)
Pendiente media	$S = \frac{D \cdot L}{A}$ <p><i>D</i>: equidistancia entre las curvas de nivel <i>L</i>: longitud total de las curvas de nivel <i>A</i>: área de la cuenca</p>	33.53
Pendiente de cause	$S = \frac{H_M - H_m}{L}$ <p><i>H_M</i>: elevación máxima de la cuenca <i>H_m</i>: elevación mínima de la cuenta <i>L</i>: longitud total de las corrientes en km</p>	4.07
Densidad de corriente	$D_c = \frac{N_c}{A}$ <p><i>N_c</i>: número de corrientes <i>A</i>: área total de la cuenca en km²</p>	35
Densidad de drenaje	$D_d = \frac{L}{A}$ <p><i>L</i>: longitud total de las corrientes en km <i>A</i>: área total de la cuenca en km²</p>	65

Fuente: CONELECTRICAS R. L.

Sobre el uso del suelo de la cuenta, se tiene que el 80% corresponde a bosque lluvioso tropical submontano, siempreverde, sobre formas de origen volcánico y el restante 20% corresponde a zona de repastos.

A continuación, se presentan los resultados de análisis de Thiessen e Isoyetas para la cuenca en cuestión.

N° Estación	Nombre	X (Este)	Y (Norte)	Precipitación media Anual (mm)	Temperatura media anual (C°)	Area_km2	Precipitación media Anual (mm) * Área_km2	Peso % de Área (km2)
1	Adifort	429178.9	1157521.6	3458.59	24.7			
2	Balsa	445549.4	1125079.0	2754.52	20.8	42.441	116904.58	0.26496148
3	Hotel_Villa_Blanca	446984.6	1128210.6	3258.69	21.3	64.867	211381.44	0.40496822
4	ICT_San_Clara	443774.4	1145672.4	4478.35	23.5	52.87	236770.36	0.3300703
5	San_Vicente	456794.9	1136707.4	5348.25	22.1			
6	Pitahaya_PuntaArenas	411548.4	1112028.0	2369.35	24.5			
7	San_Mateo_Alajuela	443072.0	1098231.3	2487.25	24.5			
8	Bagaces_Guana_Taboga	371042.8	1144230.6	1826.65	26.5			

Total	160.18	565056.39	1.00
-------	--------	-----------	------

Precipitación media Areal (mm) * km ²	3527.68
--	---------

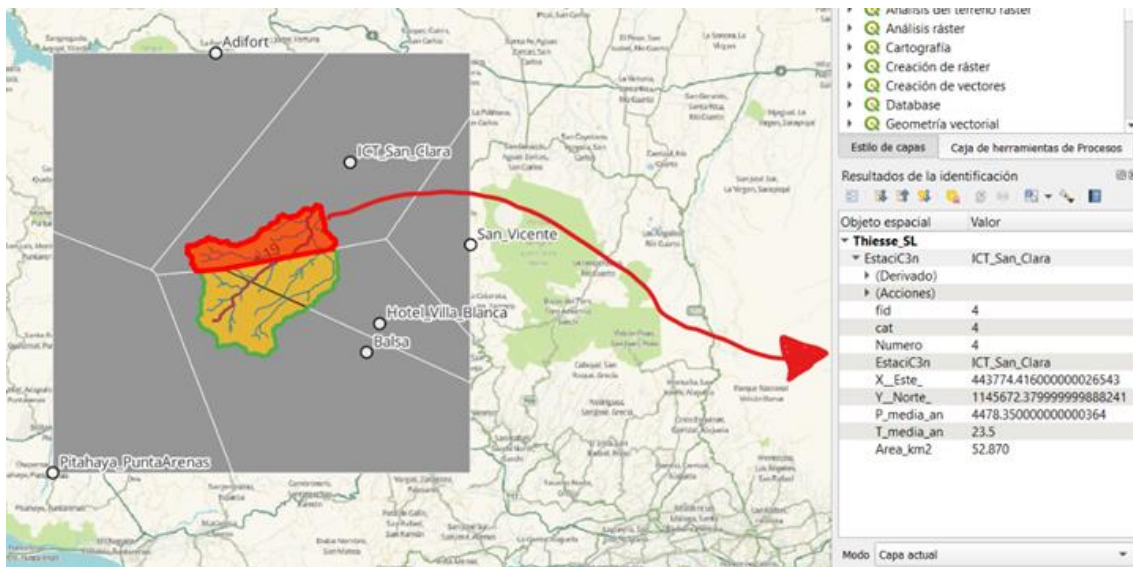


Figura 6. Precipitaciones de la cuenca del río San Lorenzo usando polígonos de Thiessen a partir de los puntos de ubicación de las estaciones meteorológicas.

Fuente: CONELECTRICAS R. L.

Como se puede ver en la Figura 6, se resalta en amarillo las estaciones que sí funcionaron durante el período de recolección de datos bajo los cuáles se realizó este modelo, las otras estaciones presentaron algunos problemas. La compañía sigue trabajando en la mejora de la comunicación con las estaciones y actualizando los datos, se espera en el corto plazo disponer de un modelo más robusto.

zone	Isoy_Min	Iso_Max	Iso_Prom (mm)	Area (km2)	Iso_Prom*Area
(1)	(2)	(3)	(4) = [(2) + (3)]/2	(5)	(6) = (4)*(5)
7	2757.128	2800.500	2778.8	2.84	7904.34
6	2800.500	2850.500	2825.5	7.72	21814.55
3	2850.501	2900.500	2875.5	8.97	25792.09
8	2900.500	2950.499	2925.5	8.70	25438.39
2	2950.500	3000.499	2975.5	8.89	26444.16
5	3000.502	3050.500	3025.5	9.13	27610.42
9	3050.500	3100.500	3075.5	9.81	30178.04
4	3100.500	4039.223	3569.9	104.12	371711.16
Total				160.18	536893.14
Precipitación Media Areal (mm) * km2					3351.80

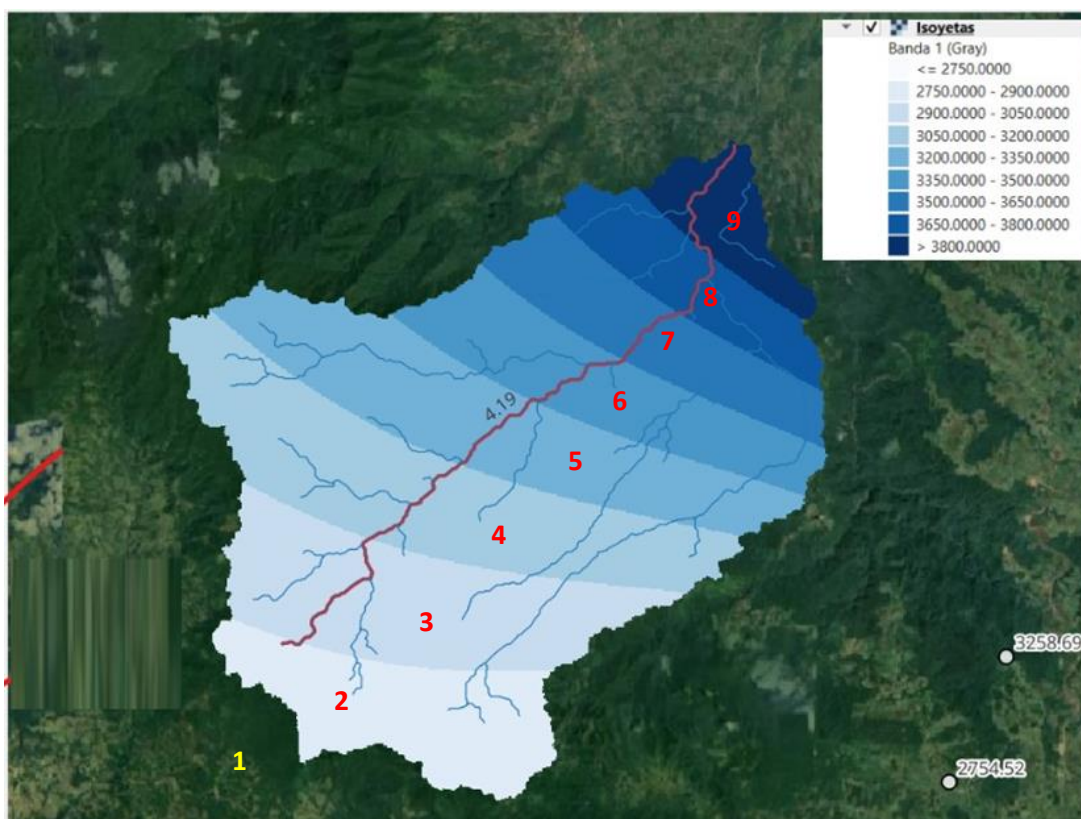


Figura 7. Precipitaciones usando método de Polígonos de Isoyetas.

Fuente: CONELECTRICAS R. L.

Finalmente, otro dato que figura en la lista de monitoreo es el Intensidad Máxima. Para este modelo se usa como referencia la curva de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de Coen Paris.

Ecuación para calcular las intensidades máximas:

$$I_{max} = 209.844 - 38.7305 \cdot \ln(D) + [42.614 - 24.6041 \cdot \ln[\ln(D)]] \cdot \ln(T) \quad 5$$

Sabiendo que:

$$D = \frac{0.0195 \cdot L}{H} \quad 6$$

Donde:

D : tiempo de concentración en minutos

T : período de retorno en años

L : largo de cause principal en metros

H : diferencial de altura de inicio al fin del cauce principal en metros

Para los periodos se cuenta con una tabla de valores ya prestablecidos que se deben usar de acuerdo con la necesidad a estimar. Con la información anterior se puede ahora determinar el caudal del río usando el Método Racional:

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{360} \quad 7$$

Donde:

Q : caudal del río

C : coeficiente

I : intensidad máxima método racional con curvas IDF (Elión Coen Paris)

A : área total de la cuenca

Para el coeficiente también se cuenta con una tabla con parámetros ya prestablecidos que se adecúan al tipo de terreno, ya sea franco arenoso, franco arcillo limosa o franco limosa y arcillosa, según el tipo de vegetación: forestal, praderas, terreros cultivados. En la Figura 8 se muestran los cálculos del modelo.

Símbolo	Descripción	Ecuación	Valor
n	Vida útil de estructura (años)		50
tc	Tiempo de concentración (min)	$0.0195*(L^3/H)$	143
T	Periodo de retomo (años)	NA	50
P	Probabilidad de que ocurra	$1/T$	2.00%
(-)p	Probabilidad de que NO ocurra	$1-1/T$	98.00%
R	Riesgo de falla	$1-(1-1/T)^n$	63.58%
Cf	Coefficiente de escorrentía	Forestal, S= >30%, Cobertura 80%	0.50
Cp	Coefficiente de escorrentía	Praderas, S= >30%, Cobertura 20%	0.40
C	Coefficiente de escorrentía	Promedio a utilizar	0.48
L	Largo del cauce principal (m)	Medición Qgis	21372
H	Diferencial de altura cauce principal (m)	$h2 - h1$	895
A	Área de la cuenca (ha)	Medición Qgis	16019.30
I	Intensidad máxima de precipitación (mm/h)	$209.844-38.7305*LN(tc)+(42.614-24.6041*LN(LN(tc)))*LN(T)$	30.25
Q	Calculo Caudal método Racional (m ³ /s)	$Q=CIA/360$	646.09

Esquema de cauce principal

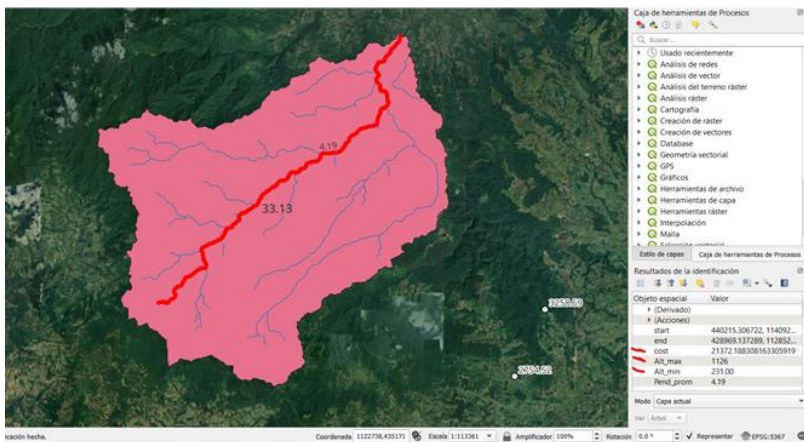


Figura 8. Cálculo de caudal según intensidad de precipitaciones por medio del método racional.

Fuente: CONELECTRICAS R. L.

En relación con los estudios previos sobre esta cuenca, se destaca el realizado por Chaves (2002), en el cual se lleva a cabo un análisis de la vulnerabilidad del recurso hídrico en nueve subcuencas del río San Carlos. Dos de estas subcuencas corresponden a los ríos San Lorenzo y Peñas Blancas.

Entre las variables biofísicas utilizadas para caracterizar las subcuencas estudiadas se incluyen: el modelo de elevación digital elaborado a partir de curvas de nivel con intervalos de 20 m, el mapa de pendientes, la geología y geomorfología, los tipos de suelos, la capacidad de uso del suelo, la cobertura forestal de 1996/97, el cambio en la cobertura forestal entre 1986/87 y 1996/97, las áreas silvestres protegidas, las estaciones hidrometeorológicas, la red hidrográfica, y las zonas de vida de Costa Rica. Además, se consideran variables socioeconómicas, entre las que se destacan la población por distrito según el censo de 2000, la población ocupada por categoría ocupacional, la tasa de desempleo, la infraestructura vial y los aprovechamientos del recurso hídrico, entre otros.

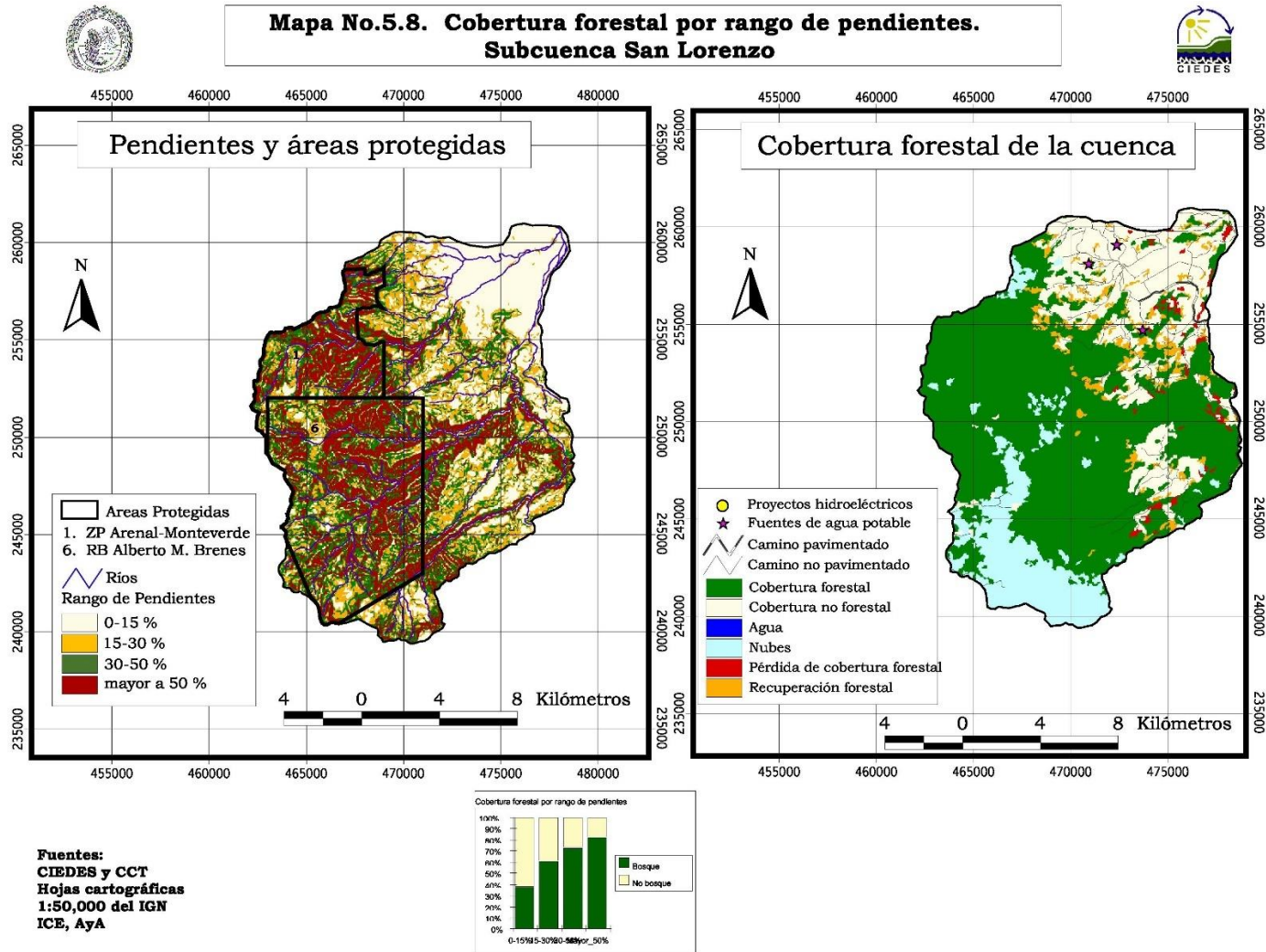


Figura 9. Cobertura forestal por rango de pendientes en la cuenca del río San Lorenzo.

Fuente: Tomado de Chaves, 2002.

Medidas actuales de adaptación y mitigación ante el cambio climático adoptadas por CONELECTRICAS R.L.

La empresa tiene claro que es imperativa la planificación de métodos de adaptación y mitigación ante el cambio climático, por lo cual está haciendo esfuerzos para establecer un sistema de detección temprana de variaciones en los caudales de los ríos de las cuencas considerando los riesgos climáticos.

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el término riesgo se usa para referirse al potencial de consecuencias adversas de un peligro relacionado con el clima, o de las respuestas de adaptación o mitigación a tal peligro, en vidas, medios de vida, salud y bienestar (de ecosistemas y especies), bienes económicos, sociales y culturales, servicios (incluidos los servicios de los ecosistemas) e infraestructura. Por lo tanto, el riesgo resulta de la interacción de la vulnerabilidad del sistema afectado, su exposición a lo largo del tiempo, así como la amenaza (relacionada con el clima) y la probabilidad de que ocurra, como se observa en la Figura 9. A partir de esta se deduce que el riesgo se configura por dos vías principales de cambio:

1. Sistema climático (Lado izquierdo de la Figura 9)
 - i. Transformaciones en las condiciones climáticas
 - ii. Alteraciones en patrones meteorológicos
 - iii. Cambios en fenómenos naturales

2. Procesos Socioeconómicos (Lado derecho de la Figura 9)
 - i. Estrategias de adaptación
 - ii. Acciones de mitigación
 - iii. Decisiones humanas y políticas

Estos factores modifican dinámicamente la naturaleza de los peligros, los niveles de exposición y los grados de vulnerabilidad. Como se puede ver, el riesgo ante el cambio climático es un proceso complejo, resultado de múltiples interacciones entre sistemas naturales y humanos.

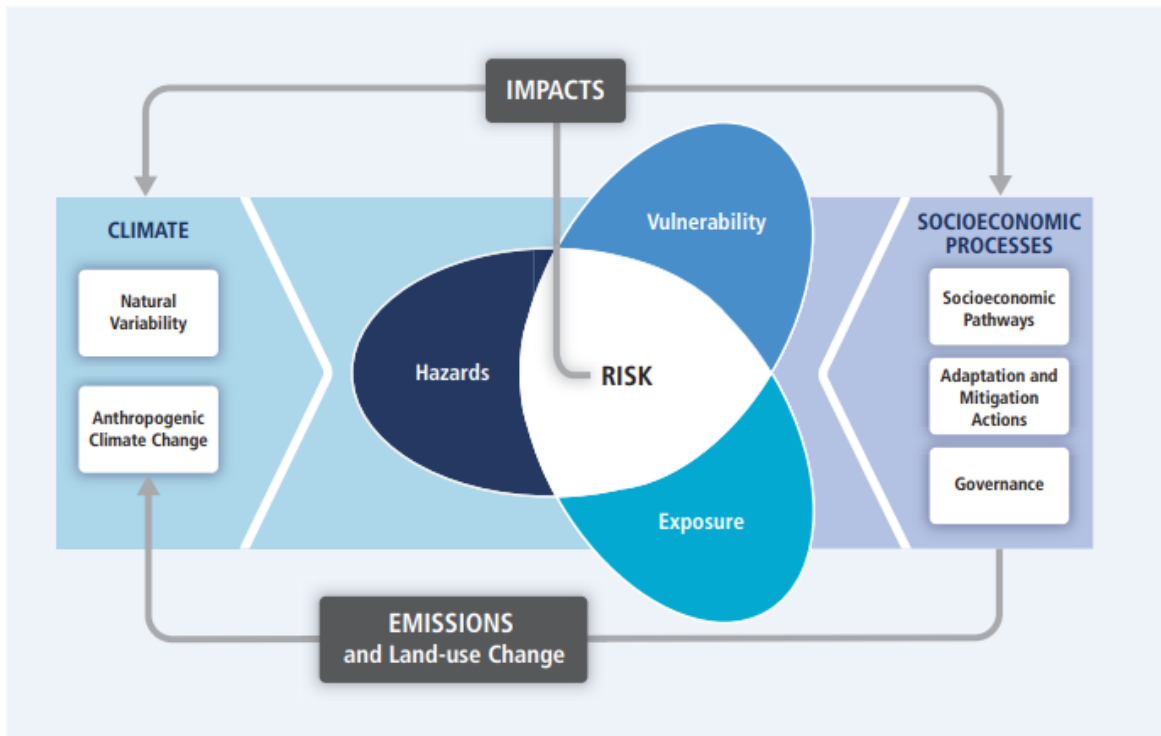


Figura 10. El riesgo de impactos relacionados con el clima resulta de la interacción de los peligros relacionados con el clima (incluidos los eventos y tendencias peligrosos), con la vulnerabilidad y la exposición de los sistemas humanos y naturales.

Fuente: Tomado de IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*

En el caso del cambio climático los peligros se pueden dividir en eventos extremos o agudos (tormentas, olas de calor, eventos de viento extremo, eventos de olas de frío, inundaciones, entre otros) y crónicos o prolongados (cambios en las tendencias y patrones, como aumento gradual en las temperaturas, aumento en el nivel del agua, cambios en la temperatura del agua, cambios en el régimen de precipitación, cambios en régimen de vientos, cambios en régimen de radiación solar, cambios de disponibilidad de agua, Sequía, entre otros). La vulnerabilidad de una planta hidroeléctrica podría darse por la posible afectación a la disponibilidad del recurso por evaporación superficial del embalse, afectación de la temperatura del agua, afectación en la capacidad de generación por escorrentía, o por incertidumbre en los caudales, daños en turbinas o en infraestructura, entre otros.

Con el fin de enfrentarse al desafío de los efectos del cambio climático en la generación de energía hidroeléctrica, la empresa cuenta con acceso a 10 estaciones meteorológicas en la zona de las cuencas del río San Lorenzo y del río Peñas Blancas, y hay dos estaciones que están próximas a ser instaladas.

La Figura 10 muestra con el símbolo de nube las 10 estaciones que ya están funcionando, con un símbolo de tachuela verde una estación que está próxima a ser instalada y, con la tachuela amarilla un punto deseado dónde se proyecta instalar una estación adicional.

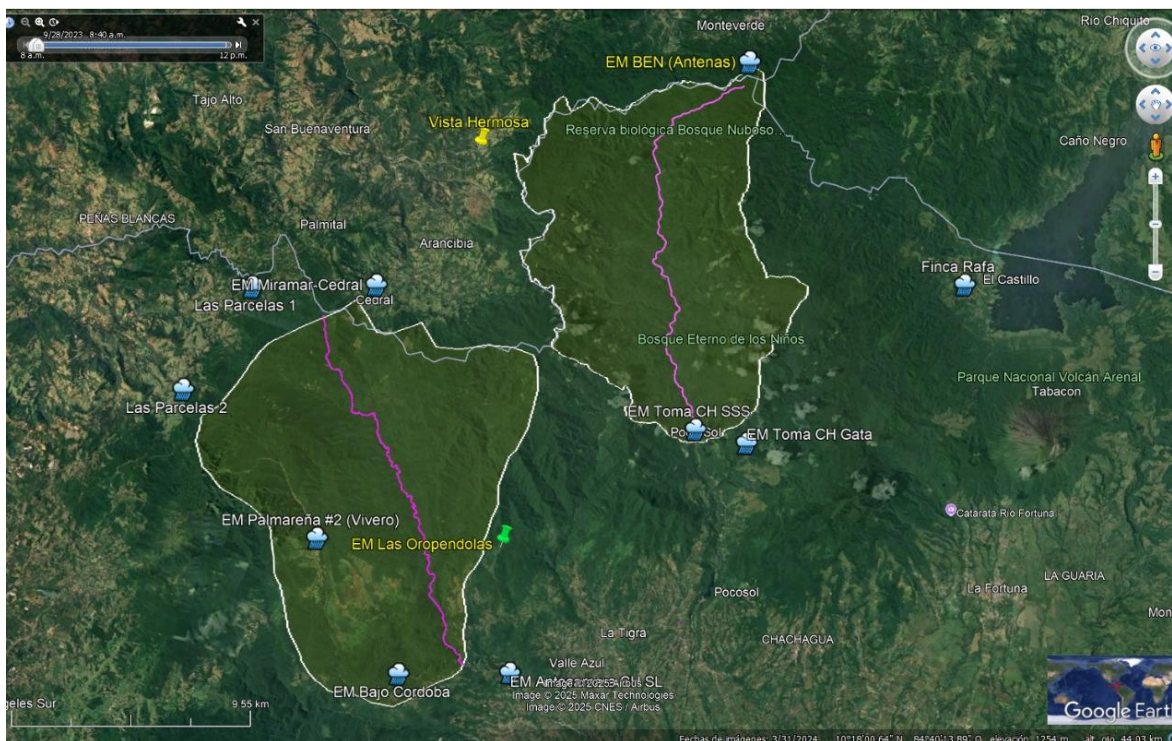


Figura 11. Georeferenciación de estaciones meteorológicas instaladas (nube), próxima a instalar (tachuela verde) y proyectada, según cuenca (tachuela roja).

Fuente: CONELECTRICAS R. L.

Adicionalmente, en cada una de las represas se cuenta con un dispositivo que mide el nivel del caudal del río cada 5 segundos.

Lo que se espera con el ITCR

En colaboración con el ITCR se espera crear un Plan de Gestión Climática que le permita a CONELECTRICAS R.L. disponer de la capacidad de adaptación y mitigación ante los fenómenos climáticos tanto de eventos extremos o agudos, como eventos crónicos o por cambios de tendencias y patrones, que puedan afectar la infraestructura energética ya instalada y por ende la producción de energía.

Para el cumplimiento de este plan debe diseñarse una metodología que sea reproducible en otras plantas hidroeléctricas del país que pertenezcan o no a las Cooperativas de electrificación socias mediante:

1. Generación de un sistema de modelos de predicción de cambio climático por bloques (5 años), que generen tendencias de los cambios crónicos que se esperan, con la funcionalidad de ser una herramienta para realizar los planes focalizados, propios y característicos de cada cuenca de manera individual.

El Tecnológico de Costa Rica será un socio que dé el acompañamiento académico en investigación y estructuración de modelos estadísticos – matemáticos que permitan la conformación de un sistema predictivo de tendencias sobre el cambio climático y las posibles afectaciones que podrían causar a la infraestructura energética (como un todo).

2. Diseñar un sistema de alerta temprana sobre la cuenca en estudio para detención de precipitaciones y sus características (intensidad, tiempo de concentración, estimaciones de cantidad de caudal en tiempo real, que estará llegando sobre el punto de aforo dependiente de las características propias de la cuenca y de sus variantes climáticas).
3. Realizar un estudio comparativo sobre el uso de suelo de la cuenca, para identificar posibles tendencias de afectación (positiva o negativa) según el cambio de uso de suelo que se esté generando, en especial para la cuenca del río San Lorenzo que cuenta con una parte importante dentro de esta de terrenos privados dedicados a usos agrícolas.

Con lo anterior, se esperaría generar los siguientes productos:

- Un Sistema de Información Geográfica (SIG) para caracterizar la cuenca del río San Lorenzo.
- Modelo de uso del suelo de la cuenca.
- Modelos estadísticos para datos climáticos.
- Correlaciones entre variables ambientales, producción energética y caudal del río.
- Resultados en bloques (estos son cambiantes, pero con una tendencia) a partir de posibles modelos de series temporales.
- Sistema dinámico tipo dashboard a partir de Código dinámico utilizando Machine o Deep Learning (ML o DL) e Inteligencia Artificial (IA), que muestre los modelos en tiempo real, que incorpore la nueva data a los modelos para que estén actualizados, que cuente con mecanismos de alerta ante probables variaciones del nivel de caudal del río para tomar previsiones a tiempo.

Visitas de campo

Se realizaron visitas a las centrales hidroeléctricas de San Lorenzo (río San Lorenzo) y Sigifredo Solís (Río Peñas Blancas).

Estas visitas tuvieron por objetivo comprender la dinámica de negocio de CONELECTRICAS R.L., conocer la infraestructura física dedicada a la producción de energía hidroeléctrica, su funcionamiento, riesgos potenciales a los que está expuesta dicha infraestructura, procesos, personal a cargo de esta área en el Consorcio, sistemas informáticos y equipos.

Además, durante las visitas se realizaron reuniones para conversar la situación actual de la compañía, lo que se estaba realizando y las posibles oportunidades de cooperación con el Tecnológico de Costa Rica.

Acuerdos logrados

1. La Escuela de Ciencias Naturales y Exactas generará una propuesta de proyecto de Investigación que contemple las necesidades y requerimientos de CONELECTRICAS R.L. expuestos previamente, la cuál será presentada para la ronda VIE 2025.
2. El Tecnológico de Costa Rica aportará el capital humano necesario para desarrollar el proyecto, los tiempos y el equipo disponible para el desarrollo de la investigación.
3. CONELECTRICAS R.L. se compromete a contribuir con el aporte de la data necesaria para la generación de modelos. En caso de no disponer de dicha información, ofrece la posibilidad de buscarla en otras fuentes como compra de fotografía aérea o imágenes satelitales, datos ambientales disponibles en el IMN o alguna otra fuente.
4. Adicionalmente, CONELECTRICAS R.L. pondrá a disposición recursos económicos para apoyar las siguientes actividades:

Tabla 2. Contrapartida económica de CONELECTRICAS R.L. para proyecto.

Actividades	Monto aproximado del apoyo
Transporte con vehículos de CONELECTRICAS R. L para aproximadamente 10 visitas de campo	¢600 000
Viáticos de alimentación para funcionarios del Tecnológico o CONELECTRICAS involucrados en el proyecto	¢300 000
Adquisición e instalación de estaciones meteorológicas en la cuenca del Río San Lorenzo	¢7 000 000
Mejora de prestaciones computacionales (Equipo tanto de CONELECTRICAS como del Tec)	¢4 000 000
De ser necesario para adquisición de información (imágenes aéreas o satelitales, otros datos)	¢2 500 000

Referencias

- Chaves, M. (2002). Análisis de vulnerabilidad del recurso hídrico y opciones de manejo sostenible en la cuenca del río San Carlos. [Trabajo final de graduación de Licenciatura en Ingeniería Civil]. Universidad de Costa Rica.
- CONELECTRICAS, R.L. (2024). Cooperativas Eléctricas. <https://www.conelectricas.com/>
- Heim, R. R. (2015). An overview of weather and climate extremes: Trends, drivers, and impacts. *Weather and Climate Extremes*, 11, 4-16.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Cambridge University Press.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press.
- Markoll, A., & Patt, A. (2018). Policy options for climate change adaptation in hydropower planning. *Climate and Development*, 10(5), 427-440.
- Rockström, J., Gaffney, O., Rogelj, J., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., & Schellnhuber, H. J. (2017). A roadmap for rapid decarbonization. *Science*, 355(6331), 450-452.
- Soncini, A., Bocchiola, D., & Conti, M. (2019). Climate change impacts on hydropower generation in an Alpine catchment. *Sustainability*, 11(7), 1840.
- Villón, M. (2002). *Hidrología*. Editorial Tecnológica.
- Zarfl, C., Klagen, I., Pielke, R., Zarfl, A., Lutz, F., & Liebig, T. (2015). A global boom in hydropower dam construction. *Aquatic Sciences*, 77(1), 161-170.

Anexos

Represa proyecto San Lorenzo



Embalse proyecto San Lorenzo



Casa máquina Proyecto San Lorenzo



Represa Proyecto Sigifredo Solís



Embalse Proyecto Sigifredo Solís



Casa máquinas Proyecto Sigifredo Solís

