

Regionalización hidrológica y desagregación de lluvia para la estimación de curvas IDF en una región de alta montaña de Oruro, Bolivia

Hydrological regionalization and rainfall disaggregation for the estimation of IDF curves in a high-mountain region of Oruro, Bolivia

Lina Carla Fernández Gutiérrez*
Universidad Técnica de Oruro
Oruro - Bolivia
lina.fernandez@uto.edu.bo
<https://orcid.org/0009-0007-3909-5173>

Jackson David Tellez Alvarez
Universidad Politécnica de Cataluña
Barcelona - España
jackson.david.tellez@upc.edu
<https://orcid.org/0000-0003-1428-9872>

*Correspondencia:
lina.fernandez@uto.edu.bo

Cómo citar este artículo:
Fernández, L., & Tellez, J. (2026). Regionalización hidrológica y desagregación de lluvia para la estimación de curvas IDF en una región de alta montaña de Oruro, Bolivia. *Esprint Investigación*, 5(Esp.1), 42-61. <https://doi.org/10.61347/ei.v5iEsp.1.298>

Recibido: 10 de abril de 2026
Aceptado: 18 de mayo de 2026
Publicado: 30 de mayo de 2026

Copyright: Derechos de autor 2026 Lina Carla Fernández Gutiérrez, Jackson David Tellez Alvarez.



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NonComercial 4.0.

Resumen: Se estima la relación intensidad–duración–frecuencia (IDF) mediante la calibración y regionalización de coeficientes de desagregación de lluvia en una región de alta montaña del departamento de Oruro (Bolivia), con el objetivo de mejorar la representación de la variabilidad de eventos extremos. El análisis se basó en 398 eventos de tormenta registrados en ocho estaciones pluviográficas, asegurando la representatividad de la variabilidad hidroclimática, y se calcularon coeficientes para duraciones de 1 a 12 horas, caracterizando la estructura temporal de la precipitación extrema. A partir de estos coeficientes se identificaron patrones espaciales que permitieron definir regiones hidrológicamente homogéneas con comportamiento diferenciado. La regionalización permitió ajustar curvas IDF mediante un modelo potencial, obteniendo parámetros representativos por región, y los resultados evidenciaron heterogeneidad espacial significativa en la distribución temporal de la lluvia, especialmente en duraciones cortas. En este contexto, el enfoque propuesto mejora la estimación de curvas IDF en condiciones con datos subdiarios limitados, proporcionando una base consistente para aplicaciones de diseño hidrológico y planificación de infraestructura hidráulica en regiones de montaña.

Palabras clave: Alta montaña, clustering jerárquico, curvas IDF, desagregación de lluvia, Oruro, precipitación extrema, regionalización hidrológica.

Abstract: The intensity–duration–frequency (IDF) relationship was estimated through the calibration and regionalization of rainfall disaggregation coefficients in a high-mountain region of the Oruro department, Bolivia, with the aim of improving the representation of extreme events. The analysis was based on 398 storm events recorded at eight pluviographic stations, ensuring representativeness of hydroclimatic variability. Disaggregation coefficients were calculated for durations from 1 to 12 hours, characterizing the temporal structure of extreme precipitation. Spatial patterns identified from these coefficients allowed the definition of hydrologically homogeneous regions with differentiated behavior. Regionalization enabled the adjustment of IDF curves using a power-law model, yielding representative parameters for each region, and results revealed significant spatial heterogeneity in temporal rainfall distribution, particularly for short durations. This approach improves IDF curve estimation under limited subdaily data conditions, providing a robust basis for hydrological design applications and hydraulic infrastructure planning in mountainous regions.

Keywords: Extreme precipitation, hierarchical clustering, high mountain, hydrological regionalization, IDF curves, Oruro, rainfall disaggregation.

1. Introducción

Las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) constituyen una herramienta fundamental en la ingeniería hidrológica para el diseño y evaluación de infraestructura hidráulica, al relacionar la magnitud de las precipitaciones extremas con su duración y frecuencia de ocurrencia (Chow et al., 1988; Coles, 2001). La estimación de estas curvas requiere registros pluviográficos de alta resolución temporal, los cuales permiten caracterizar la variabilidad intraevento de la precipitación. Sin embargo, en regiones de alta montaña, la disponibilidad de este tipo de información es frecuentemente limitada, lo que introduce incertidumbre en la estimación de eventos extremos.

En este contexto, los enfoques de desagregación de lluvia representan una alternativa metodológica eficiente para reconstruir la estructura temporal de la precipitación a partir de información agregada, como las precipitaciones máximas diarias. Estos métodos se basan en formulaciones estadísticas de eventos extremos y han sido ampliamente aplicados en la modelación hidrológica de extremos (Gumbel, 1958; Koutsoyiannis, 2004; Foufoula-Georgiou, 1989; Sivapalan & Blöschl, 1998).

No obstante, la aplicabilidad de estos coeficientes depende de la representatividad espacial de los datos utilizados para su calibración. En este sentido, la regionalización hidrológica constituye un paso clave para capturar la heterogeneidad espacial de la precipitación, especialmente en zonas donde la complejidad orográfica induce variaciones significativas en el comportamiento pluviométrico. Técnicas de clustering jerárquico, como el método de Ward (Ward, 1963), junto con criterios de validación como el índice de silueta (Rousseeuw, 1987), han demostrado ser efectivas para identificar estructuras homogéneas en variables hidrometeorológicas. Asimismo, enfoques de regionalización hidrológica han sido ampliamente utilizados para mejorar la consistencia espacial de los análisis de frecuencia (Hosking & Wallis, 1997; Merz & Blöschl, 2005).

El departamento de Oruro (Bolivia), ubicado en el Altiplano andino, presenta una marcada variabilidad espacial de la precipitación asociada a gradientes altitudinales y efectos orográficos, además de una limitada disponibilidad de estudios orientados a la regionalización de la lluvia extrema y a la estimación de curvas IDF.

En este marco, el presente estudio tiene como objetivo regionalizar la precipitación extrema en el departamento de Oruro a partir de registros de 398 eventos de tormenta provenientes de ocho estaciones pluviográficas, mediante técnicas de clustering jerárquico. A partir de esta regionalización, se desarrolla un enfoque de desagregación de lluvia para la estimación de curvas IDF en condiciones de datos limitados, permitiendo mejorar la representatividad espacial de los eventos extremos en la región de estudio.

2. Metodología

El presente estudio se basó en el análisis de registros pluviográficos de alta resolución temporal correspondientes a ocho estaciones ubicadas en el departamento de Oruro (Bolivia). La base de datos fue construida a partir de la identificación y procesamiento de 398 eventos de tormenta, obtenidos mediante la digitalización, depuración y análisis de pluviogramas desarrollados en un estudio previo (Fernández, 2004). Se realizó la delimitación de eventos independientes, control de calidad y homogenización temporal de las series.

A partir de los eventos identificados, se calcularon coeficientes de desagregación $k_d = P_d/P_{24}$ para duraciones de 1, 2, 3, 6 y 12 horas. Estos coeficientes representaron la distribución temporal relativa de la precipitación extrema y permitieron la comparación entre estaciones independientemente de la magnitud absoluta.

Con el fin de identificar patrones de similitud hidrológica, se construyó una matriz multivariada de los coeficientes $k_d = P_d/P_{24}$. Las variables fueron estandarizadas mediante normalización tipo z-score, con el objetivo de eliminar efectos de escala y garantizar la comparabilidad entre variables, asegurando una contribución homogénea al análisis multivariado.

Posteriormente, se calculó una matriz de distancias utilizando la métrica euclidiana, la cual permitió representar de manera consistente la similitud geométrica entre estaciones en el espacio de variables estandarizadas. La regionalización se realizó mediante clustering jerárquico aglomerativo utilizando el método de Ward.D2, el cual minimizó la varianza intragrupo en cada etapa de fusión, favoreciendo la formación de conglomerados compactos y homogéneos. La estructura jerárquica resultante fue evaluada mediante dendrogramas para identificar agrupaciones con comportamiento hidrológico similar.

El número óptimo de regiones se determinó mediante el índice de silueta, seleccionando la partición que maximizó simultáneamente la cohesión interna y la separación entre clústeres. Para cada región homogénea, se calcularon coeficientes de desagregación promedio, utilizados posteriormente en la calibración de relaciones IDF en forma relativa mediante un modelo de tipo potencia $k_d = a \cdot d^b$ y la duración de la precipitación. Los parámetros del modelo fueron estimados mediante regresión no lineal.

El desempeño del ajuste se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (RMSE), lo que permitió cuantificar la capacidad del modelo para reproducir la estructura temporal observada. Las curvas resultantes fueron comparadas entre regiones para su interpretación hidrológica y aplicación en diseño. El análisis se restringió a duraciones de 1, 2, 3, 6 y 12 horas, seleccionadas por su relevancia en ingeniería hidráulica y consistencia de los registros. Las duraciones subhorarias no se incluyeron debido a la mayor complejidad asociada a la variabilidad de alta frecuencia y a la definición de eventos independientes.

3. Resultados

Caracterización de la base de datos

El presente estudio se sustentó en un conjunto de datos conformado por 398 eventos de tormenta, registrados en ocho estaciones pluviográficas distribuidas en el departamento de Oruro, Bolivia. La disposición espacial de estas estaciones (figura 1) permitió cubrir los principales gradientes altitudinales del área de estudio, asegurando así la representatividad de diversas condiciones hidroclimáticas contrastantes.

Las características geográficas y altimétricas de cada estación se presentan en la tabla 1, incluyendo sus coordenadas y altitud. Esta información facilita la contextualización espacial de la variabilidad observada en las variables hidrológicas analizadas, proporcionando un marco robusto para los análisis posteriores.

Figura 1

Ubicación geográfica de las estaciones pluviográficas utilizadas en el estudio en el departamento de Oruro (Bolivia)

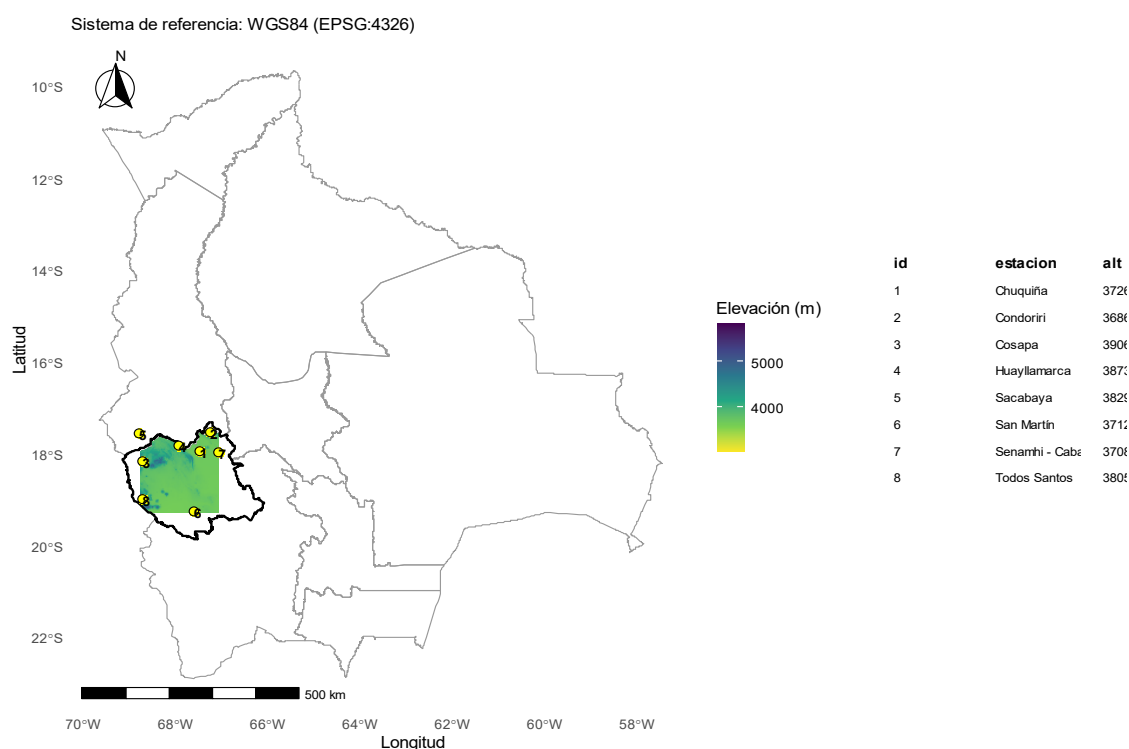


Tabla 1

Coordenadas geográficas y altitud de las estaciones pluviográficas

Estación	Latitud S	Longitud W	Altitud (msnm)
Chuquiña	17° 58' 00"	67° 27' 50.8"	3726
Condoriri	17° 32' 25"	67° 14' 12"	3686
Cosapa	18° 10' 28"	68° 42' 16"	3906
Huayllamarca	17° 49' 56"	67° 56' 16"	3873
Sacabaya	17° 34' 00"	68° 47' 00"	3829
San Martín	19° 16' 31"	67° 35' 57"	3712
Senamhi - Cabaña Forestal	17° 58' 29.01"	67° 04' 48.06"	3708
Todos Santos	19° 00' 28"	68° 42' 55"	3805

Nota. Coordenadas geográficas en WGS-84.

Las intensidades medias de precipitación, derivadas de los registros pluviográficos de cada estación, junto con sus estadísticos descriptivos básicos (tabla 2), muestran una variabilidad espacial notable entre estaciones, evidenciando diferencias en el régimen pluviométrico local y en la intensidad de los procesos de precipitación.

Tabla 2

Estadísticos descriptivos de intensidades medias de precipitación (mm/h) para diferentes duraciones y estaciones

Estación	Duración (min)	Media (mm/hor)	Desviación estándar (mm/hor)	CV
Chuquiña	5	19.43	5.36	0.28
Chuquiña	15	15.39	2.82	0.18
Chuquiña	20	13.68	4.00	0.29
Chuquiña	30	12.14	4.97	0.41
Chuquiña	45	10.10	4.74	0.47
Chuquiña	60	8.27	4.80	0.58
Chuquiña	120	7.27	5.05	0.70
Chuquiña	180	7.41	5.03	0.68
Chuquiña	360	6.89	5.24	0.76
Chuquiña	720	6.79	5.29	0.78
Chuquiña	1440	6.78	5.29	0.78
Condoriri	5	5.53	2.28	0.41
Condoriri	15	4.84	1.93	0.40
Condoriri	20	4.54	1.77	0.39
Condoriri	30	4.40	1.72	0.39
Condoriri	45	4.28	1.69	0.40
Condoriri	60	4.22	1.68	0.40
Condoriri	120	3.60	1.62	0.45
Condoriri	180	3.33	1.78	0.54
Condoriri	360	2.92	2.13	0.73
Condoriri	720	2.84	2.22	0.78
Condoriri	1440	2.82	2.23	0.79
Cosapa	5	9.90	5.71	0.58
Cosapa	15	9.63	5.49	0.57
Cosapa	20	6.68	3.63	0.54
Cosapa	30	5.80	2.83	0.49
Cosapa	45	5.12	2.71	0.53
Cosapa	60	4.79	2.66	0.55

Estación	Duración (min)	Media (mm/hor)	Desviación estándar (mm/hor)	CV
Cosapa	120	3.33	1.72	0.52
Cosapa	180	3.00	1.63	0.54
Cosapa	360	2.99	1.79	0.60
Cosapa	720	2.93	1.82	0.62
Cosapa	1440	2.93	1.82	0.62
Huayllamarca	5	17.97	3.30	0.18
Huayllamarca	15	16.07	4.19	0.26
Huayllamarca	20	13.76	3.11	0.23
Huayllamarca	30	11.26	2.49	0.22
Huayllamarca	45	9.31	2.65	0.28
Huayllamarca	60	8.04	2.46	0.31
Huayllamarca	120	5.72	1.81	0.32
Huayllamarca	180	5.25	2.09	0.40
Huayllamarca	360	4.96	1.99	0.40
Huayllamarca	720	4.76	2.00	0.42
Huayllamarca	1440	4.70	1.98	0.42
Sacabaya	5	17.19	3.23	0.19
Sacabaya	15	13.63	4.69	0.34
Sacabaya	20	9.81	4.60	0.47
Sacabaya	30	8.15	3.80	0.47
Sacabaya	45	6.95	2.83	0.41
Sacabaya	60	5.75	2.32	0.40
Sacabaya	120	3.78	0.80	0.21
Sacabaya	180	3.17	0.25	0.08
Sacabaya	360	2.61	0.70	0.27
Sacabaya	720	2.56	0.76	0.30
Sacabaya	1440	2.54	0.77	0.30
San martin	5	16.07	3.81	0.24
San martin	15	12.74	3.93	0.31
San martin	20	12.25	4.30	0.35

Estación	Duración (min)	Media (mm/hor)	Desviación estándar (mm/hor)	CV
San martin	30	9.81	1.97	0.20
San martin	45	7.21	1.37	0.19
San martin	60	5.65	0.89	0.16
San martin	120	5.21	1.63	0.31
San martin	180	4.68	1.24	0.26
San martin	360	4.28	1.50	0.35
San martin	720	4.09	1.51	0.37
San martin	1440	4.09	1.52	0.37
Senamhi	5	20.89	2.06	0.10
Senamhi	15	19.90	2.81	0.14
Senamhi	20	19.66	2.93	0.15
Senamhi	30	17.49	3.18	0.18
Senamhi	45	15.54	3.33	0.21
Senamhi	60	14.22	3.84	0.27
Senamhi	120	11.16	1.69	0.15
Senamhi	180	10.38	2.27	0.22
Senamhi	360	10.07	2.59	0.26
Senamhi	720	9.91	2.81	0.28
Senamhi	1440	9.80	2.94	0.30
Todos santos	5	8.96	4.83	0.54
Todos santos	15	6.77	4.10	0.61
Todos santos	20	6.61	4.18	0.63
Todos santos	30	6.53	4.27	0.65
Todos santos	45	4.93	3.20	0.65
Todos santos	60	4.16	2.70	0.65
Todos santos	120	3.00	2.01	0.67
Todos santos	180	2.36	1.21	0.51
Todos santos	360	1.62	0.85	0.52
Todos santos	720	1.40	0.88	0.63
Todos santos	1440	1.34	0.86	0.64

Nota. CV=Coficiente de variación. La intensidad está expresada en mm/hor

Precipitación máxima y coeficientes de desagregación

Las precipitaciones máximas correspondientes a las diferentes duraciones analizadas (1, 2, 3, 6 y 12 horas) se presentan en la tabla 3, donde se resume la información base utilizada para el cálculo de los coeficientes de desagregación. Estos valores constituyen la estructura fundamental para caracterizar la variabilidad temporal de la precipitación extrema, sirviendo como referencia clave para los análisis hidrológicos posteriores.

Tabla 3

Precipitaciones máximas medias (Pd) mm para diferentes duraciones y estaciones

Estación	60 min	120 min	180 min	360 min	720 min	1440 min
Chuquiña	8.27	14.53	22.23	41.31	81.49	162.75
Condoriri	4.22	7.19	10.00	17.53	34.02	67.58
Cosapa	4.79	6.65	9.01	17.91	35.11	70.32
Huayllamarca	8.04	11.45	15.76	29.77	57.17	112.71
Sacabaya	5.75	7.57	9.50	15.67	30.74	61.06
San martin	5.65	10.42	14.04	25.70	49.05	98.08
Senamhi	14.22	22.33	31.13	60.40	118.93	235.25
Todos santos	4.16	6.00	7.08	9.70	16.77	32.22

A partir de las precipitaciones máximas y de la precipitación diaria máxima (P_{24}), se calcularon los coeficientes de desagregación $k_d = P_d/P_{24}$, los cuales se presentan en la tabla 4. Estos coeficientes permiten normalizar la información hidrológica, facilitando la comparación entre estaciones y duraciones sin depender de la magnitud absoluta de los eventos.

Tabla 4

Coefficientes de desagregación $k_d = \frac{P_d}{P_{24}}$ por estación y duración

Estación	k 1h	k 2h	k 3h	k 6h	k 12h
Chuquiña	0.0548	0.092	0.142	0.256	0.501
Condoriri	0.0852	0.144	0.188	0.282	0.506
Cosapa	0.0736	0.102	0.134	0.259	0.499
Huayllamarca	0.084	0.111	0.144	0.268	0.506
Sacabaya	0.1018	0.135	0.169	0.260	0.505
San martín	0.0622	0.109	0.148	0.264	0.500

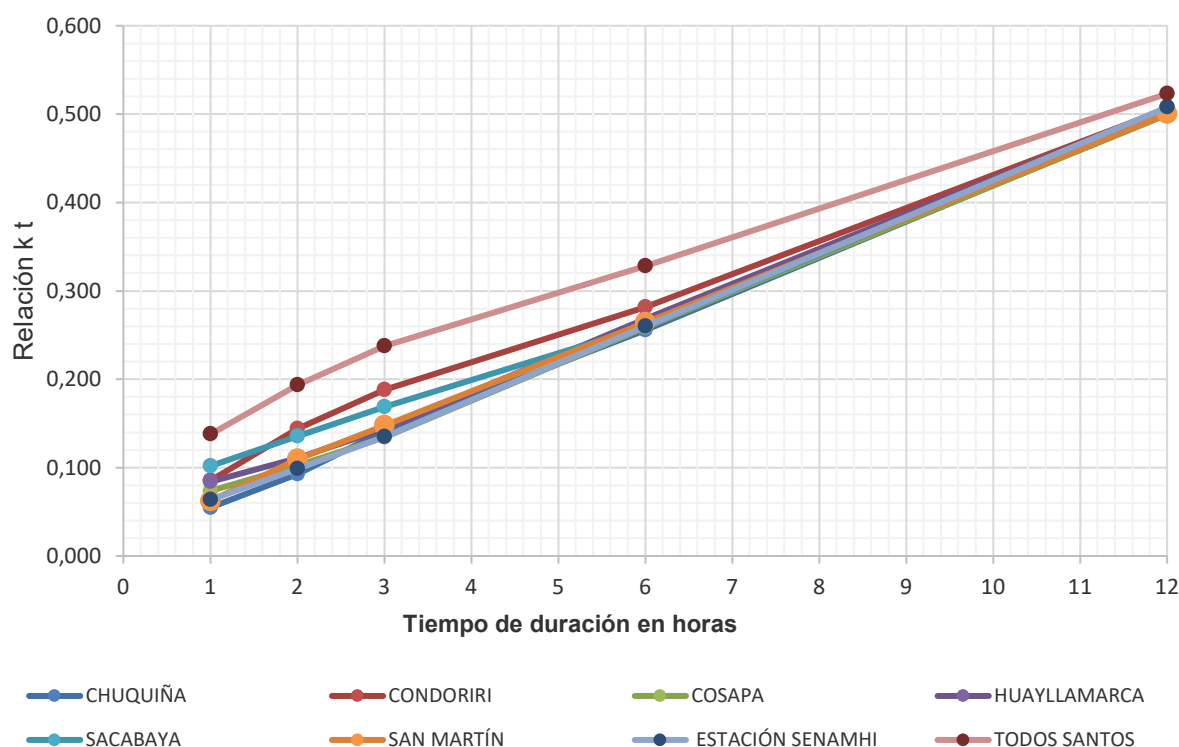
Senamhi	0.0635	0.098	0.135	0.260	0.508
Todos santos	0.1376	0.193	0.238	0.328	0.523
Media	0.0828	0.123	0.162	0.272	0.506
S	0.0268	0.033	0.036	0.024	0.008
Cv	0.324	0.272	0.219	0.088	0.015

Nota. S=Desviación estándar. Cv=Coefficiente de Variación.

Las intensidades medias de precipitación y sus estadísticos descriptivos (figura 2) evidencian una variabilidad espacial significativa entre estaciones, reflejando diferencias en el régimen pluviométrico local. Asimismo, el comportamiento global de los coeficientes de desagregación en función de la duración, también presentado en la figura 2, muestra una tendencia decreciente consistente en todas las estaciones. Este patrón indica una redistribución temporal de la precipitación extrema, caracterizada por una mayor concentración de intensidad en las duraciones más cortas.

Figura 2

Relación entre coeficientes de desagregación $k_d = \frac{P_d}{P_{24}}$ y duración de la precipitación



Comportamiento estadístico de los coeficientes $k_d = \frac{P_d}{P_{24}}$

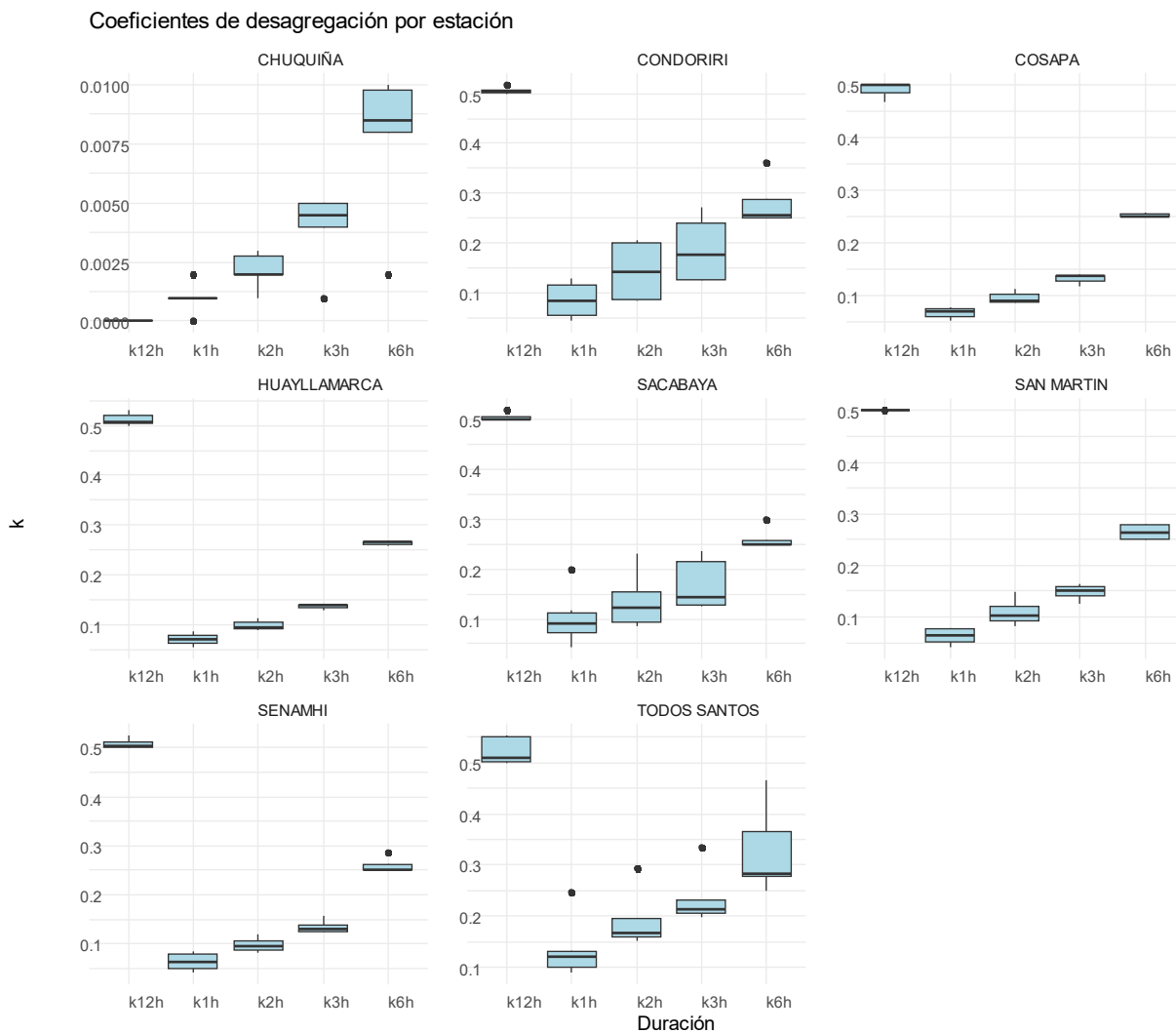
El análisis exploratorio de los coeficientes de desagregación k_d se presenta en la figura 3, que resume su comportamiento estadístico tanto a nivel de estación como de manera agregada para el conjunto total de datos. Los diagramas de caja por estación evidencian una variabilidad diferenciada en la distribución de k_d para las distintas duraciones analizadas. Se observa una mayor dispersión en

duraciones cortas, lo que refleja una alta sensibilidad de la estructura temporal de la precipitación a escalas de tiempo reducidas. A medida que la duración aumenta, la variabilidad entre estaciones tiende a disminuir, indicando un comportamiento más homogéneo en escalas temporales mayores.

La figura 3 ilustra la distribución de los coeficientes k_d para las diferentes duraciones, proporcionando una referencia visual de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación extrema en la región de estudio.

Figura 3

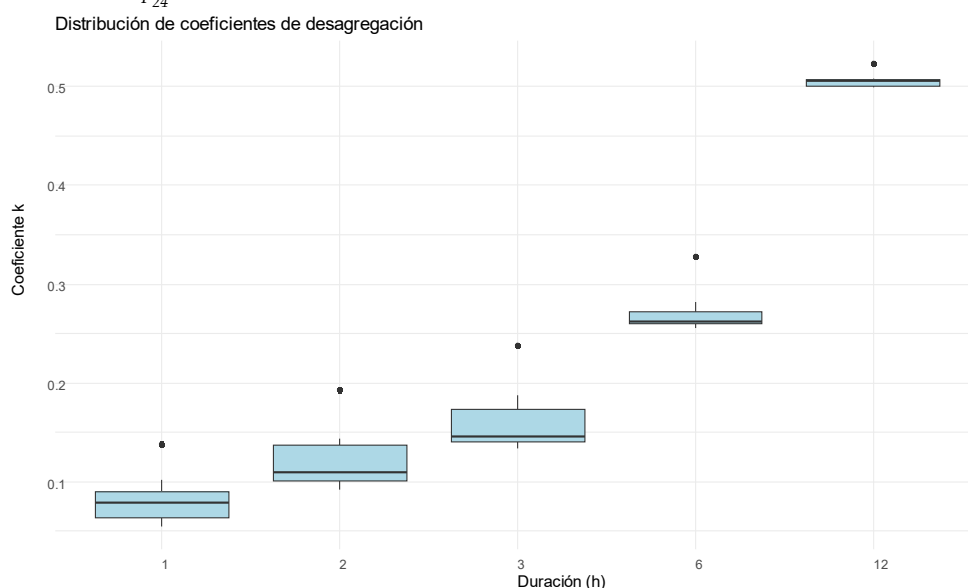
Boxplot $k_d = \frac{P_d}{P_{24}}$ por estación



De forma complementaria, la figura 4 muestra la distribución global de los coeficientes k_d considerando de manera conjunta todas las estaciones. Este comportamiento agregado confirma la tendencia decreciente de la variabilidad con la duración y evidencia la presencia de valores extremos asociados a eventos de alta intensidad, especialmente en las duraciones más cortas.

Figura 4

Boxplot $k_d = \frac{P_d}{P_{24}}$ global



Las diferencias entre estaciones en los coeficientes de desagregación k_d fueron evaluadas mediante la prueba de Kruskal–Wallis (tabla 5), evidenciando diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$). Este hallazgo confirma la heterogeneidad espacial en la estructura temporal de la precipitación y respalda la necesidad de aplicar un enfoque regionalizado para los procesos de desagregación.

Tabla 5

Resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis aplicada a los coeficientes de desagregación k_d entre estaciones para diferentes duraciones de precipitación

Estación	Estadístico de prueba H (Chi cuadrado)	Grados de libertad (gl)	Probabilidad asociada (p-valor)	Conclusión
Chuquiña	23.800	4	0.000088	Significativo (k depende de duración)
Condoriri	15.300	4	0.004180	Significativo (k depende de duración)
Cosapa	13.500	4	0.008890	Significativo (k depende de duración)
Huayllamarca	13.500	4	0.009070	Significativo (k depende de duración)
Sacabaya	24.300	4	0.000070	Significativo (k depende de duración)
San martín	18.000	4	0.001250	Significativo (k depende de duración)
Senamhi	18.100	4	0.001170	Significativo (k depende de duración)
Todos santos	19.000	4	0.000802	Significativo (k depende de duración)

Nota. gl = grados de libertad. La prueba de Kruskal–Wallis evalúa diferencias entre estaciones para cada duración analizada. Se considera significancia estadística cuando $p < 0.05$.

Regionalización hidrológica

El análisis de conglomerados jerárquico aplicado a los coeficientes de desagregación k_d se realizó mediante el método de Ward.D2, el cual minimiza la varianza intragrupo y favorece la formación de agrupamientos compactos en el espacio multivariado. La estructura de similitud entre estaciones se evaluó considerando dos escenarios de regionalización: dos y tres regiones. Los dendrogramas correspondientes a cada escenario se presentan en las figuras 5 y 6, respectivamente.

Figura 5

Dendrograma del análisis de conglomerados jerárquico mediante el método de Ward.D2 basado en los coeficientes de desagregación k_d , considerando una partición en tres regiones hidrológicas

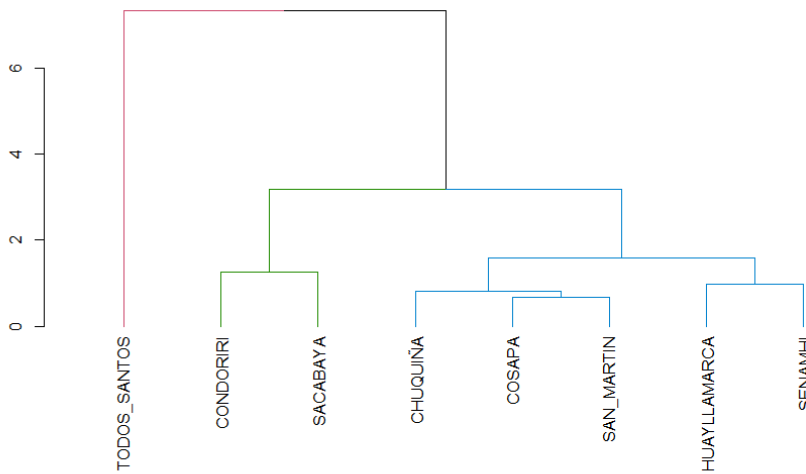
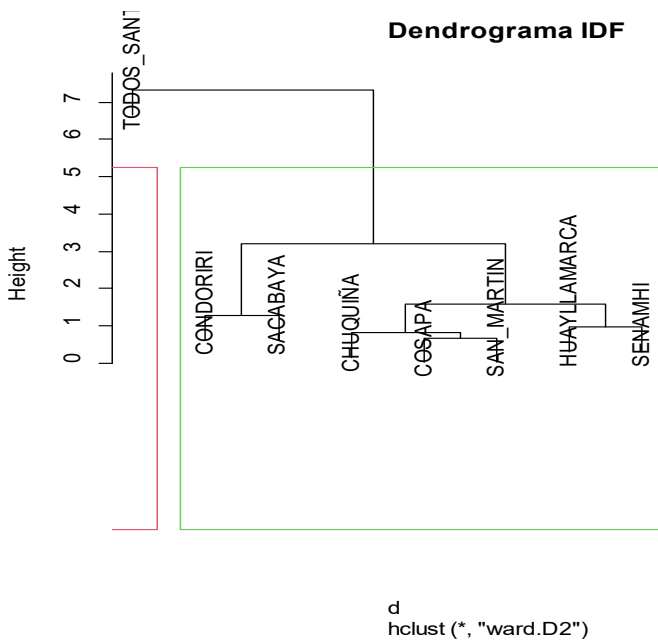


Figura 6

Dendrograma del análisis de conglomerados jerárquico mediante el método de Ward.D2 basado en los coeficientes de desagregación k_d , considerando una partición en dos regiones hidrológicas

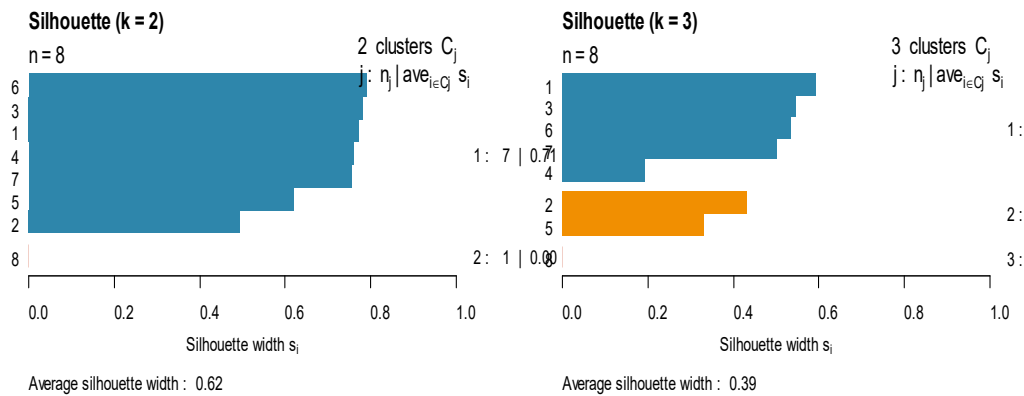


El escenario de tres regiones (figura 5) evidencia una mayor subdivisión de las estaciones; sin embargo, esta partición presenta una separación menos definida entre algunos grupos, con transiciones graduales en la estructura jerárquica. En contraste, el escenario de dos regiones (figura 6) muestra agrupamientos más compactos y una separación más clara entre los clústeres principales.

La validación del número óptimo de regiones se realizó mediante el índice de silueta, cuyos resultados comparativos para ambas configuraciones se presentan en la figura 7. Este análisis cuantitativo confirma un mejor desempeño del escenario de dos regiones, al mostrar simultáneamente una mayor cohesión interna y una separación más marcada entre los grupos.

Figura 7

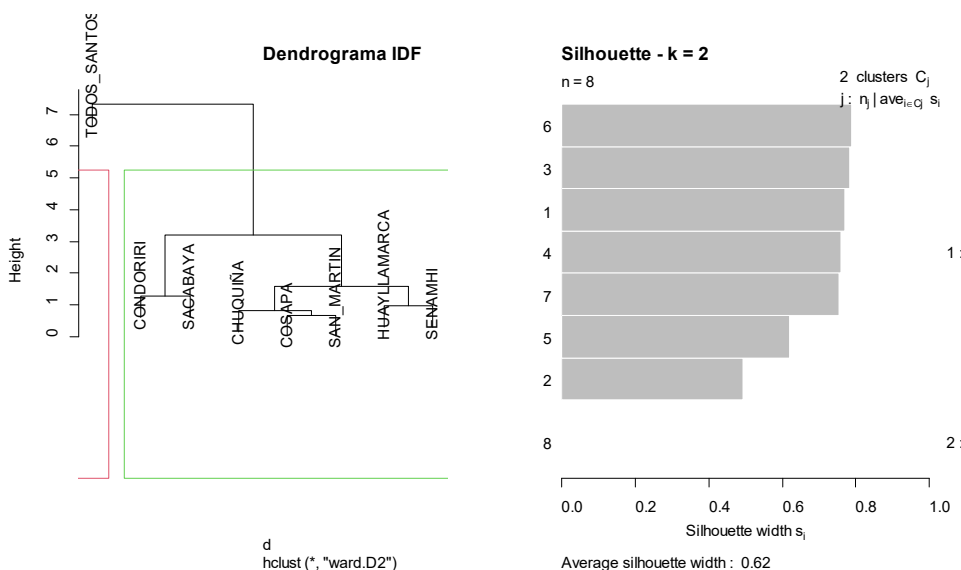
Comparación del índice de silueta para las configuraciones de dos y tres regiones, utilizada para la selección del número óptimo de clústeres



La figura 8 integra de manera sintética la estructura jerárquica del clustering y la evaluación del índice de silueta, consolidando la selección de dos regiones como la partición óptima del conjunto de estaciones.

Figura 8

Síntesis del análisis de regionalización hidrológica, integrando la estructura de conglomerados jerárquicos y la evaluación del índice de silueta, evidenciando la solución óptima de dos regiones



En base a estos resultados, se adopta una regionalización hidrológica conformada por dos regiones homogéneas, cuyas estaciones se detallan en la tabla 6. Esta clasificación constituye la base para el ajuste regional del modelo de desagregación y para la construcción de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF).

Tabla 6

Asignación de estaciones a las regiones hidrológicas obtenidas mediante clustering (Ward.D2, k = 2)

Estación	Región
Chuquiña	1
Cosapa	1
Huayllamarca	1
San martin	1
Senamhi	1
Condoriri	1
Sacabaya	1
Todos santos	2

Ajuste del modelo de desagregación

Para cada región hidrológica definida en la etapa de regionalización, se ajustó un modelo de tipo potencial entre los coeficientes de desagregación k_d y la duración de la precipitación. La relación funcional adoptada se expresa como:

$$k_d = a \cdot d^b$$

Los parámetros del modelo estimados para cada región se presentan en la tabla 7, donde se resumen tanto la magnitud del ajuste como la variabilidad de los coeficientes correspondientes a las regiones 1 y 2.

Tabla 7

Parámetros estimados del modelo de desagregación tipo potencial para las regiones hidrológicas definidas, incluyendo coeficientes del modelo, coeficiente de determinación (R^2) y error cuadrático medio (RMSE)

Región	a	b	R^2	RMSE	Interpretación
1	0.9593	0.02140	0.9593	0.0214	Baja dependencia con duración
2	0.13439	0.52864	0.9945	0.0134	Fuerte decaimiento con duración

Los resultados del ajuste se presentan en las figuras 9 y 10, correspondientes a cada región hidrológica. En ambos casos, el modelo reproduce de manera adecuada la tendencia decreciente de los coeficientes k_d con la duración, capturando la estructura de decaimiento observada en los datos.

Figura 9

Ajuste del modelo de desagregación tipo potencial entre los coeficientes k_d y la duración de la precipitación para la Región 1. Se muestran los valores observados y la curva ajustada del modelo

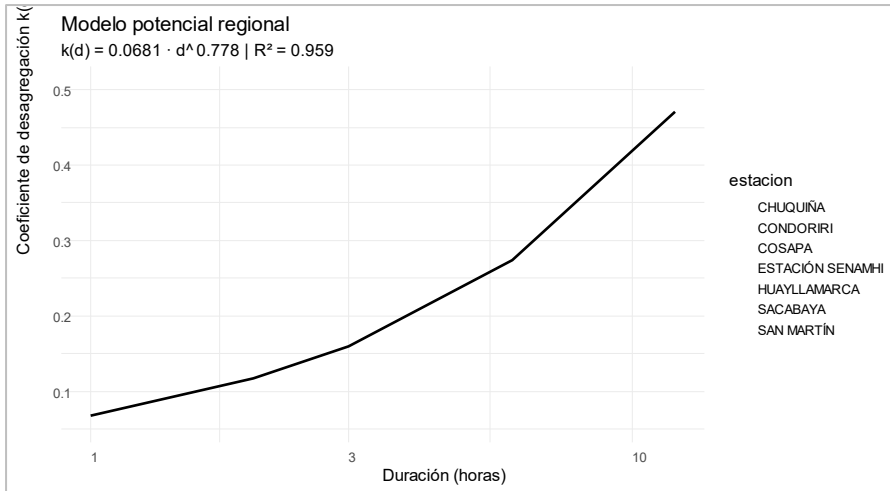
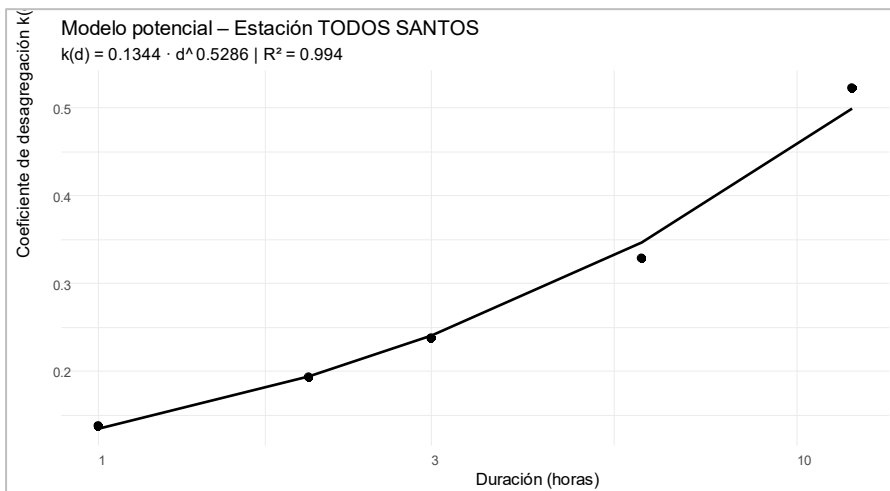


Figura 10

Ajuste del modelo de desagregación tipo potencial entre los coeficientes k_d y la duración de la precipitación para la Región 2. Se muestran los valores observados y la curva ajustada del modelo



El desempeño del modelo resulta consistente en ambas regiones, evidenciando una adecuada representación de la variabilidad temporal de la precipitación extrema dentro del marco de regionalización definido previamente. Esta consistencia respalda la aplicabilidad del enfoque potencial para la desagregación temporal de la precipitación en condiciones hidroclimáticas diferenciadas.

Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF)

Las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) obtenidas para cada región se presentan en las figuras 11 y 12, correspondientes a la Región 1 y Región 2, respectivamente. Estas curvas fueron derivadas a partir del enfoque de desagregación de las precipitaciones máximas diarias anuales (P_{24}), lo que permite la estimación de intensidades subdiarias consistentes con la estructura temporal de los eventos extremos.

Figura 11

Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) obtenidas para la Región 1 a partir del modelo de desagregación, representando la variación de la intensidad de precipitación en función de la duración y el periodo de retorno

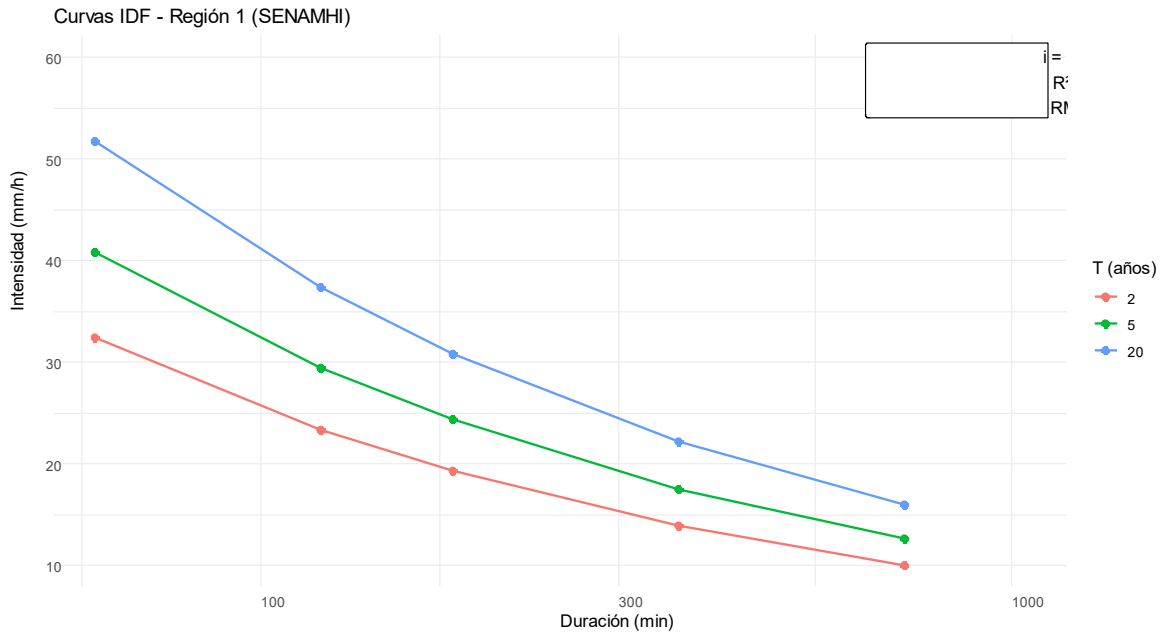
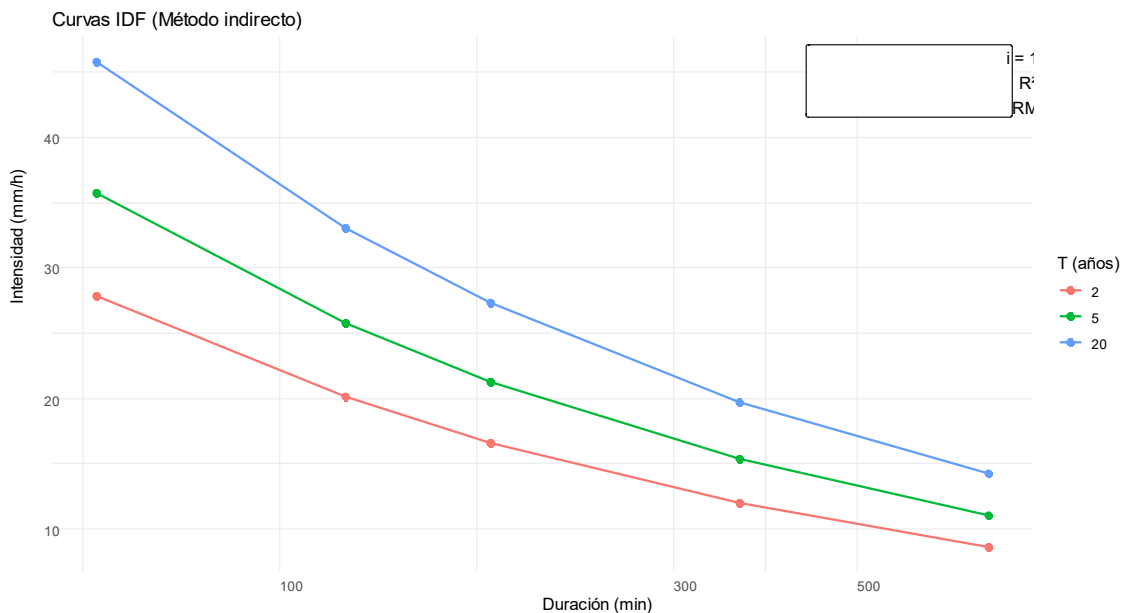


Figura 12

Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) obtenidas para la Región 2 a partir del modelo de desagregación, representando la variación de la intensidad de precipitación en función de la duración y el periodo de retorno

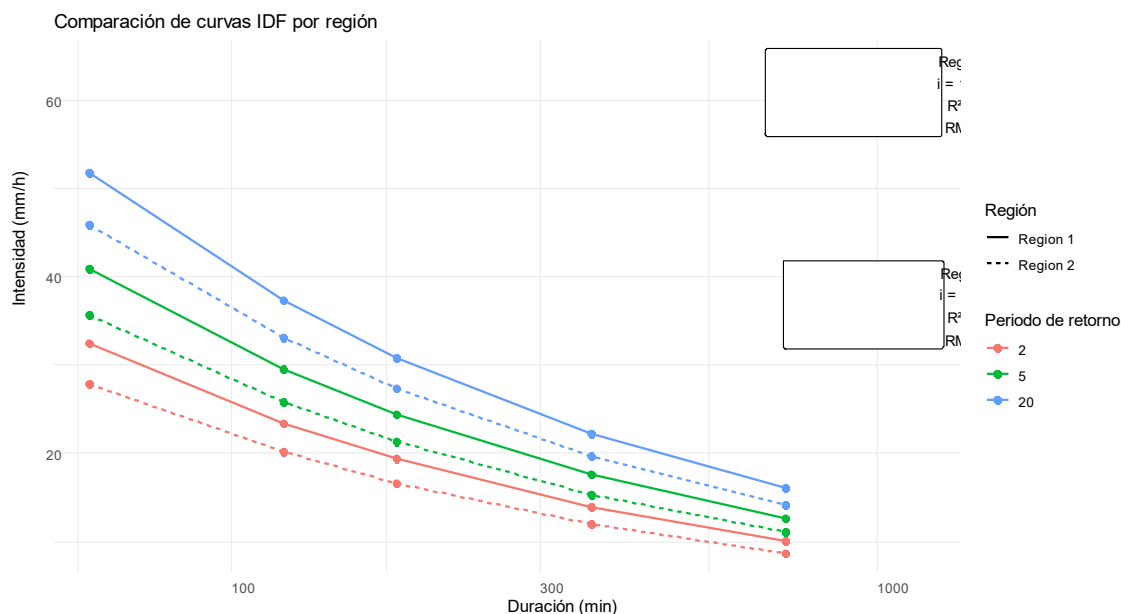


Las curvas IDF presentan el comportamiento hidrológico esperado, caracterizado por la disminución de la intensidad de precipitación con el incremento de la duración y el aumento de la intensidad con el periodo de retorno. Este patrón se mantiene de forma consistente en ambas regiones, reflejando la variabilidad temporal de la precipitación extrema en el área de estudio.

La comparación directa entre regiones se muestra en la Figura 13, donde se observa que la Región 2 presenta sistemáticamente mayores intensidades de precipitación en comparación con la Región 1. Esta diferencia se mantiene a lo largo de todas las duraciones y periodos de retorno analizados, evidenciando una separación regional consistente en la respuesta hidrológica.

Figura 13

Comparación de las curvas IDF entre la Región 1 y la Región 2, incluyendo la representación del modelo ajustado $I_{(d,T)} = c \frac{T^m}{d^n}$ y sus métricas de desempeño



El modelo general de intensidades, expresado como $I(d,T) = c \cdot \frac{T^m}{d^n}$, muestra un desempeño adecuado en ambas regiones, lo cual se evidencia en los elevados valores del coeficiente de determinación (R^2) y en los bajos errores de ajuste (RMSE), cuyos parámetros se resumen en la tabla 8. La comparación entre las curvas IDF regionales y la consistencia del ajuste del modelo se presenta en la Figura 13, evidenciando una adecuada capacidad del modelo para reproducir la variabilidad observada de la precipitación en ambas regiones.

Tabla 8

Parámetros estimados del modelo Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) para cada región hidrológica, incluyendo los coeficientes del modelo c , m y n , junto con las métricas de desempeño (coeficiente de determinación R^2 y error cuadrático medio RMSE)

Región	c	m	n	R^2	RMSE
1	198.20	0.20	0.47	1.00	0.55
2	169.04	0.21	0.47	1.00	0.53

En conjunto, las curvas IDF regionales derivadas del enfoque de desagregación reproducen de manera consistente la estructura espacio–temporal de la precipitación extrema, proporcionando una base hidrológicamente coherente para su aplicación en el diseño hidrológico del área de estudio.

4. Discusión

El análisis integrado de la variabilidad estadística, el clustering jerárquico y la estructura espacial de los coeficientes de desagregación k_d evidencia una marcada heterogeneidad hidrológica en el área de estudio. Esta heterogeneidad respalda la necesidad de regionalización en dos dominios hidrológicos consistentes, la cual fue validada mediante el método de Ward.D2 y corroborada con el índice de silueta. La estructura de agrupamiento muestra coherencia con patrones de similitud hidrológica previamente identificados.

La incorporación de la regionalización en el proceso de desagregación de precipitaciones máximas diarias (P24) permitió generar información subdiaria consistente a pesar de la limitada disponibilidad de registros pluviográficos continuos. La aplicación de la distribución de Gumbel y del modelo potencial $I(d, T) = c \cdot T^m / d^n$ reprodujo adecuadamente la variabilidad observada, mostrando un desempeño estadístico satisfactorio en ambas regiones y asegurando confiabilidad en la estimación de intensidades de diseño.

Las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) mantienen coherencia física, evidenciando la disminución de la intensidad con el aumento de la duración y su incremento con el periodo de retorno. Sin embargo, se observan diferencias sistemáticas entre regiones; la Región 2 presenta mayores intensidades, principalmente asociadas a un valor más alto del parámetro c , representativo del nivel base de la precipitación extrema. Estas diferencias confirman que la heterogeneidad identificada es tanto estadística como estructural, vinculada a características hidrológicas locales.

En conjunto, los resultados demuestran que la regionalización es un paso determinante para la adecuada representación de extremos hidrológicos, y que los enfoques de desagregación, aunque robustos, requieren calibración local para minimizar sesgos en la estimación de intensidades de diseño. Se recomienda que futuros estudios incluyan análisis de sensibilidad y validación con eventos independientes para consolidar la aplicabilidad de estos métodos en el diseño hidrológico regional.

5. Conclusiones

El presente estudio evidencia una estructura hidrológica espacialmente heterogénea en el área de estudio, la cual fue representada de manera adecuada mediante la regionalización en dos dominios hidrológicos. Esta clasificación es consistente con los resultados obtenidos a partir del clustering jerárquico y su validación estadística, demostrando la robustez del enfoque metodológico empleado.

Las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) obtenidas mediante la desagregación de precipitaciones máximas diarias y el análisis de frecuencia reprodujeron de manera consistente el comportamiento hidrológico esperado, mostrando un ajuste apropiado del modelo potencial propuesto y confirmando su aplicabilidad para la estimación de intensidades de diseño en la región.

Se identificaron diferencias sistemáticas entre las regiones, con mayores intensidades observadas en la Región 2, lo que resalta la importancia de la regionalización para la caracterización precisa de eventos extremos. Estos hallazgos respaldan la utilidad del enfoque para la estimación de variables críticas en ingeniería hidráulica y planificación de infraestructura.

En síntesis, el enfoque propuesto constituye una alternativa robusta para la generación de curvas IDF en contextos con información pluviográfica limitada, aunque se recomienda la calibración local de los coeficientes de desagregación para garantizar consistencia y confiabilidad en aplicaciones prácticas de diseño hidrológico y evaluación de riesgos.

Referencias

- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied hydrology* (International ed.). McGraw-Hill Book Company. <https://n9.cl/o279kk>
- Coles, S. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>
- Foufoula-Georgiou, E. (1989). A probabilistic storm transposition approach for estimating exceedance probabilities of extreme precipitation depths. *Water Resources Research*, 25(5), 799–806. <https://doi.org/10.1029/WR025i005p00799>.
- Gumbel, E. (1958). *Statistics of extremes* (Reimpresión 2012). Courier Corporation. <https://n9.cl/ph2xb>
- Hosking, J., & Wallis, J. (1997). *Regional frequency analysis: An approach based on L-moments* (Ilustrada, reimpresión). Cambridge University Press. <https://n9.cl/1zra4>
- Koutsoyiannis, D. (2004). Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation. *Hydrological Sciences Journal*, 49(4), 575–590. <https://doi.org/10.1623/hysj.49.4.575.54430>
- Merz, R., & Blöschl, G. (2005). Flood frequency regionalisation—Spatial proximity vs. catchment attributes. *Journal of Hydrology*, 302(1–4), 283–306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.07.018>
- Rousseeuw, P. (1987). Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20, 53–65. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7)
- Sivapalan, M., & Blöschl, G. (1998). Transformation of point rainfall to areal rainfall: Intensity–duration–frequency curves. *Journal of Hydrology*, 204, 150–167. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00117-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00117-0)
- Ward, J. (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 58(301), 236–244. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
- Fernández, L. (2006). *Determinación de las curvas IDF para el Departamento de Oruro* [Artículo]. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXVII(2–3), 70–80. <https://n9.cl/yn5ao>

Transparencia

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de naturaleza alguna como parte de la presente investigación.

Fuente de financiamiento

Los autores financiaron completamente la investigación.

Contribución de autoría

Lina Carla Fernández Gutiérrez: Conceptualización, metodología, software, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, recursos, supervisión.

Jackson David Tellez Alvarez: Conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, recursos, supervisión.

Los autores contribuyeron activamente en el análisis de los resultados, revisión y aprobación del manuscrito final.