



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**Evaluación del tránsito de avenidas empleando método
Muskingum en caudales mensuales para diseño de obras
hidráulicas, río La Leche, Lambayeque**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Civil**

AUTOR:

Caicedo Yaipén, Máximo (ORCID: 0000-0002-3586-5894)

ASESOR:

Mg. Villegas Granados, Luis Mariano (ORCID: 0000-0001-5401-2566)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Diseño de Obras Hidráulicas y Saneamiento

CHICLAYO – PERÚ

2022

Dedicatoria

A Dios, por darme las fuerzas necesarias para siempre avanzar a pesar de las dificultades.

A todos mis familiares y amigos, que siempre han estado presente para apoyarme sin importar la distancia.

Caicedo Yaipén, Máximo

Agradecimiento

A mi alma máter la UCV y al gran equipo de catedráticos de la Escuela de Ingeniería Civil que han contribuido en mi formación académica, profesional y personal

A mi asesor Mg. Ing. Luis Mariano Villegas Granados por su apoyo constante y sugerencias acertadas para la culminación de la presente tesis.

A mi familia, amigos y todas aquellas personas que hicieron posible esta tesis

Caicedo Yaipén, Máximo

Índice de contenidos

Carátula.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Índice de contenidos.....	iv
Índice de tablas.....	v
Índice de gráficos y figuras.....	vii
Resumen.....	x
Abstract.....	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
III. METODOLOGÍA.....	17
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	17
3.2. Variables y operacionalización.....	17
3.3. Población, muestra y muestreo.....	17
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	18
3.5. Procedimientos.....	19
3.6. Método de análisis de datos.....	21
3.7. Aspectos éticos.....	21
IV. RESULTADOS.....	22
V. DISCUSIÓN.....	65
VI. CONCLUSIONES.....	69
VII. RECOMENDACIONES.....	71
REFERENCIAS.....	72
ANEXOS.....	80

Índice de tablas

Tabla 1: Obras hidráulicas de la cuenca La Leche en la Región Lambayeque....	18
Tabla 2: Repositorios de acceso de datos y sus páginas web.....	19
Tabla 3: Parámetros geomorfológicos de la cuenca La Leche.....	22
Tabla 4: Estaciones meteorológicas e hidrométricas consideradas en la presente tesis.....	23
Tabla 5: Precipitaciones máximas de 24 horas de duración de las estaciones meteorológicas.....	24
Tabla 6: Análisis de extremos de precipitación de la estación Incahuasi.....	25
Tabla 7: Análisis de extremos de precipitación de la estación Tocmoche.....	26
Tabla 8: Análisis de extremos de precipitación de la estación Puchaca.....	26
Tabla 9: Análisis de extremos de precipitación de la estación Tinajones.....	26
Tabla 10: Análisis de extremos de precipitación de la estación Jayanca.....	27
Tabla 11: Parámetros del método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca.....	34
Tabla 12: Parámetros del método Muskingum para la estación hidrométrica Desaguadero.....	34
Tabla 13: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Puchaca para un período de retorno de 5 años.....	35
Tabla 14: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Puchaca para un período de retorno de 10 años.....	36
Tabla 15: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Puchaca para un período de retorno de 25 años.....	38
Tabla 16: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Puchaca para un período de retorno de 50 años.....	39
Tabla 17: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Puchaca para un período de retorno de 100 años.....	40
Tabla 18: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Puchaca para un período de retorno de 200 años.....	42
Tabla 19: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Puchaca para un período de retorno de 500 años.....	43
Tabla 20: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Puchaca para un período de retorno de 1000 años.....	44

Tabla 21: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica	
Desaguadero para un período de retorno de 5 años.....	46
Tabla 22: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica	
Desaguadero para un período de retorno de 10 años.....	47
Tabla 23: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica	
Desaguadero para un período de retorno de 25 años.....	48
Tabla 24: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica	
Desaguadero para un período de retorno de 50 años.....	50
Tabla 25: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica	
Desaguadero para un período de retorno de 100 años.....	51
Tabla 26: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica	
Desaguadero para un período de retorno de 200 años.....	52
Tabla 27: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica	
Desaguadero para un período de retorno de 500 años.....	54
Tabla 28: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica	
Desaguadero para un período de retorno de 1000 años.....	55
Tabla 29: Caudales máximos para diversos períodos de retorno según TYPASA..	62
Tabla 30: Caudales máximos para diversos períodos de retorno según el análisis del tránsito de avenidas aplicando el método Muskingum.....	63

Índice de gráficos y figuras

Figura 1: Hietograma para $Tr = 5$ años para la estación Incahuasi	27
Figura 2: Hietograma para $Tr = 10$ años para la estación Tocmoche.....	27
Figura 3: Hietograma para $Tr = 10$ años para la estación Puchaca	28
Figura 4: Hietograma para $Tr = 10$ años para la estación Tinajones.....	28
Figura 5: Hietograma para $Tr = 10$ años para la estación Jayanca	28
Figura 6: Modelamiento hidrológico de la cuenca La Leche.....	29
Figura 7: Hidrograma de salida de la estación hidrométrica Puchaca para $Tr=50$ años.....	29
Figura 8: Hidrograma de salida de la estación hidrométrica Desaguadero para $Tr=50$ años	29
Figura 9: Hidrograma de salida de la estación hidrométrica Puente La Leche para $Tr=50$ años	30
Figura 10: Relación de tránsito de avenidas general mediante balance para enero hasta diciembre	30
Figura 11: Relación de tránsito de avenidas a partir del método Muskingum para X_j $= 0.10$ correspondiente a la estación hidrométrica Puchaca mes de enero	31
Figura 12: Relación de tránsito de avenidas a partir del método Muskingum para X_j $= 0.12$ correspondiente a la estación hidrométrica Puchaca mes de enero	31
Figura 13: Relación de tránsito de avenidas a partir del método Muskingum para X_j $= 0.14$ correspondiente a la estación hidrométrica Puchaca mes de enero	32
Figura 14: Relación de tránsito de avenidas a partir del método Muskingum para X_j $= 0.16$ correspondiente a la estación hidrométrica Puchaca mes de enero	32
Figura 15: Relación de tránsito de avenidas a partir del método Muskingum para X_j $= 0.18$ correspondiente a la estación hidrométrica Puchaca mes de enero	32
Figura 16: Relación de tránsito de avenidas a partir del método Muskingum para X_j $= 0.20$ correspondiente a la estación hidrométrica Puchaca mes de enero	33

Figura 17: Correlación del tipo lineal de mejor ajuste de las relaciones de tránsito de avenidas correspondiente a la estación hidrométrica Puchaca mes de enero	33
Figura 18: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 5 años	56
Figura 19: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 10 años.....	57
Figura 20: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 25 años.....	57
Figura 21: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 50 años.....	57
Figura 22: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 100 años.....	58
Figura 23: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 200 años.....	58
Figura 24: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 500 años.....	58
Figura 25: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 1000 años.....	59
Figura 26: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Desaguadero para período de retorno de 5 años.....	59
Figura 27: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Desaguadero para período de retorno de 10 años.....	59

Figura 28: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 25 años.....	60
Figura 29: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Desaguadero para período de retorno de 50 años.....	60
Figura 30: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Desaguadero para período de retorno de 100 años.....	60
Figura 31: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 200 años.....	61
Figura 32: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Desaguadero para período de retorno de 500 años.....	61
Figura 33: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Desaguadero para período de retorno de 1000 años.....	61
Figura 34: Tránsito de avenidas usando el método Muskingum en la cuenca La Leche para los diferentes períodos de retorno.	64

Resumen

El objetivo de la tesis fue evaluar el tránsito de avenidas empleando el método Muskingum en caudales mensuales para el diseño de obras hidráulicas en el río La Leche, Lambayeque cuya metodología abordada fue del tipo aplicada y de diseño no experimental comparativo. El método Muskingum según el marco teórico y artículos científicos revisados está basado en tres elementos: las relaciones de flujo de entrada y salida, el volumen para los diferentes intervalos de duración y las constantes adimensionales del propio método en las que destacan las constantes “ K_j ” definida como la proporcionalidad del volumen en cierto intervalo de tiempo y “ X_j ” como la ponderación del tránsito a lo largo del río. El análisis de extremos de precipitación implicó estudiar las cinco estaciones meteorológicas de la cuenca, mientras que el tránsito de avenidas fue evaluado para sus tres estaciones hidrométricas. Los resultados indican que el tránsito de avenidas a partir de los hidrogramas de salida simulados y aplicando el método Muskingum en esta cuenca es el adecuado para los coeficientes promedio “ K_j ” y “ X_j ” de cada estación hidrométrica, llegando a la conclusión de que se pueden determinar caudales máximos por medio de hidrogramas de salida para diferentes períodos de retorno.

Palabras clave: Caudal, cuenca La Leche, método Muskingum, precipitación, tránsito de avenidas.

Abstract

The objective of the thesis was to evaluate the flood routing using the Muskingum method in monthly flows for the design of hydraulic structures in La Leche river, Lambayeque, whose methodology was of the applied type and of a comparative non-experimental design. The Muskingum method according to the theoretical framework and reviewed scientific articles is based on three elements: the inflow and outflow relationships, the volume for the different duration intervals and the dimensionless constants of the method itself, in which the constants "Kj" stand out. defined as the proportionality of the volume in a certain time interval and "Xj" as the weighting of the traffic along the river. The analysis of rainfall extremes involved studying the five meteorological stations of the basin, while the flood routing was evaluated for its three hydrometric stations. The results indicate that the flood routing from the simulated outlet hydrographs and applying the Muskingum method in this basin it is adequate for the average coefficients "Kj" and "Xj" of each hydrometric station, reaching the conclusion that maximum flows can be determined by means of outlet hydrographs for different return periods.

Keywords: Flow, La Leche basin, Muskingum method, rainfall, flood routing.

I. INTRODUCCIÓN

El tránsito de avenidas es una técnica que permite determinar el hidrograma de descarga y de inundación en una sección de río de una cuenca hidrográfica empleando para ello los datos del caudal en una o más secciones aguas arriba valiéndose previamente de la información hidrométrica y pluviométrica disponible en la zona de estudio, en tal sentido se requiere la óptima predicción de la propagación de los caudales que permitan tomar las medidas necesarias no sólo para los sistemas de protección y alerta de las potenciales zonas vulnerables a corto y mediano plazo, sino también para la gestión de los recursos hídricos y el ordenamiento territorial. Otro aspecto importante es la evaluación de la infraestructura hidráulica pues al presentarse avenidas máximas que por lo general superan los caudales máximos de diseño estos afectan directamente la vida útil de las obras hidráulicas generando mucha incertidumbre sobre todo en situaciones de emergencia.

A nivel mundial el impacto que ha generado el aumento de la temperatura ha provocado cambios en el comportamiento climático del planeta y las principales variables meteorológicas afectadas han sido la precipitación, la evaporación, la evapotranspiración, la humedad relativa y la escorrentía, de ahí que sus patrones se están volviendo aleatorios haciendo impredecible la cantidad de caudal que puede producir una cuenca hidrográfica. El Perú no es ajeno a este problema pues siendo un país que depende mucho de sus recursos naturales hace necesario cuantificar la disponibilidad de agua para el mejor desarrollo de la infraestructura hidráulica local y nacional.

Hoy en día no sólo se habla de El Fenómeno El Niño, del mismo modo se habla de El Fenómeno El Niño costero pues es el que probablemente influye más en las lluvias e inundaciones de los últimos años, provocando colapsos de las principales estructuras civiles del país como las obras hidráulicas. Específicamente en el año 2017 se presentaron eventos extremos denominados como atípicos, pues en realidad se debieron al Fenómeno El Niño costero cuya influencia climática provocó un aumento considerable de lluvias y varias inundaciones en la zona norte del Perú, siendo las regiones Tumbes, Piura y Lambayeque las más afectadas.

En ese contexto se requieren emplear métodos y técnicas sencillas pero adecuadas a la estimación de caudales que permitan un óptimo diseño de la infraestructura hidráulica por lo que el tránsito de avenidas es una de las metodologías que se ajusta a estas características, más aún cuando no se dispone de mucha información pluviométrica o hidrométrica en una cuenca hidrográfica.

Como **formulación del problema**: ¿Cómo evaluar el tránsito de avenidas empleando el método Muskingum en caudales mensuales para diseño de obras hidráulicas en el río La Leche, Lambayeque?.

La **justificación de la investigación** se centra desde el punto de vista social y económico, pues con la presente tesis se podrá saber cuáles son las obras hidráulicas más importantes y propensas a sufrir desbordamientos y colapsos en la cuenca del río La Leche y además podría provocar daños materiales en la infraestructura local de los pobladores y disminuiría su calidad de vida. En el aspecto ambiental se justifica ya que al hacer una evaluación del tránsito de avenidas se determinarán los caudales máximos y de esa manera establecer si ha influido o no el cambio climático en el río La Leche. Finalmente se justifica tecnológicamente puesto que el tránsito de avenidas al ser un método iterativo, pero a la vez simple facilita la estimación de caudales máximos siendo en este caso una herramienta tecnológica de gran ayuda sobre todo cuando no se dispone de mucha información meteorológica.

El **objetivo general** es evaluar el tránsito de avenidas empleando el método Muskingum en caudales mensuales para el diseño de obras hidráulicas en el río La Leche, Lambayeque.

Los **objetivos específicos** son:

Delimitar la cuenca La Leche y determinar sus parámetros geomorfológicos.

Establecer las precipitaciones máximas anuales de 24 horas de duración de la cuenca Le Leche para realizar los hidrogramas de salida mediante un modelamiento hidrológico precipitación-escorrentía.

Analizar los caudales de cada estación hidrométrica a nivel mensual y de cada año para determinar el factor de relación del tránsito de avenidas general.

Estimar los tránsitos de avenidas con el método Muskingum para la cuenca La Leche a partir de los hidrogramas de salida del modelamiento hidrológico con diferentes períodos de retorno.

La **hipótesis** es al evaluar el tránsito de avenidas empleando el método Muskingum en caudales mensuales se determinarán adecuadamente los caudales máximos para diseño de las obras hidráulicas del río La Leche.

II. MARCO TEÓRICO

Teoría del tránsito de avenidas

El tránsito de avenidas, más conocido como “flow routing” estudia el cambio de un hidrograma a medida que avanza el tiempo de descarga a lo largo de un río de una cuenca hidrográfica y/o embalse (Pazos Roldán y Mayorga Arias, 2019, p. 83).

El análisis de cualquier tipo de tránsito según Pazos y Mayorga (2019) consiste en:

[...]Supongamos que en el extremo de un canal seco arrojamos un volumen de agua. El pequeño hidrograma generado será inicialmente más alto y de menor duración y a medida que avanza, el mismo volumen pasará por los demás puntos cada vez con un hidrograma más aplanado. Suponemos que no existe pérdida de volumen (por infiltración o evaporación), de modo que el área comprendida bajo los tres hidrogramas será idéntica[...]. (2019, p. 83).

Así mismo Pazos y Mayorga (2019) mencionan que:

[...]Calcular el tránsito de un hidrograma es obtener el hidrograma en cierto punto del tramo de un río. La utilidad práctica del procedimiento es evidente. Por ejemplo, el carácter catastrófico de una avenida está relacionado directamente con la altura del pico del hidrograma (el caudal máximo), de modo que es fundamental calcular cómo ese pico va disminuyendo a medida que nos movemos aguas abajo[...]. (2019, p. 84).

Diversas investigaciones señalan que existen tres tipos de tránsitos: los agregados de crecientes, los distribuidos de crecientes y los de onda dinámica, estos tránsitos se diferencian principalmente en el uso de las características hidrológicas, componentes hidráulicas y dinámicas del flujo respectivamente, dentro de los cuales destaca el método Muskingum y sus derivaciones. El método Muskingum fue desarrollado por primera vez por los ingenieros del ejército estadounidense para los estudios de control de inundaciones de la cuenca del río Muskingum en Ohio (Khalifeh, Esmaili, Khodashenas y Khalifeh, 2020, p. 2); y en ese entendido el método es el sugerido para la estimación de tránsitos de crecidas de ríos (Hirpurkar y Ghare, 2015, p. 147)

También Pazos y Mayorga (2019) indican que:

[...]Entre los métodos hidrológicos, posiblemente el más utilizado en cálculos manuales por su sencillez sea el de Muskingum. El almacenamiento (S) en un tramo del cauce

puede descomponerse en dos partes: almacenamiento en prisma, que sería proporcional al caudal de salida (O) y almacenamiento en cuña, que sería función de la diferencia entre el caudal de entrada y el de salida (I-O), ya que cuanto mayor sea esa diferencia, más pronunciada será la cuña[...]. (2019, p. 84).

El método Muskingum establece que el almacenamiento por prisma se estima como el producto del coeficiente de proporcionalidad “K_j ó K” del volumen en cierto intervalo de tiempo “Δt ó Δt_j” por el caudal de salida “O_j”, es decir:

$$S_1 = K_j * O_j$$

Ecuación 1: Volumen de almacenamiento en cierto intervalo de tiempo.

Mientras que el volumen de almacenamiento por cuña se expresa como:

$$S_2 = K_j * X_j * (I_j - O_j)$$

Ecuación 2: Volumen de almacenamiento por cuña.

Donde “X_j ó X” es la ponderación del tránsito a lo largo del río ó tramo analizado en la cuenca e “I_j” es el caudal de entrada en el análisis del tránsito de almacenamiento. Luego el tránsito total se representa como la suma del almacenamiento por prisma más el almacenamiento por cuña, que ordenando convenientemente se define como:

$$S = S_1 + S_2 = K_j * (X_j * I_j + (1 - X_j) * O_j)$$

Ecuación 3: Suma de almacenamientos.

Después el método Muskingum señala la ecuación general de tránsito en base a la ecuación de sumas del almacenamiento por prisma y por cuña:

$$O_{j+1} = C_1 * I_{j+1} + C_2 * I_j + C_3 * O_j$$

Ecuación 4: Expresión general del tránsito de avenidas del método Muskingum.

Donde O_{j+1} es el caudal de salida de la siguiente posición al caudal inicial de salida O_j y I_{j+1} es el caudal de entrada de la siguiente posición al caudal inicial de entrada I_j. Además las variables C₁, C₂ y C₃, según Qiang, Qiaoping, Xingjun y Jun (2020)

“son las constantes adimensionales del propio método” (p. 2) y se presentan a continuación:

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2 * K * X}{2 * K * (1 - X) + \Delta t}$$

Ecuación 5: Expresión para determinar la constante C₁.

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2 * K * X}{2 * K * (1 - X) + \Delta t}$$

Ecuación 6: Expresión para determinar la constante C₂.

$$C_3 = \frac{2 * K * (1 - X) - \Delta t}{2 * K * (1 - X) + \Delta t}$$

Ecuación 7: Expresión para determinar la constante C₃.

Finalmente, al remplazar los valores de “C₁” (ecuación 5), “C₂” (ecuación 6) y “C₃” (ecuación 7), en la ecuación 4, se puede obtener la expresión general del tránsito de avenidas del método Muskingum para cualquier registro ó datos de caudales de una cuenca hidrográfica y de una obra hidráulica que permite generar un hidrograma de variaciones de caudal en función al tiempo (USDA, 2014, p. 17-43).

Investigaciones a nivel internacional

El objetivo de la investigación fue definir un hidrograma de inundación usando parámetros geomorfológicos derivados de mapas de la India con ayuda del sistema de información geográfico (SIG) que permita simular el tránsito de avenidas. La metodología aplicada se basó en el método Muskingum a partir de los datos de escorrentía para luego generar el hidrograma unitario sugerido por la Comisión Central del Agua (CWC) de India. Los resultados indican las limitaciones del hidrograma unitario CWC, una aproximación tanto en las cuencas de captación de pequeñas y grandes colinas y se observa que el hidrograma unitario subestima las descargas máximas. Finalmente, los investigadores concluyen en que es adecuado el uso de la distribución gamma de dos parámetros para la preparación de la curva del hidrograma en lugar de adoptar la práctica estándar de dibujar un hidrograma unitario sintético utilizando siete puntos conocidos con ajuste de curva aproximada (Bhuyan, Kumar, Jena y Bhunya, 2015, p. 5765).

La tesis tuvo como objetivo evaluar el método Muskingum para el tránsito de avenidas con aplicación a cuencas de la región de la Sierra Nevada de Santa Marta, específicamente la del río Tukurinca. Para ello se tuvo como metodología el análisis de la información hidrológica suministrada por el IDEAM, específicamente de la estación El Trébol de tipo Limnigráfica, que está ubicada en la Cuenca del Tukurinca, Municipio Ciénaga. Los resultados obtenidos permitieron establecer los parámetros (K y X), los coeficientes (C_1 , C_2 y C_3) y ecuaciones propias del método Muskingum para la zona evaluada, concluyéndose en que el método es aplicable a los ríos ubicados en la zona de la Sierra Nevada de Santa Marta y que los datos supuestos de manera inicial de las constantes K y X son acertados debido a que al realizar la calibración del método, se determinó que la constante X tiene un valor de 0.30 y la constante K tiene un valor de 1.00 día (Chocontá y Martínez, 2016, p. iii).

En esta publicación se tuvo como objetivo proponer una nueva técnica híbrida para la estimación de parámetros del método Muskingum basado en el principio del tránsito de avenidas y que además combine la optimización de algoritmos para una mejor estimación de los parámetros considerando en este caso seis. La metodología abordada implicó el uso de una técnica híbrida para la estimación de parámetros de esta nueva versión del modelo Muskingum para tres estudios de caso seleccionados. Los resultados obtenidos se compararon con los de otros métodos utilizando para ello varios criterios comunes de evaluación del desempeño tales como el rango de caudales e intervalos de tiempo. Finalmente se concluye en que el nuevo método híbrido respecto al modelo propuesto de Muskingum es el que presenta mejor rendimiento entre todos los considerados pues el algoritmo supera las deficiencias de las técnicas de optimización matemática y de imitación de fenómenos (Niazkar y Afzali, 2016, p. 4713).

Esta investigación tuvo como objetivo proponer una extensión de los parámetros variables del tránsito de avenidas de un hidrograma de etapas basado en el método Muskingum para evaluar caudales, también implicó la afluencia lateral que ocurre a lo largo del tramo del río. La metodología abordada permitió la comparación en dos ríos caracterizados por diferentes propiedades geométricas e hidráulicas: 1) un

tramo de 50 km del río Tíber en (Italia central) y 2) un tramo de 73 km del río Godavari en la India peninsular. Los resultados demuestran que tanto los hidrogramas de descarga aguas arriba y aguas abajo están correctamente estimados pues los parámetros estadísticos cumplen con las condiciones de frontera. Finalmente se concluye que el método considerado no sólo es aplicable al cálculo de caudales, si no también permite la estimación de los coeficientes de rugosidad óptimos para el tránsito de los diversos eventos de avenidas (Barbetta, Moramarco y Perumal, 2017, p. 216)

El artículo científico planteó como objetivo evaluar dos nuevos modelos de tránsito de avenidas a partir del método Muskingum en su condición no lineal, dentro de los cuales uno consideró el flujo lateral y el otro consideró el flujo lateral con un parámetro exponente variable. La metodología empleada sugirió minimizar la suma de las desviaciones entre los flujos de salida observados y simulados para luego aplicarse a tres ejemplos de referencia y uno real en Irán para verificar el desempeño de los modelos propuestos, también fue necesario el uso de un algoritmo híbrido para mejorar la obtención de los parámetros de los dos modelos propuestos. Las comparaciones de los resultados para cuatro ejemplos y para los diferentes modelos mostraron que dos modelos propuestos pueden producir un ajuste más preciso a los flujos de salida observados, concluyendo en que al considerar la simultaneidad de los tránsitos con la adición de un parámetro exponente y el flujo lateral, se logran reducir las desviaciones estadísticas haciendo los caudales de salida más significativos (Kang, Zhou y Zhang, 2017, p. 4449).

El objetivo de la investigación fue realizar el tránsito de avenidas en el cauce natural de la cuenca experimental del río Ichu mediante la técnica de inteligencia artificial (ANN). La metodología aplicada requirió de diferentes parámetros del canal del río, mientras que el método ANN simplificó la cantidad de datos pero en menor tiempo, también implicó un área de revisión que está ubicada en la cuenca experimental del río Ichu, aguas arriba de la ciudad de Huancavelica con lo que se pudo aplicar el método Muskingum-Cunge para el tránsito de avenidas. Se obtuvieron valores de coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS) iguales a 0.851 y 0.828 para la etapa de calibración y validación respectivamente, en tanto las ANN se

construyeron con diferentes arquitecturas. Finalmente, se concluye en que la arquitectura 1-5-1 presentó un mejor ajuste, cuyo estadístico NS fue de 0.881 y 0.859 en la etapa de entrenamiento y validación respectivamente, en tal sentido se pudo generar los hidrogramas de entrada y salida (Ayala *et al.*, 2018, p. 387).

El presente artículo científico tuvo como objetivo desarrollar un modelo de Muskingum de tres parámetros considerando el flujo lateral para el tránsito de avenidas, pero acoplado con un nuevo algoritmo de optimización. La metodología desarrollada estuvo en función de la optimización de los tres parámetros asociados con el modelo de Muskingum ya que a diferencia de los otros modelos existentes que consideran un tránsito constante, esta publicación se basó en dividir un tramo a unos pocos intervalos para aumentar la precisión de los resultados que determinaron siete índices de rendimiento de los cuales la inundación de Wilson mostró mejores optimizaciones en comparación con los otros algoritmos. En conclusión, el modelo Muskingum propuesto e integrado con el nuevo algoritmo considerando la existencia de flujo lateral, superó al método Muskingum simple y se demuestra que cuanto mayor sea el número de intervalos utilizados en un modelo, mejor será la predicción del tránsito de avenidas (Farzin *et al.*, 2018, p. 2018).

El objetivo de este artículo de investigación es proponer seis esquemas numéricos que puedan modificar el modelo inercial unidimensional para aumentar la estabilidad numérica de la solución de la ecuación general del tránsito de avenidas por lo que la metodología abordada comprendió la caracterización de los esquemas numéricos propuestos que luego fueron comparados con el esquema original en cuatro situaciones de pendiente del río y en dos situaciones donde el río está sujeto a efectos aguas abajo. Los resultados se discutieron en términos de estabilidad, flujo máximo, procesamiento, tiempo, error de conservación de volumen y el criterio del error cuadrático medio. En general, se concluye que los esquemas definen una óptima mejora con respecto a cada tipo de aplicación y en particular, se destacó el esquema numérico propuesto respecto a los tradicionales, no obstante, este esquema no tuvo éxito en la situación de simulación de mareas y se precisa siempre

contrastar los resultados con respecto a los métodos tradicionales de tránsito de avenidas. (Fassoni-Andrade, Mainardi, Collischonn, César y Dias, 2018, p. 1)

La publicación de este artículo tuvo como objetivo la aplicación de modelos Muskingum lineales y no lineales con datos de inundaciones lineales y no lineales para el estudio del tránsito de avenidas. La metodología desarrollada conllevó a la utilización de tres métodos diferentes para comparar la precisión del flujo de salida real respecto al estimado, cuyos métodos empleados fueron: ensayo y error, mínimos cuadrados y método de optimización directa. Los resultados muestran que al realizar la comparación de los modelos lineales y no lineales respecto al registro disponible de inundaciones, estos señalan un muy buen desempeño, concluyéndose en que a pesar de que el método Muskingum para el tránsito de avenidas es muy simple y práctico, se requieren ajustes lineales y no lineales del método inicial con el fin de ajustar los resultados a las condiciones de contorno más reales posibles (Alhumoud y Almashan, 2019, p. 355).

El objetivo del artículo científico permitió desarrollar un modelo no lineal de Muskingum para el tránsito hidrológico basado en la eficiencia de lo no lineal respecto al método tradicional. La metodología que se abordó evaluó cuatro modelos de Muskingum con ecuaciones de almacenamiento mejoradas, generalizadas y no lineales, en ese sentido los resultados de los modelos propuestos proporcionaron más grados de libertad que lograron ajustar los datos de los flujos observados que otros modelos Muskingum no lineales y pues tienen una mejor capacidad de predicción del caudal de los ríos. Finalmente la exactitud de los resultados concluyen en que los modelos propuestos de Muskingum que se muestran aquí son los adecuados y pueden aplicarse a otros casos de estudio (Bozorg-Haddad, Abdi-Dehkordi, Hamedi, Pazoki, y Loáiciga, 2019, p. 2677).

El objetivo de la investigación científica es estudiar las perturbaciones en los ríos empleando las ecuaciones de onda larga como parámetro de entrada en el tránsito de avenidas. La metodología aplicada permitió la aproximación de cambio de la superficie y pendiente del cauce de modo que los términos de difusión en las ecuaciones fueron pequeños pero aceptables en comparación con el método

Muskingum. Los resultados indican que de las varias formulaciones aplicativas de Muskingum conocidas, las que destacan son las ecuaciones gobernantes, las ecuaciones de onda larga, la advección-difusión y la propia aproximación de Muskingum pues son las que presentaron mejores resultados en función a los registros disponibles de inundaciones, aún así, el hecho de que no se puedan utilizar para todos los problemas requiere un método de tránsito de avenidas alternativo general, por lo que se concluye que las ecuaciones de onda larga escritas en términos de descarga y área-sección transversal es en este caso es la más recomendable (Fenton, 2019, p. 251)

En este artículo científico se tuvo como objetivo principal el aumento de la precisión del caudal de salida y se busca proponer por primera vez el nuevo modelo no lineal de Muskingum, con cuatro parámetros variables. La metodología analizada implicó entradas de tránsito para tres subregiones y en cada uno de los cuatro parámetros hidrológicos tuvo varios valores en cada subregión permitiendo una variedad de procesamientos para determinar la mejor respuesta de caudales de salida. Los resultados mostraron que las desviaciones estándar cuadráticas se redujeron considerablemente y de manera significativa en los cuatro estudios de caso en comparación con el modelo de Muskingum no lineal con tres parámetros, y finalmente se concluye en que el modelo propuesto tiene superioridad sobre otros modelos Muskingum no lineales, que han sido utilizados por otros investigadores hasta ahora (Akbari, Hessami-Kermani y Shojae, 2020, p. 3291).

La investigación científica planteó como objetivo proponer un modelo de Muskingum híbrido no lineal para optimizar el tránsito de avenidas, ya que el modelo híbrido propuesto tiene más grados de libertad que admite ajustar los datos observados que otros modelos del tipo Muskingum no lineales. La metodología evaluada permitió solucionar los problemas de enrutamiento de los hidrogramas experimentales, reales y multimodales. Los resultados confirman la adecuada predictividad del modelo híbrido basado en la minimización de la suma de la desviación cuadrada entre los valores observados y salidas transitadas, la suma del valor absoluto de las desviaciones entre el caudal observado y flujo de salida calculado, y las desviaciones entre el pico de los caudales de salida transitados y

reales. Finalmente los resultados demuestran que el modelo Muskingum híbrido no lineal si logró mejorar considerablemente los resultados en comparación al método tradicional por lo se sugiere su extensión a otros casos de estudio (Bozorg-Haddad, Mohammad-Azari, Hamedi, Pazoki, y Loáiciga, 2020, p. 109).

El artículo científico planteó como objetivo el estudio de doce variantes de tránsito de avenidas basadas en el método original de Muskingum y lo que se busca es comparar dichas variantes considerando diferentes fuentes de registro de caudales que determinen la confiabilidad del flujo de salida estimado por diversas formas de ecuaciones de tránsito de avenidas de Muskingum. La metodología implicó el rendimiento de varias formas de ecuaciones de Muskingum en función de la suma del cuadrado de la desviación, la eficiencia de Nash, la desviación del flujo de salida máximo y la desviación del tiempo de flujo de salida máximo. Los resultados aclaran que cuando las olas de crecida se propagan a través del canal, generalmente hay algún flujo de entrada-salida lateral asociado con él, por lo tanto, el flujo lateral no debe descuidarse al transitar las crecidas. Las conclusiones de esta investigación sostienen que los parámetros de las ecuaciones de Muskingum a partir de las variantes aplicadas son una herramienta confiable para el tránsito de avenidas sin teorizar demasiado el método tradicional (Nawaz, Zakwan, Khan y Rahim, 2020, p. 64).

El artículo científico planteó como objetivo analizar los factores óptimos para el modelado y control de inundaciones empleando los hidrogramas de inundaciones, pues no siempre están disponibles debido a la falta de observaciones de descargas de inundaciones. La metodología propuesta abordó los diferentes tipos de tránsitos de avenidas entre ellos los métodos numéricos de Euler y Runge-Kutta de cuarto orden para resolver el modelo de almacenamiento a partir de los cálculos hidráulicos o hidrológicos desde el extremo de aguas abajo hasta el extremo de aguas arriba. Los resultados señalan que de los análisis realizados se mejoró sustancialmente hasta un 82% en comparación con los caudales observados, concluyendo finalmente en que la aplicabilidad práctica de la metodología propuesta en la investigación también se puede replicar en sistemas fluviales reales (Badfar, Barati, Dogan y Tayfur, 2021, p. 1).

El objetivo del artículo científico es aplicar el cálculo inverso del flujo de canal abierto cuya solución inversa comienza desde el hidrograma de aguas abajo hacia el hidrograma de aguas arriba en la dirección horizontal utilizando técnicas numéricas. La metodología de aplicación se desarrolló mediante el método de diferencias finitas para estimar las ecuaciones diferenciales parciales por lo que la ecuación de Muskingum-Cunge se utilizó para estimar el tránsito de avenidas inverso. Los resultados obtenidos del método Muskingum-Cunge manifiestan que es adecuado para analizar los datos in situ de Shatt al-Kufa, Iraq, para una sola ola y predecir la necesidad de caudal que dependió como era de esperarse del análisis estadístico, sugiriendo a manera de conclusión que su aplicación es muy práctica para la zona estudiada y se puede replicar a otros lugares de similares características (Sahib, Almurshdi, Naje y Al-Zubaidi, 2021, p. 1427).

Investigaciones a nivel nacional

La tesis tuvo como objetivo realizar un estudio de la estimación de caudales máximos y sus valores a diferentes periodos de retorno, previo ajuste a una función de probabilidad de la precipitación máxima en 24 horas. La metodología fue aplicada en la estación de aforo del río Quillacancha-Cangallo, realizándose para ello el cálculo de caudales máximos dentro de la microcuenca destacando de entre estos métodos el de simulación hidrológica precipitación-escorrentía con Hec-Hms, el cual nos permite conocer el caudal para diferentes periodos de retorno para 50 y 100 años en la microcuenca. Los resultados obtenidos dieron un caudal de entrada de 39.67 m³/s y un caudal de diseño del aliviadero de 29.90 m³/s. Las conclusiones manifiestan que el modelamiento hidrológico es el adecuado para la estimación de caudales máximos y para el tránsito de avenidas del aliviadero cuyo uso podría replicarse a otras zonas de estudio (Lloclla, 2016, p. iv).

La tesis tuvo como principal objetivo realizar el estudio de tránsito de avenidas en el cauce natural del río Ichu mediante la técnica de las redes neuronales artificiales (RNA). La metodología que se aplicó determinó un área de estudio que se encuentra ubicado en la cuenca experimental del mismo río, aguas arriba de la ciudad de Huancavelica y se desarrolló un modelo calibrado y validado del proceso de lluvia-escorrentía. El tránsito de hidrograma se realizó con el método de

Muskingun-Cunge, para generar los registros históricos para los 5 tramos del cauce obteniendo 39 avenidas históricas en los años 2016 y 2017. Los resultados muestran valores de coeficientes de eficiencia Nash-Sutcliffe de 0.851 y 0.828 para la etapa de calibrado y validación respectivamente de los hidrogramas, concluyendo en que la arquitectura 1-5-1 es la que presenta un mejor ajuste y estableció el tránsito de avenidas con un tiempo de avance de 30 minutos (Requena, 2018, p. VIII).

Esta tesis tiene como objetivo realizar una evaluación hidrológica para la estimación de los caudales máximos en la subcuenca del río Sayacc ubicado en el distrito de Vischongo-Vilcashuamán, región Ayacucho, afectada anualmente por eventos extremos de desbordes del río. La metodología siguió una secuencia de procedimientos los cuales comenzaron con la evaluación en campo del cual se obtuvieron las principales fuentes de recursos hídricos superficiales existentes, luego el cálculo de los caudales máximos y las características geomorfológicas de la subcuenca del río Sayacc con el uso de programas de ingeniería. Los resultados indican un caudal máximo de 105.40 m³/s para un periodo de retorno de 50 años y el modelamiento hidráulico con Iber v.2.3.2 reveló la existencia de desbordes en los márgenes del río Sayacc, por lo cual se realizó el diseño hidráulico de las obras hidráulicas. Como conclusión de la tesis manifiesta la construcción de espigones para el control del encauzamiento y se recomienda como nueva implementación la instalación de cuatro lagunas de detención como disipadores de caudales picos (Martínez, 2019, p. 15).

La presente tesis tuvo como objetivo estudiar el comportamiento hidráulico del río Piura, en el tramo entre las ciudades de Tambogrande y Piura separadas aproximadamente 40 Km, con la finalidad de determinar la magnitud y traslación de la onda de crecida durante la avenida ocurrida el 27 de marzo del año 2017, usando el método Muskingum. La metodología consistió en el estudio de los caudales de entrada y salida en un punto de control hidrométrico del cauce y con la ayuda de información hidrológica de caudales y niveles, previamente registrados, se obtuvieron los parámetros y coeficientes de aplicación del método. Los resultados obtenidos permitieron conocer la utilidad práctica de este método como por ejemplo

en conocer el caudal máximo, pues este último tiene una relación directa con la magnitud del desastre que puede producir una avenida. Las conclusiones de la tesis mencionan que este método también puede ser utilizado como una medida de alerta temprana para tomar medidas preventivas y así minimizar los daños que puedan producirse ante la amenaza de la crecida y su tránsito de avenidas a lo largo de un cauce (Montero, 2019, p. XIII).

Investigaciones a nivel local

El presente informe tuvo como objetivo el estudio hidrológico de la cuenca del río Motupe-La Leche, para describir, evaluar, cuantificar y simular el funcionamiento de la cuenca como un sistema hidrológico integral para una adecuada gestión de sus recursos hídricos. El informe caracterizó la cuenca, en cuanto a sus parámetros físicos, meteorológicos y aspectos sociales. Asimismo, se realizó un análisis de los datos pluviométricos e hidrométricos, determinando su variabilidad en el tiempo y espacio. En el capítulo de variabilidad climática se consideró la influencia de las variables climáticas y oceanográficas a nivel global sobre la precipitación. También, se elaboró un modelo hidrológico en el programa WEAP, que tuvo dos escenarios: estado actual (incorporando las demandas hídricas) y el estado natural sin demandas hídricas, se realizó finalmente un balance hídrico. Por último, se concluye en el análisis de extremos de precipitaciones máximas, avenidas y sequías para la cuenca que definieron su comportamiento aleatorio y estacional (Fonseca, Lavado y Chunga, 2019, p. 6).

La publicación científica tiene como objetivo la determinación de los caudales máximos en las zonas alejadas de una cuenca donde no se cuenta con información pluviométrica ni hidrométrica empleando el análisis de las curvas de infiltración considerando como primer dato de entrada el método del número de curva. La metodología que se empleó consideró todos los valores de infiltración obtenidos en ciertas partes de la cuenca a partir del muestreo de campo de los diversos tipos de suelos y de los pocos registros históricos de las estaciones pluviométricas llamadas así como subcuencas para el análisis hidrológico y luego se aplicó el procesamiento de imágenes con la ayuda del programa New Loc Clim v. 1.10 cuyos resultados nos permitieron identificar todos los lugares vulnerables ante fuertes crecidas. Las

conclusiones manifiestan que para estimar los caudales máximos que permitan diseñar las diferentes obras hidráulicas en cuencas es necesario conocer al menos 25 años de registros históricos (Arriola, Villegas y Sotomayor, 2020, p. 1).

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

El **tipo de investigación** fue aplicada debido a que no se van a generar conocimientos nuevos a diferencia de las investigaciones básicas, pero que si dependen de sus aportes, resultados y cuyo problema está destinado a la acción (Baena, 2017, p. 10). Por lo expuesto y debido a que ya existe el método Muskingum válido para el tránsito de avenidas, este se aplicará a la cuenca La Leche empleando caudales mensuales con fines de diseño de obras hidráulicas.

El **diseño de la investigación** es no experimental comparativo, pues se buscó examinar de manera simultánea semejanzas y diferencias en la presente tesis de investigación (Baena, 2017, p. 47); en tal sentido se compararon los resultados tanto a nivel de caudales máximos por medio de la simulación hidrológica con respecto a los generados por el tránsito de avenidas aplicando el método Muskingum para la cuenca La Leche.

3.2. Variables y operacionalización

Variable independiente 1:

Tránsito de avenidas.

Variable independiente 2:

Método Muskingum.

Variable dependiente:

Cuenca del río La Leche.

3.3. Población, muestra y muestreo

La **población** correspondió a todas las obras hidráulicas de toda la cuenca La Leche, donde el criterio de inclusión limitó sólo a las obras hidráulicas de la Región Lambayeque y el criterio de exclusión descartó a las obras hidráulicas de la Región Cajamarca, puesto que la cuenca La Leche abarca las dos regiones.

La **muestra** correspondió a las obras hidráulicas mostradas en la tabla 1, pues son las más importantes y que siempre se han visto afectadas por inundaciones durante eventos extremos como El Fenómeno El Niño.

Tabla 1: *Obras hidráulicas de la cuenca La Leche en la Región Lambayeque*

N°	Código	Coordenadas UTM		Obra hidráulica de la cuenca La Leche
		Este	Norte	
1	OH1	624128	9286841	Bocatoma San Isidro
2	OH2	626608	9286678	Puente vehicular La Leche
3	OH3	632780	9284210	Bocatoma Huaca La Cruz
4	OH4	623914	9284351	Descarga Canal de Estiaje
5	OH5	642589	9284656	Puente Colgante Pítipo
6	OH6	653344	9288869	Toma Manchuria
7	OH7	653441	9289604	Bocatoma Magdalena
8	OH8	653524	9289181	Toma San Luis
9	OH9	657848	9291140	Toma Isla II
10	OH10	658574	9291088	Bocatoma Palto
11	OH11	658637	9291201	Toma Pozo Azul
12	OH12	660546	9291473	Bocatoma La Florida
13	OH13	660676	9291721	Toma Barreto
14	OH14	660807	9291697	Bocatoma Batangrande
15	OH15	662930	9292203	Bocatoma Mayascón
16	OH16	666195	9293711	Toma Las Garzas
17	OH17	667872	9293944	Bocatoma La U
18	OH18	668266	9294818	Toma El Palto
19	OH19	669474	9295291	Toma La Isla

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En cuanto a las **técnicas de recolección de datos** se empleó el análisis documental que implicó la búsqueda y descarga de datos de precipitación y temperatura y caudales de las páginas oficiales del Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología (SENAMHI) y de la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Para la

descarga de la base de datos de mapas de cuencas hidrográficas, ríos, curvas de nivel y demás complementarios se usó el repositorio digital de GEO GPS PERÚ. Todos los datos se encuentran disponibles gratuitamente a través de sus páginas web tal como se detalla en la tabla 2.

Tabla 2: *Repositorios de acceso de datos y sus páginas web*

N°	Institución	Tipo de datos descargado	Página web
1	SENAMHI	Precipitación y temperatura	https://www.senamhi.gob.pe/mapas/mapa-estaciones/mapadepesta1.php?
2	ANA	Caudal	http://snirh.ana.gob.pe/visorS2/
3	GEO GPS PERÚ	Archivos tipo Shapefile y tipo Aster DEM para delimitación de cuencas hidrográficas, ríos, curvas de nivel y demás complementarios	https://www.geogpsperu.com/2014/02/descargar-cuencas-hidrograficas-del.html

Fuente: Elaboración propia.

Los **instrumentos de recolección de datos** correspondieron a los formatos que se aplicaron para el buen desarrollo de la presente tesis. En total se emplearon seis formatos de recolección de datos los cuales se detallan desde el anexo 3 hasta el anexo 8.

3.5. Procedimientos

Se inició con la **delimitación de la cuenca La Leche**, para ello fue necesario descargar la información del portal electrónico de GEO GPS PERÚ donde se pudo encontrar los datos geográficos necesarios de la zona de estudio, con lo que al aplicar el software ArcMap v.10.6 se realizó el tratamiento de los archivos tipo Shapefile y Aster Dem para la generación de los mapas respectivos de la cuenca, red hidrográfica, curvas de nivel, altitudes, parámetros geomorfológicos y demás

complementarios tales como mapa climático, cobertura vegetal, red de estaciones meteorológicas e hidrométricas, curvas número en condiciones normales, secas y húmedas. Estos formatos y archivos fueron finalmente exportados en formato jpg para una mejor visualización de capas tal y como se muestran desde el anexo 9 al anexo 16 y del anexo 24 al anexo 28 de la presente tesis.

Como siguiente paso fue necesario el **establecimiento de las precipitaciones máximas anuales de 24 horas de duración**, en donde fue preciso descargar los datos de temperatura y precipitación de la página web de SENAMHI correspondientes a las estaciones meteorológicas disponibles y las más cercanas a la cuenca La Leche que permitieron estimar las temperaturas medias mínimas, temperaturas medias máximas, precipitaciones medias y también las precipitaciones máximas para los períodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años con ayuda de los programas Ms Excel e Hidroesta 2, con lo que después se pudo estimar los hietogramas usando el programa Bloques v.2.015 y los hidrogramas de salida mediante el programa HEC-HMS v.3.50. Después con los datos procesados se crearon los archivos tipo Shapefile en ArcMap v.10.6 y se exportaron a jpg para mejor visualización de capas. Los detalles de tal desarrollo se muestran desde el anexo 17 hasta el anexo 23 y los anexos 29 y 30.

El tercer paso incluyó el **análisis de los caudales a nivel mensual de cada año**, cuya etapa inicial consistió en descargar los datos de caudales de la página electrónica del ANA correspondientes a las estaciones hidrométricas disponibles dentro de la cuenca La Leche. Lo siguiente fue definir el tipo de obra hidráulica para realizar su tránsito de avenidas general escogiéndose en este caso un aliviadero de descarga libre tipo Creager con lo que se realizó una correlación entre los caudales de descarga de la obra hidráulica y las relaciones de almacenamiento para obtener el factor de relación (F.R.) a nivel mensual, es decir desde enero a diciembre. Para cumplir con este procedimiento se empleó el formato de recolección de datos N°1: Parámetros para el análisis del tránsito de avenidas, que se muestra en el anexo 3.

La cuarta etapa correspondió a la **estimación de los tránsitos de avenidas con el método Muskingum**, e inició con el balance entre los caudales de entrada, caudales de salida y volúmenes de almacenamiento que a partir del factor de relación obtenido previamente y combinado a los valores “Xj” se determinaron mediante correlación del tipo lineal la recta de mejor ajuste a la dispersión de valores a partir del coeficiente de determinación “R²”. Finalmente se obtiene la ecuación general del tránsito de avenidas con los valores promedio de cada mes y se realizó el tránsito para cada periodo de retorno por medio de hidrogramas, luego exportados en formato Shapefile y a jpg para mejor visualización de capas. Esta última etapa requirió del uso del formato de recolección de datos N°2: Parámetros para el análisis del método Muskingum, que se detalla en el anexo 4; también fue necesario generar un plano de tránsitos de avenidas para diferentes períodos de retorno como el que se muestra en el anexo 31.

3.6. Método de análisis de datos

El método de procesamiento y análisis de datos incluyó la aplicación de seis softwares: Ms Excel, Ms Word, ArcMap v.10.6, Hidroesta 2, Bloques v.2.015 y HEC-HMS v.3.50.

3.7. Aspectos éticos

La elaboración de la presente tesis de investigación compromete al autor a respetar la autenticidad de los datos obtenidos del SENAMHI, ANA y GEO GPS PERÚ, y obliga a cumplir con la normativa vigente nacional e internacional en los que respecta a derechos de autor y propiedad intelectual, siendo necesario indicar en donde corresponda la fuente de obtención de datos numéricos y gráficos. Así mismo en cuanto a las referencias bibliográficas, todas están citadas en formato ISO 690 e incluyen sus respectivos enlaces electrónicos para su posterior consulta de cualquier persona que lo requiera.

IV. RESULTADOS

A partir del **primer objetivo específico**, se tuvo como resultado la delimitación de la cuenca La Leche a nivel regional (anexo 9), la delimitación a nivel de cuencas hidrográficas (anexo 10) y los parámetros geomorfológicos de la cuenca (tabla 3).

Tabla 3: *Parámetros geomorfológicos de la cuenca La Leche*

Parámetros			Unidad	Nomenclatura	Valores obtenidos	
1. Superficie total de la cuenca (A)			Km ²	Area total (At)	1606.61	
2. Perímetro de la cuenca (P)			Km	Perímetro total (Pt)	297.25	
3. Relaciones de forma	3.1 Factores de cuenca	3.1.1 Índice o Coeficiente de Compacidad (K)		Adimensional	$K = 0.28 P / (At)^{1/2}$	2.08
		3.1.2 Factor de forma	Longitud del río más largo (LB)	Km	LB	100.25
			Ancho Medio (Am)	Km	Am = Area cuenca/ LB	16.03
			Factor de Forma (Ff)	Adimensional	Ff = A / (L*L)	0.160
	3.2 Rectángulo equivalente		3.2.1 Lado Mayor (L)	Km	$L = \frac{K * \sqrt{A}}{1.12} * \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K}\right)^2} \right)$	136.89
			3.2.2 Lado Menor (I)	Km	$L = \frac{K * \sqrt{A}}{1.12} * \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K}\right)^2} \right)$	11.74
4. Relaciones de drenaje	4.1 Número de ríos para los diferentes grados de ramificación de toda la cuenca			Adimensional	Orden 1	510.43
				Adimensional	Orden 2	175.12
				Adimensional	Orden 3	86.85
				Adimensional	Orden 4	96.98
				Adimensional	Orden 5	16.70

	4.2 Longitud total de los ríos de diferentes grados para toda la cuenca	Km	Lt	886.08
	4.3 Densidad de drenaje para toda la cuenca	Km / Km ²	Dd = Lt / At	0.55
	5. Pendiente media del cauce principal según Taylor - Schwarz	%	$S = \left(\frac{\sum_{i=1}^n Li}{\sum_{i=1}^n \frac{Li}{(Si)^{0.5}}} \right)^2$	3.425

Fuente: Elaboración propia.

Del **segundo objetivo específico**, se tuvo como resultado a partir de las estaciones meteorológicas más cercanas (tabla 4 y tabla 5), el polígono de Thiessen (anexo 17), la interpolación de los rangos de precipitaciones (anexo 18), isoyetas (anexo 19).

Tabla 4: Estaciones meteorológicas e hidrométricas consideradas en la presente tesis

N°	Coordenadas UTM		Tipo de estación	Nombre	Altitud (m.s.n.m.)	Cuenca a la que pertenecen
	Este	Norte				
1	636233.30	9299847.70	Meteorológica	Jayanca	102.70	Motupe
2	669532.60	9295274.30		Puchaca	336.00	La Leche
3	681844.10	9291550.00		Tocmoche	1435.00	
4	683778.50	9310282.80		Incahuasi	3052.00	
5	673799.3	9264113		*Granja Militar Sasape	45.00	Motupe
6	673799.30	9264113.00		Tinajones	22.60	Chancay-Lambayeque
7	669560.30	9295292.60	Hidrométrica	Puchaca	345.00	La Leche
8	643745.80	9281339.20		Desaguadero	150.00	
9	627054.50	9286665.00		Puente La Leche	45.00	

Fuente: Elaboración propia.

*En el caso de la estación Granja Militar Sasape sólo se consideró para el análisis de interpolación de la precipitación media.

Tabla 5: Precipitaciones máximas de 24 horas de duración de las estaciones meteorológicas

Año	Incahuasi	Tocmoche	Puchaca	Tinajones	Jayanca
1964	21.00	NP	NP	NP	2.10
1965	28.00	10.10	NP	NP	21.80
1966	21.00	7.00	NP	NP	3.50
1967	34.00	10.00	NP	NP	12.50
1968	19.00	3.50	NP	NP	0.00
1969	28.00	15.00	NP	NP	2.00
1970	33.00	7.00	NP	NP	3.40
1971	43.00	0.00	NP	71.50	30.90
1972	28.00	15.00	NP	NP	112.50
1973	35.00	15.00	NP	NP	18.80
1974	30.00	8.00	NP	NP	4.30
1975	31.00	20.00	NP	4.20	29.30
1976	24.00	10.00	NP	NP	13.00
1977	23.00	10.00	NP	NP	5.50
1978	22.00	6.00	NP	NP	15.40
1979	16.50	20.00	NP	NP	3.00
1980	27.50	10.00	NP	NP	4.00
1981	25.00	15.00	NP	NP	32.20
1982	37.00	30.00	NP	NP	11.50
1983	32.00	60.00	NP	NP	85.50
1984	33.00	25.00	NP	NP	35.20
1985	20.00	25.00	NP	NP	7.60
1986	34.00	20.00	NP	0.00	6.10
1987	30.00	30.00	NP	0.00	19.70
1988	43.00	18.00	NP	NP	6.40
1989	57.00	30.00	NP	NP	5.30
1990	25.00	10.00	NP	NP	6.50
1991	21.00	5.20	NP	0.00	6.40
1992	21.00	45.00	NP	NP	22.50
1993	27.00	25.00	NP	NP	21.20
1994	23.00	12.00	NP	NP	15.70
1995	14.50	6.00	NP	9.10	16.50
1996	16.90	18.00	NP	9.40	7.70
1997	26.20	49.00	NP	12.20	15.70
1998	25.50	95.00	NP	73.20	81.80
1999	29.90	40.00	NP	47.30	30.50
2000	23.60	60.00	NP	12.60	12.40
2001	26.50	64.00	NP	22.40	41.60
2002	48.10	53.00	NP	180.20	35.30
2003	28.50	50.00	NP	12.50	29.90

2004	18.00	77.00	NP	15.50	7.40
2005	21.40	36.00	NP	11.50	8.80
2006	36.00	26.00	NP	35.50	40.10
2007	20.50	33.00	NP	5.80	2.40
2008	48.50	86.00	40.20	62.80	51.70
2009	35.00	55.00	55.20	27.00	18.00
2010	30.80	39.80	38.20	11.50	33.50
2011	31.10	35.00	20.60	12.50	9.10
2012	25.00	51.50	60.40	63.00	68.00
2013	30.60	60.00	30.90	23.40	9.80
2014	31.60	59.60	14.20	4.20	5.60
2015	27.00	73.60	50.20	20.20	38.30
2016	11.70	2.60	22.40	30.50	8.40
2017	31.50	71.00	87.60	60.70	90.40
2018	NP	31.50	NP	13.80	NP

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y NP indica que no presento datos en ese año.

Luego en concordancia con el **segundo objetivo específico**, se realizó el análisis de extremos de la precipitación por medio de 8 distribuciones teóricas para los diferentes períodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años, obteniéndose los resultados desde la tabla 6 hasta la tabla 10; en consecuencia, se generaron los hietogramas mediante bloques alternos para cada estación meteorológica tal y como se presentan desde la figura 1 hasta la figura 5.

Tabla 6: Análisis de extremos de precipitación de la estación Incahuasi

Tr (años)	Distribuciones estadísticas							
	Normal	LN 2P	LN 3P	GM 2P	GM 3P	LP T 3	Gumbel	LogGum
	Delta teórico (Δ_o)							
	0.0816	0.0532	0.0516	0.0555	0.0564	NO SE AJUSTA EL REGISTRO A ESTA DISTRIBUCIÓN	0.0586	0.1099
5	35.62	34.95	34.90	35.03	34.93		34.56	33.68
10	39.43	39.91	39.44	39.44	39.93		39.63	40.18
25	43.49	45.97	44.82	44.52	45.94		46.02	50.21
50	46.11	50.37	48.61	48.01	50.20		50.77	59.24
100	48.47	54.68	52.26	51.30	54.28		55.48	69.80
200	50.63	58.95	55.80	54.41	58.22		60.17	82.20
500	53.24	64.58	60.37	58.31	63.24		66.36	101.99
1000	55.08	68.84	63.77	61.10	66.88		71.04	120.05

Fuente: Programa Hidroesta 2.

Tabla 7: Análisis de extremos de precipitación de la estación Tocmoche

Tr (años)	Distribuciones estadísticas							
	Normal	LN 2P	LN 3P	GM 2P	GM 3P	LP T 3	Gumbel	LogGum
	Delta teórico (Δo)							
	0.1352	NO SE AJUSTA EL REGISTRO A ESTA DISTRIBUCIÓN	NO SE AJUSTA EL REGISTRO A ESTA DISTRIBUCIÓN	NO SE AJUSTA EL REGISTRO A ESTA DISTRIBUCIÓN	0.0971	NO SE AJUSTA EL REGISTRO A ESTA DISTRIBUCIÓN	0.1014	NO SE AJUSTA EL REGISTRO A ESTA DISTRIBUCIÓN
5	51.51						48.58	
10	62.10						62.64	
25	73.38						80.42	
50	80.67						93.60	
100	87.22						106.69	
200	93.21						119.73	
500	100.48						136.93	
1000	105.58						149.43	

Fuente: Programa Hidroesta 2.

Tabla 8: Análisis de extremos de precipitación de la estación Puchaca

Tr (años)	Distribuciones estadísticas							
	Normal	LN 2P	LN 3P	GM 2P	GM 3P	LP T 3	Gumbel	LogGum
	Delta teórico (Δo)							
	0.0845	0.0866	0.1059	0.1029	0.0833	NO SE AJUSTA EL REGISTRO A ESTA DISTRIBUCIÓN	0.0982	0.1428
5	60.63	58.79	57.50	57.97	59.22		57.93	54.93
10	70.38	75.11	70.43	70.30	71.59		70.88	76.07
25	80.77	97.54	86.85	85.16	86.21		87.26	114.80
50	87.49	115.46	99.14	95.72	96.45		99.41	155.78
100	93.53	134.38	111.49	105.87	106.19		111.46	210.91
200	99.05	154.39	123.98	115.67	115.53		123.48	285.24
500	105.75	182.68	140.82	128.18	127.36		139.33	424.80
1000	110.44	205.56	153.85	137.27	135.89		151.31	574.00

Fuente: Programa Hidroesta 2.

Tabla 9: Análisis de extremos de precipitación de la estación Tinajones

Tr (años)	Distribuciones estadísticas							
	Normal	LN 2P	LN 3P	GM 2P	GM 3P	LP T 3	Gumbel	LogGum
	Delta teórico (Δo)							
	0.1983	NO SE AJUSTA EL REGISTRO A ESTA DISTRIBUCIÓN	NO SE AJUSTA EL REGISTRO A ESTA DISTRIBUCIÓN	NO SE AJUSTA EL REGISTRO A ESTA DISTRIBUCIÓN	NO SE AJUSTA EL REGISTRO A ESTA DISTRIBUCIÓN	NO SE AJUSTA EL REGISTRO A ESTA DISTRIBUCIÓN	0.1747	NO SE AJUSTA EL REGISTRO A ESTA DISTRIBUCIÓN
5	60.25						55.78	
10	76.40						77.23	
25	93.61						104.34	
50	104.72						124.45	
100	114.72						144.41	
200	123.86						164.30	
500	134.95						190.54	
1000	142.72						210.38	

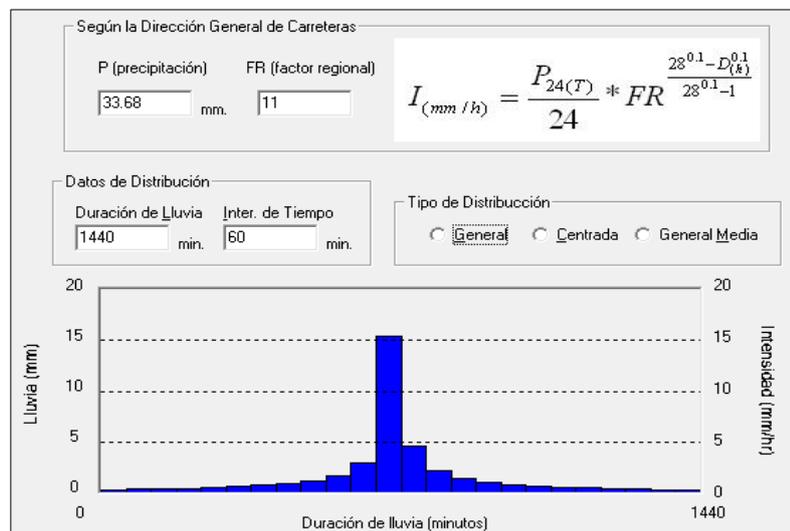
Fuente: Programa Hidroesta 2.

Tabla 10: Análisis de extremos de precipitación de la estación Jayanca

Tr (años)	Distribuciones estadísticas							
	Normal	LN 2P	LN 3P	GM 2P	GM 3P	LPT 3	Gumbel	LogGum
	Delta teórico (Δ)							
	0.1762	NO SE AJUSTA EL REGISTRO A ESTA DISTRIBUCIÓN	NO SE AJUSTA EL REGISTRO A ESTA DISTRIBUCIÓN	NO SE AJUSTA EL REGISTRO A ESTA DISTRIBUCIÓN	0.1194	NO SE AJUSTA EL REGISTRO A ESTA DISTRIBUCIÓN	0.1562	NO SE AJUSTA EL REGISTRO A ESTA DISTRIBUCIÓN
5	43.49				37.97		40.47	
10	54.35				54.96		54.92	
25	65.94				77.31		73.16	
50	73.42				94.15		86.70	
100	80.15				110.94		100.14	
200	86.30				127.64		113.53	
500	93.77				149.50		131.19	
1000	99.00				165.72		144.54	

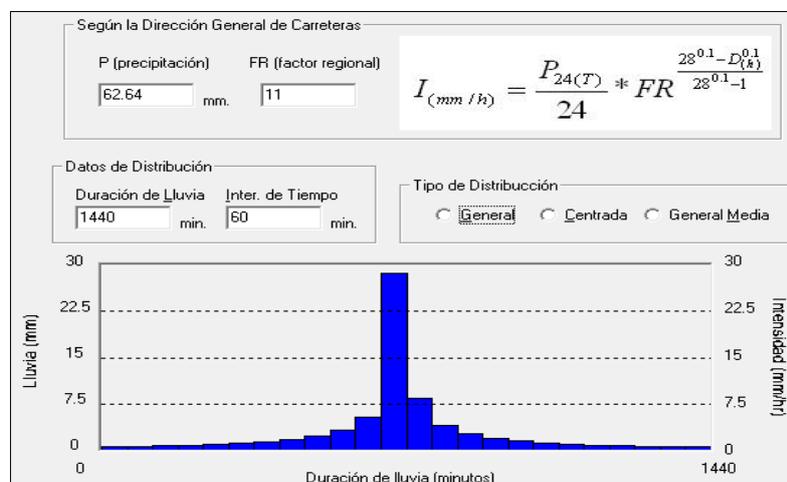
Fuente: Programa Hidroesta 2.

Figura 1: Hietograma para Tr = 5 años para la estación Incahuasi



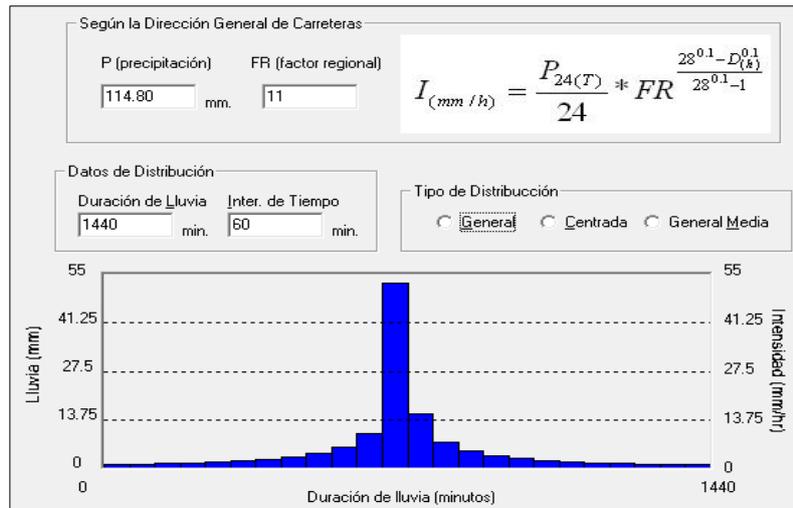
Fuente: Programa Hietograma

Figura 2: Hietograma para Tr = 10 años para la estación Tocomche



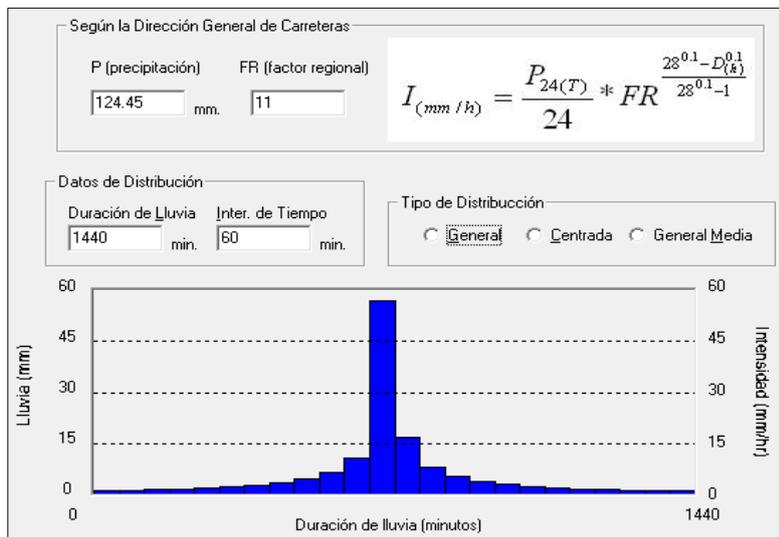
Fuente: Programa Hietograma

Figura 3: Hietograma para Tr = 10 años para la estación Puchaca



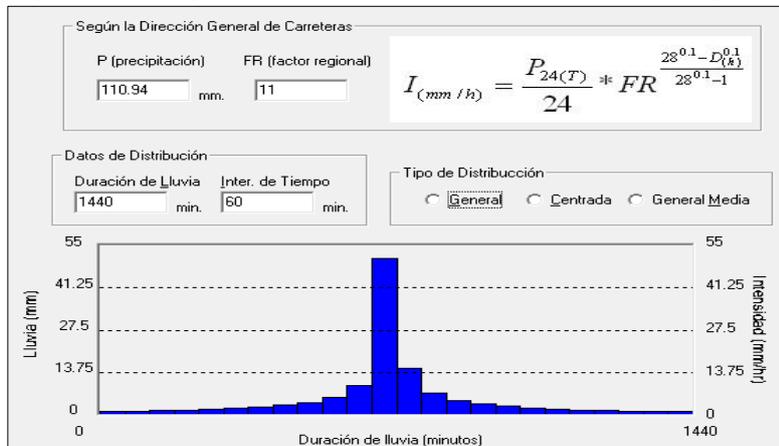
Fuente: Programa Hietograma

Figura 4: Hietograma para Tr = 10 años para la estación Tinajones



Fuente: Programa Hietograma

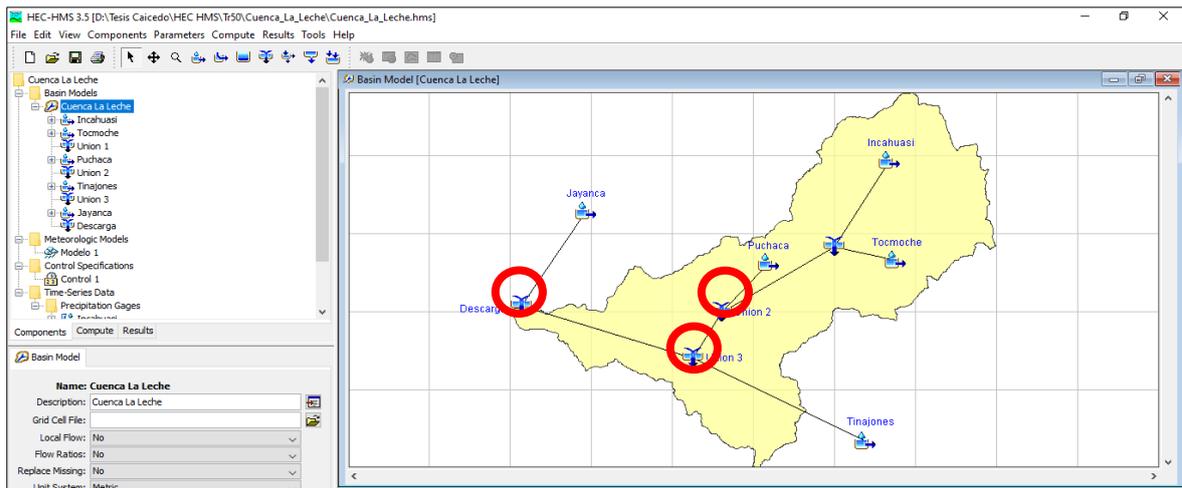
Figura 5: Hietograma para Tr = 10 años para la estación Jayanca



Fuente: Programa Hietograma

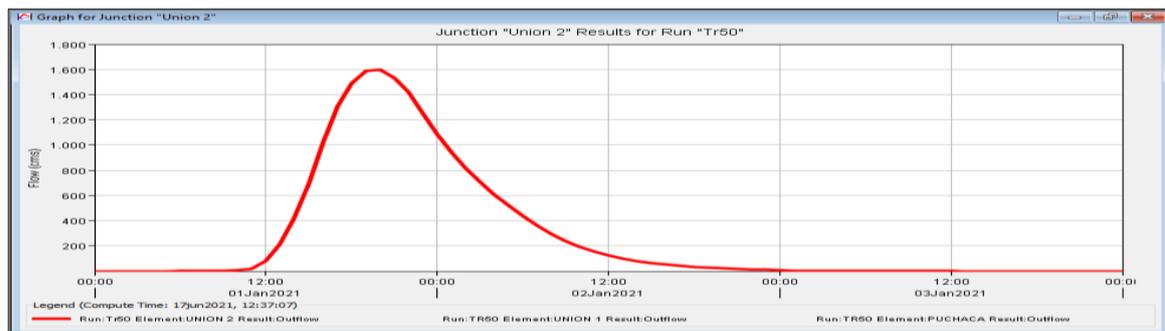
También como parte del **segundo objetivo específico** se modeló hidrológicamente la cuenca La Leche (figura 6), mediante el proceso precipitación-escorrentía con lo que se pudo determinar los hidrogramas de salida en los puntos de interés en círculos de color rojo, ya que en esas zonas se encuentran las estaciones hidrométricas haciendo de esta manera posible su posterior tránsito de avenidas. Los hidrogramas se muestran en la figura 7, 8 y 9.

Figura 6: Modelamiento hidrológico de la cuenca La Leche



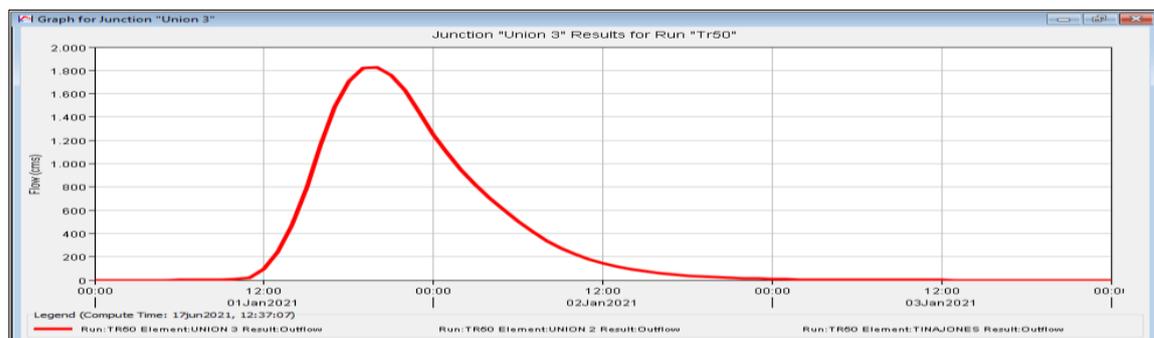
Fuente: Programa Hietograma

Figura 7: Hidrograma de salida de la estación hidrométrica Puchaca para $Tr=50$ años



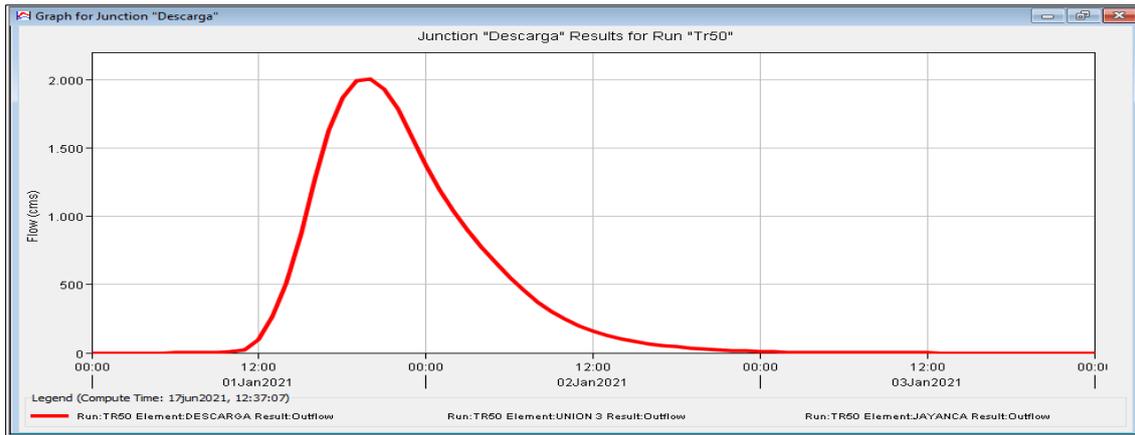
Fuente: Programa Hietograma

Figura 8: Hidrograma de salida de la estación hidrométrica Desaguadero para $Tr=50$ años



Fuente: Programa Hietograma

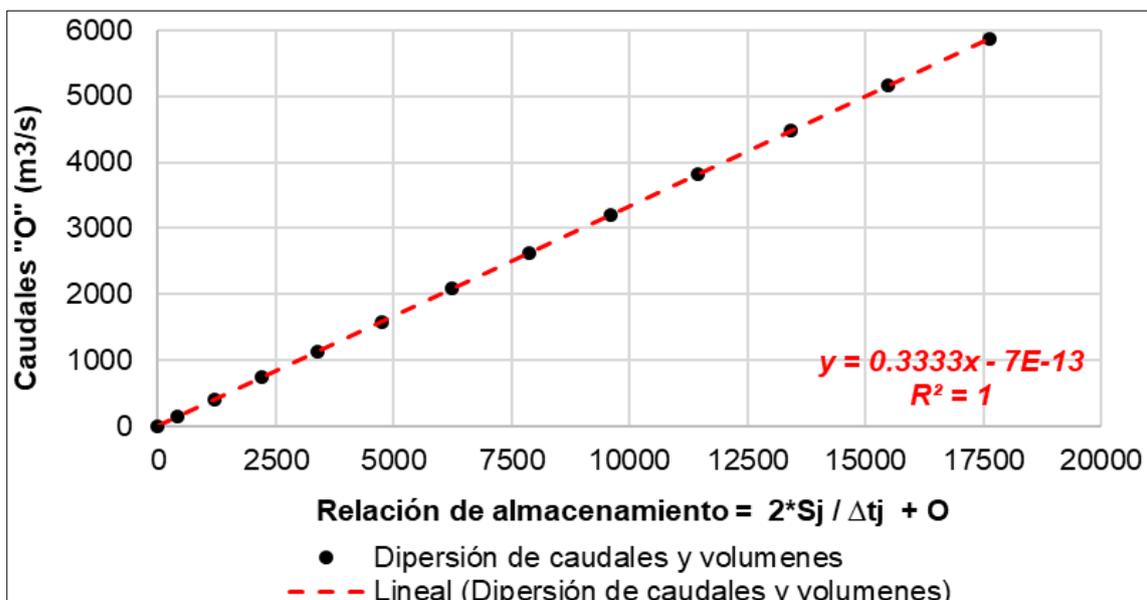
Figura 9: Hidrograma de salida de la estación hidrométrica Puente La Leche para Tr=50 años



Fuente: Programa Hietograma

Los resultados del **tercer objetivo específico**, indican el balance entre los caudales de entrada, caudales de salida y volúmenes de almacenamiento de cada estación hidrométrica de la cuenca La Leche y que es válido para el diseño de obras hidráulicas, siendo en este caso la aplicación en un aliviadero de descarga libre tipo Creager (anexo 3) cuya finalidad fue la determinación del factor de relación (F.R.) a nivel mensual (figura 10), es decir desde enero a diciembre para el tránsito de avenidas general.

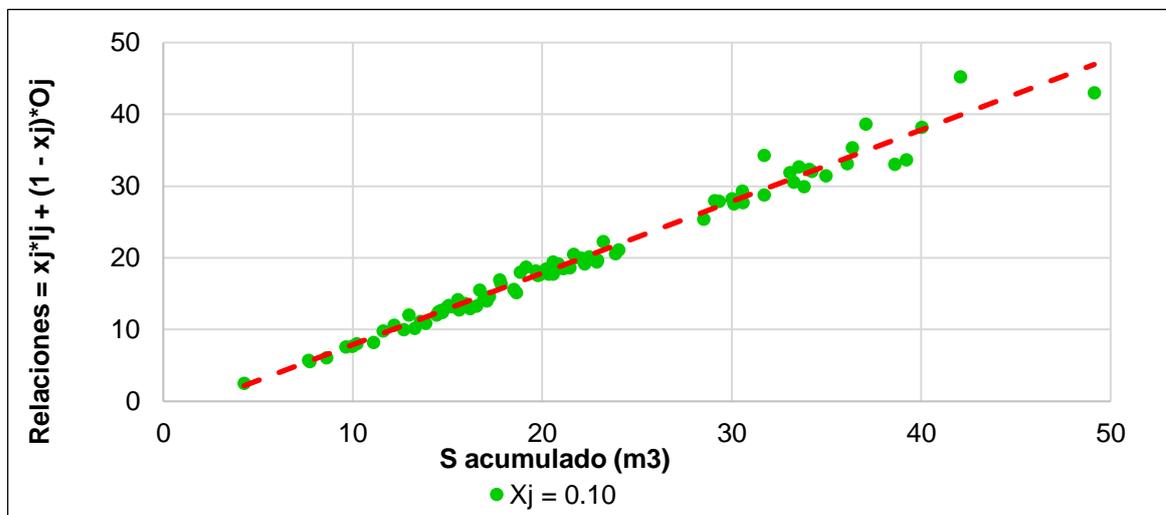
Figura 10: Relación de tránsito de avenidas general mediante balance para enero hasta diciembre



Fuente: estación hidrométrica Puchaca

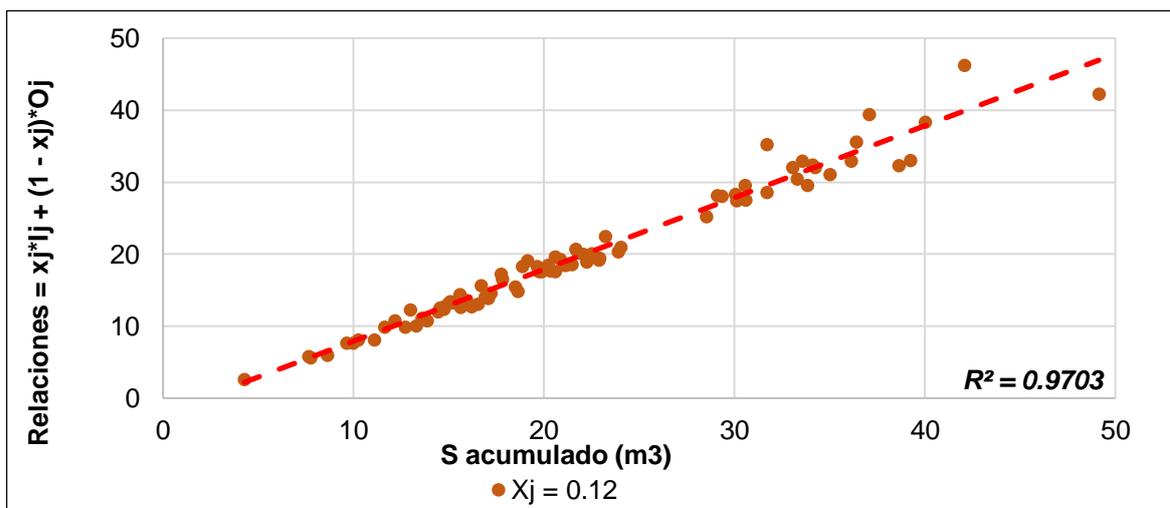
De acuerdo al **cuarto objetivo específico** y en concordancia con el objetivo anterior se completó el balance de caudales y se iteró los valores de “ X_j ” cuyo valor mínimo el método Muskingum sugiere de 0.10 y un máximo de 1.00 (anexo 4). Como siguiente paso se estimó el factor “ K_j ” mediante correlación lineal según la dispersión de valores (figura 11 hasta la figura 16) y se escogió la de más alto coeficiente de determinación (R^2 más cercano a 1.00), estableciéndose según la pendiente de la recta el valor de “ K_j ”, tal como se muestra en la figura 17.

Figura 11: Relación de tránsito de avenidas a partir del método Muskingum para $X_j = 0.10$ correspondiente a la estación hidrométrica Puchaca mes de enero



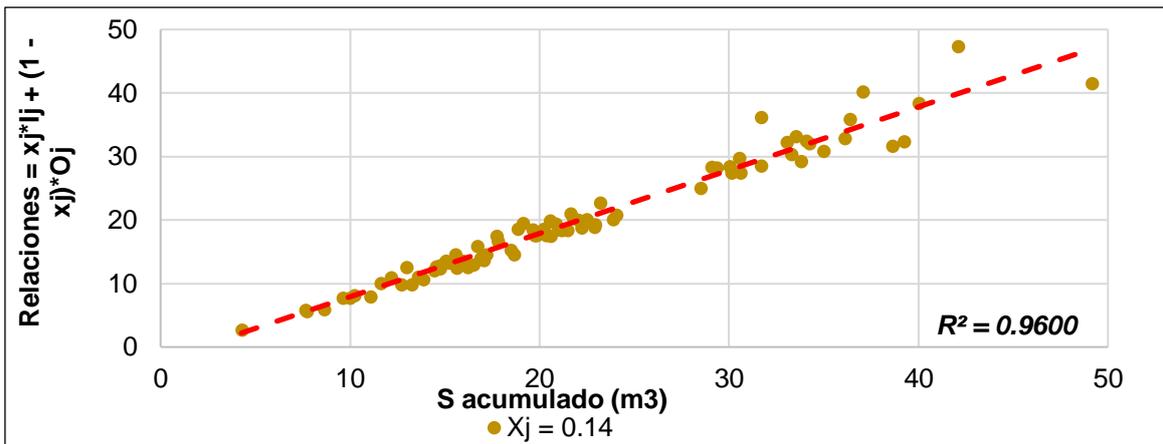
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 12: Relación de tránsito de avenidas a partir del método Muskingum para $X_j = 0.12$ correspondiente a la estación hidrométrica Puchaca mes de enero



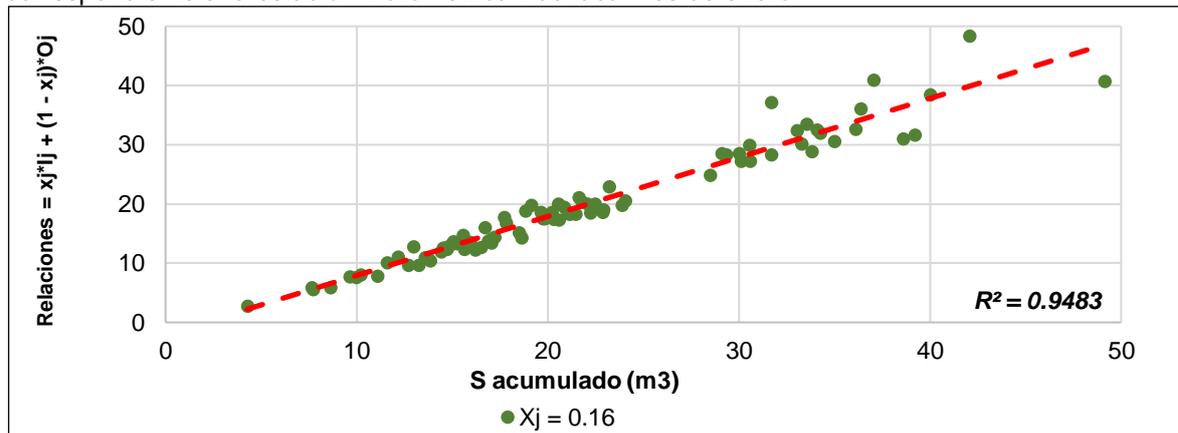
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 13: Relación de tránsito de avenidas a partir del método Muskingum para $X_j = 0.14$ correspondiente a la estación hidrométrica Puchaca mes de enero



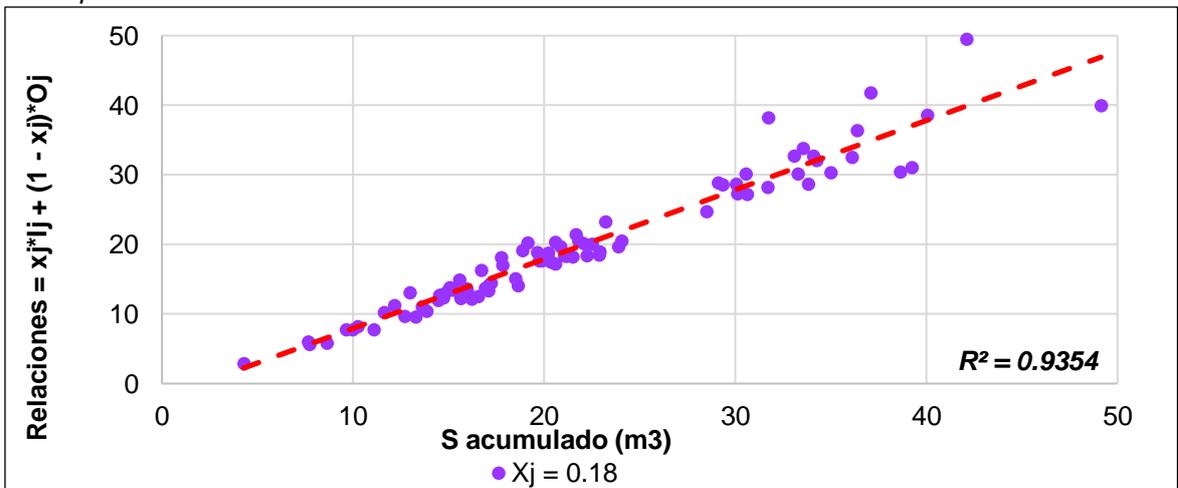
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 14: Relación de tránsito de avenidas a partir del método Muskingum para $X_j = 0.16$ correspondiente a la estación hidrométrica Puchaca mes de enero



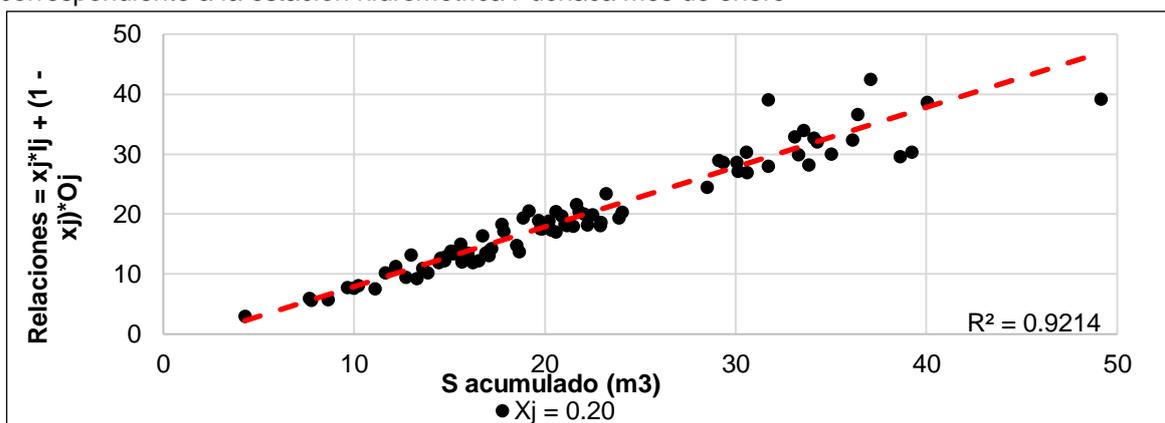
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 15: Relación de tránsito de avenidas a partir del método Muskingum para $X_j = 0.18$ correspondiente a la estación hidrométrica Puchaca mes de enero



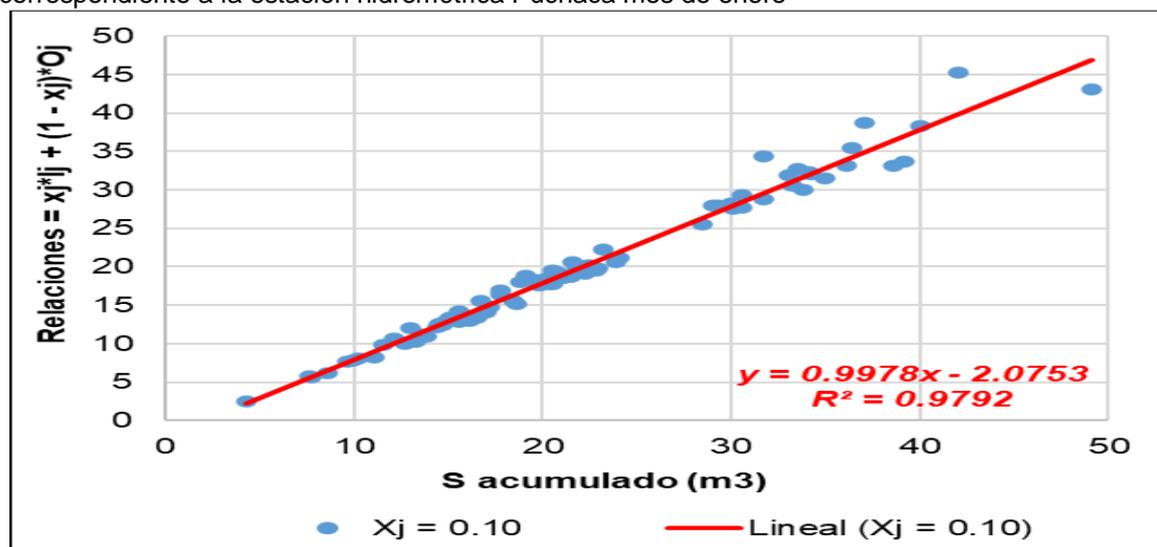
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 16: Relación de tránsito de avenidas a partir del método Muskingum para $X_j = 0.20$ correspondiente a la estación hidrométrica Puchaca mes de enero



Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 17: Correlación del tipo lineal de mejor ajuste de las relaciones de tránsito de avenidas correspondiente a la estación hidrométrica Puchaca mes de enero



Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Según la correlación de la recta del tipo lineal de la figura 17, se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.9792, el cual es aceptable pues es +muy cercano a 1.00, en ese sentido el valor de X_j fue de 0.10 y el valor de K_j fue de 0.9978.

Después se aplicaron las constantes de las ecuaciones 5, 6 y 7 correspondiente al método Muskingum obteniéndose para todos los meses y además se complementan con los coeficientes K_j y X_j (tabla 11 y tabla 12) para las dos estaciones hidrométricas.

Tabla 11: Parámetros del método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca

Mes	K_j	X_j	C_1	C_2	C_3
Enero	0.9978	0.1000	0.2863	0.4290	0.2847
Febrero	0.9968	0.1000	0.2865	0.4292	0.2842
Marzo	0.9984	0.1000	0.2861	0.4289	0.2850
Abril	0.9952	0.1000	0.2869	0.4296	0.2835
Mayo	0.9986	0.1000	0.2861	0.4289	0.2851
Junio	0.9973	0.1000	0.2864	0.4291	0.2845
Julio	0.9987	0.1000	0.2860	0.4288	0.2851
Agosto	0.9992	0.1000	0.2859	0.4287	0.2853
Setiembre	0.9985	0.1000	0.2861	0.4289	0.2850
Octubre	0.9982	0.1000	0.2862	0.4289	0.2849
Noviembre	0.9979	0.1000	0.2863	0.4290	0.2847
Diciembre	0.9976	0.1000	0.2863	0.4291	0.2846
Promedio	0.9979	0.1000	0.2863	0.4290	0.2847

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12: Parámetros del método Muskingum para la estación hidrométrica Desaguadero

Mes	K_j	X_j	C_1	C_2	C_3
Enero	0.9255	0.1000	0.3057	0.4445	0.2498
Febrero	0.9207	0.1000	0.3070	0.4456	0.2473
Marzo	0.9388	0.1000	0.3020	0.4416	0.2565
Abril	0.9430	0.1000	0.3008	0.4406	0.2585
Mayo	0.9669	0.1000	0.2943	0.4355	0.2702
Junio	0.9726	0.1000	0.2928	0.4343	0.2729
Julio	0.9938	0.1000	0.2873	0.4298	0.2829
Agosto	1.0091	0.1000	0.2834	0.4267	0.2899
Setiembre	1.0116	0.1000	0.2828	0.4262	0.2910
Octubre	0.9646	0.1000	0.2950	0.4360	0.2691
Noviembre	0.9775	0.1000	0.2915	0.4332	0.2752
Diciembre	0.9912	0.1000	0.2880	0.4304	0.2817
Promedio	0.9679	0.1000	0.2942	0.4354	0.2704

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se muestran las ecuaciones del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca (ecuación 8), para la estación hidrométrica Desaguadero (ecuación 9) y sus respectivos caudales transitados para la estación hidrométrica Puchaca (tabla 13 hasta la tabla 20; figura

18 hasta la figura 25) y los caudales transitados para la estación Desaguadero (tabla 21 hasta la tabla 28; figura 26 hasta la figura 33)

$$O_{j+1} = 0.2863 * I_{j+1} + 0.4290 * I_j + 0.2847 * O_j$$

Ecuación 8: Expresión general para el tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca

$$O_{j+1} = 0.2942 * I_{j+1} + 0.4354 * I_j + 0.2704 * O_j$$

Ecuación 9: Expresión general para el tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Desaguadero

Tabla 13: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Puchaca para un período de retorno de 5 años

Nº	Hora	Ij (m³/s)	Oj (m³/s)
1	00:00	0.000	0.000
2	01:00	0.000	0.000
3	02:00	0.000	0.000
4	03:00	0.000	0.000
5	04:00	0.000	0.000
6	05:00	0.000	0.000
7	06:00	0.000	0.000
8	07:00	0.000	0.000
9	08:00	0.000	0.000
10	09:00	0.000	0.000
11	10:00	0.000	0.143
12	11:00	0.500	4.406
13	12:00	14.500	21.130
14	13:00	47.700	56.738
15	14:00	105.700	115.519
16	15:00	188.700	191.767
17	16:00	272.200	267.448
18	17:00	335.600	326.730
19	18:00	372.400	361.944
20	19:00	381.300	372.526
21	20:00	369.900	361.945
22	21:00	339.500	333.753
23	22:00	297.100	296.515
24	23:00	258.600	259.691
25	00:00	224.700	226.418
26	01:00	195.900	197.089
27	02:00	169.700	170.456
28	03:00	145.100	145.764
29	04:00	122.200	122.841
30	05:00	101.000	101.780
31	06:00	82.000	82.880

32	07:00	65.400	66.369
33	08:00	51.400	52.370
34	09:00	39.900	40.903
35	10:00	31.000	31.844
36	11:00	24.100	24.788
37	12:00	18.800	19.331
38	13:00	14.700	15.103
39	14:00	11.500	11.810
40	15:00	9.000	9.228
41	16:00	7.000	7.176
42	17:00	5.400	5.505
43	18:00	4.000	4.114
44	19:00	2.900	2.988
45	20:00	2.000	2.110
46	21:00	1.400	1.488
47	22:00	1.000	1.053
48	23:00	0.700	0.743
49	00:00	0.500	0.541
50	01:00	0.400	0.411
51	02:00	0.300	0.303
52	03:00	0.200	0.201
53	04:00	0.100	0.129
54	05:00	0.100	0.080
55	06:00	0.000	0.023
56	07:00	0.000	0.006
57	08:00	0.000	0.002
58	09:00	0.000	0.001
59	10:00	0.000	0.000
60	11:00	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Puchaca para un período de retorno de 10 años

N°	Hora	Ij (m ³ /s)	Oj (m ³ /s)
1	00:00	0.000	0.000
2	01:00	0.000	0.000
3	02:00	0.000	0.000
4	03:00	0.000	0.000
5	04:00	0.000	0.000
6	05:00	0.000	0.000
7	06:00	0.000	0.000
8	07:00	0.000	0.000
9	08:00	0.000	0.000
10	09:00	0.000	0.086
11	10:00	0.300	0.840
12	11:00	2.400	9.656
13	12:00	29.300	41.169
14	13:00	90.300	105.968

15	14:00	193.900	210.286
16	15:00	338.600	342.687
17	16:00	480.500	471.032
18	17:00	584.500	568.539
19	18:00	641.600	623.345
20	19:00	650.500	635.555
21	20:00	625.300	611.931
22	21:00	568.400	559.153
23	22:00	492.800	492.599
24	23:00	426.100	428.402
25	00:00	368.000	371.286
26	01:00	319.400	321.549
27	02:00	275.300	276.789
28	03:00	234.500	235.749
29	04:00	196.800	198.014
30	05:00	162.300	163.680
31	06:00	131.600	133.062
32	07:00	104.800	106.435
33	08:00	82.400	83.976
34	09:00	64.000	65.565
35	10:00	49.600	51.026
36	11:00	38.700	39.748
37	12:00	30.100	30.958
38	13:00	23.500	24.192
39	14:00	18.500	18.976
40	15:00	14.500	14.858
41	16:00	11.300	11.540
42	17:00	8.600	8.807
43	18:00	6.400	6.542
44	19:00	4.500	4.681
45	20:00	3.100	3.292
46	21:00	2.200	2.339
47	22:00	1.600	1.667
48	23:00	1.100	1.176
49	00:00	0.800	0.850
50	01:00	0.600	0.614
51	02:00	0.400	0.432
52	03:00	0.300	0.309
53	04:00	0.200	0.202
54	05:00	0.100	0.101
55	06:00	0.000	0.029
56	07:00	0.000	0.008
57	08:00	0.000	0.002
58	09:00	0.000	0.001
59	10:00	0.000	0.000
60	11:00	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Puchaca para un período de retorno de 25 años

N°	Hora	Ij (m³/s)	Oj (m³/s)
1	00:00	0.000	0.000
2	01:00	0.000	0.000
3	02:00	0.000	0.000
4	03:00	0.000	0.000
5	04:00	0.000	0.000
6	05:00	0.000	0.000
7	06:00	0.000	0.000
8	07:00	0.000	0.029
9	08:00	0.100	0.223
10	09:00	0.600	1.122
11	10:00	2.800	4.527
12	11:00	10.500	24.944
13	12:00	66.900	89.249
14	13:00	186.700	215.233
15	14:00	383.300	412.051
16	15:00	650.900	655.862
17	16:00	905.800	886.307
18	17:00	1086.300	1055.722
19	18:00	1178.400	1144.558
20	19:00	1182.200	1155.251
21	20:00	1125.500	1101.824
22	21:00	1013.200	997.584
23	22:00	870.500	871.445
24	23:00	747.400	752.375
25	00:00	641.400	647.892
26	01:00	553.700	557.904
27	02:00	474.700	477.693
28	03:00	402.400	404.973
29	04:00	336.500	338.935
30	05:00	276.900	279.420
31	06:00	224.000	226.668
32	07:00	178.200	181.065
33	08:00	140.000	142.761
34	09:00	108.800	111.485
35	10:00	84.400	86.787
36	11:00	65.800	67.596
37	12:00	51.200	52.662
38	13:00	40.000	41.172
39	14:00	31.500	32.307
40	15:00	24.700	25.292
41	16:00	19.200	19.618
42	17:00	14.600	14.941
43	18:00	10.800	11.034
44	19:00	7.500	7.819
45	20:00	5.100	5.445
46	21:00	3.600	3.839
47	22:00	2.600	2.752

48	23:00	1.900	1.971
49	00:00	1.300	1.377
50	01:00	0.900	0.950
51	02:00	0.600	0.642
52	03:00	0.400	0.440
53	04:00	0.300	0.283
54	05:00	0.100	0.152
55	06:00	0.100	0.086
56	07:00	0.000	0.025
57	08:00	0.000	0.007
58	09:00	0.000	0.002
59	10:00	0.000	0.001
60	11:00	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Puchaca para un período de retorno de 50 años

N°	Hora	Ij (m³/s)	Oj (m³/s)
1	00:00	0.000	0.000
2	01:00	0.000	0.000
3	02:00	0.000	0.000
4	03:00	0.000	0.000
5	04:00	0.000	0.000
6	05:00	0.000	0.029
7	06:00	0.100	0.194
8	07:00	0.500	0.842
9	08:00	2.000	2.901
10	09:00	6.300	8.624
11	10:00	17.800	33.422
12	11:00	81.500	105.569
13	12:00	213.400	239.865
14	13:00	413.100	445.933
15	14:00	700.100	720.997
16	15:00	1025.900	1019.899
17	16:00	1308.200	1279.330
18	17:00	1494.100	1460.459
19	18:00	1590.200	1555.034
20	19:00	1596.400	1566.960
21	20:00	1534.700	1511.079
22	21:00	1420.100	1398.427
23	22:00	1253.900	1247.588
24	23:00	1088.100	1092.603
25	00:00	945.200	951.014
26	01:00	818.900	825.857
27	02:00	711.800	715.620
28	03:00	611.700	614.008
29	04:00	516.400	520.489
30	05:00	433.600	437.156
31	06:00	359.600	362.903

32	07:00	294.000	297.845
33	08:00	238.900	242.372
34	09:00	192.400	195.636
35	10:00	154.000	157.267
36	11:00	124.000	126.602
37	12:00	100.000	101.963
38	13:00	80.400	82.103
39	14:00	64.900	66.162
40	15:00	52.200	53.256
41	16:00	42.000	43.001
42	17:00	34.300	34.974
43	18:00	28.000	28.411
44	19:00	22.500	22.866
45	20:00	17.900	18.169
46	21:00	13.900	14.114
47	22:00	10.400	10.541
48	23:00	7.200	7.493
49	00:00	4.900	5.238
50	01:00	3.500	3.737
51	02:00	2.600	2.723
52	03:00	1.900	1.991
53	04:00	1.400	1.454
54	05:00	1.000	1.043
55	06:00	0.700	0.712
56	07:00	0.400	0.460
57	08:00	0.300	0.288
58	09:00	0.100	0.154
59	10:00	0.100	0.087
60	11:00	0.000	0.025

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Puchaca para un período de retorno de 100 años

N°	Hora	Ij (m³/s)	Oj (m³/s)
1	00:00	0.000	0.000
2	01:00	0.000	0.000
3	02:00	0.000	0.029
4	03:00	0.100	0.223
5	04:00	0.600	0.865
6	05:00	1.900	2.636
7	06:00	5.500	7.118
8	07:00	14.000	17.594
9	08:00	33.400	53.404
10	09:00	119.000	149.789
11	10:00	291.800	324.449
12	11:00	547.100	584.585
13	12:00	899.500	932.500
14	13:00	1328.000	1327.206

15	14:00	1718.600	1690.549
16	15:00	2009.900	1967.323
17	16:00	2178.800	2136.192
18	17:00	2240.300	2197.175
19	18:00	2193.200	2161.755
20	19:00	2079.400	2052.294
21	20:00	1902.800	1879.066
22	21:00	1671.200	1667.893
23	22:00	1452.900	1460.096
24	23:00	1264.200	1272.113
25	00:00	1097.000	1105.895
26	01:00	953.900	958.703
27	02:00	819.500	823.151
28	03:00	693.800	699.112
29	04:00	583.700	588.621
30	05:00	486.100	491.101
31	06:00	401.600	406.358
32	07:00	329.200	333.449
33	08:00	267.300	271.907
34	09:00	217.600	221.555
35	10:00	177.400	180.668
36	11:00	144.900	147.527
37	12:00	118.500	120.553
38	13:00	96.800	98.439
39	14:00	78.900	80.312
40	15:00	64.400	65.553
41	16:00	52.600	53.683
42	17:00	43.500	44.252
43	18:00	36.000	36.489
44	19:00	29.500	29.830
45	20:00	23.700	24.043
46	21:00	18.800	19.005
47	22:00	14.300	14.494
48	23:00	10.300	10.464
49	00:00	6.700	7.228
50	01:00	4.800	5.119
51	02:00	3.500	3.703
52	03:00	2.600	2.714
53	04:00	1.900	1.989
54	05:00	1.400	1.453
55	06:00	1.000	1.014
56	07:00	0.600	0.661
57	08:00	0.400	0.417
58	09:00	0.200	0.233
59	10:00	0.100	0.109
60	11:00	0.000	0.031

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Puchaca para un período de retorno de 200 años

N°	Hora	Ij (m³/s)	Oj (m³/s)
1	00:00	0.000	0.000
2	01:00	0.000	0.029
3	02:00	0.100	0.251
4	03:00	0.700	1.030
5	04:00	2.300	3.055
6	05:00	6.200	7.766
7	06:00	14.800	17.778
8	07:00	32.200	38.342
9	08:00	68.000	97.800
10	09:00	201.600	246.302
11	10:00	461.000	507.648
12	11:00	837.500	890.408
13	12:00	1350.400	1395.853
14	13:00	1966.700	1962.813
15	14:00	2520.900	2478.336
16	15:00	2927.300	2864.765
17	16:00	3155.400	3093.603
18	17:00	3228.600	3166.747
19	18:00	3146.800	3102.269
20	19:00	2971.400	2933.288
21	20:00	2708.100	2675.173
22	21:00	2369.100	2365.730
23	22:00	2052.900	2064.336
24	23:00	1781.700	1793.699
25	00:00	1542.500	1555.740
26	01:00	1338.900	1346.078
27	02:00	1148.300	1153.801
28	03:00	970.800	978.591
29	04:00	816.000	823.076
30	05:00	679.000	686.186
31	06:00	560.800	567.531
32	07:00	459.600	465.540
33	08:00	373.000	379.568
34	09:00	303.900	309.385
35	10:00	247.800	252.310
36	11:00	202.300	206.005
37	12:00	165.500	168.330
38	13:00	135.100	137.434
39	14:00	110.200	112.143
40	15:00	89.900	91.538
41	16:00	73.500	75.000
42	17:00	60.800	61.837
43	18:00	50.300	50.951
44	19:00	41.100	41.586
45	20:00	33.000	33.469
46	21:00	26.100	26.423
47	22:00	19.900	20.126

48	23:00	14.200	14.456
49	00:00	9.200	9.924
50	01:00	6.500	6.988
51	02:00	4.800	5.051
52	03:00	3.500	3.684
53	04:00	2.600	2.708
54	05:00	1.900	1.958
55	06:00	1.300	1.373
56	07:00	0.900	0.920
57	08:00	0.500	0.562
58	09:00	0.300	0.346
59	10:00	0.200	0.184
60	11:00	0.000	0.052

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Puchaca para un período de retorno de 500 años

N°	Hora	Ij (m³/s)	Oj (m³/s)
1	00:00	0.100	0.186
2	01:00	0.500	0.754
3	02:00	1.700	2.232
4	03:00	4.500	5.486
5	04:00	10.200	11.921
6	05:00	20.900	24.040
7	06:00	40.800	46.620
8	07:00	77.800	101.213
9	08:00	190.600	227.784
10	09:00	409.400	444.771
11	10:00	713.600	751.162
12	11:00	1112.200	1154.396
13	12:00	1618.700	1657.114
14	13:00	2214.700	2225.724
15	14:00	2807.800	2787.576
16	15:00	3316.100	3275.598
17	16:00	3700.300	3649.540
18	17:00	3945.400	3896.772
19	18:00	4069.800	4022.682
20	19:00	4077.300	4032.063
21	20:00	3973.600	3940.264
22	21:00	3799.000	3770.690
23	22:00	3559.600	3531.390
24	23:00	3251.100	3228.710
25	00:00	2894.100	2891.727
26	01:00	2553.000	2564.481
27	02:00	2256.200	2266.598
28	03:00	1985.900	1995.916
29	04:00	1741.700	1753.823
30	05:00	1531.200	1538.393
31	06:00	1334.900	1342.314

32	07:00	1158.400	1164.047
33	08:00	995.200	1003.542
34	09:00	856.400	863.256
35	10:00	734.000	740.602
36	11:00	628.500	634.111
37	12:00	536.600	542.064
38	13:00	458.700	463.399
39	14:00	392.200	396.241
40	15:00	335.500	339.168
41	16:00	287.900	290.732
42	17:00	246.800	249.261
43	18:00	211.700	213.663
44	19:00	181.200	183.058
45	20:00	155.400	156.834
46	21:00	132.900	134.276
47	22:00	113.900	114.921
48	23:00	97.200	98.352
49	00:00	83.600	84.394
50	01:00	71.700	72.652
51	02:00	62.400	62.972
52	03:00	54.200	54.608
53	04:00	46.900	47.177
54	05:00	40.200	40.383
55	06:00	33.900	34.114
56	07:00	28.200	28.395
57	08:00	23.000	23.133
58	09:00	18.100	18.216
59	10:00	13.500	13.612
60	11:00	9.200	7.823

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Puchaca para un período de retorno de 1000 años

N°	Hora	Ij (m ³ /s)	Oj (m ³ /s)
1	00:00	0.20	0.343
2	01:00	0.90	1.200
3	02:00	2.50	3.160
4	03:00	6.10	7.267
5	04:00	13.10	15.103
6	05:00	25.90	29.381
7	06:00	48.80	55.122
8	07:00	90.20	114.736
9	08:00	210.80	247.743
10	09:00	435.40	471.026
11	10:00	746.50	782.714
12	11:00	1147.00	1186.868
13	12:00	1648.60	1688.548
14	13:00	2247.40	2274.524

15	14:00	2898.00	2893.641
16	15:00	3502.90	3470.070
17	16:00	3994.20	3946.304
18	17:00	4348.20	4294.916
19	18:00	4561.80	4515.926
20	19:00	4667.00	4620.264
21	20:00	4654.00	4609.986
22	21:00	4533.80	4501.131
23	22:00	4343.90	4316.758
24	23:00	4092.70	4064.977
25	00:00	3773.00	3745.578
26	01:00	3386.80	3380.288
27	02:00	3007.20	3016.470
28	03:00	2668.50	2680.466
29	04:00	2364.20	2375.011
30	05:00	2087.40	2098.669
31	06:00	1840.70	1852.031
32	07:00	1623.70	1630.858
33	08:00	1421.60	1429.539
34	09:00	1241.20	1247.076
35	10:00	1074.40	1082.916
36	11:00	932.40	939.444
37	12:00	807.30	813.693
38	13:00	698.20	704.232
39	14:00	604.40	609.265
40	15:00	522.10	526.937
41	16:00	452.30	455.660
42	17:00	389.80	393.952
43	18:00	338.80	341.536
44	19:00	293.50	296.070
45	20:00	254.70	256.775
46	21:00	220.80	222.570
47	22:00	191.20	192.918
48	23:00	166.00	167.223
49	00:00	143.50	144.787
50	01:00	124.40	125.310
51	02:00	107.30	108.420
52	03:00	93.30	94.113
53	04:00	81.10	81.914
54	05:00	71.00	71.674
55	06:00	62.50	62.937
56	07:00	54.90	55.156
57	08:00	47.80	47.976
58	09:00	41.10	41.283
59	10:00	34.90	35.114
60	11:00	29.300	22.568

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Desaguadero para un período de retorno de 5 años

N°	Hora	Ij (m³/s)	Oj (m³/s)
1	00:00	0.000	0.000
2	01:00	0.000	0.000
3	02:00	0.000	0.000
4	03:00	0.000	0.000
5	04:00	0.000	0.000
6	05:00	0.000	0.000
7	06:00	0.000	0.000
8	07:00	0.000	0.000
9	08:00	0.000	0.000
10	09:00	0.000	0.000
11	10:00	0.000	0.177
12	11:00	0.600	5.458
13	12:00	17.500	26.012
14	13:00	57.500	69.610
15	14:00	127.600	141.458
16	15:00	228.000	234.461
17	16:00	329.500	326.514
18	17:00	406.700	398.345
19	18:00	452.000	440.845
20	19:00	463.400	453.417
21	20:00	450.200	440.331
22	21:00	413.700	405.867
23	22:00	362.600	360.619
24	23:00	316.100	316.017
25	00:00	274.900	275.750
26	01:00	240.000	240.252
27	02:00	208.000	207.924
28	03:00	178.100	177.897
29	04:00	150.000	149.923
30	05:00	124.100	124.198
31	06:00	100.700	101.052
32	07:00	80.300	80.880
33	08:00	63.200	63.833
34	09:00	49.100	49.818
35	10:00	38.000	38.724
36	11:00	29.600	30.155
37	12:00	23.100	23.507
38	13:00	18.000	18.371
39	14:00	14.200	14.416
40	15:00	11.100	11.261
41	16:00	8.600	8.731
42	17:00	6.600	6.706
43	18:00	5.000	5.020
44	19:00	3.500	3.587
45	20:00	2.400	2.515
46	21:00	1.700	1.803
47	22:00	1.300	1.318

48	23:00	0.900	0.925
49	00:00	0.600	0.658
50	01:00	0.500	0.484
51	02:00	0.300	0.320
52	03:00	0.200	0.203
53	04:00	0.100	0.128
54	05:00	0.100	0.078
55	06:00	0.000	0.021
56	07:00	0.000	0.006
57	08:00	0.000	0.002
58	09:00	0.000	0.000
59	10:00	0.000	0.000
60	11:00	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Desaguadero para un período de retorno de 10 años

N°	Hora	Ij (m ³ /s)	Oj (m ³ /s)
1	00:00	0.000	0.000
2	01:00	0.000	0.000
3	02:00	0.000	0.000
4	03:00	0.000	0.000
5	04:00	0.000	0.000
6	05:00	0.000	0.000
7	06:00	0.000	0.000
8	07:00	0.000	0.000
9	08:00	0.000	0.000
10	09:00	0.000	0.118
11	10:00	0.400	1.089
12	11:00	3.000	12.428
13	12:00	36.800	52.746
14	13:00	113.400	135.306
15	14:00	243.600	267.922
16	15:00	425.800	435.773
17	16:00	604.800	597.930
18	17:00	736.800	720.726
19	18:00	809.800	789.274
20	19:00	821.900	804.016
21	20:00	791.100	773.703
22	21:00	720.100	706.732
23	22:00	625.400	622.708
24	23:00	541.500	541.893
25	00:00	468.200	470.033
26	01:00	406.700	407.409
27	02:00	350.900	350.969
28	03:00	299.200	299.077
29	04:00	251.200	251.230
30	05:00	207.300	207.646
31	06:00	168.100	168.731

32	07:00	133.900	134.904
33	08:00	105.300	106.391
34	09:00	81.800	83.036
35	10:00	63.400	64.591
36	11:00	49.400	50.301
37	12:00	38.500	39.190
38	13:00	30.000	30.602
39	14:00	23.600	24.022
40	15:00	18.600	18.831
41	16:00	14.400	14.598
42	17:00	11.000	11.149
43	18:00	8.200	8.291
44	19:00	5.800	5.944
45	20:00	4.000	4.173
46	21:00	2.800	2.936
47	22:00	2.000	2.106
48	23:00	1.500	1.517
49	00:00	1.000	1.051
50	01:00	0.700	0.736
51	02:00	0.500	0.505
52	03:00	0.300	0.326
53	04:00	0.200	0.205
54	05:00	0.100	0.099
55	06:00	0.000	0.027
56	07:00	0.000	0.007
57	08:00	0.000	0.002
58	09:00	0.000	0.001
59	10:00	0.000	0.000
60	11:00	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Desaguadero para un período de retorno de 25 años

N°	Hora	Ij (m³/s)	Oj (m³/s)
1	00:00	0.000	0.000
2	01:00	0.000	0.000
3	02:00	0.000	0.000
4	03:00	0.000	0.000
5	04:00	0.000	0.000
6	05:00	0.000	0.000
7	06:00	0.000	0.000
8	07:00	0.000	0.029
9	08:00	0.100	0.257
10	09:00	0.700	1.404
11	10:00	3.500	5.728
12	11:00	13.000	31.805
13	12:00	83.600	113.962
14	13:00	234.400	274.828

15	14:00	482.500	525.877
16	15:00	820.800	836.317
17	16:00	1144.600	1129.084
18	17:00	1375.200	1343.718
19	18:00	1494.400	1455.802
20	19:00	1501.700	1468.811
21	20:00	1432.100	1400.719
22	21:00	1291.700	1268.309
23	22:00	1112.000	1108.458
24	23:00	956.300	957.902
25	00:00	821.900	825.871
26	01:00	710.400	712.056
27	02:00	609.900	610.368
28	03:00	517.600	517.853
29	04:00	433.200	433.554
30	05:00	356.600	357.402
31	06:00	288.600	289.875
32	07:00	229.700	231.497
33	08:00	180.500	182.462
34	09:00	140.300	142.433
35	10:00	108.800	110.834
36	11:00	84.800	86.308
37	12:00	66.000	67.225
38	13:00	51.500	52.545
39	14:00	40.600	41.270
40	15:00	31.900	32.315
41	16:00	24.700	25.053
42	17:00	18.900	19.093
43	18:00	13.900	14.068
44	19:00	9.700	9.969
45	20:00	6.600	6.952
46	21:00	4.700	4.926
47	22:00	3.400	3.519
48	23:00	2.400	2.497
49	00:00	1.700	1.768
50	01:00	1.200	1.236
51	02:00	0.800	0.830
52	03:00	0.500	0.530
53	04:00	0.300	0.333
54	05:00	0.200	0.207
55	06:00	0.100	0.099
56	07:00	0.000	0.027
57	08:00	0.000	0.007
58	09:00	0.000	0.002
59	10:00	0.000	0.001
60	11:00	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Desaguadero para un período de retorno de 50 años

N°	Hora	Ij (m³/s)	Oj (m³/s)
1	00:00	0.000	0.000
2	01:00	0.000	0.000
3	02:00	0.000	0.000
4	03:00	0.000	0.000
5	04:00	0.000	0.000
6	05:00	0.000	0.029
7	06:00	0.100	0.228
8	07:00	0.600	1.000
9	08:00	2.300	3.419
10	09:00	7.300	10.311
11	10:00	21.100	41.220
12	11:00	99.400	131.684
13	12:00	262.600	300.165
14	13:00	510.600	558.908
15	14:00	868.200	904.428
16	15:00	1275.600	1279.590
17	16:00	1630.300	1604.753
18	17:00	1865.800	1831.605
19	18:00	1989.500	1950.158
20	19:00	2000.900	1965.377
21	20:00	1926.800	1895.835
22	21:00	1786.100	1755.224
23	22:00	1580.300	1566.875
24	23:00	1373.900	1373.506
25	00:00	1195.200	1196.841
26	01:00	1036.900	1040.519
27	02:00	902.200	902.531
28	03:00	776.200	774.938
29	04:00	655.800	657.153
30	05:00	550.900	552.034
31	06:00	457.100	458.292
32	07:00	373.900	376.096
33	08:00	303.800	305.961
34	09:00	244.700	246.908
35	10:00	195.900	198.454
36	11:00	157.700	159.717
37	12:00	127.100	128.623
38	13:00	102.300	103.593
39	14:00	82.500	83.467
40	15:00	66.400	67.220
41	16:00	53.500	54.327
42	17:00	43.700	44.190
43	18:00	35.600	35.893
44	19:00	28.700	28.880
45	20:00	22.700	22.900
46	21:00	17.700	17.782
47	22:00	13.200	13.262

48	23:00	9.200	9.445
49	00:00	6.300	6.621
50	01:00	4.500	4.720
51	02:00	3.300	3.419
52	03:00	2.400	2.470
53	04:00	1.700	1.761
54	05:00	1.200	1.263
55	06:00	0.900	0.910
56	07:00	0.600	0.596
57	08:00	0.300	0.351
58	09:00	0.200	0.211
59	10:00	0.100	0.101
60	11:00	0.000	0.027

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Desaguadero para un período de retorno de 100 años

N°	Hora	Ij (m3/s)	Oj (m3/s)
1	00:00	0.000	0.029
2	01:00	0.100	0.228
3	02:00	0.600	0.941
4	03:00	2.100	2.963
5	04:00	6.100	8.076
6	05:00	15.700	20.200
7	06:00	38.000	63.373
8	07:00	140.600	181.179
9	08:00	349.500	395.192
10	09:00	659.500	714.424
11	10:00	1089.100	1142.071
12	11:00	1613.500	1627.422
13	12:00	2094.100	2074.089
14	13:00	2455.000	2414.401
15	14:00	2667.100	2622.482
16	15:00	2747.700	2698.364
17	16:00	2695.100	2656.204
18	17:00	2559.900	2523.303
19	18:00	2347.000	2311.940
20	19:00	2065.800	2053.862
21	20:00	1799.000	1799.865
22	21:00	1567.700	1569.989
23	22:00	1362.100	1366.356
24	23:00	1185.500	1185.536
25	00:00	1019.400	1018.515
26	01:00	863.700	865.344
27	02:00	727.000	728.692
28	03:00	605.600	607.963
29	04:00	500.500	503.050
30	05:00	410.400	412.711
31	06:00	333.100	336.415

32	07:00	271.200	274.095
33	08:00	221.100	223.485
34	09:00	180.500	182.473
35	10:00	147.700	149.130
36	11:00	120.600	121.754
37	12:00	98.300	99.317
38	13:00	80.200	81.074
39	14:00	65.600	66.430
40	15:00	54.200	54.742
41	16:00	44.800	45.105
42	17:00	36.700	36.854
43	18:00	29.500	29.694
44	19:00	23.400	23.484
45	20:00	17.900	17.968
46	21:00	13.000	13.019
47	22:00	8.500	9.016
48	23:00	6.100	6.388
49	00:00	4.400	4.614
50	01:00	3.300	3.391
51	02:00	2.400	2.462
52	03:00	1.700	1.759
53	04:00	1.200	1.233
54	05:00	0.800	0.829
55	06:00	0.500	0.530
56	07:00	0.300	0.303
57	08:00	0.100	0.126
58	09:00	0.000	0.034
59	10:00	0.000	0.009
60	11:00	0.000	0.002

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Desaguadero para un período de retorno de 200 años

N°	Hora	Ij (m3/s)	Oj (m3/s)
1	00:00	0.000	0.029
2	01:00	0.100	0.257
3	02:00	0.700	1.080
4	03:00	2.400	3.249
5	04:00	6.500	8.357
6	05:00	15.800	19.436
7	06:00	35.000	42.590
8	07:00	75.100	112.118
9	08:00	230.800	288.649
10	09:00	536.500	600.817
11	10:00	982.900	1059.289
12	11:00	1593.700	1666.116
13	12:00	2331.000	2347.452
14	13:00	2998.000	2967.134

15	14:00	3491.000	3431.987
16	15:00	3771.900	3708.170
17	16:00	3867.700	3798.053
18	17:00	3777.600	3723.228
19	18:00	3574.000	3523.145
20	19:00	3264.000	3215.712
21	20:00	2861.700	2846.420
22	21:00	2484.400	2486.673
23	22:00	2159.400	2163.340
24	23:00	1872.000	1878.551
25	00:00	1626.500	1626.928
26	01:00	1396.300	1395.466
27	02:00	1181.500	1184.075
28	03:00	993.600	996.119
29	04:00	827.100	830.496
30	05:00	683.300	686.856
31	06:00	560.100	563.336
32	07:00	454.600	459.201
33	08:00	370.300	374.215
34	09:00	301.900	305.155
35	10:00	246.500	249.180
36	11:00	201.700	203.624
37	12:00	164.600	166.208
38	13:00	134.200	135.618
39	14:00	109.600	110.722
40	15:00	89.500	90.708
41	16:00	74.100	74.795
42	17:00	61.200	61.611
43	18:00	50.100	50.300
44	19:00	40.200	40.460
45	20:00	31.800	31.935
46	21:00	24.300	24.364
47	22:00	17.500	17.532
48	23:00	11.300	12.044
49	00:00	8.100	8.519
50	01:00	5.900	6.137
51	02:00	4.300	4.473
52	03:00	3.200	3.280
53	04:00	2.300	2.359
54	05:00	1.600	1.658
55	06:00	1.100	1.133
56	07:00	0.700	0.729
57	08:00	0.400	0.430
58	09:00	0.200	0.233
59	10:00	0.100	0.106
60	11:00	0.000	0.029

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Desaguadero para un período de retorno de 500 años

N°	Hora	Ij (m3/s)	Oj (m3/s)
1	00:00	0.000	0.029
2	01:00	0.100	0.199
3	02:00	0.500	0.801
4	03:00	1.800	2.354
5	04:00	4.600	5.728
6	05:00	10.500	12.534
7	06:00	21.800	25.532
8	07:00	43.000	50.045
9	08:00	83.000	111.425
10	09:00	209.900	256.590
11	10:00	459.100	506.933
12	11:00	807.800	861.341
13	12:00	1266.300	1328.883
14	13:00	1851.200	1913.264
15	14:00	2542.200	2575.286
16	15:00	3232.700	3229.959
17	16:00	3827.600	3799.155
18	17:00	4280.200	4236.032
19	18:00	4572.200	4526.077
20	19:00	4724.400	4675.538
21	20:00	4740.600	4689.642
22	21:00	4627.200	4586.154
23	22:00	4430.300	4392.123
24	23:00	4157.300	4116.528
25	00:00	3802.900	3766.344
26	01:00	3390.400	3375.549
27	02:00	2994.400	2995.726
28	03:00	2648.600	2649.611
29	04:00	2333.000	2334.528
30	05:00	2047.200	2052.254
31	06:00	1800.300	1800.732
32	07:00	1570.200	1571.547
33	08:00	1362.900	1362.919
34	09:00	1171.200	1174.968
35	10:00	1007.800	1010.636
36	11:00	863.800	866.964
37	12:00	739.600	742.206
38	13:00	631.400	634.413
39	14:00	539.800	542.376
40	15:00	461.600	463.818
41	16:00	394.900	397.031
42	17:00	338.800	340.306
43	18:00	290.400	291.744
44	19:00	249.100	250.069
45	20:00	213.200	214.255
46	21:00	182.900	183.582
47	22:00	156.400	157.160

48	23:00	134.000	134.496
49	00:00	114.400	115.097
50	01:00	98.300	98.753
51	02:00	84.400	85.015
52	03:00	73.300	73.673
53	04:00	63.800	63.939
54	05:00	55.200	55.239
55	06:00	47.300	47.270
56	07:00	39.900	39.922
57	08:00	33.200	33.252
58	09:00	27.200	27.130
59	10:00	21.400	21.361
60	11:00	16.000	12.742

Fuente: Elaboración propia.

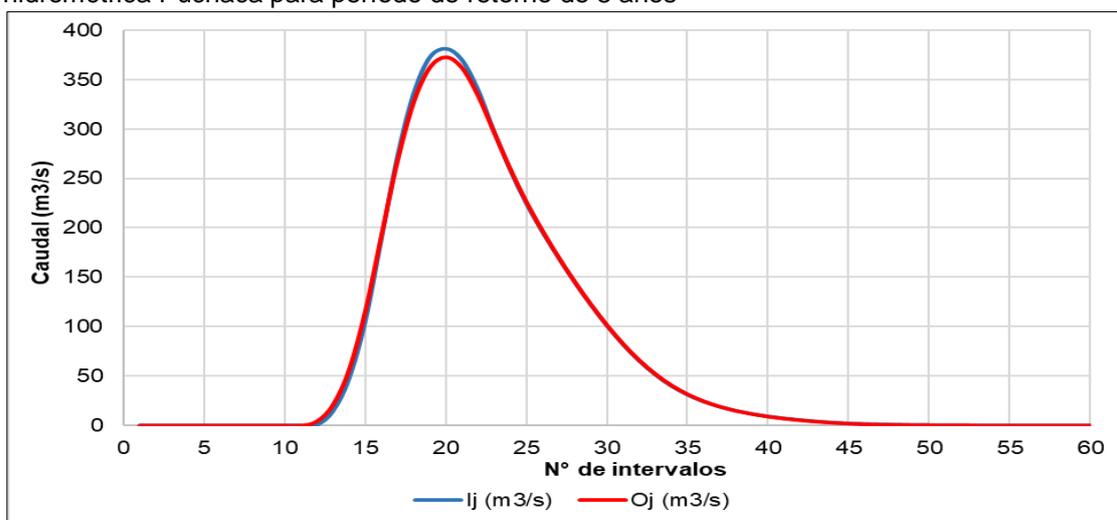
Tabla 28: Caudales máximos transitados para la estación hidrométrica Desaguadero para un período de retorno de 1000 años

N°	Hora	Ij (m3/s)	Oj (m3/s)
1	00:00	0.00	0.059
2	01:00	0.20	0.368
3	02:00	0.90	1.256
4	03:00	2.60	3.325
5	04:00	6.30	7.614
6	05:00	13.50	15.880
7	06:00	27.00	31.143
8	07:00	51.30	58.971
9	08:00	95.90	125.604
10	09:00	230.80	277.262
11	10:00	485.40	533.417
12	11:00	839.90	891.834
13	12:00	1298.10	1357.652
14	13:00	1873.90	1937.282
15	14:00	2563.80	2615.752
16	15:00	3316.20	3333.568
17	16:00	4019.00	4002.474
18	17:00	4592.80	4555.682
19	18:00	5009.20	4961.560
20	19:00	5264.10	5220.421
21	20:00	5393.70	5344.725
22	21:00	5386.50	5336.397
23	22:00	5254.60	5213.903
24	23:00	5041.10	5003.888
25	00:00	4755.80	4715.349
26	01:00	4390.30	4347.535
27	02:00	3946.20	3925.740
28	03:00	3507.80	3505.306
29	04:00	3115.20	3116.683
30	05:00	2761.70	2762.894
31	06:00	2439.50	2442.332

32	07:00	2151.90	2155.911
33	08:00	1898.60	1898.773
34	09:00	1662.70	1664.545
35	10:00	1452.00	1452.102
36	11:00	1257.00	1260.888
37	12:00	1090.90	1093.764
38	13:00	944.40	947.247
39	14:00	816.80	819.769
40	15:00	707.00	709.190
41	16:00	610.80	613.398
42	17:00	529.20	530.461
43	18:00	456.10	458.614
44	19:00	396.30	397.586
45	20:00	343.40	344.695
46	21:00	298.00	298.946
47	22:00	258.30	259.111
48	23:00	223.70	224.596
49	00:00	194.20	194.682
50	01:00	167.90	168.581
51	02:00	145.60	145.901
52	03:00	125.50	126.221
53	04:00	109.20	109.595
54	05:00	94.90	95.373
55	06:00	83.00	83.433
56	07:00	73.10	73.246
57	08:00	64.10	64.161
58	09:00	55.90	55.839
59	10:00	48.10	48.074
60	11:00	40.900	30.807

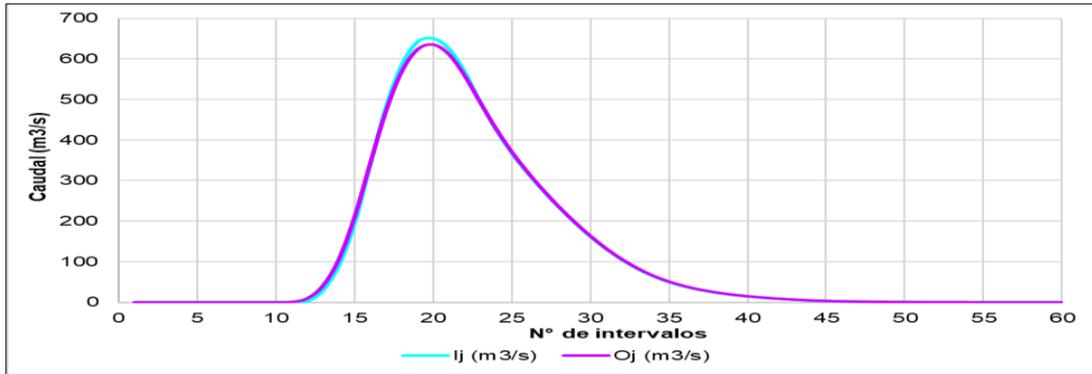
Fuente: Elaboración propia.

Figura 18: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 5 años



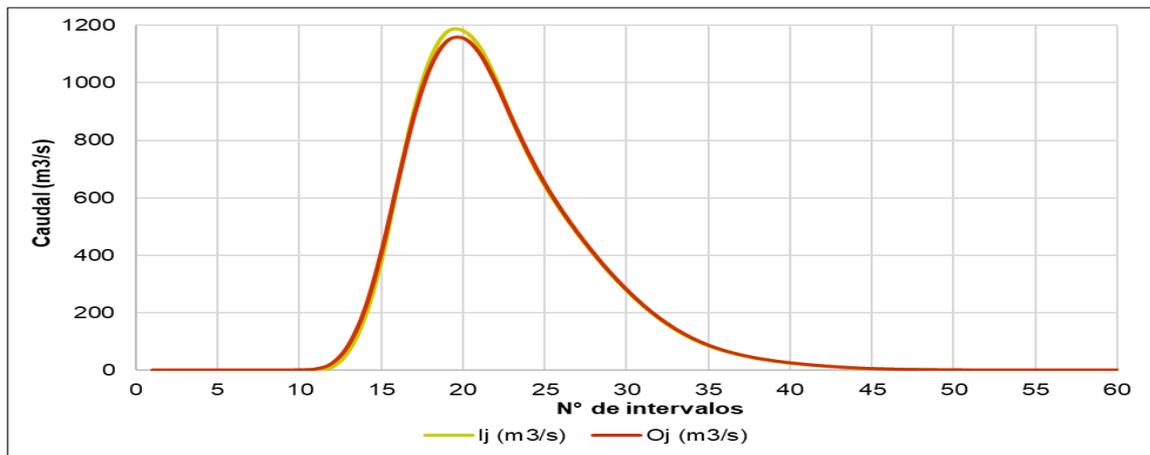
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 19: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 10 años



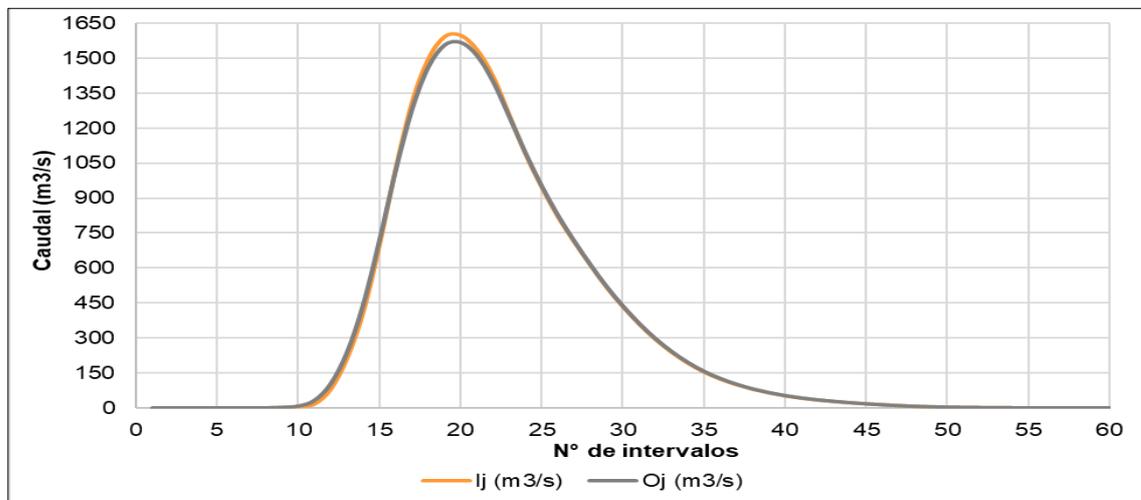
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 20: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 25 años



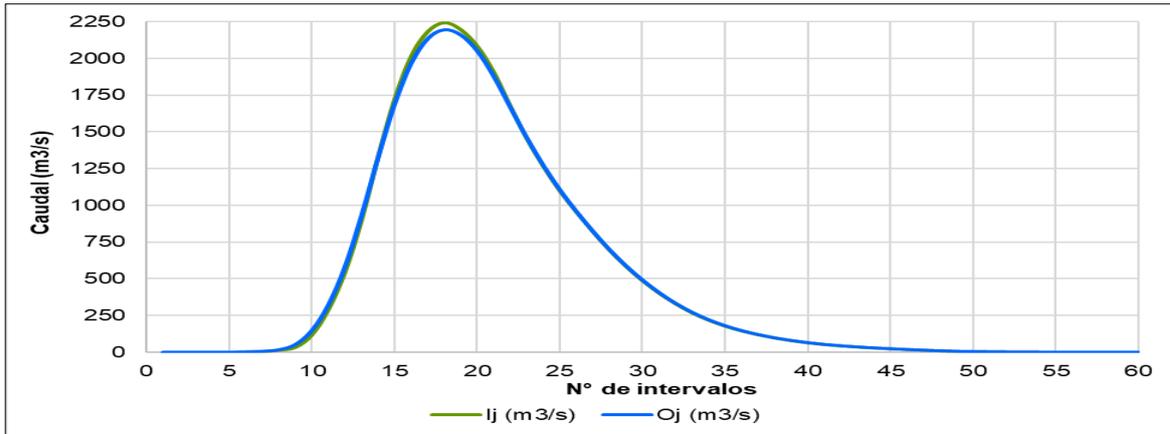
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 21: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 50 años



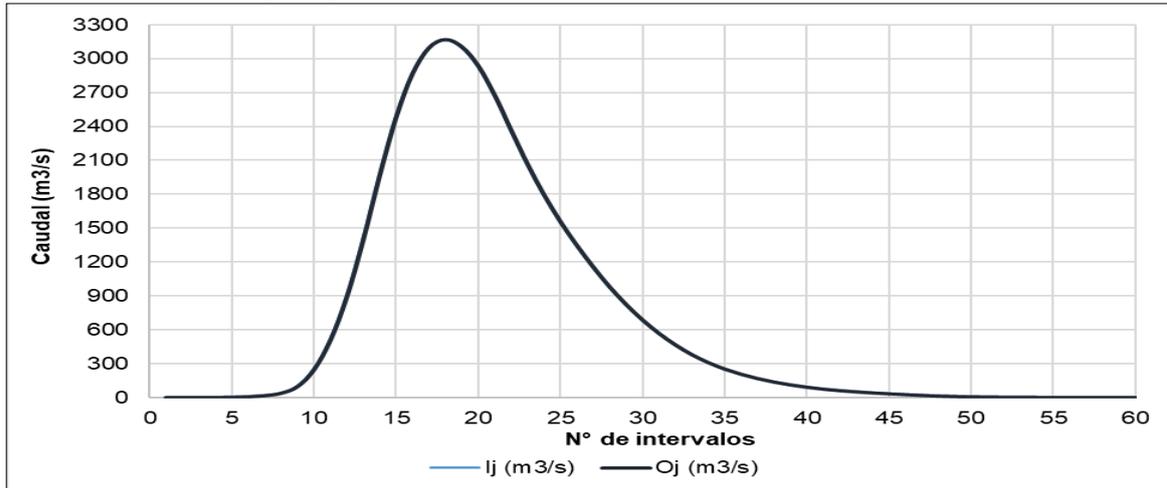
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 22: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 100 años



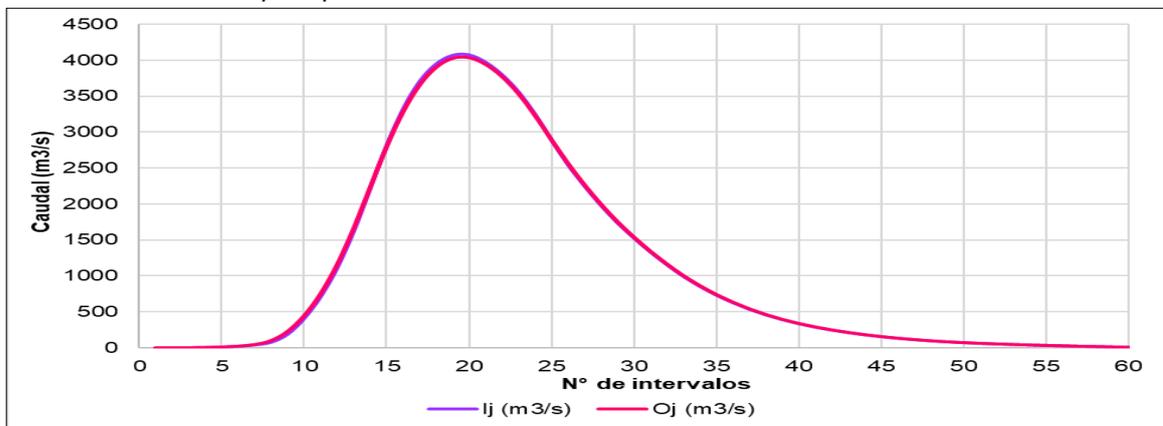
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 23: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 200 años



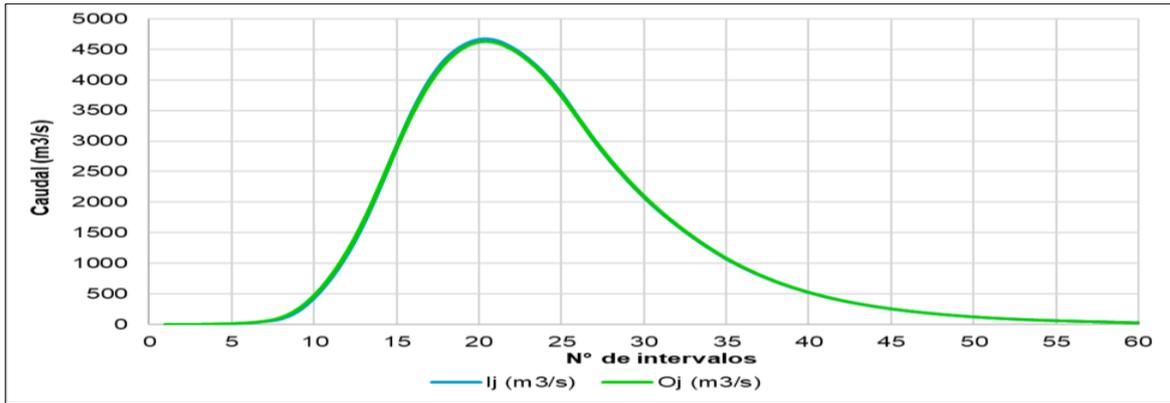
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 24: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 500 años



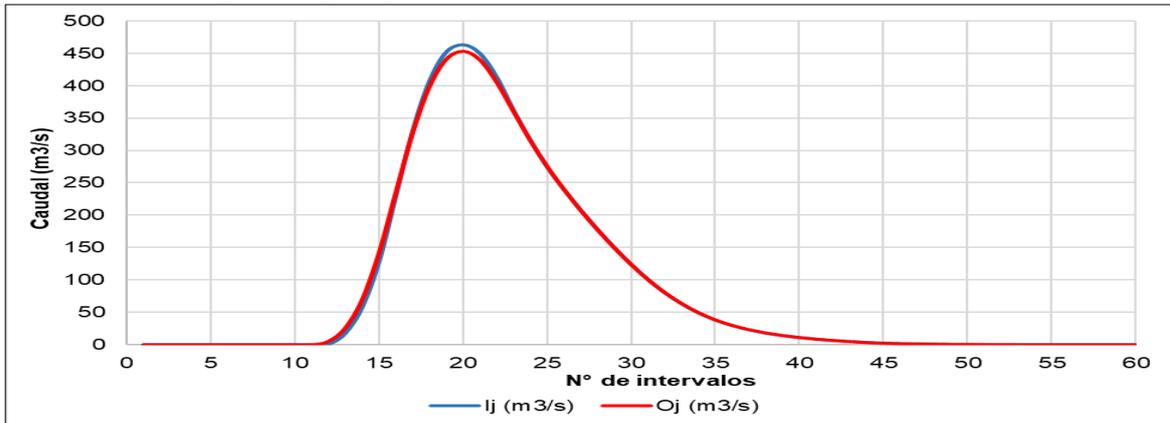
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 25: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 1000 años



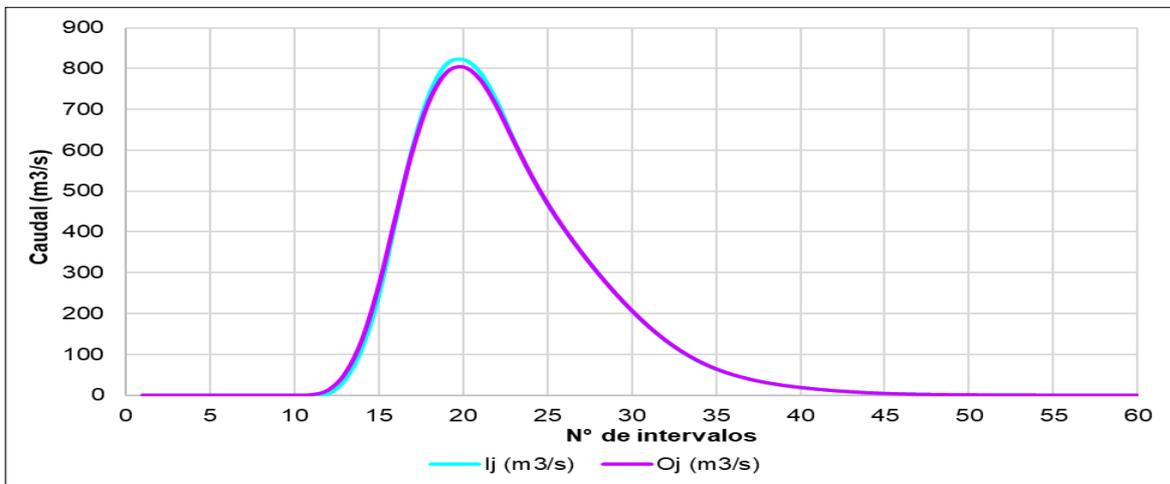
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 26: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Desaguadero para período de retorno de 5 años



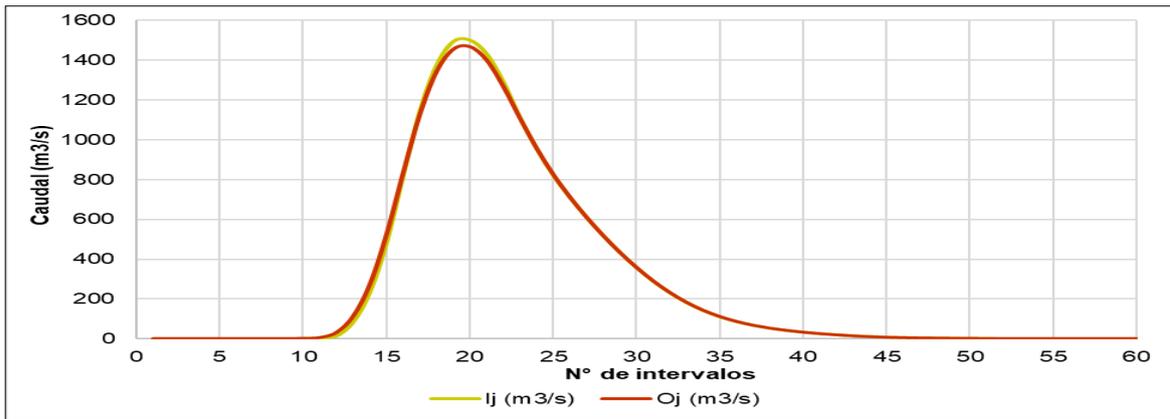
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 27: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Desaguadero para período de retorno de 10 años



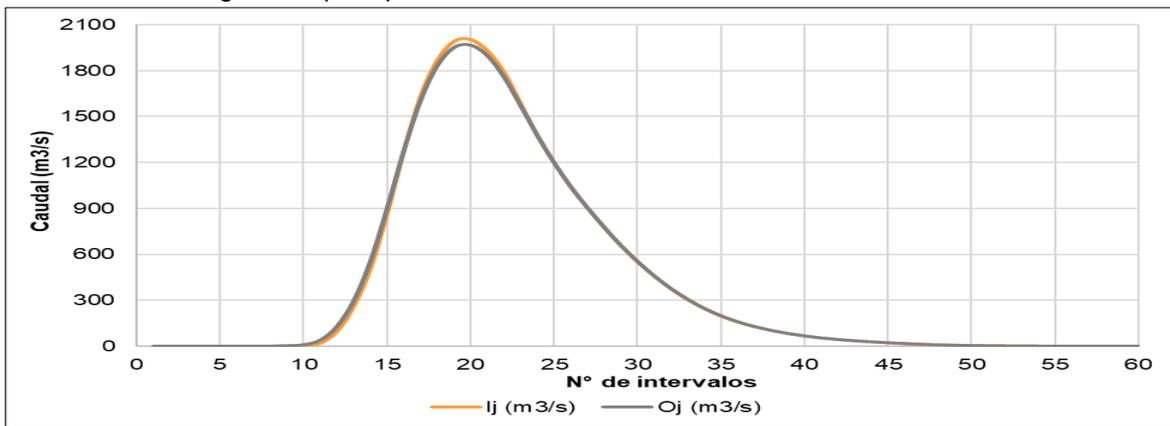
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 28: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 25 años



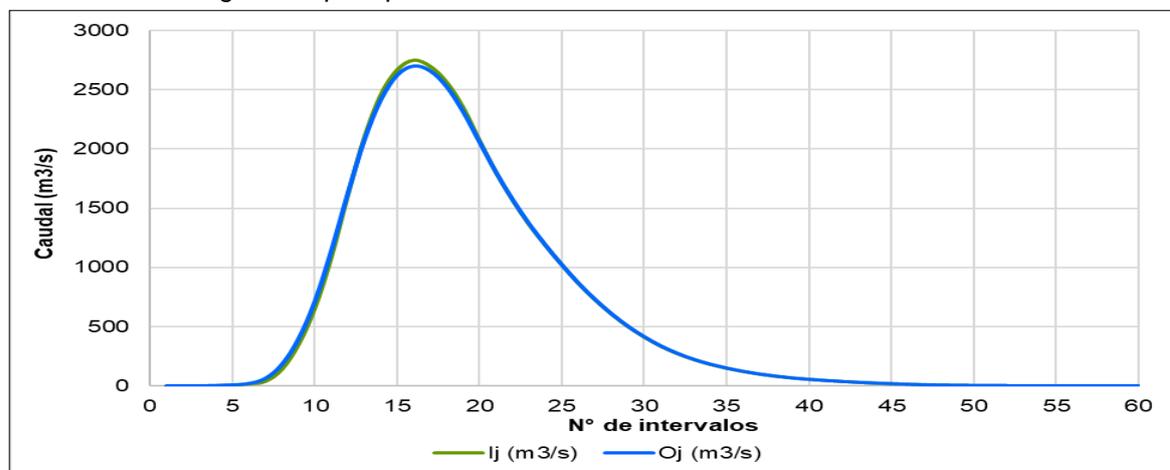
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 29: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Desaguadero para período de retorno de 50 años



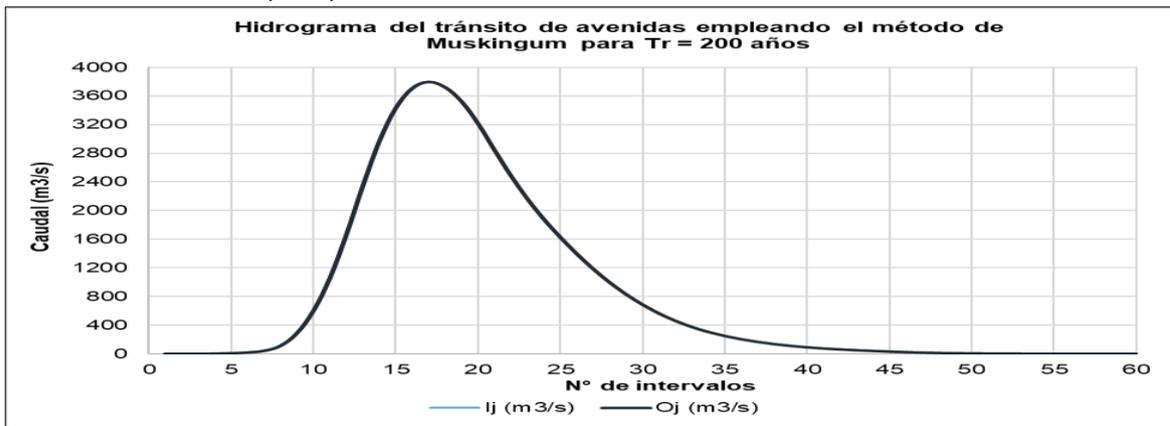
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 30: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Desaguadero para período de retorno de 100 años



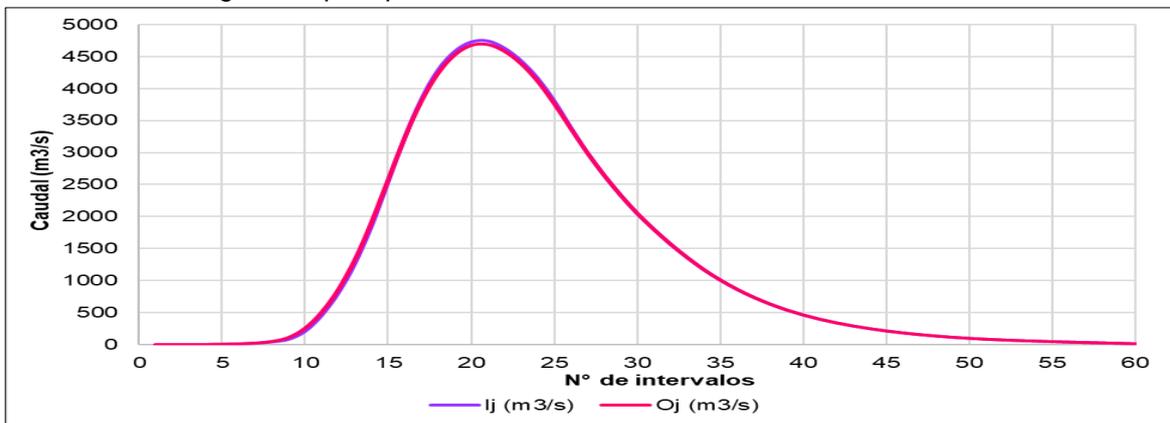
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 31: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Puchaca para período de retorno de 200 años



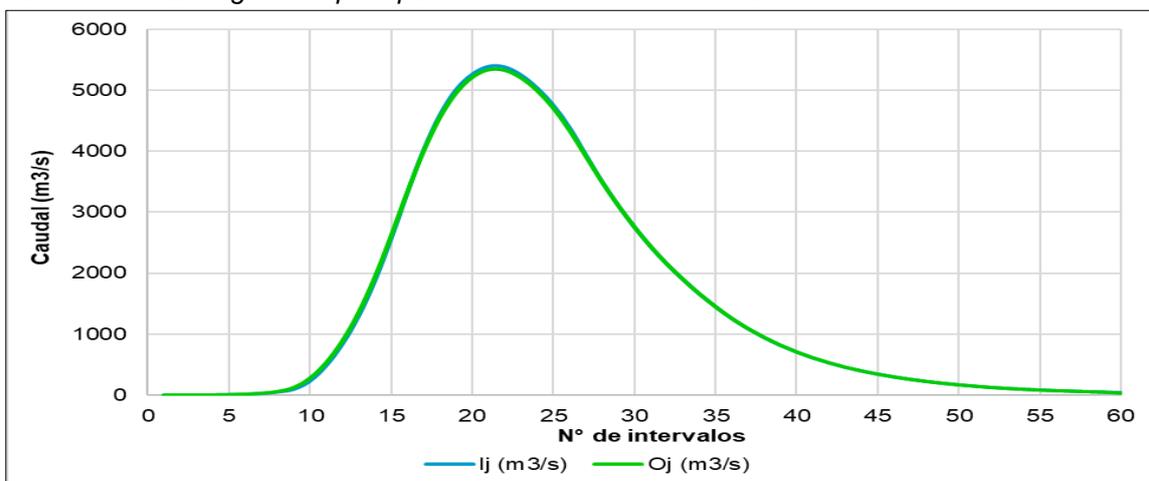
Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 32: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Desaguadero para período de retorno de 500 años



Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Figura 33: Hidrograma del tránsito de avenidas empleando el método Muskingum para la estación hidrométrica Desaguadero para período de retorno de 1000 años



Fuente: estación hidrométrica Puchaca

Cabe indicar que no se pudo realizar el tránsito de avenidas en la estación hidrométrica Puente La Leche debido a que la estación presenta muy pocos registros mensuales e incompletos, además sólo se dispone de los últimos seis años dificultando aún más su aplicación en la presente tesis, sin embargo se creyó conveniente considerar los caudales máximos obtenidos en dicha estación por medio del estudio de control de inundaciones y movimientos de masas de la cuenca La Leche realizado por Grupo Typsa (2019); los rangos obtenidos de los caudales máximos se muestran en la tabla 29.

Tabla 29: Caudales máximos para diversos períodos de retorno según TYPESA

Tr (años)	Caudal máximo (m³/s)
5	594.54
10	1123.93
25	1823.75
50	2353.14
100	2882.53
200	3411.92
500	4111.74
1000	4641.13

Fuente: TYPESA (2019).

Complementariamente a los resultados obtenidos del **cuarto objetivo específico**, se generó un archivo Shapefile en el programa ArcGis mapa de tránsito de avenidas aplicando el método Muskingum en la cuenca La Leche para los diferentes períodos de retorno (figura 34). Así mismo en la figura 34 en la tabla 30, se puede observar el aumento progresivo de los caudales conforme va aumentando el período de retorno y como era de esperarse las zonas aguas abajo de la cuenca La Leche sobre todo en la estación hidrométrica Puente La Leche presenta los tránsitos de avenidas más altos según cada período de retorno, caso contrario sucede en la estación hidrométrica Puchaca pues su ubicación en la parte central de la cuenca hace que sus caudales sean menores en comparación con el punto de descarga.

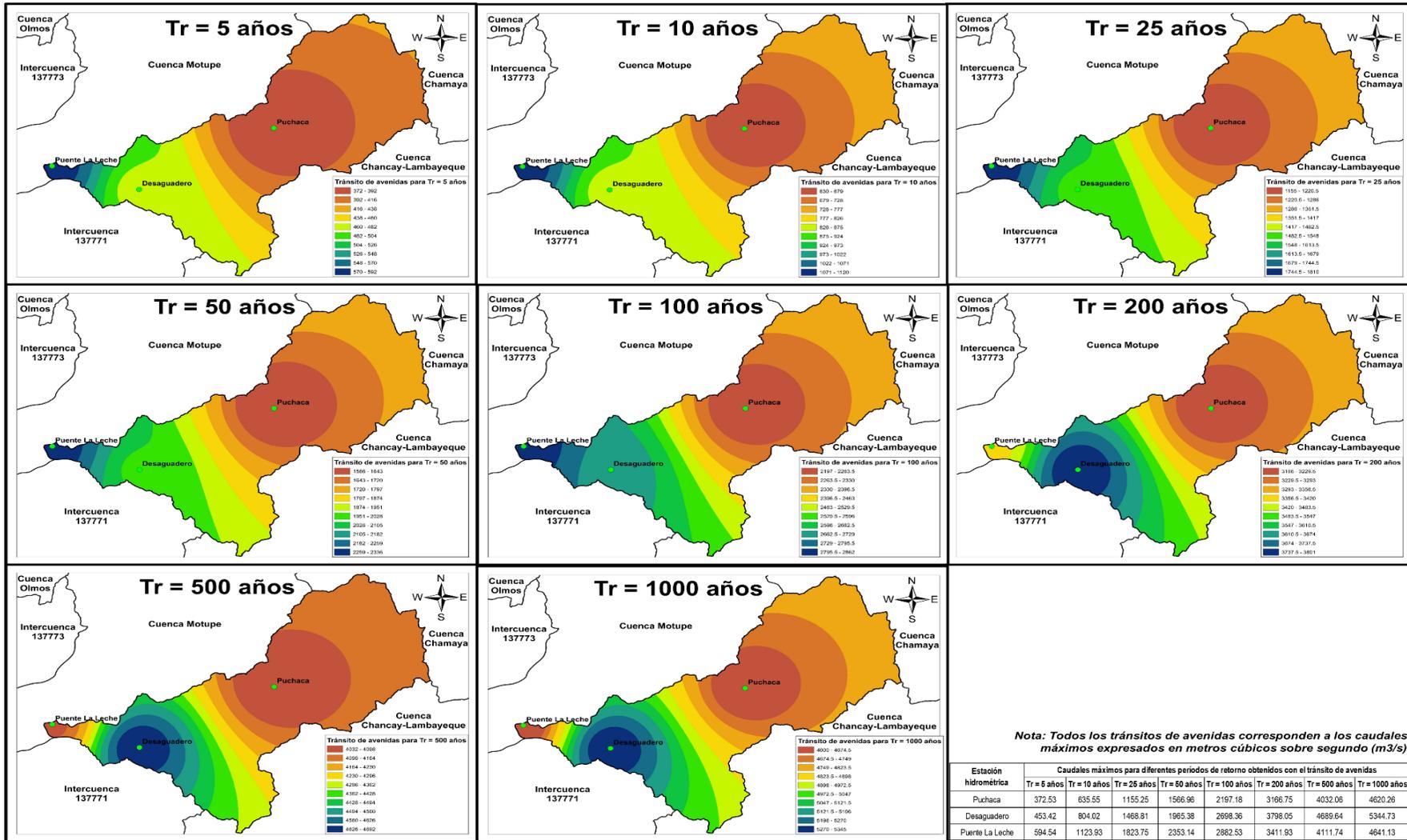
Tabla 30: Caudales máximos para diversos períodos de retorno según el análisis del tránsito de avenidas aplicando el método Muskingum

Estación hidrométrica	Caudales máximos para diferentes períodos de retorno obtenidos con el tránsito de avenidas							
	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años	Tr = 200 años	Tr = 500 años	Tr = 1000 años
Puchaca	372.53	635.55	1155.25	1566.96	2197.18	3166.75	4032.06	4620.26
Desaguadero	453.42	804.02	1468.81	1965.38	2698.36	3798.05	4689.64	5344.73
*Puente La Leche	594.54	1123.93	1823.75	2353.14	2882.53	3411.93	4111.74	4641.13

Fuente: Elaboración propia.

*Los caudales transitados para la estación hidrométrica Puente La Leche fueron tomados del estudio de TYPESA (2019) debido a la falta de información de caudales a nivel mensual y anual.

Figura 34: Tránsito de avenidas usando el método Muskingum en la cuenca La Leche para los diferentes períodos de retorno.



Fuente: estación hidrométrica Puchaca

V. DISCUSIÓN

La discusión se elaboró en función al orden de los objetivos específicos y resultados obtenidos que fueron logrados con la ejecución de la presente tesis, pues el fin último del tránsito de avenidas es proporcionar los caudales máximos para diferentes períodos de retorno a partir de los caudales de entrada a nivel mensual, con el propósito de brindar un aporte en la gestión de los recursos hídricos y diseño de obras hidráulicas en la cuenca La Leche; al respecto Meselhe *et al.* (2021) aseveran que “los beneficios de este método en general ayuda a la toma de decisiones en la gestión del agua y brinda la oportunidad de medir la magnitud de los desastres relacionados con inundaciones a partir del análisis del caudal máximo” (p. 209); por lo señalado el desarrollo de la presente tesis aportó en el conocimiento de los caudales máximos cuyos resultados servirán para la mejor toma de decisiones en la gestión y planificación de los recursos hídricos de la cuenca La Leche, Región Lambayeque.

En cuanto al **primer objetivo específico**, se logró delimitar adecuadamente la cuenca La Leche usando la información digital disponible tipo Aster Dem y Shapefile tomando en consideración la red hidrográfica y el orden de los ríos, el cual está en concordancia con el artículo científico de Cyr-Gagnon y Rodriguez (2021), pues los investigadores sostienen que “el uso de softwares tipo GIS son los adecuados para la gestión de datos e implementación de sistemas de protección de recursos hídricos, añaden que esta metodología es compatible con ArcGis y su aplicación es muy importante en cuencas” (p. 2); así mismo, la presente tesis está en relación con la investigación de Zang *et al.* (2020) que consideran “hoy en día es imprescindible el uso del sistema de información geográfica en el estudio de cuencas para su posterior determinación del tránsito de avenidas” (p. 1).

También respecto al **primer objetivo específico**, Monteiro y Corrêa (2020), afirman que “el estudio de cuencas a través de su delimitación busca contribuir a la comprensión de la dinámica geomorfológica y la evolución de los accidentes geográficos, en tal sentido es recomendable aplicar sistemas georreferenciados para su óptimo estudio y evaluación” (p. 1); en ese sentido con la presente tesis de investigación fue necesario delimitar la cuenca hidrográfica La Leche para

comprender el comportamiento de misma en función a sus parámetros geomorfológicos tales como el área, perímetro, factor de forma, índice de compacidad, densidad de drenaje, curvas hipsométrica y frecuencia de altitudes

En razón al **segundo objetivo específico**, se determinaron las precipitaciones máximas de 24 horas de duración a partir del registro completo de precipitaciones de las estaciones meteorológicas disponibles en la cuenca La Leche, esto con el fin de generar los hidrogramas de salida de los caudales simulados con el modelamiento hidrológico tipo precipitación escorrentía; por lo expuesto, Arriola, Villegas y Sotomayor (2020) en su investigación destacan “el uso de un modelamiento hidrológico en base a las precipitaciones máximas de 24 horas de duración para la generación de hidrogramas de avenidas siendo esto muy indispensable incluso en cuencas con escasa información meteorológica e hidrométrica” (p. 2)

En semejanza a lo obtenido en el **segundo objetivo específico**, Branquinho *et al.* (2020) sostienen que “es indispensable el conocimiento de la distribución de la precipitación, pues afecta principalmente la producción agrícola y la actividad económica, además imponen la necesidad de un mayor conocimiento de la distribución de lluvias y de una simulación hidrológica” (p. 212), por lo expuesto, con el desarrollo de la presente tesis se pudo cuantificar las precipitaciones máximas de 24 horas para diferentes períodos de retorno que permitieron estimar la precipitación media, el polígono de Thiessen y generar un mapa de distribución de lluvias con ayuda de ArcGis, cuyo propósito fue conseguir el modelamiento hidrológico de la cuenca La Leche.

En lo que respecta al **tercer objetivo específico**, la obtención de los factores de relación (F.R.) correspondiente al tránsito de avenidas estuvo condicionada al tipo de obra hidráulica pues se escogió un aliviadero de descarga libre tipo Creager en la presente tesis de investigación por lo que este procedimiento se asemeja con la metodología aplicada por la tesis de Montero (2019) pues sostiene que “la aplicación del método Muskingum, permite conocer de manera particular las variables y registros de una estación hidrométrica con el fin de obtener información

histórica suficiente, cuyo análisis y resultados permiten tomar decisiones en problemas de ingeniería hidráulica” (p. 43).

Así mismo, respecto al **tercer objetivo específico**, Hernández (2018) en su tesis propone un “diagrama de flujo para la estimación del tránsito de avenidas” (p. 75) el cual es congruente con la metodología aplicada en la presente tesis haciendo válido su uso para otras cuencas del Perú. Por último, en el artículo de investigación de Gąsiorowski y Szymkiewicz (2020) acotan que “debido a que la ecuación general del tránsito de avenidas es dimensionalmente consistente, se deduce que siempre asegurará valores óptimos de los parámetros necesarios del propio método independientemente de sus valores iniciales” (p. 3162), en ese sentido la ecuación de correlación del tipo lineal correspondiente al tránsito de avenidas aplicado en la presente tesis logró establecer un coeficiente de determinación excelente ($R^2 = 1.00$).

Con relación al **cuarto objetivo específico**, los tránsitos de avenidas calculados con el método de Muskingum a partir de los hidrogramas de salida del modelamiento hidrológico para los diferentes períodos de retorno muestran una diversidad de valores de los coeficientes “ K_j ” pero muy semejantes, mientras que para el coeficiente “ X_j ” son iguales en todos los meses, tal y como lo demostraron de manera similar Arriola, Villegas, Arbulú y Sotomayor (2021) en su artículo científico que trató “sobre el tránsito de avenidas empleando el método de Muskingum en la cuenca Chicama ubicada en el norte peruano” (p. 15), validando de esta manera los resultados obtenidos en la presente tesis de investigación pues la cuenca La Leche se ubica también en esta zona del Perú.

Por otro lado en concordancia al **cuarto objetivo específico**, los investigadores Qiang *et al.* (2020) mencionan que “a pesar de su simpleza pero debido a su alta precisión en la estimación de tránsito de avenidas a partir del balance de caudales de entrada y salida, el método Muskingum permite optimizar los parámetros de la ecuación original” (p. 1), por lo mencionado se obtuvo un adecuado tránsito de los caudales máximos para cada período de retorno siendo estos resultados muy adecuados para la cuenca La Leche.

Adicionalmente al **cuarto objetivo específico**, para Bazargan y Norouzi (2018) en sus resultados logrados afirman que “si se utilizan valores promedio en lugar de valores constantes de “K”, “X” y “ Δt ” para los tránsitos de avenidas, la precisión del flujo de salida calculado se incrementará particularmente en la obtención caudal máximo del pico del hidrograma” (p. 4763), tal efecto se pudo ver en los caudales máximos deducidos del tránsito de avenidas que se obtuvieron para la estaciones hidrométricas de la cuenca La Leche. Si bien es cierto que el rango de valores de las constantes del método Muskingum es en cierta forma conocido, sin embargo, como afirman los mismos autores en otro artículo científico “el método Muskingum logró aumentar la precisión de los cálculos del tránsito de avenidas al estimar la sección máxima de inundaciones utilizando parámetros de dos inundaciones de línea de base en lugar de usar parámetros de una sola inundación” (Norouzi y Bazargan, 2020, p. 1897).

Finalmente, la investigación realizada por Okkan y Kirdemir (2020), recomienda “la aplicación de modelos híbridos que impliquen muchas más variables como la pendiente, rugosidad del río o velocidad que son ajenas al método original de Muskingum con el fin de generar hidrogramas de salida muchos más exactos” (p. 343) y para Pashazadeh y Javan (2020) proponen la “aplicación de neuronas artificiales como enfoques alternativos al método Muskingum para predecir los hidrogramas de salida, pues el desempeño mostrado por esta metodología alternativa es igual de eficiente que la de Muskingum” (p. 1349); por lo expresado por los investigadores y en contrastación con lo aplicado en la presente tesis se plantea que en futuras investigaciones se empleen otros métodos alternativos que permitan la validación y aplicación del método Muskingum en otras cuencas del Perú.

VI. CONCLUSIONES

Se delimitó la cuenca La Leche y se determinaron los principales parámetros geomorfológicos obteniéndose un área de 1606.61 Km², un perímetro de 297.25 Km, un índice de compacidad de 2.08 que indica que la cuenca es del tipo alargada y un factor de forma de 0.16 que según este valor indica que las descargas son de menor volumen aguas arriba, pero de mayor intensidad aguas abajo sobre todo en eventos de máximas avenidas, por último la curva hipsométrica señala que es una cuenca en fase de vejez o sedimentaria.

Se establecieron las precipitaciones máximas anuales de 24 horas de duración para cinco estaciones meteorológicas, pero de las cuales sólo tres estaciones (Incahuasi, Tocmoche e Incahuasi) pertenecen a la cuenca La Leche y las otras dos (Granja Militar Sasape y Jayanca) involucran a las cuencas Motupe y Chancay-Lambayeque, estas se consideraron para la interpolación con fines de estimación de las altitudes, la precipitación media, temperatura media mínima, temperatura media máxima, isoyetas, isotermas y el polígono de Thiessen, luego se aplicaron las distribuciones teóricas que permitieron realizar los hidrogramas de salida mediante el modelamiento hidrológico precipitación-escorrentía para varios períodos de retorno y cuyo caudal máximo fue de 5401.70 m³/s para un periodo de retorno de 1000 años.

Se analizaron los caudales de cada estación hidrométrica a nivel mensual y de cada año para un aliviadero de descarga libre tipo Creager de longitud de 200 metros, coeficiente de descarga de 2.00, una altura probable de descarga de 6.00 metros y un caudal máximo de 6000 m³/s, lo cual sustenta el tránsito de avenidas general que determinó el factor de relación de 0.333 con una correlación lineal perfecta para todos los meses y para todas las estaciones hidrométricas de la cuenca La Leche.

Se estimaron los tránsitos de avenidas con el método Muskingum correspondientes a las estaciones hidrométricas Puchaca, Desaguadero y Puente La Leche pertenecientes a la cuenca La Leche, a partir de los caudales máximos de los hidrogramas de salida del modelamiento hidrológico para los

diferentes períodos de retorno y cuyo caudal máximo fue de 5344.70 m³/s para un periodo de retorno de 1000 años.

VII. RECOMENDACIONES

Se recomienda delimitar la cuenca La Leche empleando otros sistemas digitales de georreferenciación como ERDAS Imagine, PCI Geomatics, TNTmips y/o GDAL/OGR, que permitan validar y actualizar aún más los datos geográficos y parámetros geomorfológicos de la cuenca hidrográfica, por otro lado se propone que en otras cuencas se delimiten a nivel de microcuencas para un mayor detalle en el análisis de los parámetros geomorfológicos, sin embargo con respecto a la presente investigación no fue necesario aplicar este procedimiento debido a que cada microcuenca no tiene una estación meteorológica propia por ende no se podría estimar el tránsito de avenidas para diferentes períodos de retorno.

Se sugiere emplear otras distribuciones teóricas respecto a las aplicadas en la presente tesis para la estimación de las precipitaciones máximas de 24 horas de duración con la finalidad de conocer los hidrogramas de salida probablemente más extremos que los determinados en esta tesis de investigación a fines de comparación y mediante otros tipos de modelamientos hidrológicos que involucren más elementos como la evapotranspiración, infiltración y humedad de la cuenca.

A manera de recomendación se insta a las autoridades en gestión de recursos hídricos de la cuenca La Leche instalar estaciones de aforos o del tipo hidrométrica en las zonas de cabecera de la cuenca pues el tanto el factor de relación como el tránsito de avenidas general obtenidos con el desarrollo de la presente tesis no reflejan los valores exactos de esas zonas pues su cálculo dependió directamente de los hidrogramas de salida del modelamiento hidrológico según cada período de retorno y de la interpolación de caudales máximos de las tres estaciones hidrométricas que dispone actualmente la cuenca.

Los parámetros del método Muskingum obtenidos en la presente investigación son válidos sólo para la cuenca La Leche, por lo que se recomienda ampliar la aplicación de este método a otras cuencas que puedan determinar sus propias constantes, sin embargo, se podrían extrapolar los datos de los tránsitos de avenidas mediante un análisis regional a nivel de las cuencas del norte del Perú.

REFERENCIAS

AKBARI, Reyhaneh, HESSAMI-KERMANI, Masoud y SHOJAEE, Saeed. Flood Routing: Improving outflow using a new non-linear Muskingum model with four variable parameters coupled with PSO-GA algorithm. *Water Resources Management* [en línea]. Vol.34, no.10, pp.3291-3316. 01 de agosto de 2020. [Fecha de consulta: 07 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02613-5>. ISSN: 0920-4741

ALHUMOUD, Jasem y ALMASHAN, Nourah. Muskingum method with variable parameter estimation. *Mathematical Modelling of Engineering Problems* [en línea]. Vol.6, no.3, pp.355-362. Setiembre de 2019. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.18280/mmep.060306>. ISSN: 2369-0739

Estimación del tránsito de avenidas empleando el método de Muskingum en la estación El Tambo de la cuenca Chicama, Perú por Guillermo Arriola [et al]. *Revista Científica Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación* [en línea]. Vol.8, no.2, pp.15-29. 28 de setiembre de 2021. [Fecha de consulta: 07 de agosto de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.26495/icti.v8i2.1901>. ISSN: 2313-1926

ARRIOLA, Guillermo, VILLEGAS, Luis y SOTOMAYOR, Gioconda. Análisis de las curvas de infiltración para determinar caudales máximos en zonas de escasa información ante eventos extremos. *Revista Científica Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación* [en línea]. Vol.7, no.1. 31 de julio de 2020. [Fecha de consulta: 07 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.26495/icti.v7i1.1352>. ISSN: 2313-1926

Flow routing in the natural channel of the Ichu river experimental basin through artificial neural networks por Iván Ayala [et al]. *Journal of Environmental Science and Engineering A* [en línea]. Vol.7, no.10, pp.387-403. 2018. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.17265/2162-5298/2018.10.001>. ISSN: 2162-5301

Reverse flood routing in rivers using linear and nonlinear muskingum models por Meisam Badfar [et al]. *Journal of Hydrologic Engineering* [en línea]. Vol.20, no.6. 01 de junio de 2021. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021]. Disponible en [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002088](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002088). ISSN: 1084-0699

BAENA, Guillermina. Metodología de la investigación [en línea]. 3.a. ed. México: Grupo Editorial Patria, 2017 [Fecha de consulta: 14 de mayo de 2021]. Disponible en http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abuso/Articulos/metodologia%20de%20la%20investigacion.pdf. ISBN: 978-607-744-748-1

BARBETTA, Silvia, MORAMARCO, Tommaso y PERUMAL, Muthiah. A Muskingum-based methodology for river discharge estimation and rating curve development under significant lateral inflow conditions. *Journal of Hydrology* [en línea]. Vol.554, pp.216-232. Noviembre de 2017. [Fecha de consulta: 07 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.022>. ISSN: 0022-1694

BAZARGAN, Jalal y NOROUZI, Hadi. Investigation the effect of using variable values for the parameters of the linear Muskingum method using the Particle Swarm Algorithm (PSO). *Water Resources Management* [en línea]. Vol.32, no.14, pp.4763-4777. 01 de noviembre de 2018. [Fecha de consulta: 07 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2082-6>. ISSN: 0920-4741

Flood hydrograph with synthetic unit hydrograph routing por Mahendra Bhuyan [et al]. *Water Resources Management* [en línea]. Vol.29, no.15, pp.5765-5782. 01 de diciembre de 2015. [Fecha de consulta: 07 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1145-1>. ISSN: 0920-4741

Generalized storage equations for flood routing with nonlinear Muskingum models por Omid Bozorg-Haddad [et al]. *Water Resources Management* [en línea].

Vol.33, no.8, pp.2677-2691. 15 de junio de 2019. [Fecha de consulta: 07 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02247-2>. ISSN: 0920-4741

Application of a new hybrid non-linear Muskingum model to flood routing por Omid Bozorg-Haddad [et al]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management* [en línea]. Vol.173, no.3, pp.109-120. 01 de junio de 2020. [Fecha de consulta: 07 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.1680/jwama.19.00075>. ISSN: 1741-7589

Rainfall distribution in a Region of Amazon rainforest in the north of Mato Grosso por Rodrigo Branquinho [et al]. *Acta Agronómica* [en línea]. Vol.69, no.3, pp. 212-218. 2020. [Fecha de consulta: 21 de junio de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.15446/acag.v69n3.84187>. ISSN: 0120-2812

CHOCONTÁ, Yolima y MARTÍNEZ, Amparo. Determinación de las constantes K y X para el tránsito de crecientes en la estación El Trébol en el río Tucurínca de la sierra nevada de Santa Marta Departamento de Magdalena, por el método de Muskingum. Tesis (Título de Ingeniera Civil). Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016. Disponible en <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3205?mode=full>

CYR-GAGNON, Julia y RODRÍGUEZ, Manuel. Optimizing data management for municipal source water protection. *Land Use Policy* [en línea]. Vol.100. Enero de 2021. [Fecha de consulta: 23 de junio de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.12.035>. ISSN: 0264-8377

Flood routing in river reaches using a three-parameter Muskingum model coupled with an improved bat algorithm por Saeed Farzin [et al]. *Water* [en línea]. Vol.10, no.9. 24 de agosto de 2018. [Fecha de consulta: 07 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.3390/w10091130>. ISSN: 2073-4441

- Comparison of numerical schemes of river flood routing with an inertial approximation of the Saint Venant equations por Alice Fassoni-Andrade [et al]. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* [en línea]. Vol.23, no.10. 2018. [Fecha de consulta: 07 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0318170069>. ISSN: 2318-0331
- FENTON, John. Flood routing methods. *Journal of Hydrology* [en línea]. Vol.570, pp.251-264. Marzo de 2019. [Fecha de consulta: 09 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.006>. ISSN: 0022-1694
- FONSECA, Sigfredo, LAVADO, Karina y CHUNGA, Julio. Estudio hidrológico de la Unidad Hidrográfica Motupe La Leche: Resumen Ejecutivo. Informe Principal. Lima: Dirección de Calidad y Evaluación de los Recursos Hídricos-Autoridad Nacional del Agua, 2019. Disponible en <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4629>
- GAŚIOROWSKI, Dariusz y SZYMKIEWICZ, Romuald. Identification of parameters influencing the accuracy of the solution of the nonlinear Muskingum equation. *Water Resources Management* [en línea]. Vol.34, no.10, pp.3147-3164. 01 de agosto de 2020. [Fecha de consulta: 23 de junio de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02599-0>. ISSN: 0920-4741
- HERNÁNDEZ-ANDRADE, Juan y MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, Sergio. Tránsito de avenidas en vasos: ¿hidrológico o hidráulico?. *Tecnología y Ciencias del Agua* [en línea]. Vol.10, no.6, pp.147-177. 01 de noviembre de 2019. [Fecha de consulta: 09 de mayo de 2021]. Disponible en <http://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-06-06>. ISSN: 0187-8336
- HERNÁNDEZ, Juan. Implementación en MapWindow GIS de un método hidrológico de tránsito de avenidas en vasos. Tesis (Magíster en Ingeniería Civil). Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguascalientes, 2018. Disponible en <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/1560>

HIRPURKAR, Piyusha y GHARE, Aniruddha. Parameter estimation for the nonlinear forms of the Muskingum model. *Journal of Hydrologic Engineering* [en línea]. Vol.20, no.8, pp.147-177. 05 de noviembre de 2015. [Fecha de consulta: 09 de mayo de 2021]. Disponible en <http://doi.org/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001122>. ISSN: 1084-0699

KANG, Ling y ZHOU, Liwei. Parameter estimation of variable-parameter nonlinear Muskingum model using excel solver. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* [en línea]. Vol.121, no.5. 16 de marzo de 2018. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021]. Disponible en <http://doi.org/10.1088/1755-1315/121/5/052047>. ISSN: 1755-1315

KANG, Ling, ZHOU, Liwei y ZHANG, Song. Parameter estimation of two improved nonlinear Muskingum models considering the lateral flow using a hybrid algorithm. *Water Resources Management* [en línea]. Vol.31, no.14, pp.4449-4466. 01 de noviembre de 2017. [Fecha de consulta: 09 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1758-7>. ISSN: 0920-4741

Estimation of nonlinear parameters of the type 5 Muskingum model using SOS algorithm por Saeid Khalifeh [et al]. *MethodsX* [en línea]. Vol.7. 2020. [Fecha de consulta: 09 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105398>. ISSN: 2352-3409

Hydrologic validation and flood analysis por Witold Krajewski [et al]. *Advances in Global Change Research* [en línea]. Vol.69, pp.609-624. 2020. [Fecha de consulta: 14 de junio de 2021]. Disponible en https://doi.org/10.1007/978-3-030-35798-6_8. ISSN: 1574-0919

LLOCCLLA, Jose. Determinación del caudal máximo de avenida con fines de diseño del aliviadero de la presa Querobamba, Cangallo-Ayacucho-2016. Tesis (Para obtener el título de Ingeniero Agrícola). Ayacucho: Universidad Nacional

de San Cristóbal de Huamanga, 2016. Disponible en <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/3726>

MARTÍNEZ, Helbira. Evaluación hidrológica para la determinación de caudales máximos en la subcuenca del río Sayacc, Vischongo-Vilcashuamán- Ayacucho, 2018. Tesis (Para obtener el título de Ingeniera Agrícola). Ayacucho: Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, 2019. Disponible en <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/3599>

Continental scale heterogeneous channel flow routing strategy for operational forecasting models por Ehab Meselhe [et al]. *Journal of The American Water Resources Association* [en línea]. Vol.57, no.2, pp.209-221. Abril de 2021. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12847>. ISSN: 1093-474X

MONTEIRO, Kleython de Araujo y CORRÊA, Antonio. Application of morphometric techniques for the delimitation of Borborema highlands, northeast of Brazil, eastern escarpment from drainage knick-points. *Journal of South American Earth Sciences* [en línea]. Vol.103. Noviembre de 2020. [Fecha de consulta: 23 de junio de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102729>. ISSN: 0895-9811

MONTERO, Mario. Estudio del tránsito de avenidas del río Piura por el método de Muskingum-Tramo Tambogrande-Piura. Caso: Inundación Universidad Nacional de Piura-Marzo 2017. Tesis (Para optar el título profesional de Ingeniero Civil). Piura: Universidad Nacional de Piura, 2019. Disponible en <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/1832>

Comparative analysis of variants of Muskingum model por Abdur Nawaz [et al]. *Water and Energy International* [en línea]. Vol.63r. no.7, pp.64-73. Octubre de 2020. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021]. Disponible en <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:wei&volume=63r&issue=7&article=013>. ISSN: 0974-4711

NIAZKAR, Majid y AFZALI, Seied. Application of new hybrid optimization technique for parameter estimation of new improved version of Muskingum model. *Water Resources Management* [en línea]. Vol.30, no.13, pp.4713-4730. 01 de octubre de 2016. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1449-9>. ISSN: 0920-4741

NOROUZI, Hadi y BAZARGAN, Jalal. Flood routing by linear Muskingum method using two basic floods data using particle swarm optimization (PSO) algorithm. *Water Science and Technology: Water Supply* [en línea]. Vol.20, no.5, pp.1897-1908. 01 de agosto de 2020. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.2166/ws.2020.099>. ISSN: 1606-9749

OKKAN, Umut y KIRDEMIR, Umut. Locally tuned hybridized particle swarm optimization for the calibration of the nonlinear Muskingum flood routing model. *Journal of Water and Climate Change* [en línea]. Vol.11, no.1S, pp.1897-1908. 2020. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.015>. ISSN: 2040-2244

PASHAZADEH, Arash y JAVAN, Mitra. Comparison of the gene expression programming, artificial neural network(ANN), and equivalent Muskingum inflow models in the flood routing of multiple branched rivers. *Theoretical and Applied Climatology* [en línea]. Vol.139, no.3-4, pp.1349-1362. 01 de febrero de 2020. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03032-2>. ISSN: 0177-798X

PAZOS, Marlon y MAYORGA, David. Hidrología agrícola [en línea]. Babahoyo, Ecuador: Centro de Investigación y Desarrollo Profesional, 2019 [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2021]. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/338669423_Hidrologia_Agricola

Parameter estimation of muskingum model based on whale optimization algorithm with elite opposition-based learning por Zou Qiang [et al]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [en línea]. Vol.780, no.2. 09 de abril

de 2020. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.1088/1757-899X/780/2/022013>. ISSN: 1757-8981

REQUENA, David. Tránsito de avenidas en el cauce natural del río Ichu mediante redes neuronales artificiales. Tesis (Para optar el título profesional de Ingeniero Civil). Huancavelica: Universidad Nacional de Huancavelica, 2018. Disponible en <https://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/1674>

Utilization of Muskingum-Cunge method for the inverse routing of shatt al-kufa to regulate flood wave in a stream por Jumana Sahib [et al]. *Journal of Green Engineering* [en línea]. Vol.11, no.2, pp.1427-1441. 2021. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021]. Disponible en <http://www.jgenng.com/volume11-issue2.php>. ISSN: 1757-8981

TYPSA: Grupo Tyspa. (27 de agosto, 2019). Programa Subsectorial de Irrigaciones del Ministerio de Agricultura y Riego. Disponible en <https://controldeinundacionesriolaleche.pe/wp-content/uploads/2019/09/7.-Mesa-T%C3%A9cnica-Validaci%C3%B3n-Entregable-4-27-08-19.pdf>

USDA. Part 630. Hydrology National Engineering Handbook. [en línea]. Washington: United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service, 2014 [fecha de consulta: 09 de mayo de 2021]. Chapter 17. Flood Routing. Disponible en <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=35555.wba>

A new runoff routing scheme for Xin'anjiang model and its routing parameters estimation based on geographical information por Shuaihong Zang [et al]. *Water* [en línea]. Vol.12, no.12. Diciembre de 2020. [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021]. Disponible en <https://doi.org/10.3390/w12123429>. ISSN: 2073-4441

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de operacionalización de variables

Variable dependiente	Definición conceptual	Definición operacional	Indicador	Unidad del indicador	Escala de medición	Instrumento de recolección de datos
VD1: Tránsito de avenidas	Es aquel procedimiento que sirve para determinar el hidrograma de salida de una presa, dando un hidrograma de entrada (Hernández-Andrade y Martínez-Martínez, 2019, p. 148).	La variable se va a medir en función a las características de la obra hidráulica y su tránsito de avenidas	Caudal	Metros cúbicos sobre segundo (m ³ /s)	Intervalo	Formato de recolección de datos N°1: Parámetros para el análisis del tránsito de avenidas
			Tiempo	Horas (hrs)		
			Volumen del aliviadero	Metros cúbicos (m ³)		
			Altura del agua sobre el aliviadero	Metros (m)		
VD2: Método Muskingum	Es un método efectivo para el tránsito de avenidas en hidrología e ingeniería de recursos hídricos (Kang, Zhou y Zhang, 2018, p. 1).	La variable se va a medir en función a la ecuación general del método Muskingum	Parámetro K ó K _j y X _j	Adimensional	Intervalo	Formato de recolección de datos N°2: Parámetros el análisis del método Muskingum
			Intervalo de tiempo Δt ó Δt_j	Horas (hrs)		
			Constante C1	Adimensional		
			Constante C2			
			Constante C3	Metros cúbicos sobre segundo (m ³ /s)		
Caudal de entrada I _j y salida O _j						

Variable independiente	Definición conceptual	Definición operacional	Indicadores	Unidad del indicador	Escala de medición	Instrumento de recolección de datos
VI: Cuenca La Leche	La cuenca hidrográfica es una interacción compleja entre la generación de escorrentía y el transporte de agua en toda una red de drenaje (Krajewski, Quintero, El Saadani y Goska, 2020, p.609).	La variable se va a medir considerando los parámetros geomorfológicos de la cuenca y sus principales elementos meteorológicos	Parámetros geomorfológicos de la cuenca	Variable	Intervalo	Formato de recolección de datos N°3: Parámetros de cuenca
			Caudal	Metros cúbicos sobre segundo (m ³ /s)		Formato de recolección de datos N°4: Registro de caudales
			Precipitación	Milímetros (mm)		Formato de recolección de datos N°5: Registro de precipitación
			Temperatura	Grados Celsius (°C)		Formato de recolección de datos N°6: Registro de temperatura

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2: Formato de recolección de datos N°1 - Parámetros para el análisis del tránsito de avenidas

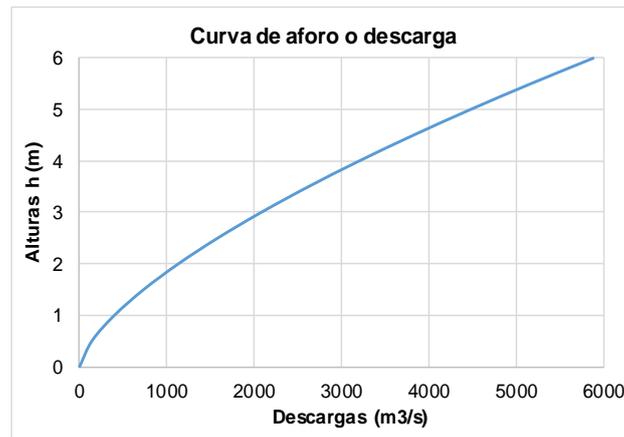
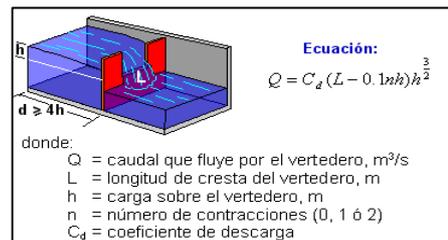
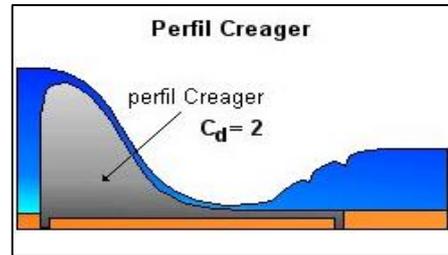
1. Datos de entrada:

Tipo de estructura de descarga = Aliviadero de descarga libre con perfil Creager

Cd =	2.00
L (m) =	200.00
n =	0.00
h1 (m) =	0.00
h2 (m) =	0.50
h3 (m) =	1.00
h4 (m) =	1.50
h5 (m) =	2.00
h6 (m) =	2.50
h7 (m) =	3.00
h8 (m) =	3.50
h9 (m) =	4.00
h10 (m) =	4.50
h11 (m) =	5.00
h12 (m) =	5.50
h13 (m) =	6.00

Caudales de aliviadero	
Q1 (m3/s) =	0.00
Q2 (m3/s) =	141.42
Q3 (m3/s) =	400.00
Q4 (m3/s) =	734.85
Q5 (m3/s) =	1131.37
Q6 (m3/s) =	1581.14
Q7 (m3/s) =	2078.46
Q8 (m3/s) =	2619.16
Q9 (m3/s) =	3200.00
Q10 (m3/s) =	3818.38
Q11 (m3/s) =	4472.14
Q12 (m3/s) =	5159.46
Q13 (m3/s) =	5878.78

Volumenes del aliviadero	
S1 (m3) =	0.00
S2 (m3) =	509116.88
S3 (m3) =	1440000.00
S4 (m3) =	2645448.92
S5 (m3) =	4072935.06
S6 (m3) =	5692099.79
S7 (m3) =	7482459.49
S8 (m3) =	9428976.61
S9 (m3) =	11520000.00
S10 (m3) =	13746155.83
S11 (m3) =	16099689.44
S12 (m3) =	18574046.41
S13 (m3) =	21163591.38

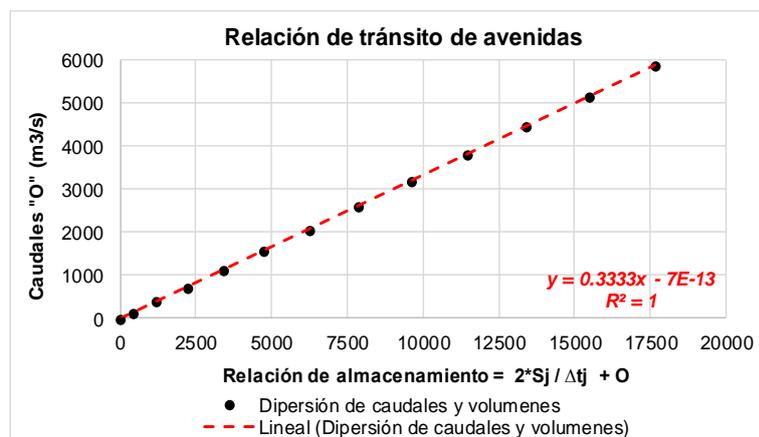


2. Determinación de la relación de almacenamiento para el aliviadero de descarga libre tipo Creager

Condición inicial: Qaliviadero = 0

O1 =	0.00	(2Sj/Δtj) + O	0.000
O2 =	141.42		424.264
O3 =	400.00		1200.000
O4 =	734.85		2204.541
O5 =	1131.37		3394.113
O6 =	1581.14		4743.416
O7 =	2078.46		6235.383
O8 =	2619.16		7857.481
O9 =	3200.00		9600.000
O10 =	3818.38		11455.130
O11 =	4472.14		13416.408
O12 =	5159.46		15478.372
O13 =	5878.78		17636.326

F.R. = 0.3333



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3: Formato de recolección de datos N°2 - Parámetros para el análisis del método Muskingum

Ij = Qregis	Ij+1 + Ij	(2Sj/Δtj) + Oj + Ij+1 + Ij - 2*Oj	Oj = ((2Sj/Δtj) + Oj) * F.R.	S inicial = Ij - Oj	S promedio	S acumulado	Relaciones = Xj*Ij + (1 - Xj)*Oj				
							Xj =0.10	Xj =0.12	Xj =0.14	Xj =0.16	Xj =0.18
6.400	6.400	6.400	2.133	4.267	4.267	4.267	2.560	2.645	2.730	2.816	2.901
8.000	14.400	16.534	5.511	2.489	3.378	7.645	5.760	5.809	5.859	5.909	5.959
8.960	16.960	22.472	7.490	1.470	1.980	9.625	7.637	7.666	7.696	7.725	7.755
7.050	16.010	23.502	7.833	-0.783	0.343	9.968	7.755	7.739	7.724	7.708	7.692
13.520	20.570	28.406	9.468	4.052	1.635	11.602	9.873	9.954	10.035	10.116	10.197
14.180	27.700	37.170	12.389	1.791	2.922	14.524	12.568	12.604	12.640	12.675	12.711
28.700	42.880	55.273	18.422	10.278	6.034	20.559	19.450	19.656	19.861	20.067	20.272
38.110	66.810	85.238	28.410	9.700	9.989	30.547	29.380	29.574	29.768	29.962	30.156
22.140	60.250	88.668	29.553	-7.413	1.144	31.691	28.812	28.664	28.515	28.367	28.219
31.950	54.090	83.652	27.881	4.069	-1.672	30.019	28.288	28.369	28.451	28.532	28.614
35.980	67.930	95.820	31.937	4.043	4.056	34.075	32.341	32.422	32.503	32.584	32.664
25.470	61.450	93.396	31.129	-5.659	-0.808	33.267	30.563	30.450	30.337	30.224	30.110
46.110	71.580	102.718	34.236	11.874	3.108	36.375	35.423	35.661	35.898	36.136	36.373
14.660	60.770	95.016	31.669	-17.009	-2.567	33.807	29.968	29.628	29.288	28.947	28.607
3.140	17.800	49.478	16.491	-13.351	-15.180	18.627	15.156	14.889	14.622	14.355	14.088
24.050	27.190	43.686	14.561	9.489	-1.931	16.696	15.510	15.699	15.889	16.079	16.269
6.150	30.200	44.765	14.920	-8.770	0.360	17.056	14.043	13.868	13.692	13.517	13.342
17.700	23.850	38.775	12.924	4.776	-1.997	15.059	13.401	13.497	13.592	13.688	13.783
10.820	28.520	41.447	13.814	-2.994	0.891	15.950	13.515	13.455	13.395	13.335	13.275
14.660	25.480	39.299	13.098	1.562	-0.716	15.234	13.254	13.286	13.317	13.348	13.379
24.740	39.400	52.502	17.499	7.241	4.401	19.635	18.223	18.368	18.513	18.658	18.802
14.780	39.520	57.024	19.006	-4.226	1.507	21.142	18.584	18.499	18.415	18.330	18.245
11.400	26.180	45.192	15.062	-3.662	-3.944	17.198	14.696	14.623	14.550	14.476	14.403
11.300	22.700	37.767	12.588	-1.288	-2.475	14.723	12.459	12.433	12.407	12.382	12.356
23.130	34.430	47.022	15.672	7.458	3.085	17.808	16.418	16.567	16.716	16.866	17.015

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4: Formato de recolección de datos N°3 - Parámetros de cuenca

PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS DE LA CUENCA LA LECHE							
PARÁMETROS				UNIDAD	NOMENCLATURA	VALORES OBTENIDOS	
1. Superficie total de la cuenca (A)				Km ²	Area total (At)	1606.61	
2. Perímetro de la cuenca (P)				Km	Perímetro total (Pt)	297.25	
3. Relaciones de forma	3.1 Factores de cuenca	3.1.1 Índice o Coeficiente de Compacidad (K)		Adimensional	$K = 0.28 P / (At)^{1/2}$	2.08	
		3.1.2 Factor de forma	Longitud del río más largo (LB)		Km	LB	100.25
			Ancho Medio (Am)		Km	$Am = Area\ cuenca / LB$	16.03
			Factor de Forma (Ff)		Adimensional	$Ff = A / (L*L)$	0.160
	3.2 Rectangulo equivalente		3.2.1 Lado Mayor (L)		Km	$L = \frac{K * \sqrt{A}}{1.12} * \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K} \right)^2} \right)$	136.89
			3.2.2 Lado Menor (l)		Km	$l = \frac{K * \sqrt{A}}{1.12} * \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K} \right)^2} \right)$	11.74
4. Relaciones de drenaje	4.1 Número de ríos para los diferentes grados de ramificación de toda la cuenca			Adimensional	Orden 1	510.43	
				Adimensional	Orden 2	175.12	
				Adimensional	Orden 3	86.85	
				Adimensional	Orden 4	96.98	
				Adimensional	Orden 5	16.70	
	4.2 Longitud total de los ríos de diferentes grados para toda la cuenca			Km	Lt	886.08	
	4.3 Densidad de drenaje para toda la cuenca			Km / Km ²	$Dd = Lt / At$	0.55	
5. Pendiente media del cauce principal según Taylor - Schwarz				%	$S = \left(\frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{(S_i)^{1/2}}} \right)^2$	3.425	

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 5: Formato de recolección de datos N°4 – Registro de caudales

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1985	4.13	20.83	28.94	5.76	15.57	10.73	3.80	6.78	12.99	40.88	0.42	13.47
1986	21.75	5.25	20.74	32.00	14.10	1.78	3.33	9.79	1.02	5.56	13.98	10.41
1987	17.65	20.59	49.08	12.63	8.15	0.80	4.96	4.31	1.41	3.10	2.66	6.70
1988	9.01	10.71	16.45	27.08	11.35	1.91	0.35	0.38	2.54	9.26	13.86	3.77
1990	13.85	14.49	22.29	8.53	4.98	20.54	9.35	0.44	1.08	30.91	18.53	9.44
1991	10.50	40.49	14.27	15.52	6.98	1.09	0.84	0.23	0.50	0.78	2.99	2.97
1992	15.68	21.34	26.95	58.13	4.10	7.59	2.59	3.18	2.73	5.51	5.41	10.10
1995	30.00	30.00	14.27	8.46	115.00	1.81	9.74	0.40	7.54	4.17	7.54	30.00
1996	10.76	35.00	40.00	20.00	11.47	5.31	1.30	6.93	1.27	12.44	7.07	5.52
1997	4.28	45.00	12.48	20.00	20.00	3.12	1.22	1.90	2.84	3.61	7.57	22.00
1999	35.00	64.00	52.64	53.33	33.21	16.89	17.25	2.94	10.09	9.51	5.52	39.78
2000	10.32	49.61	200.00	100.00	30.91	36.81	9.16	5.90	8.54	5.36	0.62	21.73
2005	2.27	13.48	31.48	8.80	2.93	2.56	0.60	0.17	0.03	4.19	12.86	1.62
2008	16.69	32.90	46.61	15.25	19.62	8.89	4.97	16.81	5.45	15.68	9.96	15.50
2009	93.09	20.35	96.58	20.34	16.09	45.33	16.45	5.33	16.24	4.48	8.88	19.18
2010	7.94	39.71	19.12	49.35	23.82	5.46	3.58	3.62	19.64	14.94	0.91	5.58
2011	10.25	13.19	7.01	62.03	25.58	6.12	2.38	2.21	4.38	4.58	5.13	55.86
2012	72.79	64.89	35.61	31.48	12.28	3.12	3.50	0.83	0.61	47.06	13.49	18.75
2016	3.50	30.00	25.00	30.00	10.00	7.00	5.00	1.00	0.16	0.60	0.40	5.00
2017	14.00	40.00	100.00	55.00	35.00	12.00	12.00	10.00	4.00	9.00	5.00	9.00
2018	22.00	13.00	15.00	28.00	22.00	15.00	10.00	4.50	0.50	0.50	20.00	18.00
2019	9.00	80.00	40.00	40.00	20.00	10.00	30.00	2.50	0.50	6.00	12.00	22.00
2020	9.00	6.00	15.00	40.00	18.00	10.00	10.00	0.30	7.00	5.00	0.20	20.00

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 6: Formato de recolección de datos N°5 – Registro de precipitaciones

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1964	21.00	7.00	12.00	18.00	2.00	3.00	3.00	5.50	0.00	0.00	14.00	9.00
1965	5.00	10.00	15.50	23.00	12.00	4.00	6.00	2.50	28.00	15.00	24.00	28.00
1966	21.00	15.00	19.00	12.00	10.00	1.50	4.00	5.00	8.00	11.00	14.00	5.00
1967	34.00	23.00	16.00	4.00	2.50	2.00	8.50	4.00	5.00	10.00	10.00	4.00
1968	4.00	5.00	8.00	9.00	4.00	0.50	3.00	7.00	4.00	19.00	9.50	0.00
1969	15.00	28.00	15.00	21.00	6.00	10.00	0.50	3.00	9.00	8.00	14.00	10.00
1970	12.00	12.00	19.00	9.00	13.00	4.00	0.50	3.00	7.50	33.00	15.00	14.00
1971	8.00	18.00	43.00	16.00	16.00	4.50	0.50	2.00	8.00	10.00	14.00	10.00
1972	11.00	25.00	28.00	20.00	1.50	4.00	3.50	3.00	5.00	0.50	5.00	18.00
1973	9.50	16.00	25.00	35.00	7.00	7.00	5.00	10.00	14.00	11.00	7.00	6.50
1974	6.00	30.00	12.00	8.00	7.00	11.50	12.00	15.00	12.00	15.00	10.00	10.00
1975	8.00	15.00	31.00	20.00	12.00	6.00	4.50	13.00	4.00	21.00	20.00	0.00
1976	18.00	24.00	14.00	13.50	15.00	4.00	1.50	0.00	1.50	5.00	8.50	6.00
1977	23.00	18.00	21.00	14.00	8.00	7.00	0.00	0.00	9.00	3.00	8.00	7.00
1978	4.50	10.00	22.00	13.00	11.50	4.00	10.00	7.00	4.50	5.00	8.00	5.00
1979	16.50	14.00	15.00	14.00	8.00	5.00	0.50	6.00	9.00	3.50	5.00	3.00
1980	5.00	10.00	27.50	19.00	5.50	0.00	1.50	0.00	0.00	21.00	12.00	6.00
1981	5.00	21.00	25.00	25.00	5.00	7.00	4.00	3.50	0.00	5.00	13.00	20.00
1982	10.00	11.00	4.00	21.00	7.00	3.00	0.00	0.00	6.50	18.00	15.00	37.00
1983	23.00	32.00	26.00	18.00	15.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.00	2.00	10.00
1984	6.00	33.00	18.00	8.00	12.00	5.00	5.50	0.00	0.00	10.00	3.00	3.00
1985	2.00	2.00	8.00	5.00	10.00	0.00	0.00	0.00	5.50	20.00	0.00	5.00
1986	4.00	10.00	20.00	34.00	3.50	0.00	7.00	5.00	3.50	5.50	10.00	13.00
1987	26.00	23.00	30.00	25.00	5.00	0.00	2.00	0.00	5.00	11.50	4.50	5.00
1988	18.50	12.00	7.00	43.00	26.00	1.00	0.00	0.00	5.00	13.00	13.00	6.00

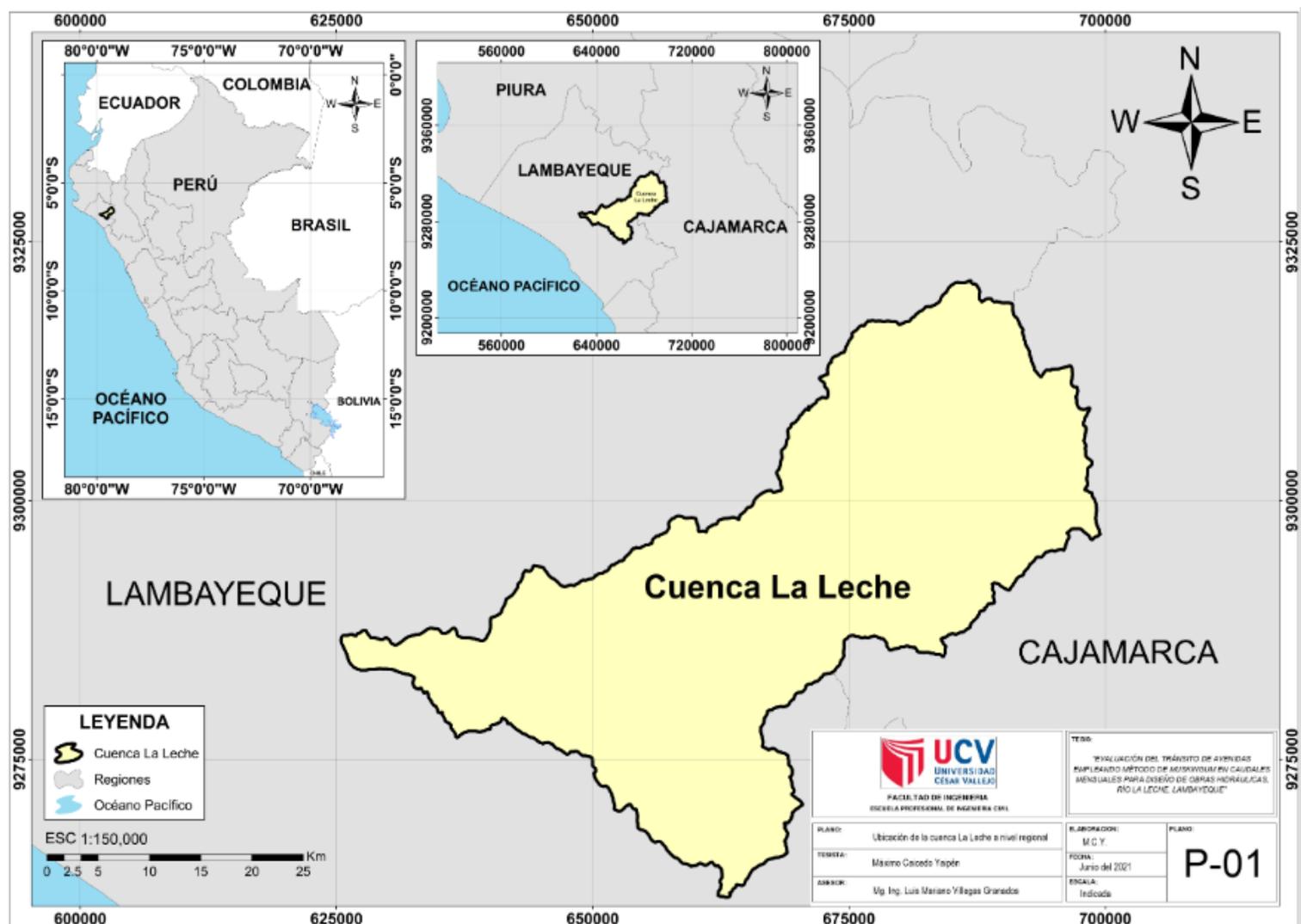
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 7: Formato de recolección de datos N°6 – Registro de temperaturas

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1965	34.6	34.6	34.8	33	33.4	32.2	30	30.2	30.9	31	31.6	32.7
1966	34.2	35.2	35	35.2	32.4	29.6	29	30	29.2	30.4	31.2	32.8
1967	33.8	34.9	34.8	35	33.4	29.3	28	28.6	29.6	30.4	29.6	31.4
1968	34.4	34.8	34.2	35	31.4	28.4	29.4	30	29.9	30.8	31.9	32.8
1969	34.8	36	35.7	34.8	33.4	32.4	29.1	30.5	31.5	31.8	32.5	33.4
1970	36.6	35.9	35.2	34.8	33	28.8	27.1	29	30	30.2	31.6	32.8
1971	33.4	34.6	33.2	32.2	30	29.2	30.2	28	29.8	29.6	31.8	33
1972	34	35.2	35.8	34.2	33.4	32.4	31.4	31	31.4	32.2	32.2	34.8
1973	35	35.5	36	34.3	32.4	29.6	27.6	30.8	29.8	29.7	32.2	33.1
1974	34	36	34.7	34.6	31.5	29.2	28.8	28.6	29.2	29.7	31.2	32.5
1975	33.8	34.2	32.7	33.2	31.6	29.8	28.3	28.8	29.6	31	30.8	32.6
1976	35	34.8	35	34.7	32.8	31.4	30.5	30	31.8	31.6	33	35.8
1977	34.8	35	36.4	35.8	32.5	31	29	29.6	30.8	31.2	32.6	34.1
1978	35.8	35.6	36.4	34	33	30.1	29.7	30.2	31.6	32	33.4	35
1979	35.5	35.8	35.8	35	31.8	31	30	30.2	32	31.8	33.5	34.2
1980	36.4	35.6	37	37.4	34.5	32.4	30.1	30.4	31.6	32.6	33.2	33.2
1981	34.1	35.6	35.4	34.4	30.8	29	29.2	30.8	30.8	32.6	32.8	35.1
1982	35.4	36.2	36.1	34.8	32.7	30.9	30.6	30.4	32	33.3	36.3	36.1
1983	35.4	35.6	36	34	33.8	32.8	32	31	31	31	32	33.2
1984	34.2	35	33.8	34.4	33	31.2	29.6	31	33.2	34.2	33.2	33.4
1985	34.2	35	35.2	34.4	34	31.2	31	32.2	33	34	33.2	34
1986	34.2	35.2	35	34.2	33	29	29	29.6	32	30.6	31.8	33.8
1987	34.8	35	35.6	34.4	33.6	31.6	31	30.4	31.4	32.4	32	33.6
1988	34.8	35.2	35	34.4	33.4	29.8	28		28.6	30.6	31.8	33
1989	34.2	34.2	35	33	31.6	29	28	28	30	31	33	33
1990			35.2	35	32	30.2	28.8	30.2	30.2	30.6	32.4	33.2

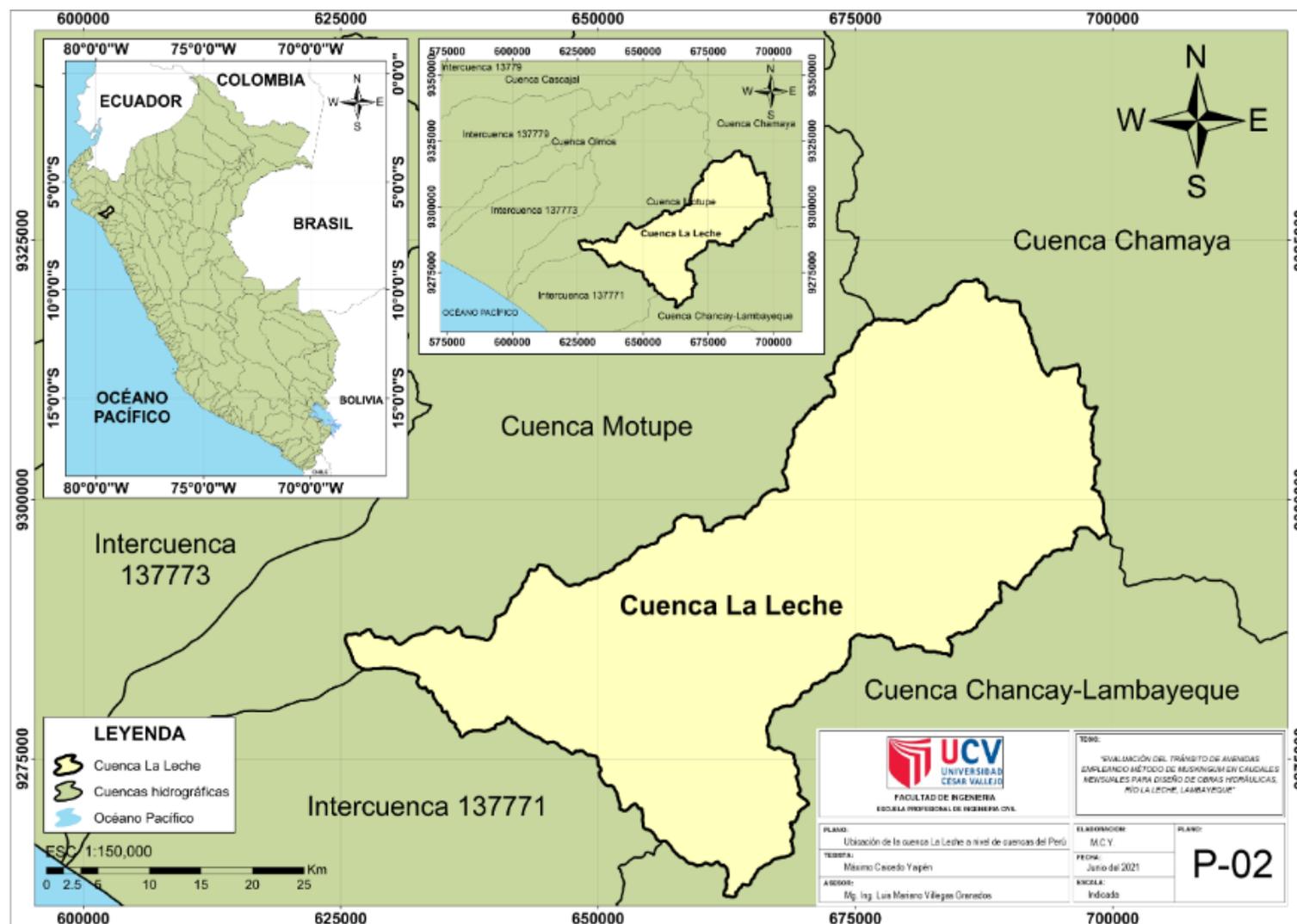
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 8: Ubicación de la cuenca a nivel regional



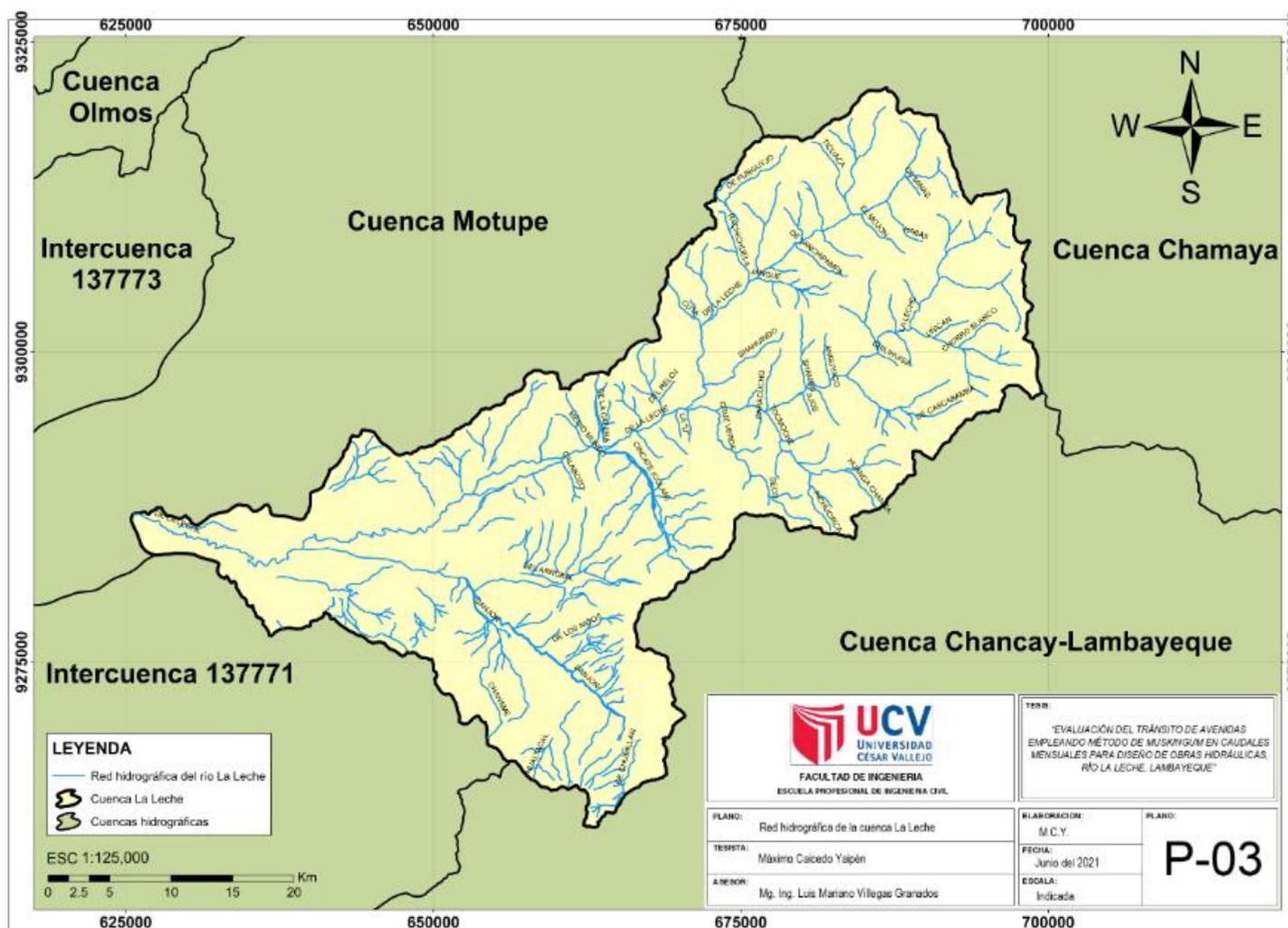
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9: Ubicación de la cuenca a nivel de cuencas del Perú



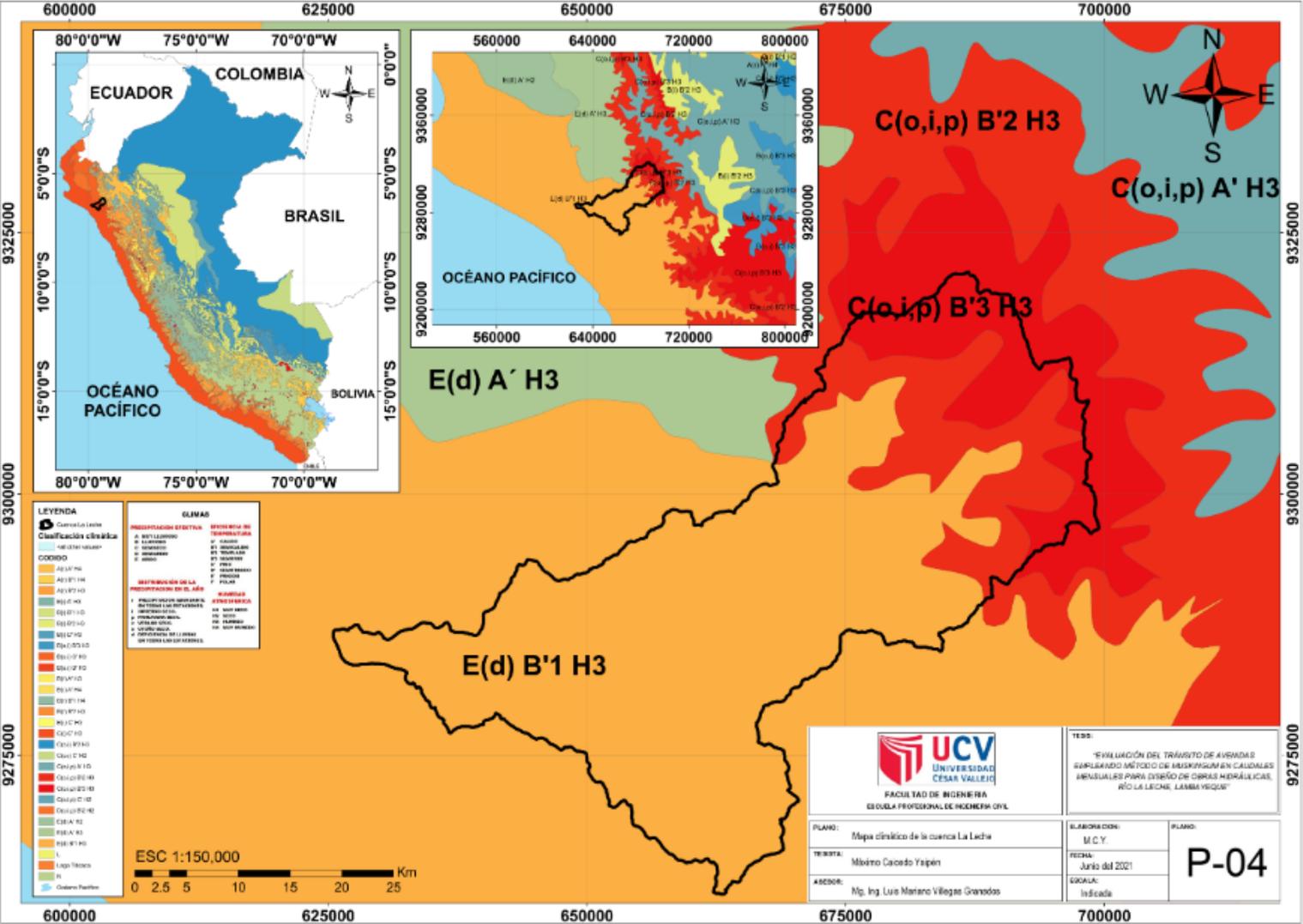
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 10: Red hidrográfica de la cuenca La Leche



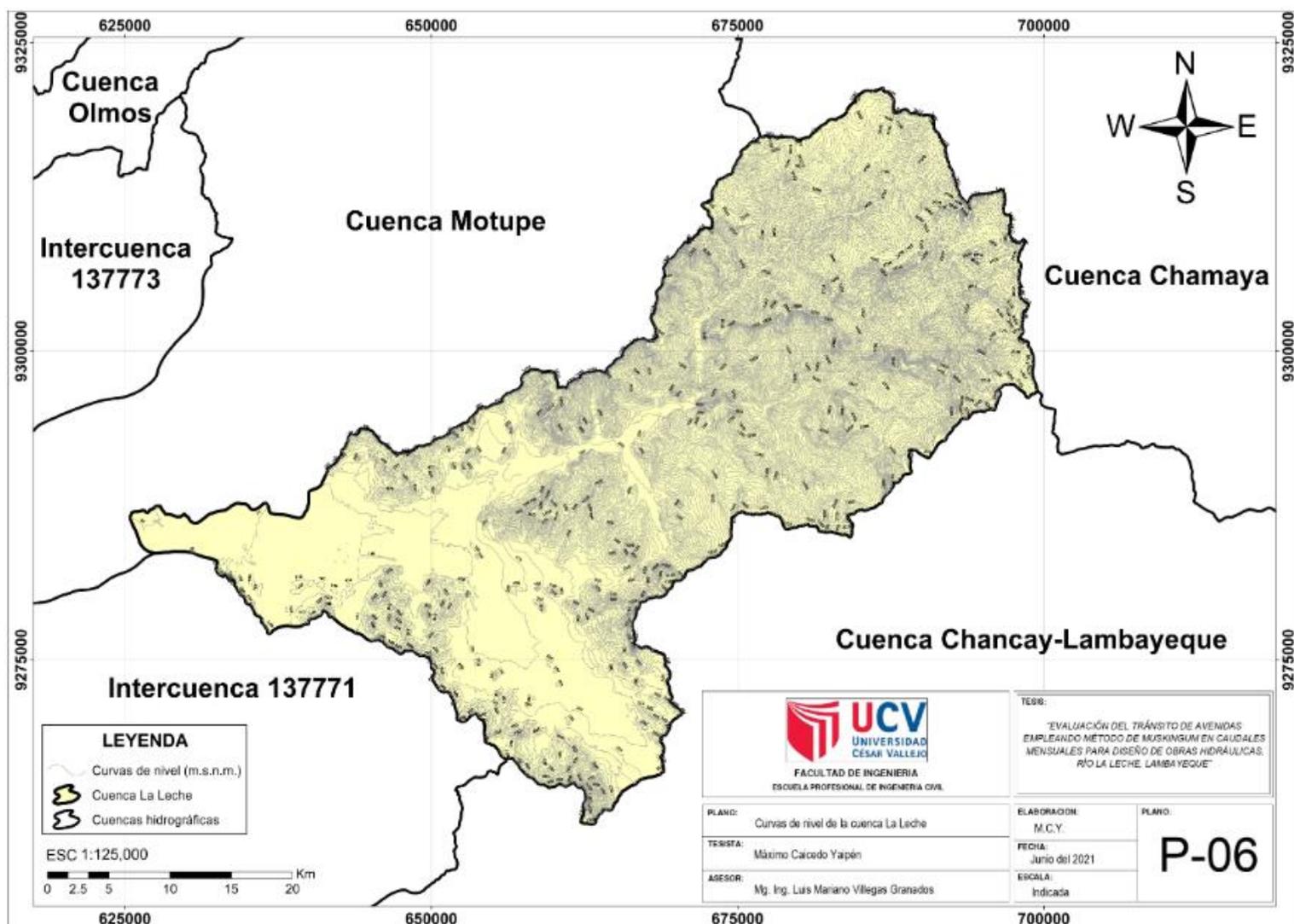
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 11: Mapa climático de la cuenca La Leche



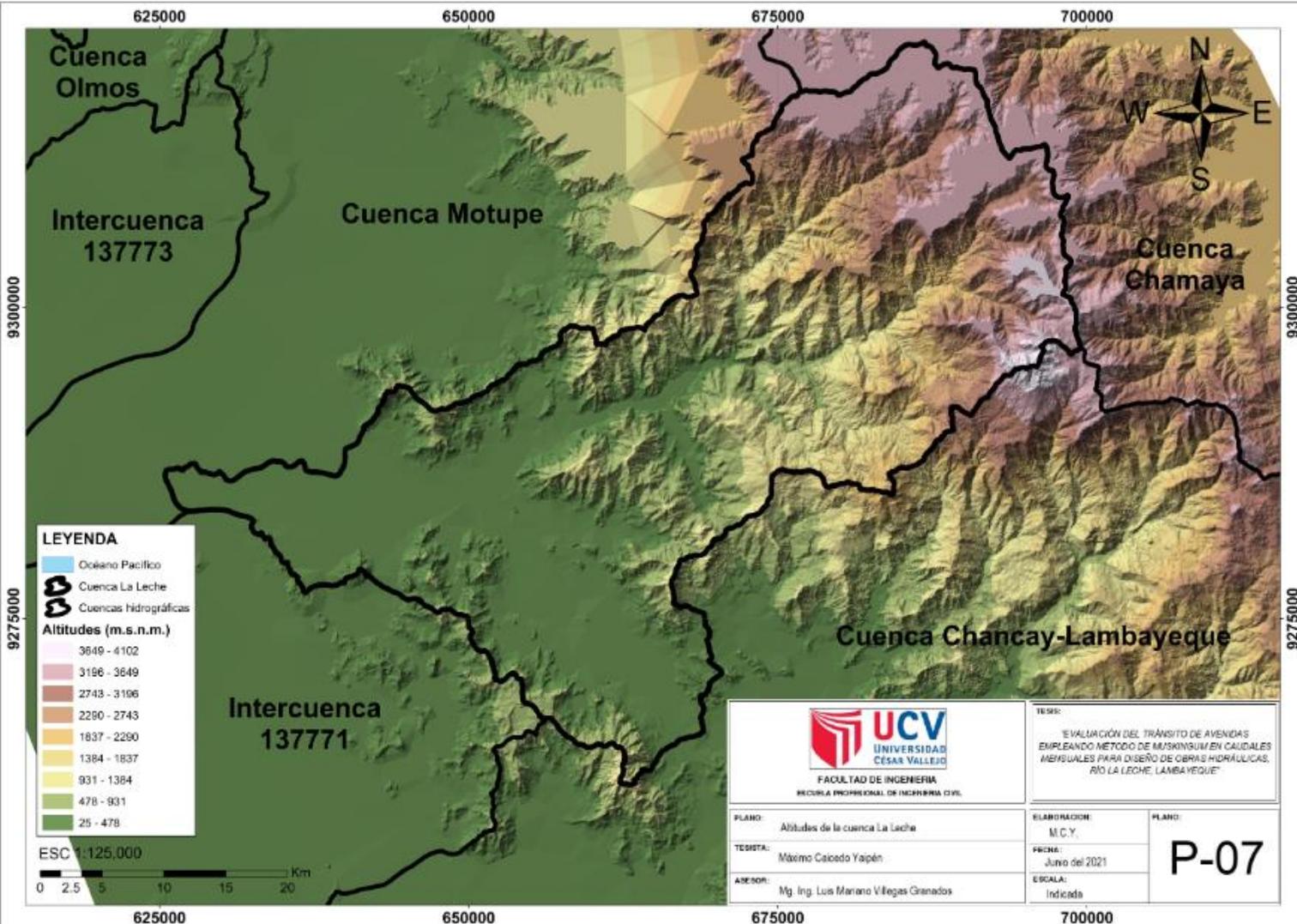
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 13: Curvas de nivel de la cuenca La Leche



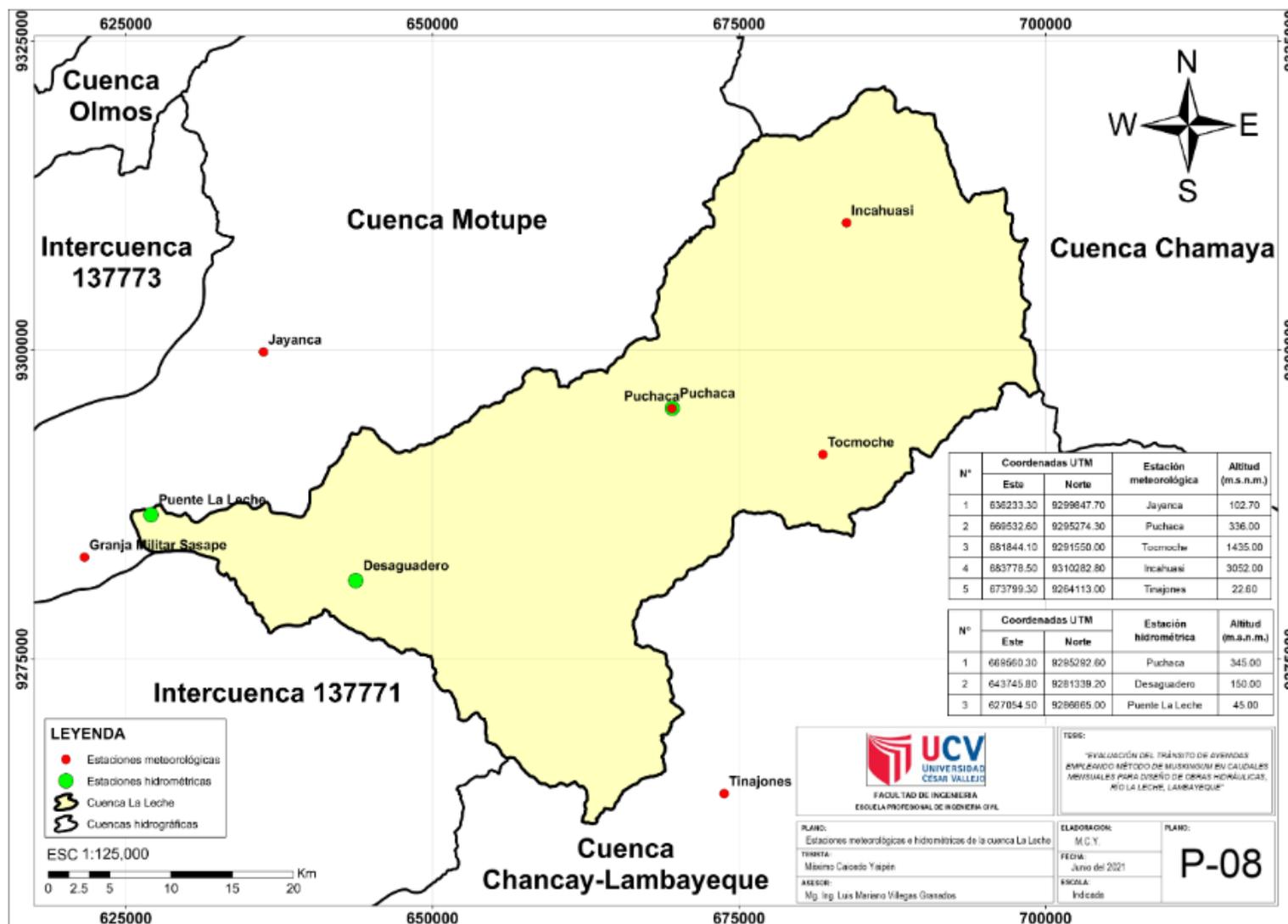
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 14: Altitudes de la cuenca La Leche



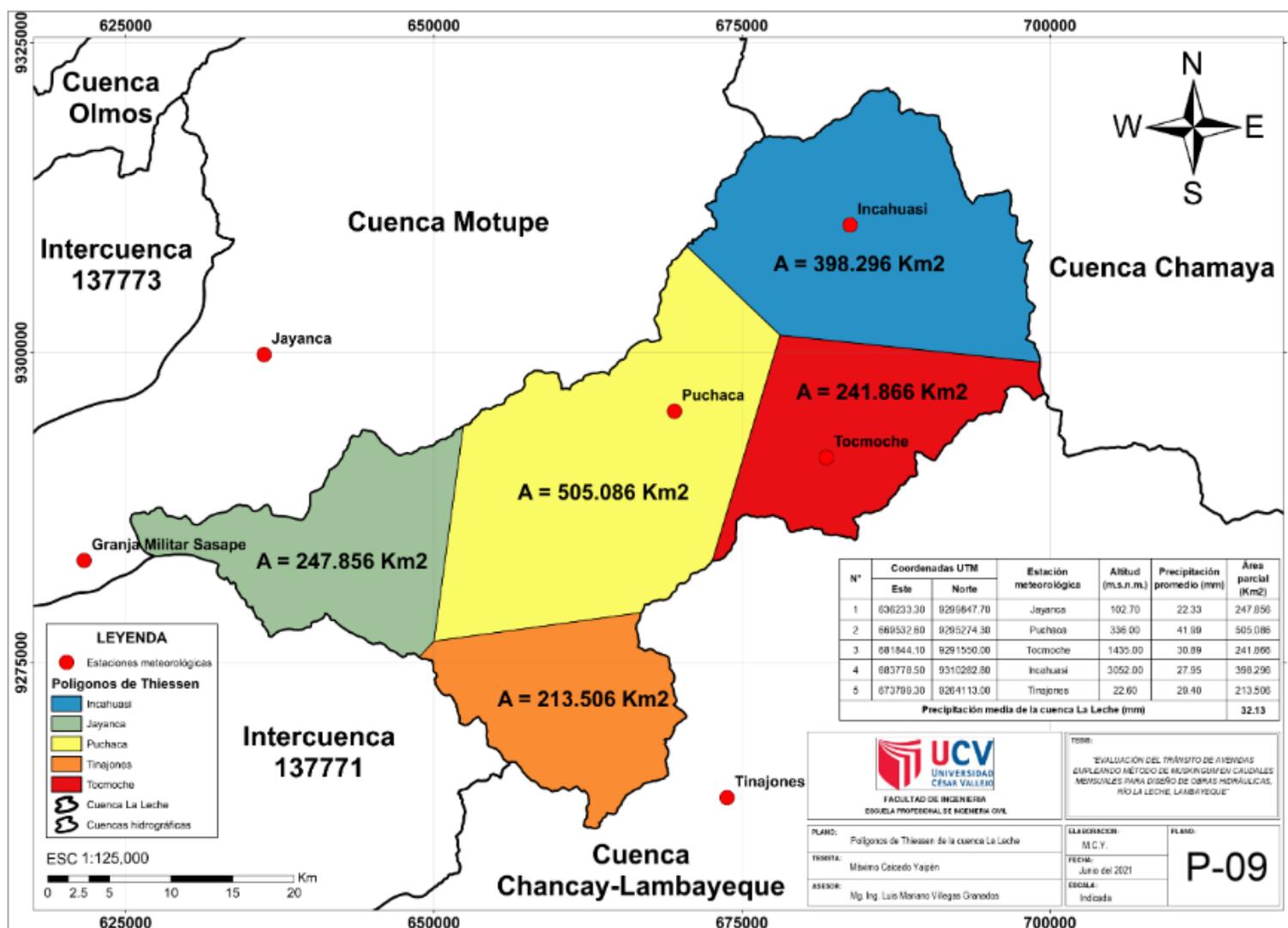
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 15: Estaciones meteorológicas e hidrométricas de la cuenca La Leche



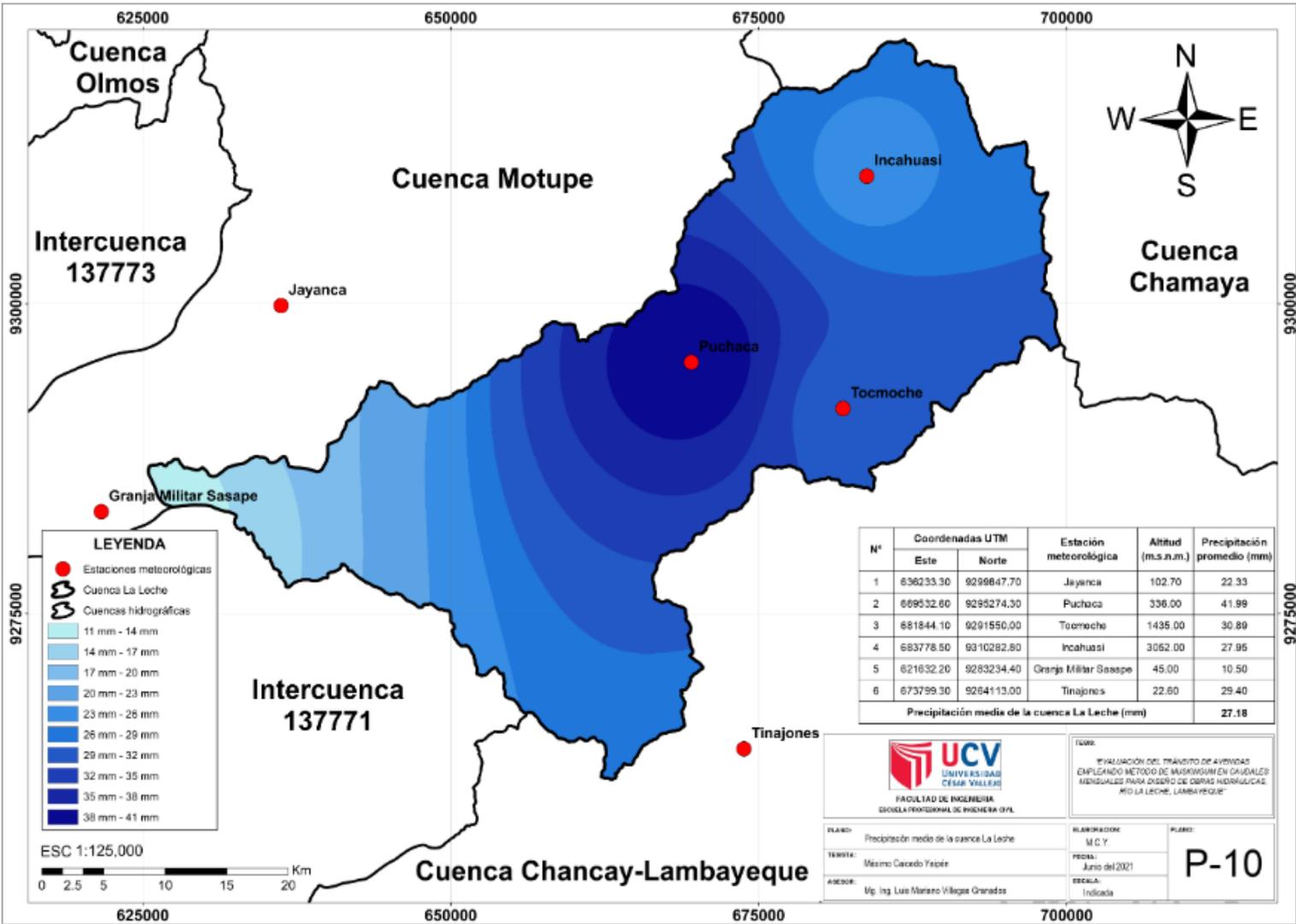
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 16: Polígono de Thiessen de la cuenca La Leche



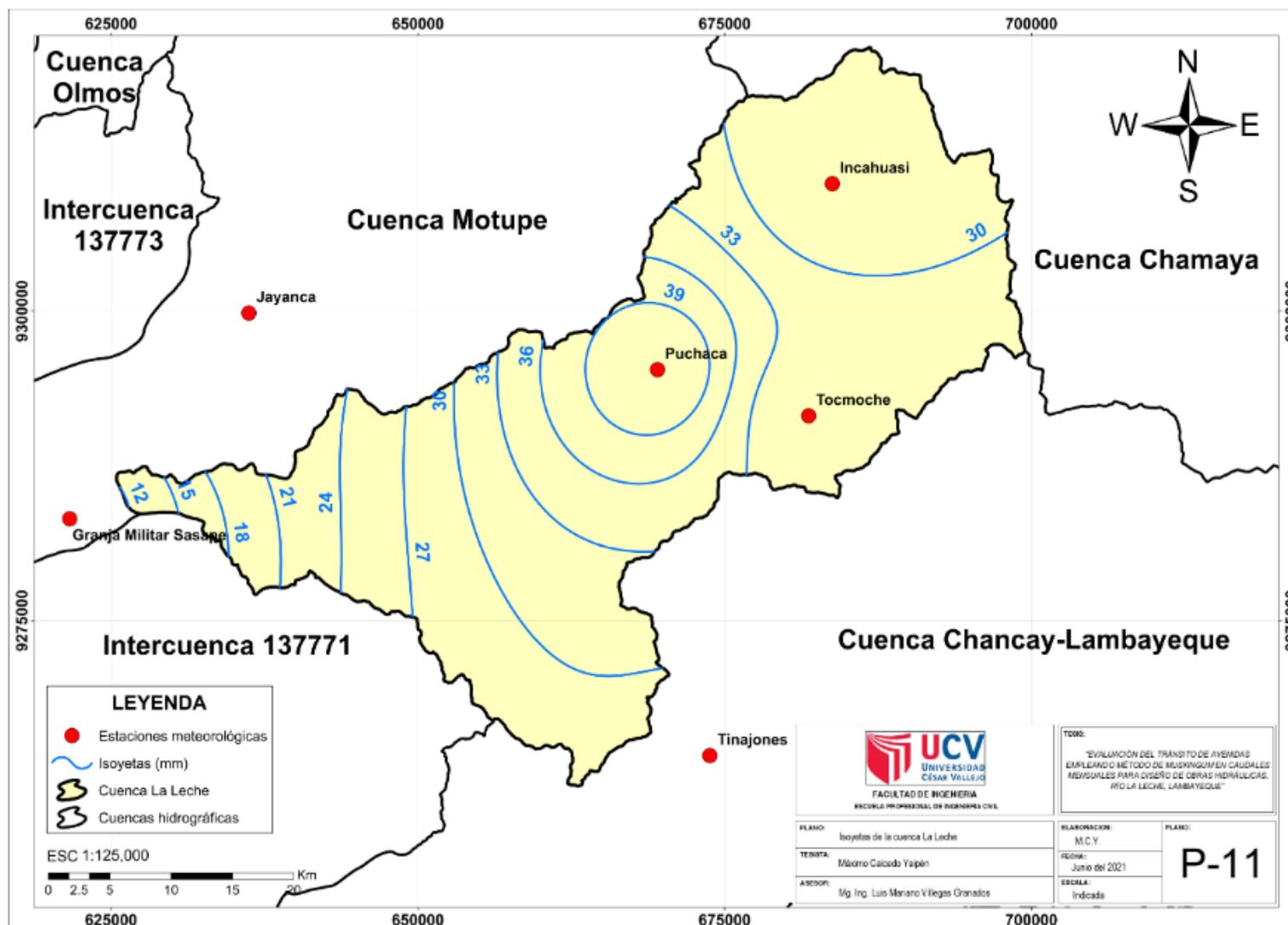
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 17: Precipitación media de la cuenca La Leche



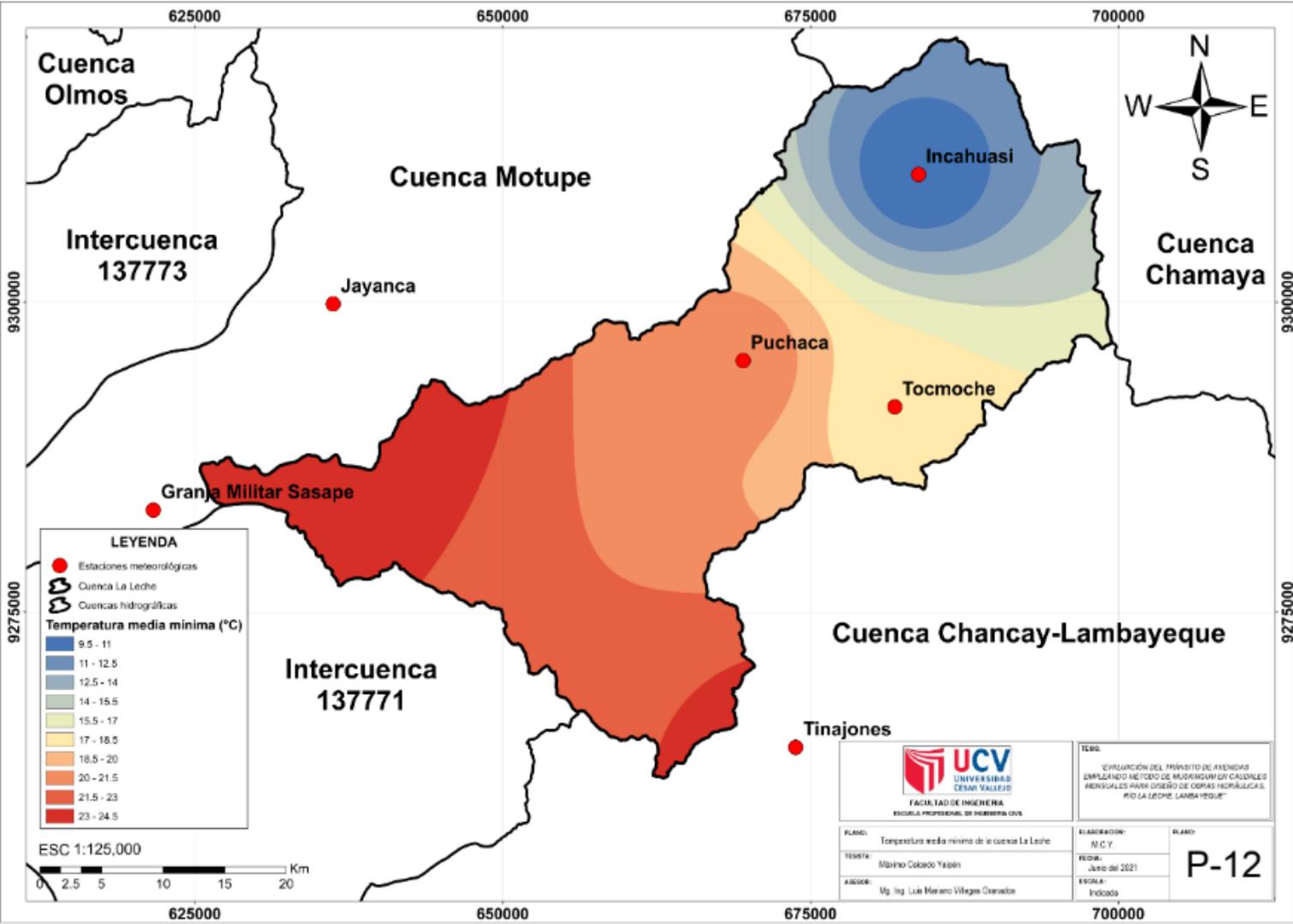
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 18: Isoyetas de la cuenca La Leche



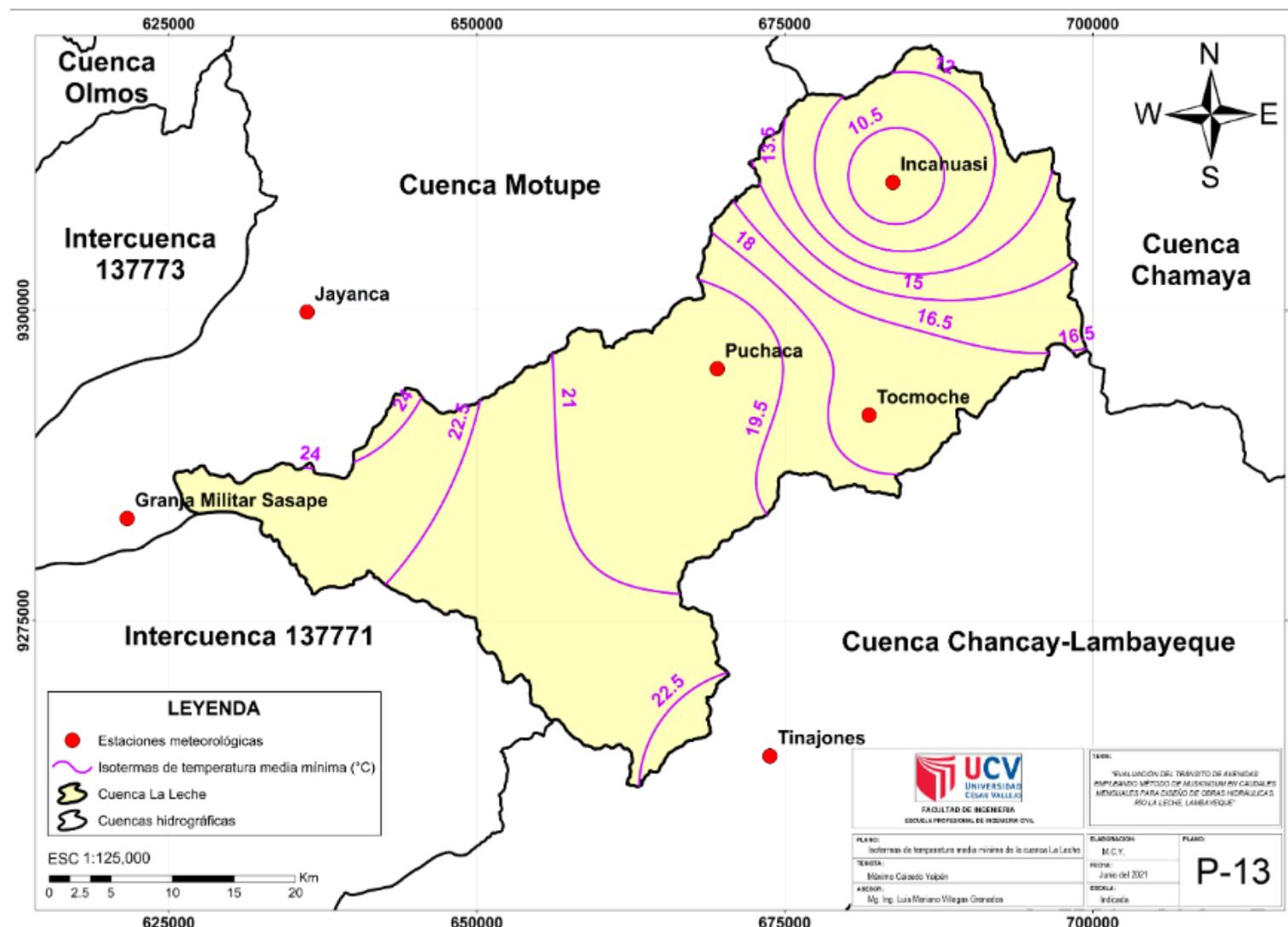
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 19: Temperatura media mínima de la cuenca La Leche



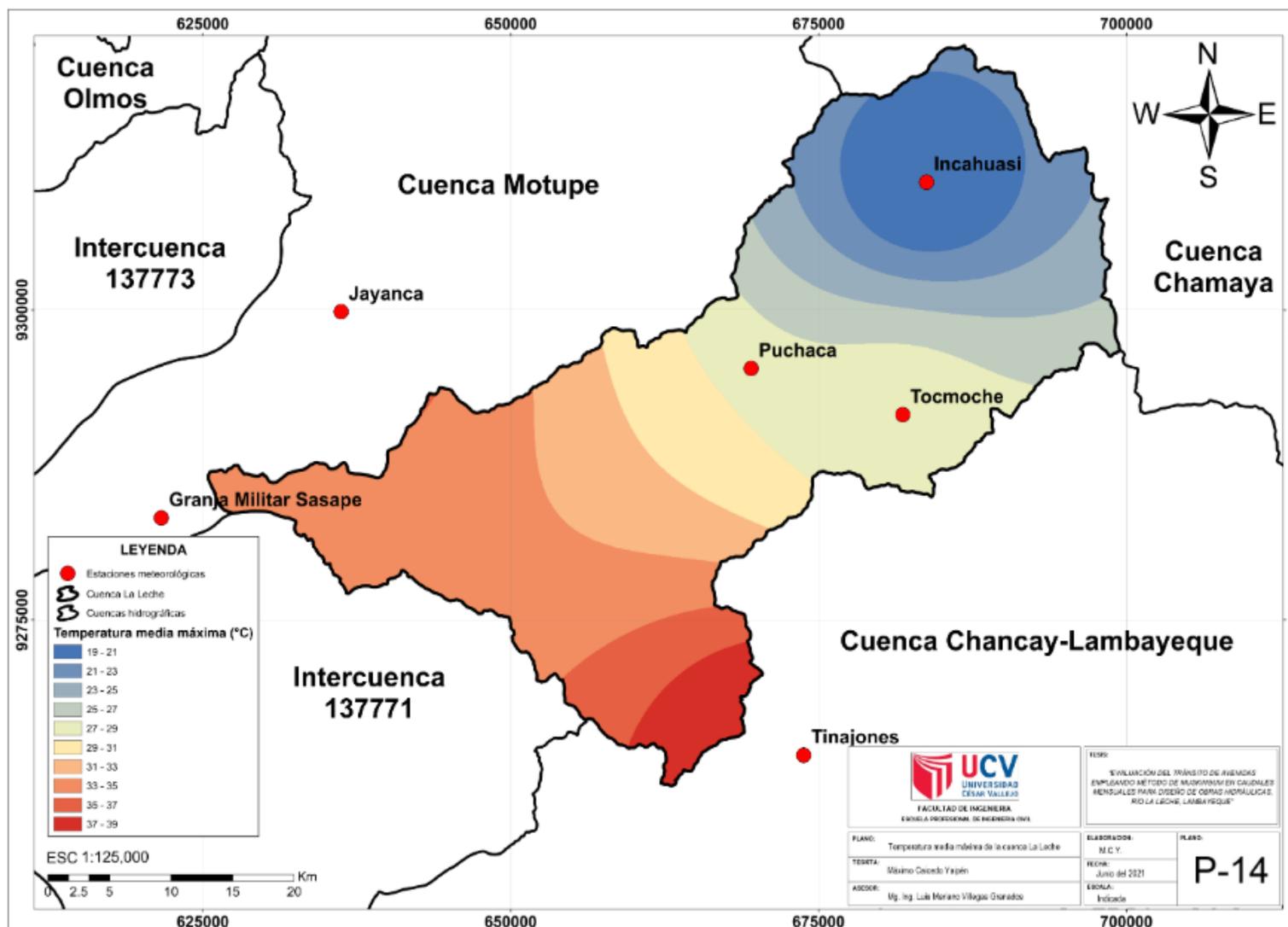
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 20: Isotermas de temperatura media mínima de la cuenca La Leche



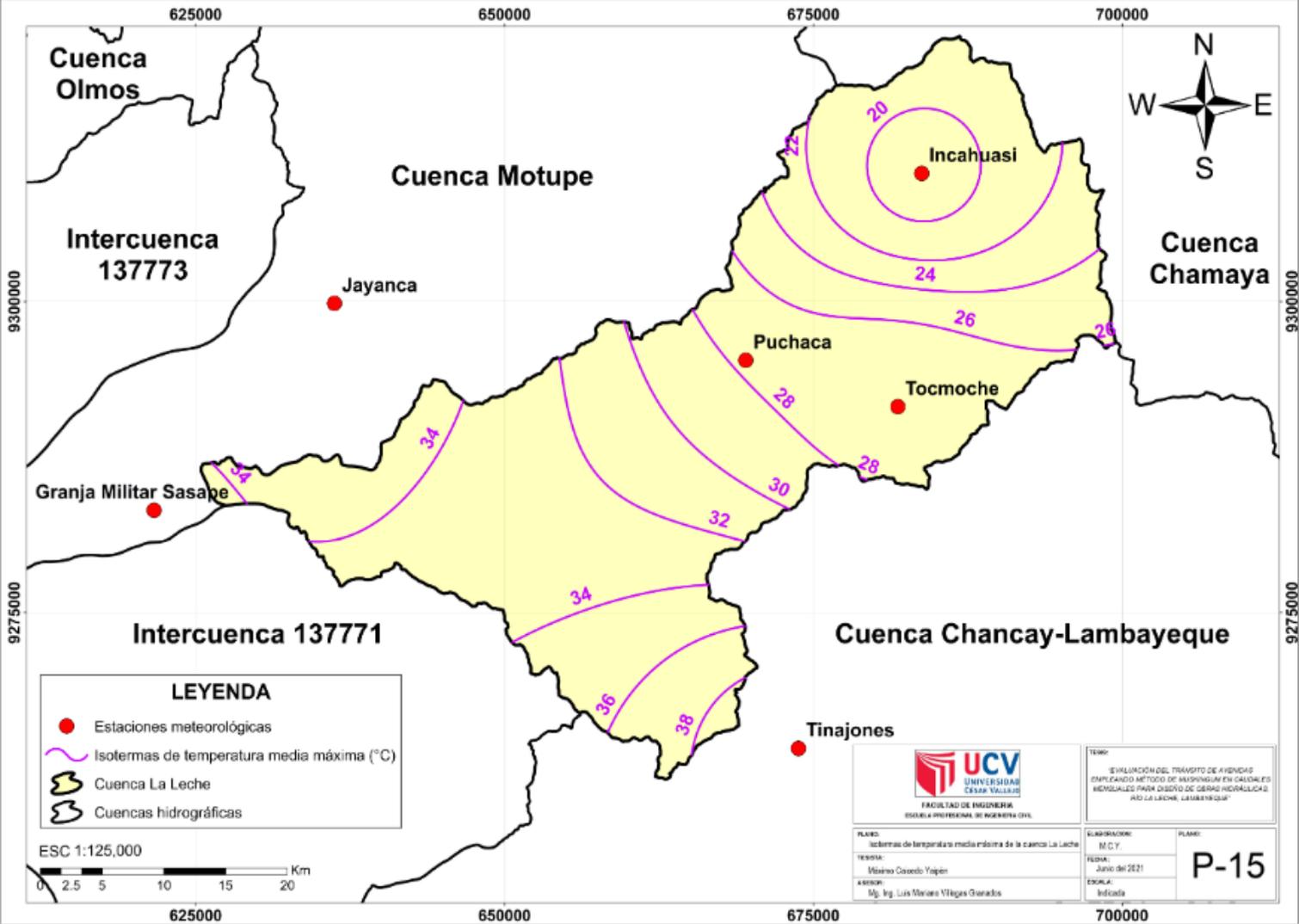
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 21: Temperatura media máxima de la cuenca La Leche



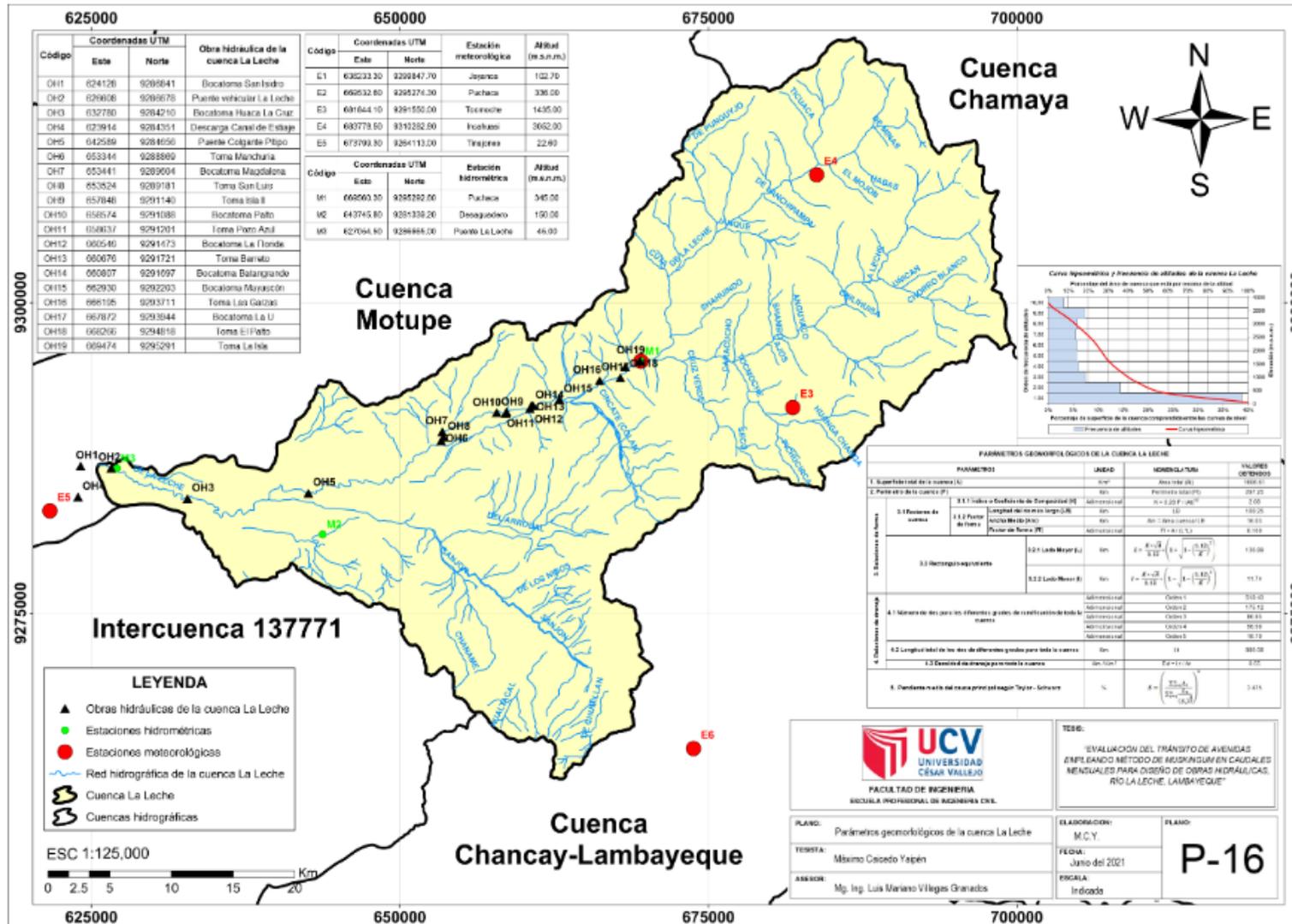
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 22: Isotermas de temperatura media máxima de la cuenca La Leche



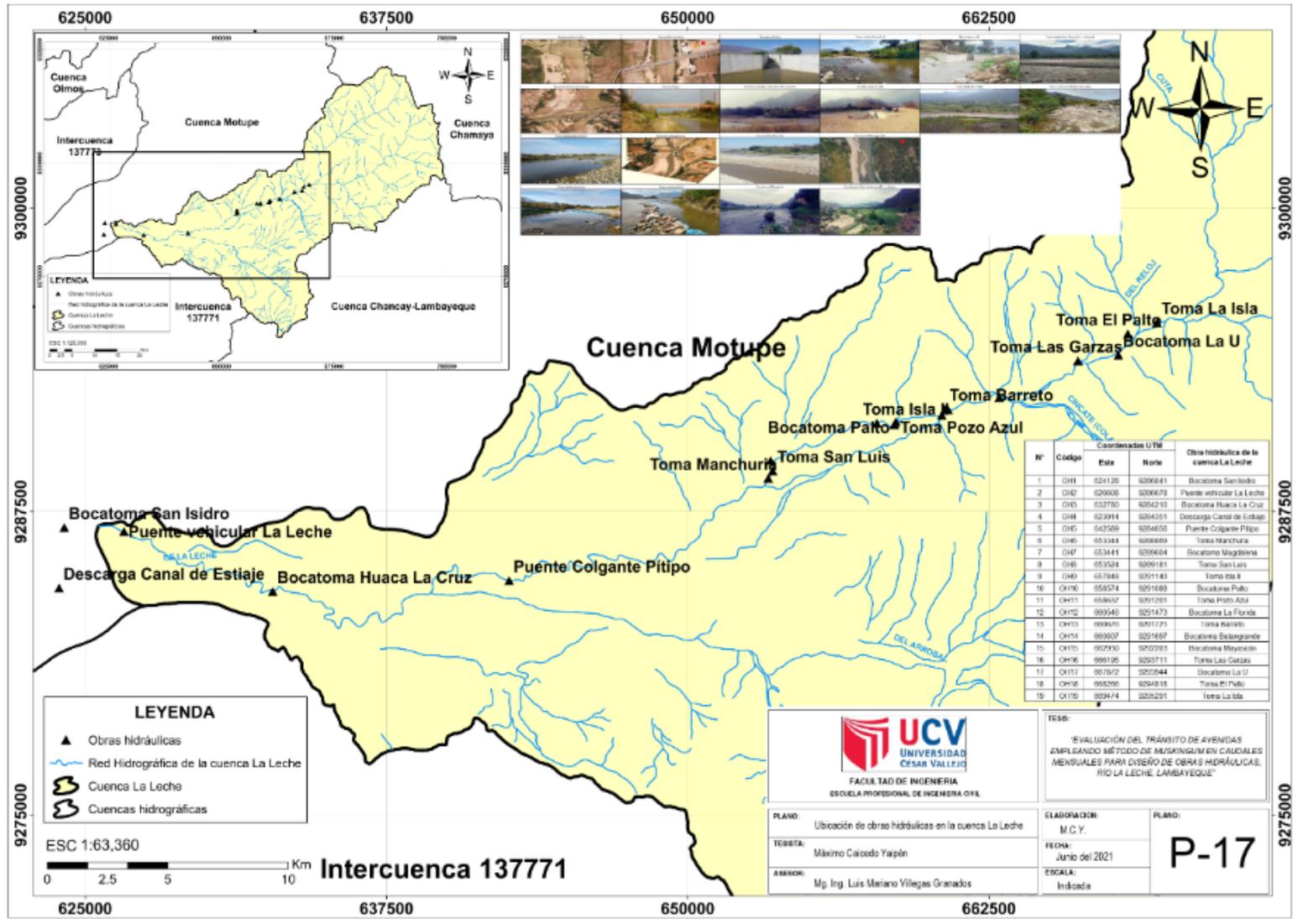
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 23: Parámetros geomorfológicos de la cuenca La Leche



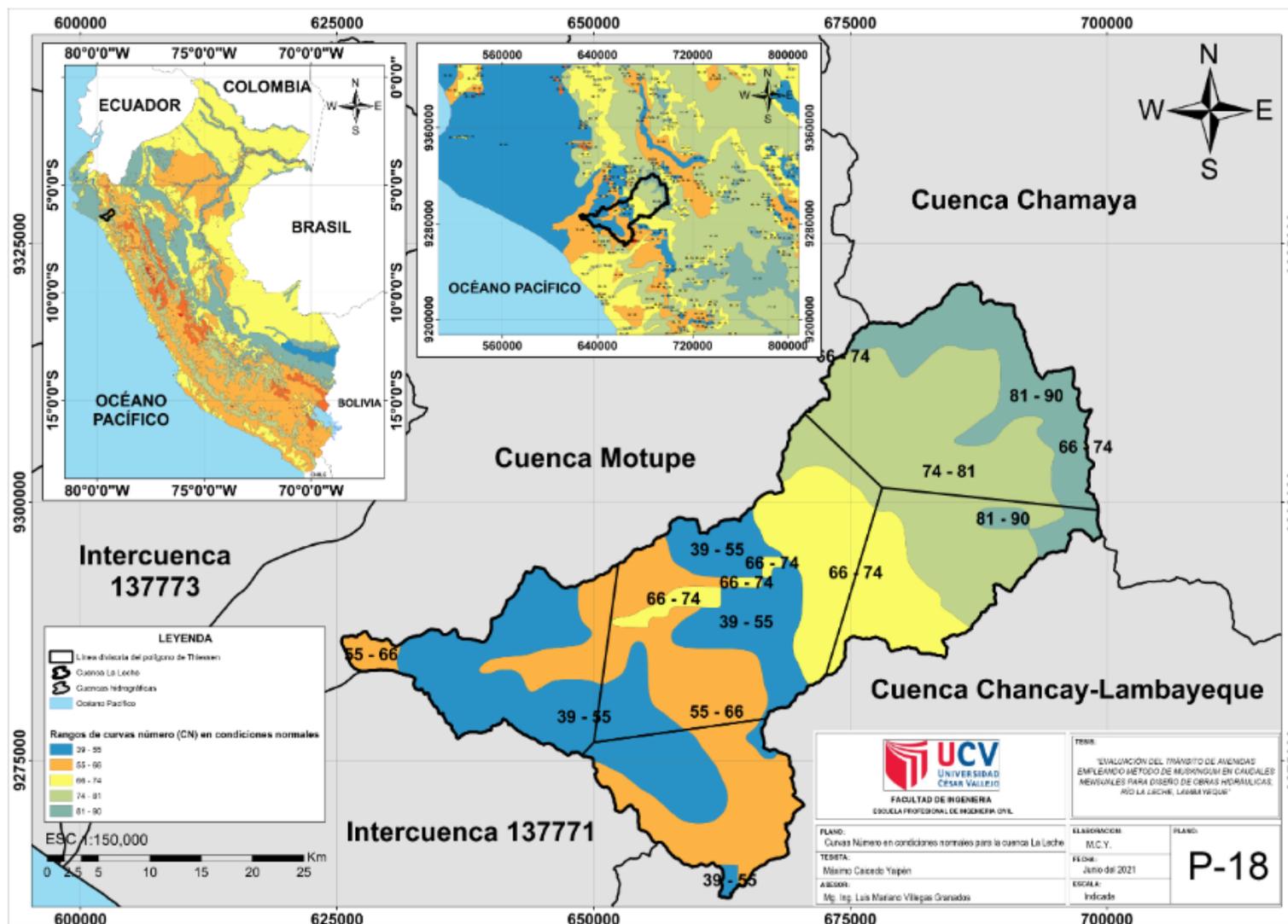
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 24: Ubicación de obras hidráulicas en la cuenca La Leche



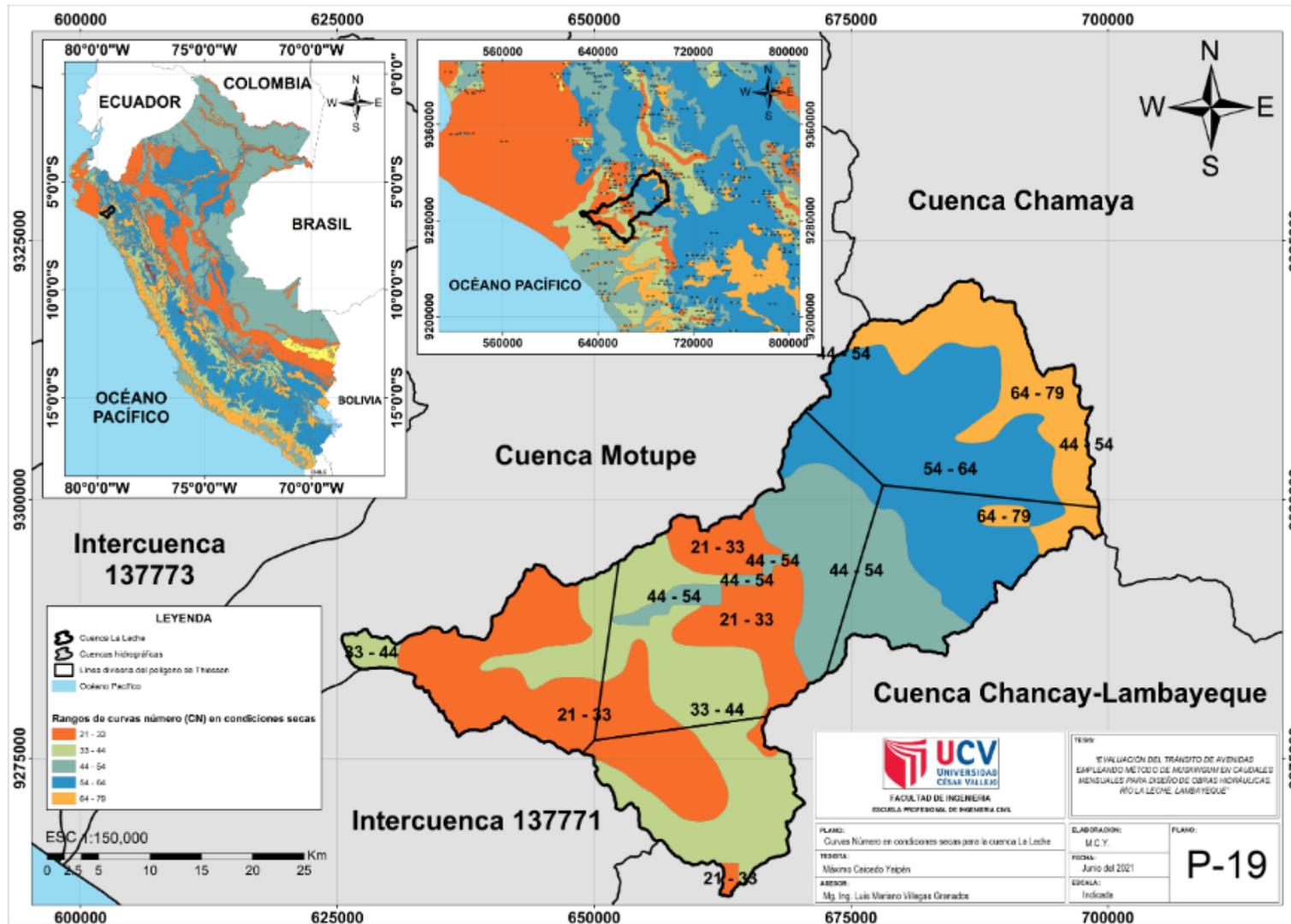
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 25: Curvas Número en condiciones normales para la cuenca La Leche



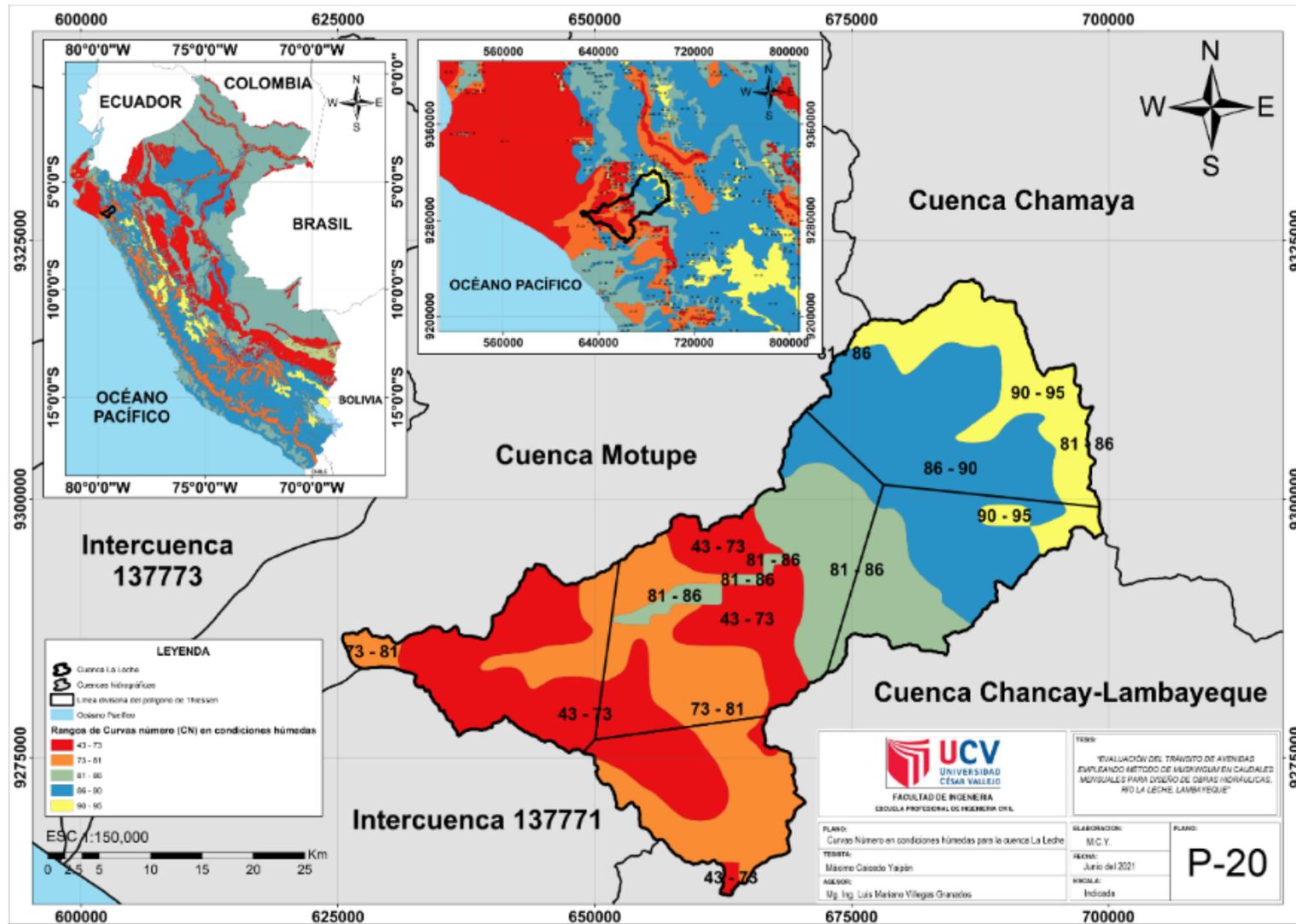
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 26: Curvas Número en condiciones secas para la cuenca La Leche



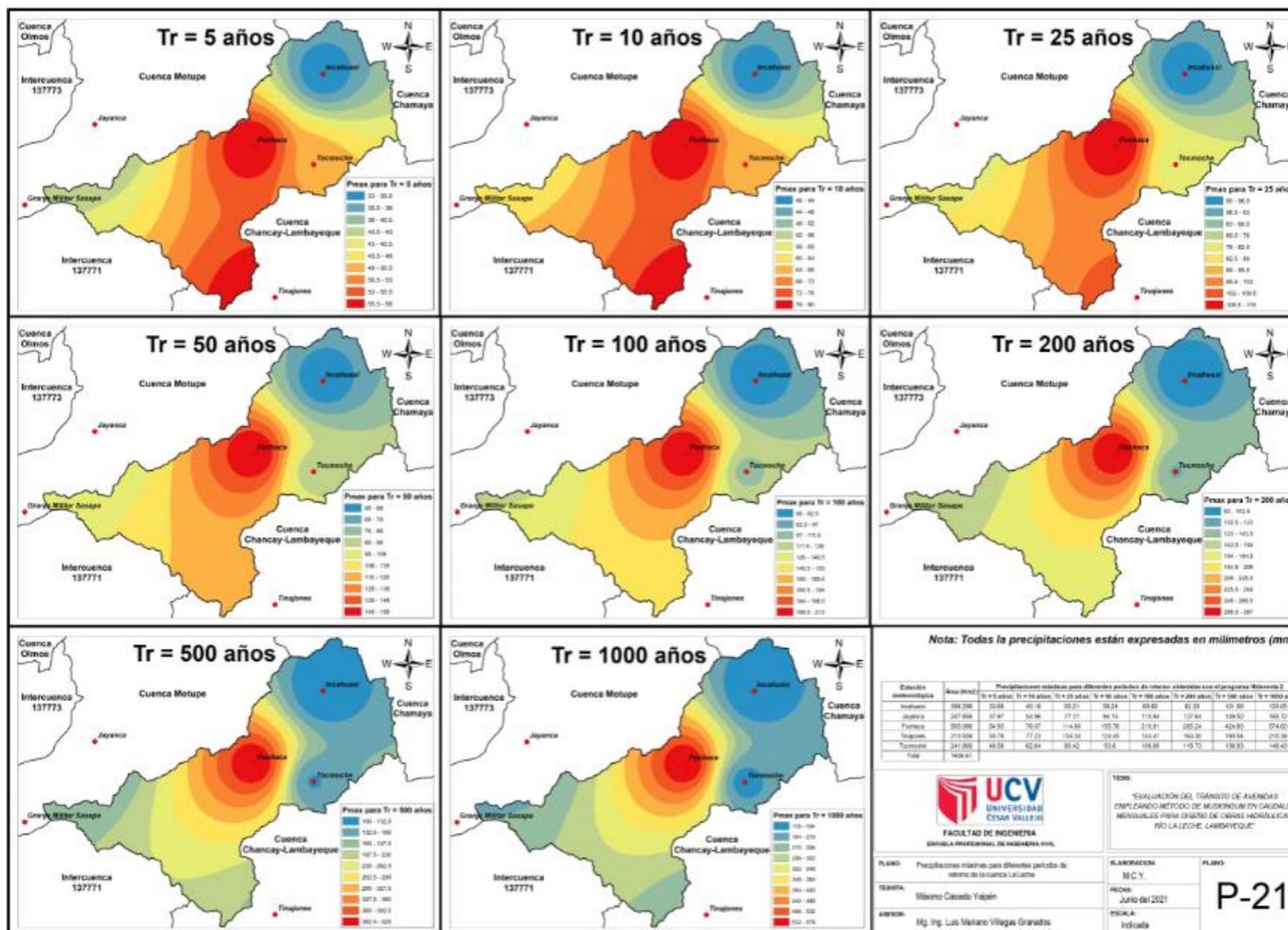
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 27: Curvas Número en condiciones húmedas para la cuenca La Leche



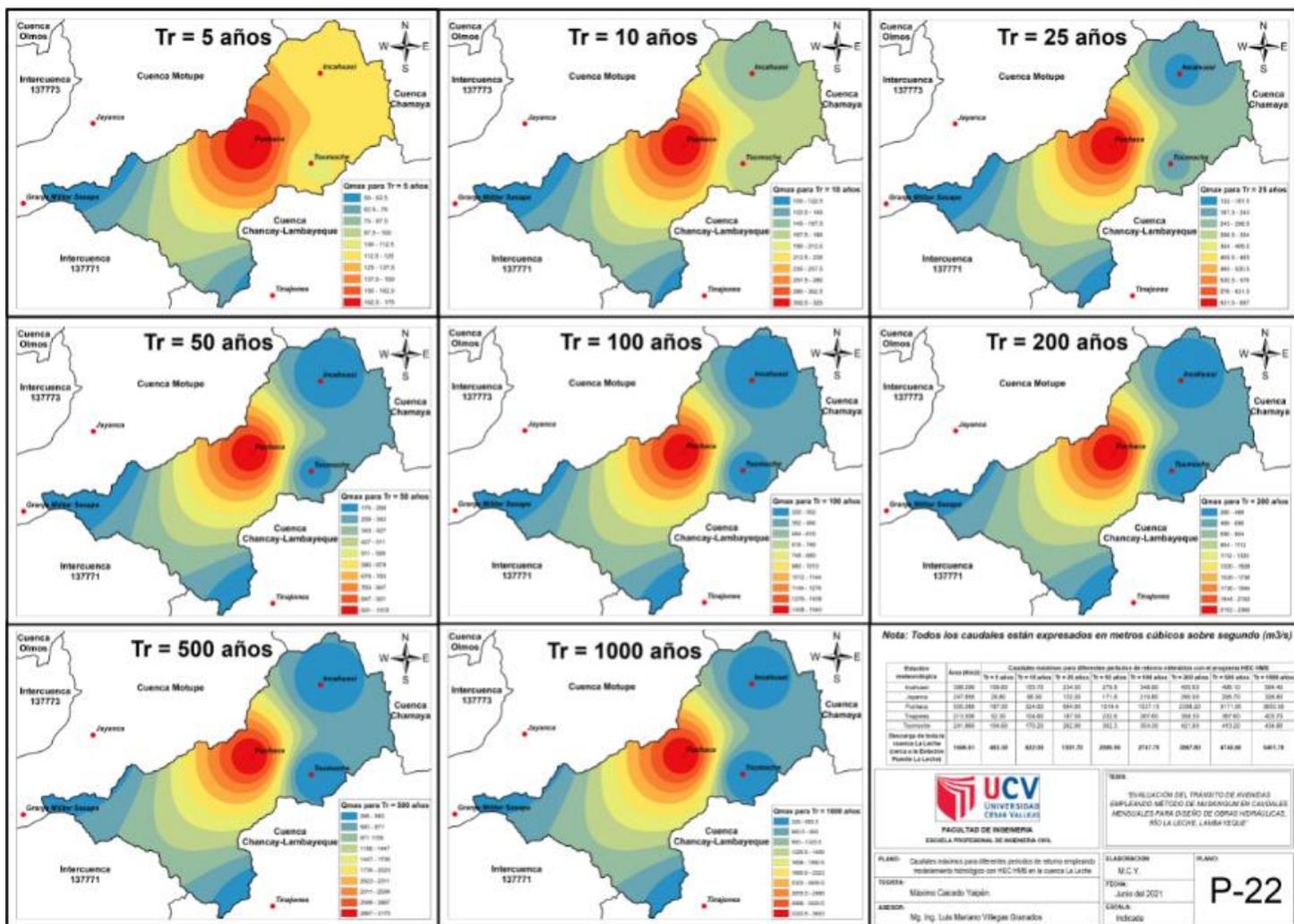
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 28: Precipitaciones máximas para diferentes períodos de retorno de la cuenca La Leche



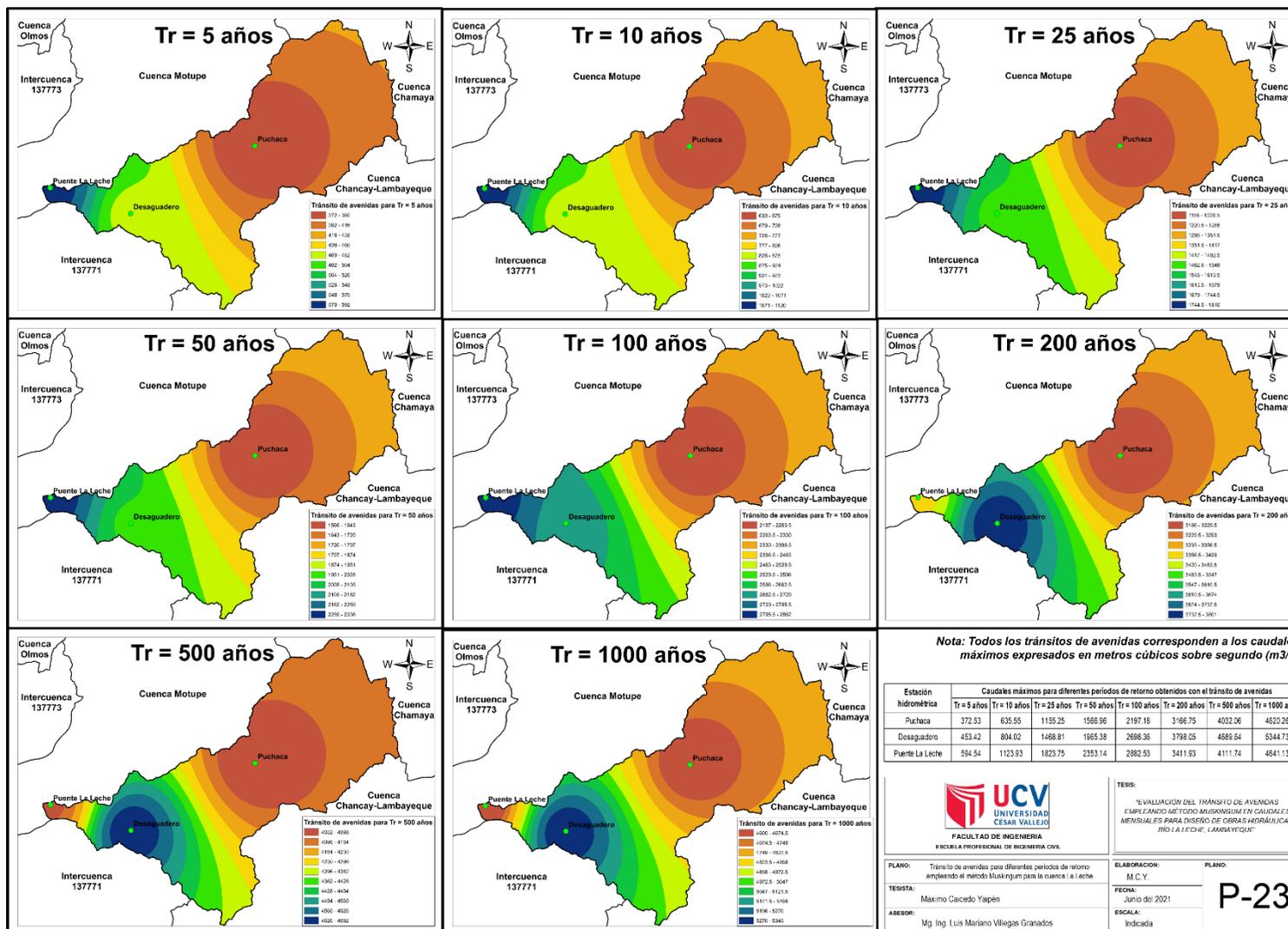
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 29: Caudales máximos para diferentes períodos de retorno empleando modelamiento hidrológico con HEC HMS en la cuenca La Leche



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 30: Tránsito de avenidas para diferentes períodos de retorno empleando el método Muskingum para la cuenca La Leche



Fuente: Elaboración propia.