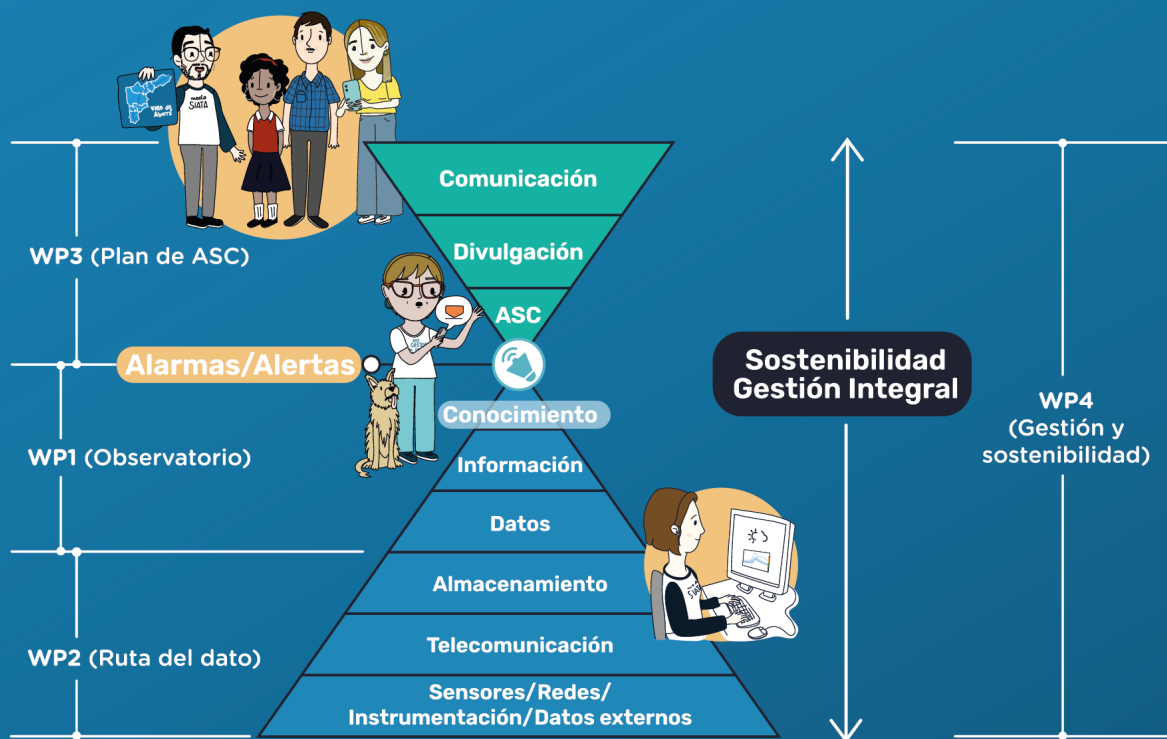


Desarrollar actividades de **investigación aplicada, desarrollo tecnológico y apropiación social del conocimiento para la acción preventiva, la toma de decisiones oportuna para una gestión efectiva del riesgo** (incluyendo variabilidad y cambio climático), y el seguimiento y análisis integral de variables relacionadas con la calidad del aire en el territorio metropolitano, **apoyando el proceso de formulación de políticas públicas y el fortalecimiento de la gobernanza por parte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá**, garantizando el estricto cumplimiento de las actividades de carácter obligatorio reguladas por el marco legal vigente.



Contenido

Introducción	1
Área de estudio	2
Datos y metodología	3
Sensores en tierra	3
Filtrado	3
Análisis de Fourier	6
Cointegración	6
Análisis de humedad y precipitación por eventos	7
Análisis de tendencia de humedad	9
Análisis histórico de lluvia, humedad y movimientos en masa	11
Espacialización de humedad	12
Resultados	13
Señales filtradas	13
Humedad en términos de saturación	14
ARIMA	16
ImputeFin	17
Análisis frecuencial	18
Cointegración	21
Análisis de respuesta de humedad por eventos de lluvia	21
Sensor 296 - h1	23
Sensor 296 - h3	27
Análisis de humedad, tendencia y movimientos en masa	35
Análisis histórico	36
Tendencia y categorización	38
Espacialización de humedad	47
Discusión y conclusiones	54
Procesamientos de datos de humedad	54



Análisis de eventos de humedad y lluvia: Sensor 296 56

Análisis de eventos de humedad y lluvia general 56

Análisis de humedad y movimientos en masa 57

Espacialización de humedad 59

Apéndice: Análisis de Humedad y Eventos de lluvia 59

107 60

188 62

235 64

396 66

422 69

538 71

541 72

553 74

576 75

608 77

618 79

Referencias 81

Evaluación de umbrales de humedad en el terreno como detonantes de eventos e implementación de sensores de humedad

Investigador: Mauricio Felipe Revelo Aristizabal

Introducción

Los movimientos en masa como procesos geomorfológicos destructivos, representan amenazas significativas para la vida humana y la infraestructura a nivel mundial (Petley, 2012; Sidle and Ochiai, 2006). En regiones como el Valle de Aburrá, los períodos de lluvia prolongados a menudo desencadenan movimientos en masa, lo que conduce a pérdidas económicas y humanas sustanciales, exacerbadas por una conciencia de riesgo y peligro inadecuada. El desencadenante de estos eventos está estrechamente ligado a las condiciones de humedad del suelo antecedentes, predominantemente influenciadas por factores como la precipitación (Alexander, 1992; Lindenmaier et al., 2005). La saturación progresiva del suelo aumenta la presión del agua en los poros y disminuye la cohesión, predisponiendo así las pendientes a la inestabilidad (Crozier, 1999; Pelletier et al., 1997; Sidle and Ochiai, 2006). En consecuencia, comprender la dinámica de la humedad del suelo a corto y largo plazo se vuelve primordial para realizar predicciones efectivas y establecer estrategias de mitigación.

Desde el cálculo de umbrales, la investigación se ha centrado principalmente en la lluvia como detonante de deslizamientos (Guzzetti et al., 2007). Estos umbrales suelen considerar factores como la intensidad y duración de los eventos de lluvia desencadenantes o la precipitación acumulada antes de la ocurrencia de los deslizamientos (Guzzetti et al., 2008). Sin embargo, la influencia de las condiciones de humedad del suelo antecedentes en la actividad de los deslizamientos sigue siendo poco explorada, con pocos estudios que analizan este aspecto (Crozier, 1999; Godt et al., 2006; Ponziani et al., 2012). Los existentes mayormente comparan índices de humedad del suelo o niveles de saturación con cantidades de lluvia inmediatamente anteriores a los eventos de deslizamiento, empleando análisis de correlación y umbrales en distintos períodos de tiempo, que van desde episodios individuales hasta décadas (Crozier, 1999; Godt et al., 2006).

Las interacciones entre la atmósfera y el terreno influyen significativamente en la dinámica de la humedad del suelo y, en consecuencia, en la susceptibilidad a los deslizamientos. Procesos como la infiltración, la lluvia, la evaporación, la evapotranspiración y la absorción de agua por las raíces de las plantas, gobernados por mecanismos climáticos, desempeñan roles fundamentales en este contexto (Hemmati et al., 2012). Evaluar el impacto dinámico de variables atmosféricas sobre variables del suelo a lo largo del tiempo y en diferentes escalas, proporciona información valiosa para múltiples aplicaciones en el campo de los movimientos en masa.



Para un análisis preciso de la humedad del suelo y su migración a estas aplicaciones, es necesario contar con datos crudos de buena calidad, ya sean in-situ, modelados o derivados de sensores remotos. La exploración de estas técnicas efectivas permite la aplicación de los datos para su posterior análisis temporal y/o espacial. Si bien los procesos basados en la física se emplean comúnmente para el control de calidad de variables, especialmente en la calibración e instalación de sensores (Allen, 1996), el análisis estadístico y numérico de las observaciones recopiladas sigue siendo un punto focal para mejorar la confiabilidad y utilidad de los datos basados en el campo (Illston et al., 2008).

En este contexto, algunos autores han intentado incluir indirectamente información sobre la humedad del suelo en los umbrales de precipitación (Palau et al., 2023). Con el objetivo de mejorar la capacidad predictiva de los umbrales basados únicamente en la precipitación, Bogaard and Greco (2018) propusieron identificar las condiciones que conducen a los deslizamientos combinando información de lluvia (desencadenante) e información antecedente de humedad del suelo (causa), denominándolos umbrales hidrometeorológicos, en algunos casos, algunos autores han recurrido al uso de herramientas satelitales y de modelación hidrológica distribuida para generar los valores de entrada de humedad (Palau et al. (2023); Zeng et al. (2024); Palazzolo et al. (2023); Marino et al. (2020)). En esta línea investigativa también resalta el estudio de Zhu et al. (2014), donde se analizaron las respuestas de la humedad del suelo ante eventos de lluvia en diferentes posiciones topográficas a lo largo de una ladera mixta en la cuenca del lago Taihu, China. Utilizando sistemas de monitoreo en tiempo real, se evaluó cómo la humedad del suelo varía según la posición topográfica y el uso del suelo. Este enfoque detallado permitió identificar que las posiciones inferiores y de pie de ladera son puntos críticos de recarga lateral, tanto de flujo superficial como subsuperficial, lo cual aporta una comprensión más completa de las dinámicas hidrológicas locales. Este tipo de análisis son útiles para entender la dinámica del agua y su posible relación con los movimientos en masa.

En esta investigación se explora inicialmente la fase de calidad de datos, empleando distintas técnicas para su mejora y la disminución de las limitantes que presentan los datos medidos por los sensores hasta la actualidad, estableciendo una metodología de tratado de datos estandarizada que permita una correcta migración de estos insumos a diferentes aplicaciones. Adicionalmente, se exploran técnicas estadísticas que permitan establecer relaciones entre variables de interés y su impacto sobre la humedad del suelo. Posteriormente, se exploró la construcción de una base de datos de humedad del suelo a partir de los sensores en tierra de SIATA para evaluar su incorporación a los umbrales por lluvia. En este mismo contexto se analizó como bajo diferentes características de lluvia medida a partir de registros pluviométricos, como la humedad respondía según las características in-situ del sensor. Finalmente, se exploraron herramientas para la espacialización de la humedad.

Área de estudio

El Valle de Aburrá, ubicado en el departamento de Antioquia, Colombia, está conformado por varios municipios, incluyendo Caldas, Itagüí, Sabaneta, Bello, Copacabana, Girardota, Barbosa, La Estrella, Envigado y el Distrito de Medellín. Principalmente, se trabajó con dos grupos de sensores, pluviómetros y sensores de humedad en tierra, los cuales fueron seleccionados para ser sometidos a un tratamiento de datos específico, con el objetivo de establecer metodologías y estándares de procesamiento, donde se tuvieron en cuenta algunas características como la estacionariedad, la cantidad y la calidad de los datos de las series temporales registradas por cada uno de ellos.

Datos y metodología

A continuación se muestran las metodologías para el análisis de humedad a escala en tierra y satelital.

Sensores en tierra

En esta sección se presenta la metodología empleada para el análisis de las series temporales y el procesamiento de datos en tierra. En la Figura 1 se puede observar el flujo de trabajo general para el procesamiento de las series de humedad derivadas del monitoreo hidrológico y geotécnico.

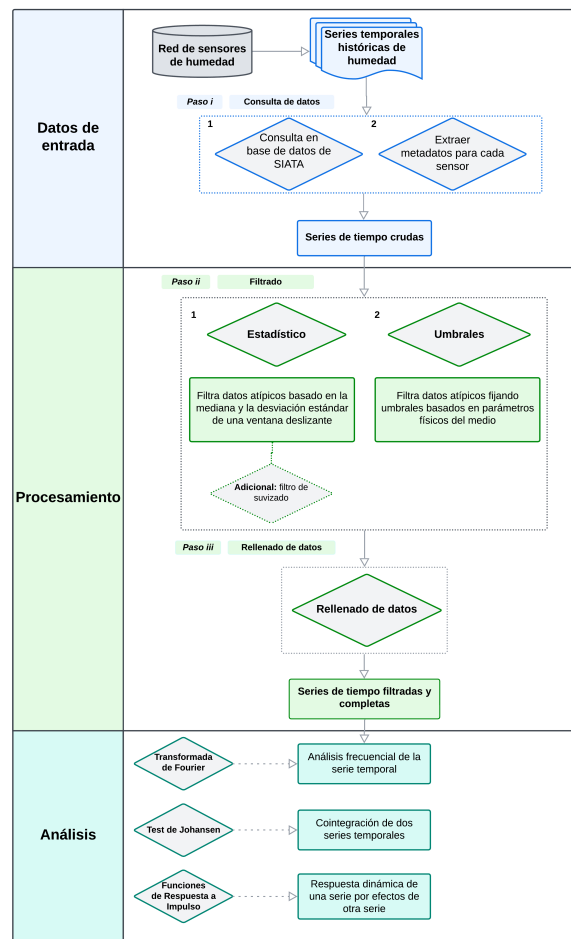


Figura 1: Metodología para procesamiento de señales de humedad del suelo para sensores en tierra.

Filtrado

Se emplearon dos enfoques para el filtrado y control de calidad de los datos, basados en la metodología de You et al. (2010):

- I. **Filtrado Estadístico:** Se identificaron y corrigieron anomalías mediante pruebas de cambio de paso y detección de valores atípicos usando intervalos de confianza en ventanas deslizantes de 180 datos (3 horas). Se calculó la mediana y la desviación absoluta mediana (MAD) para establecer umbrales basados en 2 desviaciones estándar. También se incorporó un filtro de suavizado Gaussiano para reducir el ruido instrumental en la señal.
- II. **Filtrado por Umbral:** Se establecieron límites físicos o teóricos para los valores medidos, como capacidad de campo, porosidad y punto de marchitez en humedad del suelo. Los valores por fuera de estos límites fueron considerados anomalías. Esto se apoya en ensayos de suelo realizados en los puntos de instalación.

Para el filtrado de umbral, un valor útil para comparar múltiples puntos es la saturación, expresada en una escala de 0 a 100 %. Este valor muestra cómo el volumen de agua ocupa los espacios vacíos en el suelo. La humedad del suelo y la saturación se relacionan de la siguiente manera según Das (2009),

$$\theta = \frac{V_w}{V_m} \quad \text{y} \quad S_w = \frac{V_w}{V_v} \quad (1)$$

donde:

- $V_m = V_v + V_s$: el volumen total del suelo, compuesto por el volumen de vacíos (V_v) y el volumen de sólidos (V_s).
- V_w : volumen de agua en el suelo.

En otros términos, V_s puede expresarse como $\frac{V_v}{e}$, donde e es la relación de vacíos. Reemplazando los términos de θ en 1 se obtiene la ecuación a continuación,

$$\theta = \frac{eV_w}{1 + eV_v} \quad (2)$$

Aquí $\frac{V_w}{V_v}$ es S_w , por lo que la ecuación se vuelve:

$$\theta = \frac{eS_w}{1 + e} \quad (3)$$

Donde en función del contenido volumétrico de agua y la relación de vacíos la saturación es:

$$S_w = \frac{\theta(1 + e)}{e} \quad (4)$$

Adicionalmente, la porosidad (n) se calcula como:

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (5)$$

Rellenado de datos faltantes

Se exploraron dos metodologías:

ARIMA

El modelo ARIMA (*Modelo Autorregresivo Integrado de Media Móvil*) es una técnica estadística para el análisis de series temporales, que combina componentes autorregresivos (AR), medias móviles (MA) y diferenciación integrada (I) para transformar la serie en estacionaria (James and Tripathi, 2021; Kontopoulou et al., 2023). Su ecuación general, para un modelo ARIMA(p, d, q), es:

$$X_t = c + \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \theta_2 \epsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} + \epsilon_t \quad (6)$$

donde p , d , y q son los órdenes del modelo autorregresivo, de diferenciación, y de media móvil, respectivamente; ϕ_i y θ_j son los coeficientes de AR y MA; ϵ_t es el término de error; y c es una constante.

El modelo se utiliza para prever valores futuros mediante un proceso iterativo que incluye identificación, estimación de parámetros y pruebas diagnósticas. La selección del mejor modelo se realizó mediante búsqueda en cuadrícula, probando combinaciones de p , d , y q , ajustando modelos y seleccionando el que minimizó el AIC (*Criterio de Información de Akaike*).

ImputeFin

ImputeFin es una librería en R diseñada para la imputación de datos faltantes en series temporales, desarrollada por Liu et al. (2019). Implementa un modelo autorregresivo (AR) con distribuciones de cola pesada y un algoritmo de *Expectation-Maximization estocástico* (SAEM) combinado con *Monte Carlo de Cadenas de Markov* (MCMC). El algoritmo se compone de los siguientes puntos principales:

- I. **Modelo AR(1):** Modela la serie temporal con la ecuación (7):

$$y_t = \phi_0 + \phi_1 y_{t-1} + \epsilon_t \quad (7)$$

donde y_t depende linealmente de y_{t-1} . Las innovaciones ϵ_t se modelan con una distribución t de Student, útil para manejar valores atípicos.

- II. **Innovaciones heterocedásticas:** Para capturar heterocedasticidad, ϵ_t se modela como una mezcla gaussiana con varianza dependiente de τ_t , una variable aleatoria gamma, según las ecuaciones (8) y (9):

$$\epsilon_t \mid \sigma^2, \tau_t \sim N\left(0, \frac{\sigma^2}{\tau_t}\right) \quad (8)$$

$$\tau_t \sim \text{Gamma}\left(\frac{\nu}{2}, \frac{\nu}{2}\right) \quad (9)$$

- III. **Paso E (Expectation):** Se aproxima la expectativa del logaritmo de la verosimilitud completa mediante muestreo Gibbs de las variables latentes τ y los valores faltantes y_{mis} , como se muestra en la ecuación (10):

$$Q(\theta \mid \theta^{(k)}) = \mathbf{E}_{Z \mid X, \theta^{(k)}} [\log p(X, Z \mid \theta)] \quad (10)$$

donde X son datos observados y Z son variables latentes.

- IV. **Paso M (Maximization):** Actualiza los parámetros $\theta = \{\phi_0, \phi_1, \sigma^2, \nu\}$ maximizando Q en cada iteración, de acuerdo con la ecuación (11):

$$\theta^{(k+1)} = \arg \max_{\theta} Q(\theta \mid \theta^{(k)}) \quad (11)$$

Este proceso se repite hasta alcanzar la convergencia.

El modelo fue evaluado con datos de sensores de humedad, usando métricas como el *Error Cuadrático Medio* (RMSE), *Error Absoluto Medio* (MAE) y el *Coefficiente de Determinación* (R^2). Los escenarios de datos faltantes fueron generados con bloques únicos (2 semanas, 5 días, 15 horas) y múltiples bloques. La imputación se realizó de manera iterativa.

Análisis de Fourier

La transformada de Fourier es una herramienta matemática que descompone una función o señal en sus componentes de frecuencia (Van Dronghen, 2018). Para una función continua $f(t)$, su transformada de Fourier $F(\omega)$ se define en la ecuación (12) como:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt, \quad (12)$$

donde $f(t)$ es la función en el dominio del tiempo o espacio, y $F(\omega)$ es su representación en el dominio de las frecuencias, permitiendo identificar las distintas frecuencias que componen una señal.

Para su aplicación, es fundamental garantizar una tasa de muestreo uniforme y la ausencia de datos faltantes. La compresión de la señal en el dominio frecuencial permitió establecer propuestas de nuevas tasas de muestreo para el análisis de datos, reduciendo el ruido instrumental y evitando el comportamiento sintético de la señal observado con las tasas originales de 1 minuto.

Cointegración

El concepto de cointegración permite identificar relaciones de largo plazo entre series temporales no estacionarias. Aunque las series individuales puedan ser no estacionarias, una combinación lineal de ellas puede ser estacionaria, como ocurre frecuentemente entre la precipitación y la humedad. Este análisis se basó en el método de máxima verosimilitud con información completa desarrollado por Johansen (1988), el cual permite estimar múltiples relaciones de cointegración y evaluar cómo estas se ven afectadas por impulsos a corto y largo plazo (Kaufmann, 2002).

El test de cointegración se basó en dos estadísticos fundamentales:

- I. **Estadístico de Traza (ET):** Evalúa el número total de vectores de cointegración presentes.
- II. **Estadístico de Máxima Raíz Característica (EMRC):** Examina cada posible número de vectores de cointegración individualmente.

Ambos estadísticos se compararon con valores críticos para determinar la presencia y número de relaciones de cointegración entre las series temporales.

El análisis se realizó bajo el supuesto de que las series temporales pueden ser representadas por un modelo de *Autoregresión Vectorial* (VAR) en niveles, donde cada variable incluye rezagos de sí misma y de todas las demás variables del modelo. Este modelo se expresa en la ecuación (13):

$$\hat{y}_t = B_1 y_{t-1} + \dots + B_k y_{t-k} + M + Dt + \delta d_t + E_t, \quad (13)$$

donde:

- $\hat{y}_t$: Vector de variables endógenas en el tiempo t .
- $B_1, \dots, B_k$: Matrices de coeficientes de los rezagos de las variables endógenas.
- $y_{t-1}, \dots, y_{t-k}$: Vectores de variables endógenas rezagadas.
- M : Vector de constantes.
- Dt : Término de tendencia determinística.
- δd_t : Término de variables exógenas.
- E_t : Vector de términos de error con distribución normal multivariante, media cero y varianza constante.

El modelo permite evaluar las relaciones de equilibrio a largo plazo y su respuesta a perturbaciones a corto plazo, utilizando pruebas estadísticas para identificar la presencia y número de vectores de cointegración.

Análisis de humedad y precipitación por eventos

El contenido volumétrico de agua del suelo responde dinámicamente a eventos de precipitación, lo cual permite comprender procesos hidrológicos en pendientes con diferentes usos del suelo, afectando su capacidad para almacenar y transmitir agua, influyendo en el flujo subsuperficial y la estabilidad del terreno, con la precipitación como factor principal Zhu et al. (2014).

A partir de la integración de humedad y lluvia, se seleccionaron sensores con al menos ocho meses continuos de datos y con menos de una semana de datos faltantes. Este análisis permitió evaluar cómo la precipitación influye en la humedad a distintas posiciones topográficas y profundidades, mejorando la comprensión de procesos de infiltración y flujo subsuperficial. La Figura 2 muestra la distribución de sensores seleccionados.

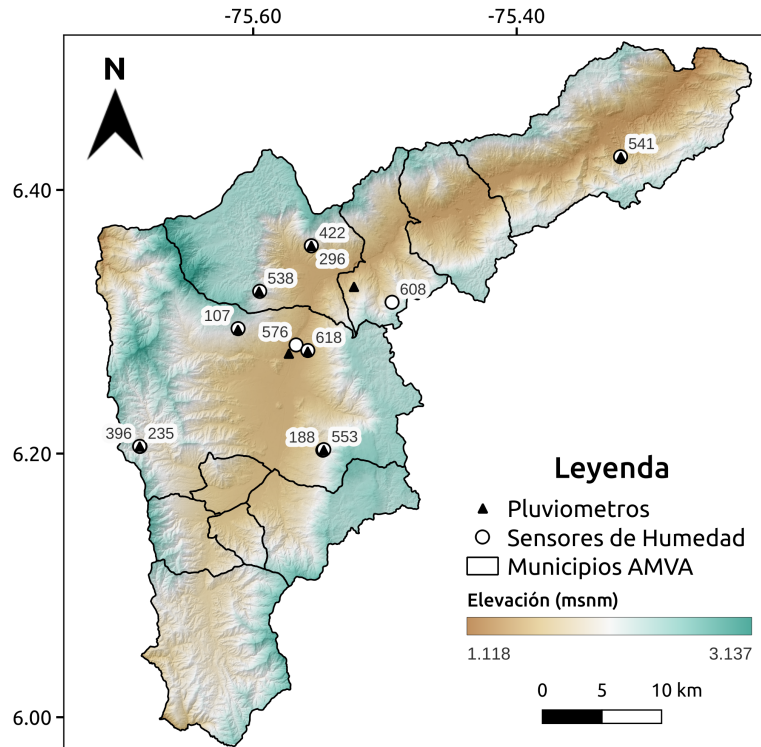


Figura 2: Mapa de distribución espacial de sensores de humedad y pluviómetros.

Posteriormente, se utilizó una base de datos de eventos de lluvia categorizada por el equipo de Meteorología de SIATA, que clasifica los eventos de la red de pluviómetros en cuatro categorías: Débil, Moderado, Fuerte y Muy Fuerte, hasta agosto de 2024. Para cada evento, se analizó el comportamiento de la humedad en una ventana temporal de 12 horas antes del inicio y después de la finalización del evento meteorológico. Se calcularon las siguientes métricas: humedad inicial (%), delta máximo de humedad (%), lluvia acumulada (mm), intensidad de lluvia (mm/h), rezago (lags/horas), duración del evento de lluvia y humedad antecedente de 48 horas (%).

La Figura 3 presenta un gráfico ilustrativo de un evento muy fuerte para el sensor 608, representando estas métricas.

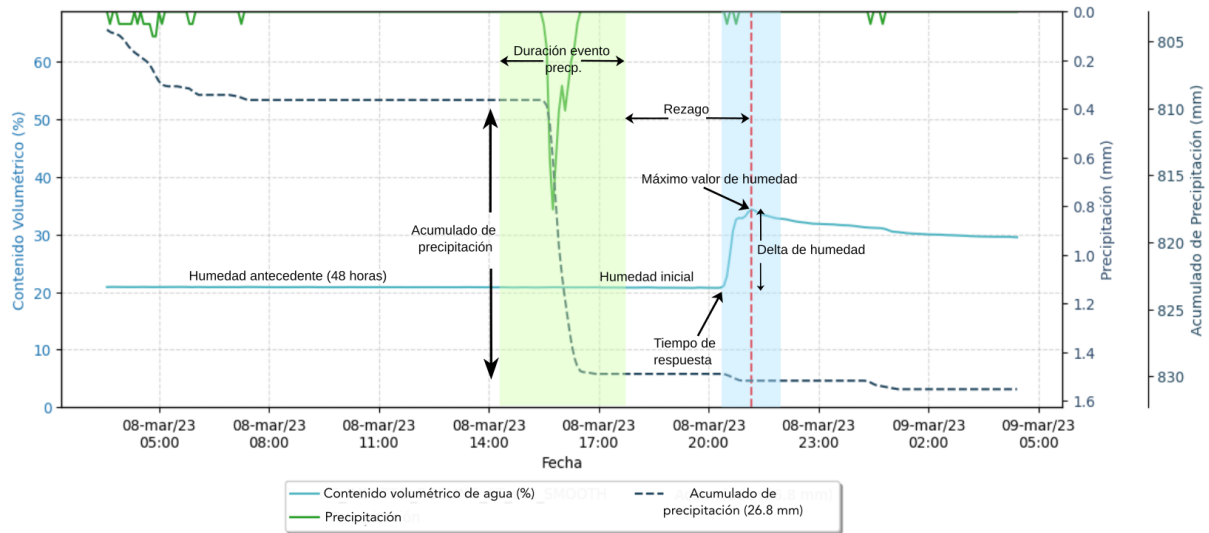


Figura 3: Patrones típicos de la respuesta de la humedad del suelo a las precipitaciones (0,5 m de profundidad en sensor 608, evento Muy Fuerte, 8 de marzo de 2023).

Entre las variables por evento, se realizó un análisis de correlación de Spearman para identificar cuáles tenían una mayor relación con el comportamiento la humedad. Adicionalmente, se analizaron los eventos de lluvia en correspondencia temporal con los movimientos en masa reportados en el inventario. Las características evaluadas de la lluvia incluyeron el acumulado, la intensidad media y la duración. Para asociar los eventos de lluvia con los de movimientos en masa, se consideró una cláusula que permite esta relación hasta 48 horas posteriores a la finalización del evento de lluvia.

Análisis de tendencia de humedad

Se quiso evidenciar la influencia de tendencias mensuales y de más largo plazo de la humedad del suelo derivada de los sensores, ligados a movimientos en masa. La metodología aplicada para detectar tendencias en las series temporales de humedad del suelo y precipitación se fundamenta en dos herramientas estadísticas robustas: el test de Mann-Kendall modificado y la pendiente de Sen, con el fin de evaluar la existencia de una tendencia monotónica y su magnitud en series temporales que potencialmente presentan dependencia temporal y no linealidades (Carmona and Poveda, 2014). A continuación se presentan las dos herramientas:

Test de Mann-Kendall Modificado

El test de Mann-Kendall es una prueba no paramétrica utilizada para detectar tendencias en series temporales sin asumir normalidad en los datos (Carmona and Poveda, 2014). Evalúa si una serie presenta una tendencia ascendente o descendente mediante el cálculo del estadístico S , definido en la ecuación (14):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (14)$$



donde x_j y x_k son valores observados en los tiempos j y k , y sign devuelve +1, 0 o -1 según si la diferencia es positiva, nula o negativa. Un S positivo indica una tendencia creciente y un S negativo, decreciente.

El test clásico asume independencia en los datos, pero en series con autocorrelación, como la humedad del suelo, se ajusta la varianza de S considerando la autocorrelación (ρ_i) según la ecuación (15):

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2) \cdot \rho_i \quad (15)$$

Finalmente, el estadístico Z para el test modificado se define como se muestra en la ecuación (16):

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S > 0, \\ 0 & \text{si } S = 0, \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S < 0. \end{cases} \quad (16)$$

Este ajuste mejora la robustez del test frente a la dependencia temporal, proporcionando resultados más precisos en series con autocorrelación.

Pendiente de Sen

La pendiente de Sen es un método no paramétrico que estima la magnitud de la tendencia detectada por el test de Mann-Kendall (Carmona and Poveda, 2014). Se calcula derivando la pendiente entre todos los pares de puntos de datos de la serie temporal, como se muestra en la ecuación (17):

$$\beta = \text{mediana} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad \text{para } i < j \quad (17)$$

Este método es robusto frente a datos atípicos y faltantes, ya que al basarse en la mediana, proporciona una medida confiable de la tendencia incluso en presencia de ruido o variabilidad significativa en los datos.

Análisis de tendencia y categorización

El residual de la serie de humedad del suelo se obtuvo mediante el proceso de *Empirical Mode Decomposition* (EMD), que descompone la serie temporal en una suma de *Intrinsic Mode Functions* (IMFs) y un componente de tendencia (residual) (Carmona and Poveda, 2014). Las IMF $c_i(t)$ representan oscilaciones de diferentes frecuencias, mientras que el residual $r_n(t)$ refleja la tendencia de largo plazo de la serie. El EMD descompone la serie $x(t)$ como:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (18)$$

En este análisis, el residual se utilizó para aplicar el test de Mann-Kendall modificado y calcular la pendiente de Sen, lo que permite evaluar la existencia y magnitud de la tendencia.

La categorización de los datos de humedad del suelo se realizó utilizando los percentiles $Q1$ (25 %) y $Q3$

(75 %), junto con el rango inter cuartil (IQR). El cálculo se desarrolló usando todo el histórico disponible para el sensor, como se puede ver en la Figura 4. Los límites de categorización se definieron como:

- **Muy Bajo:** Valores por debajo de $Q1 - 1,5 \cdot IQR$ (Bigote Inferior)
- **Bajo:** Entre $Q1 - 1,5 \cdot IQR$ y $Q1$
- **Normal:** Entre $Q1$ y $Q3$
- **Alto:** Entre $Q3$ y $Q3 + 1,5 \cdot IQR$
- **Muy Alto:** Valores por encima de $Q3 + 1,5 \cdot IQR$ (Bigote Superior)

Para cada intervalo de tiempo, se calculó la proporción de datos que se encuentran dentro de estas categorías. Esta información es relevante para identificar periodos en los que la humedad del suelo puede estar potencialmente correlacionada con eventos movimientos en masa cercanos.

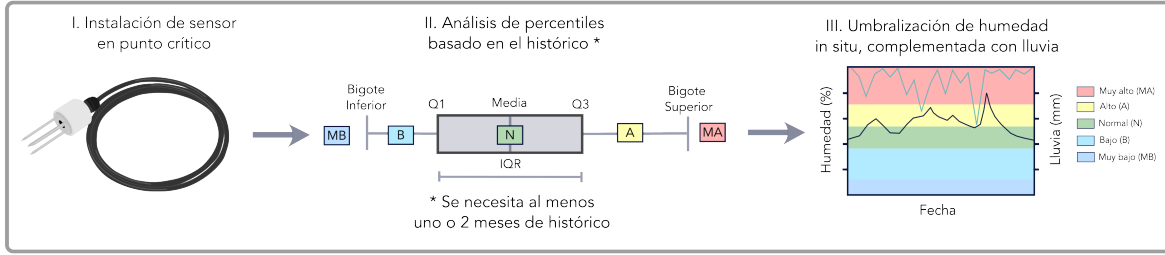


Figura 4: Metodología para umbralización de humedad en puntos in situ derivado de sensores de humedad.

Análisis histórico de lluvia, humedad y movimientos en masa

Zhang et al. (2025) emplean un análisis bayesiano bivariado para estimar la probabilidad condicional de ocurrencia de deslizamientos $P(L | V_1, V_2)$, a partir de variables de severidad de lluvia y saturación del suelo, la ecuación 19 se describe como se construye la matriz de probabilidad,

$$P(L | V_1, V_2) = \frac{P(V_1, V_2 | L) \cdot P(L)}{P(V_1, V_2)} \quad (19)$$

Estas probabilidades se estiman mediante frecuencias relativas:

$$P(L) \approx \frac{N_L}{N_{RE}} \quad (20)$$

$$P(V_1, V_2) \approx \frac{N_{V_1, V_2}}{N_{RE}} \quad (21)$$

$$P(V_1, V_2 | L) \approx \frac{N(V_1, V_2 | L)}{N_L} \quad (22)$$

A partir de las bases de datos de lluvia de meteorología y humedad del suelo derivada de productos satelitales como SMAP, se realizó una clasificación por categorías de valores representativos de severidad e intensidad. Estas categorías se analizaron frente al historial de eventos pasados con el fin de estimar la probabilidad condicional de ocurrencia de deslizamientos asociada a cada combinación de condiciones. Adicionalmente se asoció condiciones de humedad antecedente a esto mismos deslizamientos en una ventana de 4.5 días y evaluar los valores más comunes.

A partir de estas bases de datos se construyó un nuevo conjunto de datos que integra variables representativas de eventos de lluvia como duración, intensidad, precipitación acumulada y energía junto con variables de humedad del suelo derivadas de productos satelitales, tales como saturación máxima, saturación antecedente y promedios temporales. Esta base fue estructurada de forma que cada registro corresponde a una combinación de condiciones clasificadas en dos categorías: aquellas asociadas a eventos de movimientos en masa y aquellas que no generaron deslizamientos.

Espacialización de humedad

En esta sección se presentan las metodologías para la espacialización de la humedad. En la contraparte satelital, se exploraron cuatro estrategias para espacializar la humedad a escala del valle: Modelos hidrológicos y productos satelitales. Para la modelación hidrológica se utilizó el Soil and Water Assessment Tool (SWAT), un modelo en estudios de cuencas hidrográficas.

SWAT permite representar el comportamiento hidrológico en áreas geográficamente diversas al subdividir una cuenca en subcuencas y unidades de respuesta hidrológica (HRUs) (Janjić and Tadić, 2023). Cada HRU integra características específicas de suelo, uso del suelo y manejo, lo que permite que SWAT capte la variabilidad espacial y temporal de procesos hidrológicos de interés. Gracias a esta estructura, el modelo puede simular con precisión el flujo de agua y la humedad del suelo en diferentes capas (Janjić and Tadić, 2023). En este proyecto, el equipo de hidrología de SIATA proporcionó un modelo SWAT calibrado con datos hasta 2023, obteniendo series de tiempo de humedad del suelo en unidades de milímetros y escala diaria.

Para la segunda fuente de datos se analizaron dos satélites, el primero fue la misión satelital Soil Moisture Active Passive (SMAP) de la NASA, que ofrece estimaciones globales de humedad del suelo mediante observaciones en la banda L de microondas (Reichle et al., 2019). SMAP utiliza un radiómetro pasivo, que permite observar la humedad en las primeras capas del suelo (hasta 5 cm) y estimar la humedad en zonas más profundas (hasta 100 cm). Este producto proporciona datos a una resolución espacial de 9 km cada 3 horas. Con la actualización a su versión 4, SMAP ha mejorado la precisión, reduciendo el sesgo en las estimaciones de humedad en la superficie y la zona de raíces (Reichle et al., 2019). Se compararon las series de tiempo del satélite con 5 sensores en tierra, evaluando su nivel de correlación.

La segunda estrategia fue el desarrollo del modelo 'trapezoide' o 'triángulo'. Este es uno de los enfoques más utilizados en teledetección para estimar la humedad superficial del suelo, combinando información térmica y óptica (Sadeghi et al., 2017). En este contexto, el modelo térmico-óptico trapezoidal (TOTRAM) se define en función de la temperatura de la superficie terrestre y el índice de vegetación, como se expresa:

$$W_T = \frac{i_d + s_d \text{NDVI} - \text{LST}}{i_d - i_w + (s_d - s_w) \text{NDVI}} \quad (23)$$

Dado que TOTRAM depende de datos térmicos, su aplicación es limitada a satélites con esta información, por ende, se usó la misión Landsat 8. Se evaluó el desempeño de TOTRAM con 5 sensores in situ de la red de sensores de humedad de SIATA para evaluar su desempeño.

Adicionalmente, la tercera estrategia implementó productos derivados del satélite ERA-5 que ofrece productos de humedad derivados de un re-análisis. En este también se evaluó la correlación a nivel de pixel a 9km con 6 sensores en tierra.

Adicionalmente, como cuarta estrategia, para las misiones que ofrecen un producto satelital como SMAP y ERA5 se les aplicó un método de smart downscaling para estimar la humedad del suelo a 1 km de resolución espacial, utilizando la plataforma de computación en la nube Google Earth Engine.

En esta metodología se combina el producto de humedad del suelo de 9 km con mediciones ópticas y térmicas de MODIS, mediante un modelo de regresión con Random Forest. El procedimiento consta de tres pasos: (1) extracción de índices de humedad y variables a resolución moderada (NDVI, LST diurno, diferencia de LST diurno-nocturno y reflectancias en bandas NIR y SWIR, evapotranspiración, cobertura vegetal y LAI (Leaf Area Index)), (2) entrenamiento del modelo con datos satelitales para establecer relaciones con los índices de humedad a través de Random Forest, y (3) predicción de la humedad a 1 km usando el modelo entrenado.

Se corrige el sesgo mediante una ecuación de ajuste basada en la media de píxeles. La metodología y detalles fueron tomados de Mohseni et al. (2024). El algoritmo usado es el clasificador smileGradient-TreeBoost en Google Earth Engine, el cual está basado en Gradient Boosted Trees (GBT) que optimiza secuencialmente múltiples árboles de decisión para mejorar la precisión en tareas de clasificación supervisada.

Resultados

A continuación, se presentan los resultados para todas las fases de investigación, desde el procesamiento de las series temporales de humedad hasta la correlación con eventos de lluvia y espacialización.

Señales filtradas

El filtrado se aplicó en las señales de los cinco sensores. Para efectos de visualización, en la Figura 5 se puede observar la señal para 1 año (2021 a 2022), suavizada y con valores atípicos corregidos con el filtrado estadístico para el sensor 541.

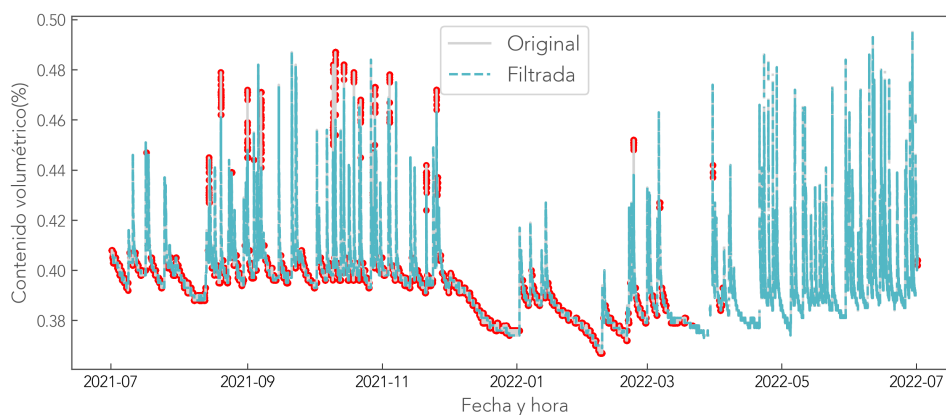


Figura 5: Señal con filtro estadístico para sensor 541.

En la Figura 6 se puede ver el resultado del filtrado adicional de suavizado para el sensor 532 para la señal tomada entre febrero y marzo de 2023.

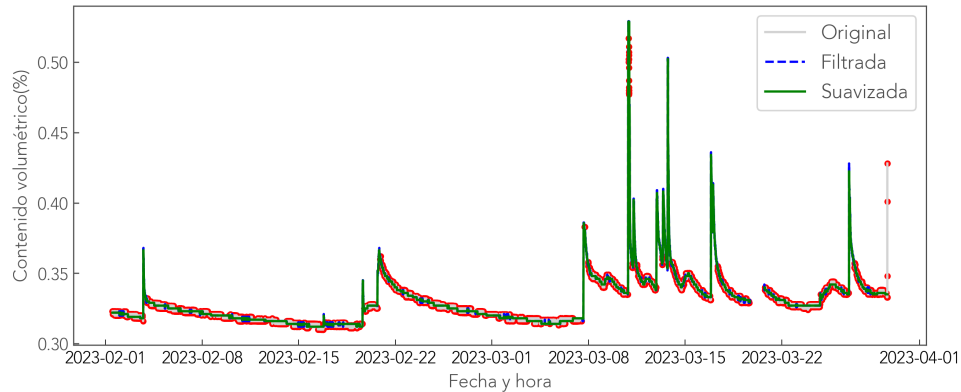


Figura 6: Señal con estadístico y de suavizado para sensor 532.

Finalmente, en la Figura 7 se observa que el filtrado basado en propiedades físicas hipotéticas.

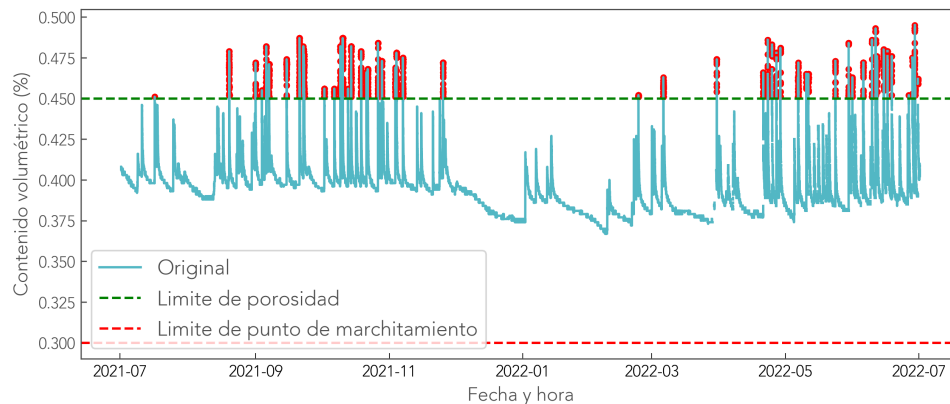


Figura 7: Señal con filtro físico para sensor 541.

Humedad en términos de saturación

A partir de la relación propuesta y con los resultados de laboratorio se usó la relación de vacíos para transformar los datos a saturación. A manera de ejemplo, se muestran los puntos ubicados en la fortuna en la parte alta (Figuras 8 y 9). Los valores para este punto oscilaron en promedio al rededor de 70 y 80 % de saturación para el periodo consultado entre agosto y octubre de 2024 (estación 725). Para los otros puntos (726, 731 y 732) se obtuvieron promedios al rededor de 80 %. Estos valores tienen sentido debido a que los resultados muestran suelo de clasificación MH(limo elástico) y permeabilidades en el orden de -8 , siendo de granulometría muy fina.

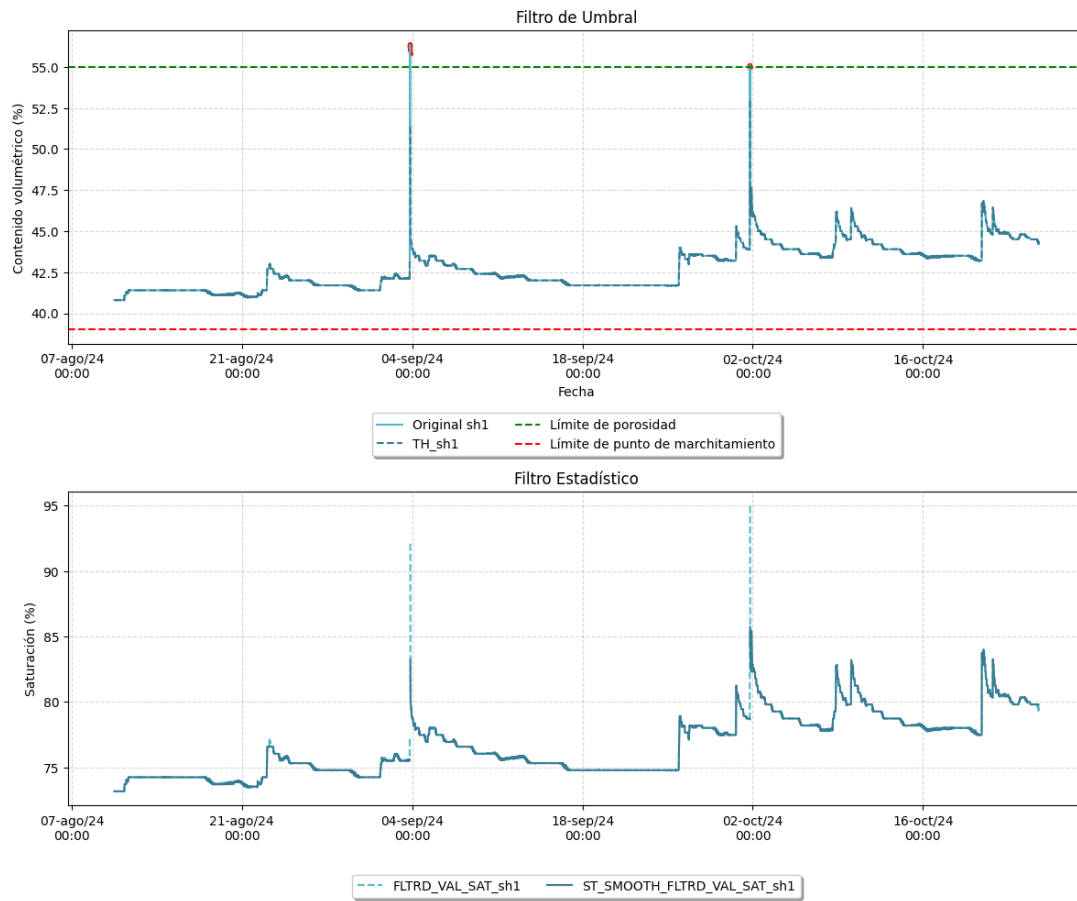


Figura 8: Serie de saturación para estación 725 a 70 centímetros de profundidad.

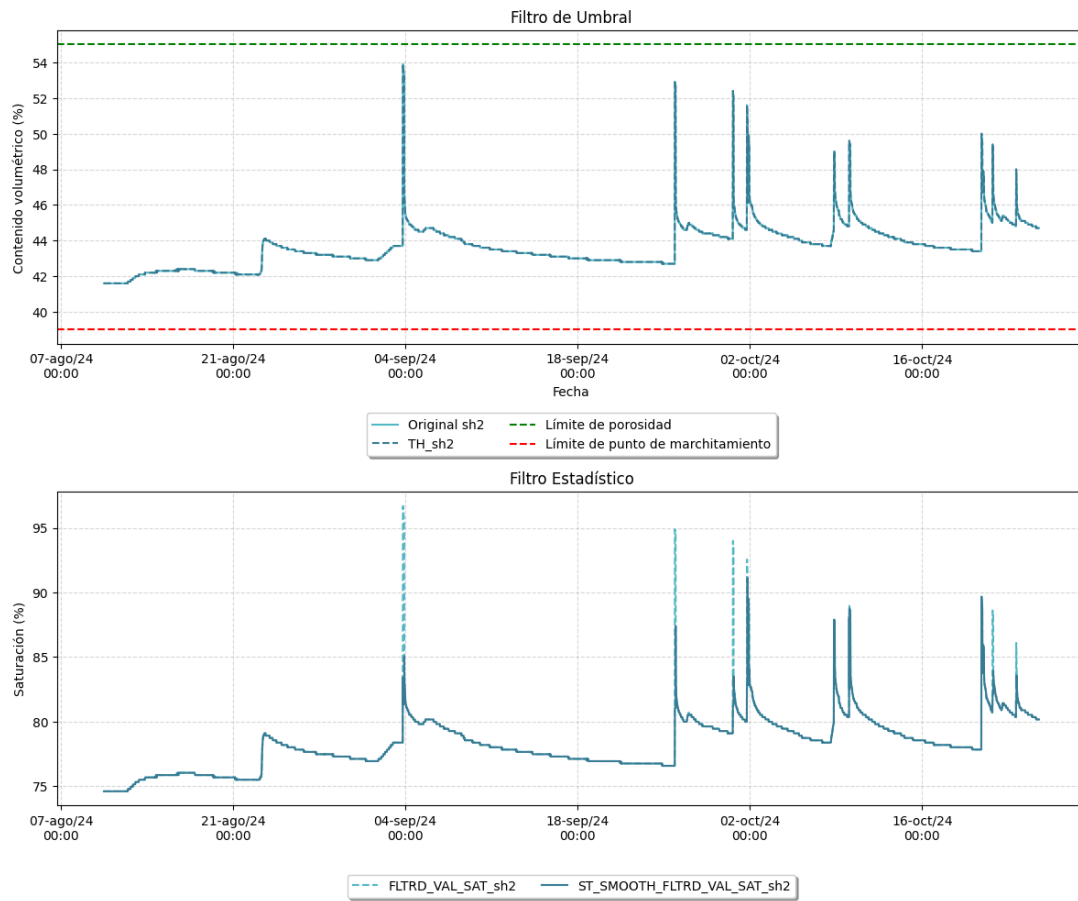


Figura 9: Serie de saturación para estación 725 a 1 metro de profundidad.

ARIMA

En esta sección, se presentan a detalle los resultados para la estación 541 (Vereda Potrerito - Barbosa). Se obtuvo que el mejor modelo ARIMA según el criterio de información de Akaike (AIC) fue (2, 0, 1), este mostró un ajuste con un valor de -88791.829, implicando un equilibrio entre la complejidad del modelo y su capacidad para explicar la variabilidad de los datos. Los coeficientes indican una fuerte relación autorregresiva con valores de 0.8572 para $ar.L1$ y 0.0705 para $ar.L2$, y un efecto moderado de media móvil en la serie temporal, con un coeficiente de 0.2985 para $ma.L1$. Sin embargo, los tests estadísticos revelan que los residuos no son completamente independientes ni normalmente distribuidos, con evidencias de heteroscedasticidad indicadas por un ratio de 1.43, lo que sugiere que podría ser necesario un ajuste adicional del modelo para abordar estas características de los datos. En la Figura 10 se puede ver el modelo ajustado, con un zoom para mejor visualización.

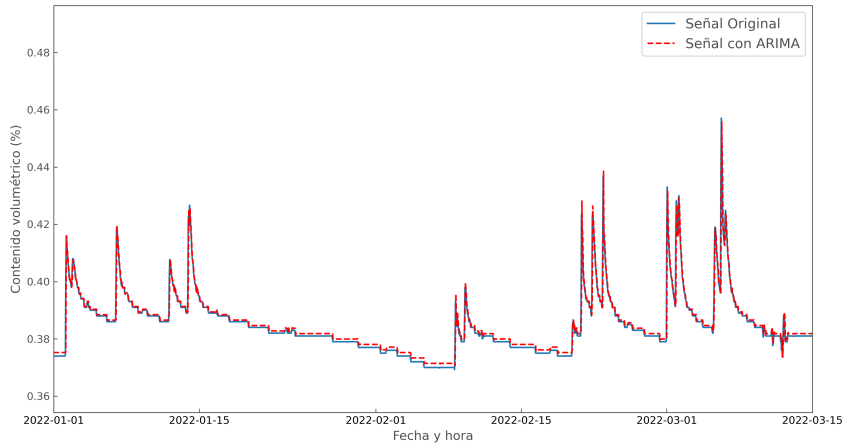


Figura 10: Modelo ARIMA ajustado a rango entre para sensor 541.

En la Tabla 1 se presentan las métricas de los modelos ARIMA ajustados para otras estaciones seleccionadas.

Tabla 1: Resultados de Modelos ARIMA

Estación	Fecha selec.	Modelo	AIC	AR(1)	AR(2)	MA(1)	H
608	01/2023 a 05/2024	(2, 1, 2)	-183787.33	0.6791	0.0711	-0.4688	0.75
532	05/2023 a 05/2024	(1, 1, 2)	-148713.18	0.7551	NA	-0.5389	4.66
396 (Sensor 1)	05/2023 a 05/2024	(2, 1, 2)	-279354.61	1.0035	-0.1824	-0.6969	0.78
396 (Sensor 2)	05/2023 a 05/2024	(1, 0, 2)	-286750.41	0.9845	NA	0.3536	0.86
613	05/2023 a 05/2024	(2, 0, 2)	-170341.39	1.6369	-0.6375	-0.2989	2.13

ImputeFin

Para evaluar la precisión del modelo, se seleccionaron rangos con datos completos o con muy poco porcentaje de datos faltantes para todos los sensores. Estos resultados son generales y extrapolables a las demás series. Para los bloques individuales se definieron 3 rangos, obteniendo los siguientes estadísticos (ver Tabla 2).

Periodo	RMSE	MAE	R^2
15 horas	0.00075	4.70e-05	0.99
5 días	0.00304	0.00048	0.93
2 semanas	0.00674	0.00168	0.68

Tabla 2: Resultados de las métricas por diferentes periodos de tiempo.

En la Figura 11 se puede ver la comparación entre la serie original y el resultado de la serie ajustada con el algoritmo y adicionalmente se puede ver un gráfico de correlación entre los datos observados y simulados.

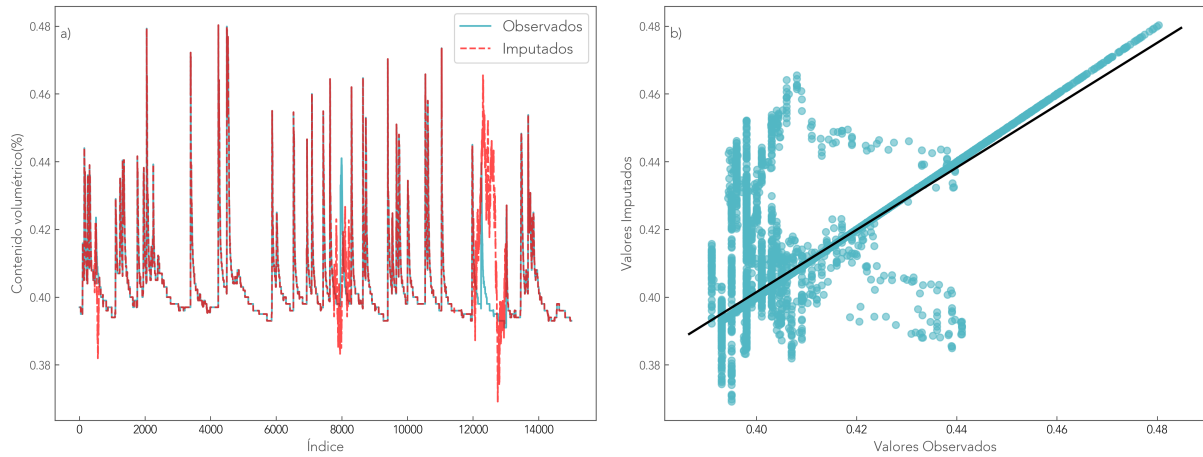


Figura 11: Serie rellenada. a) Obs vs Sim y b) Diagrama de correlación.

Para el caso de los bloques simultáneos, en la Figura 12 se puede visualizar el resultado. Se definieron escalas de 1 semana, 1 día, 12 horas y 1 hora de pérdida de datos.

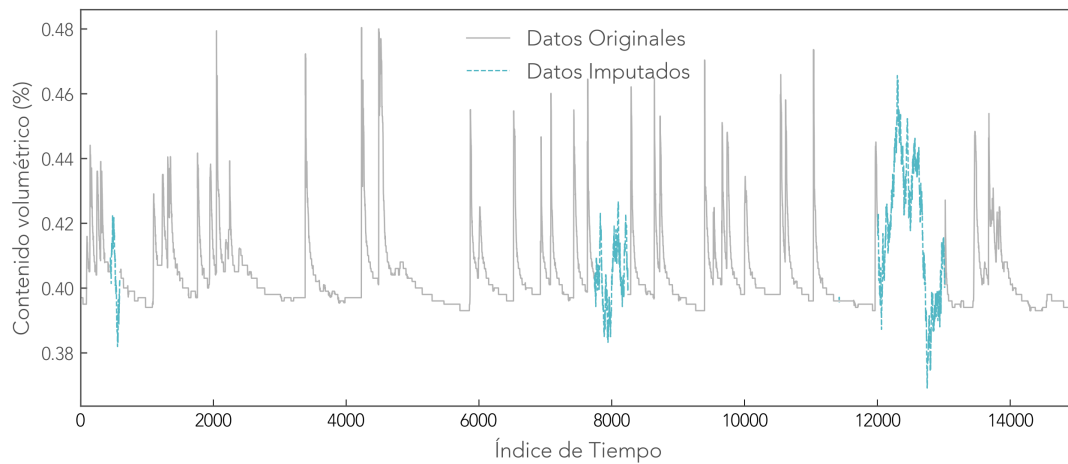


Figura 12: Serie rellenada con imputeFin.

El valor de RMSE es 0.0077, MAE es 0.0019 y R^2 es 0.5841.

Análisis frecuencial

En la Figura 13 se pueden observar los espectros originales a 1 minuto y los espectros resultantes de la señal remuestreada a un primer valor de 30 minutos. Según el criterio de Nyquist-Shannon en el lapso de 6 meses seleccionado, el límite de lo que se considera ruido, está en promedio por encima de 10^{-3} Hz para la mayoría de sensores, el doble de este valor arroja promedios de 1 hora, en donde si se considera esta tasa de muestreo, se estarían conservando todas las características importantes de la señal original.

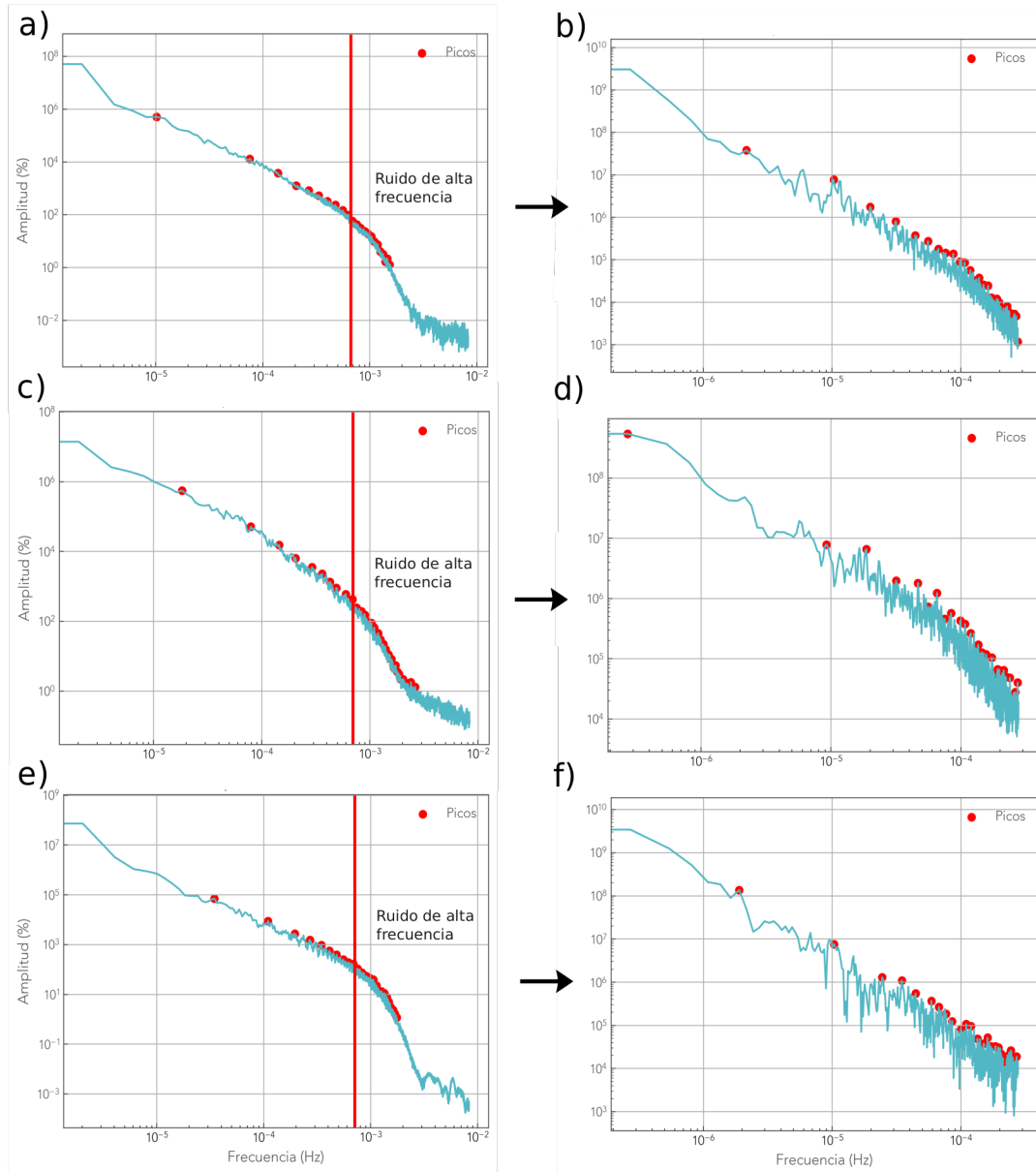


Figura 13: Espectros. a) espectro de Fourier de sensor 613 a 1 minuto, b) espectro de Fourier de sensor 613 a 30 minutos, c) espectro de Fourier de sensor 532 a 1 minuto, d) espectro de Fourier de sensor 532 a 30 minutos, e) espectro de Fourier de sensor 608 a 1 minuto y f) espectro de Fourier de sensor 608 a 30 minutos.

En la Figura 14 se muestran los espectros de Fourier para las series temporales para 5 sensores para otro ejemplo de muestreo de 10 minutos.

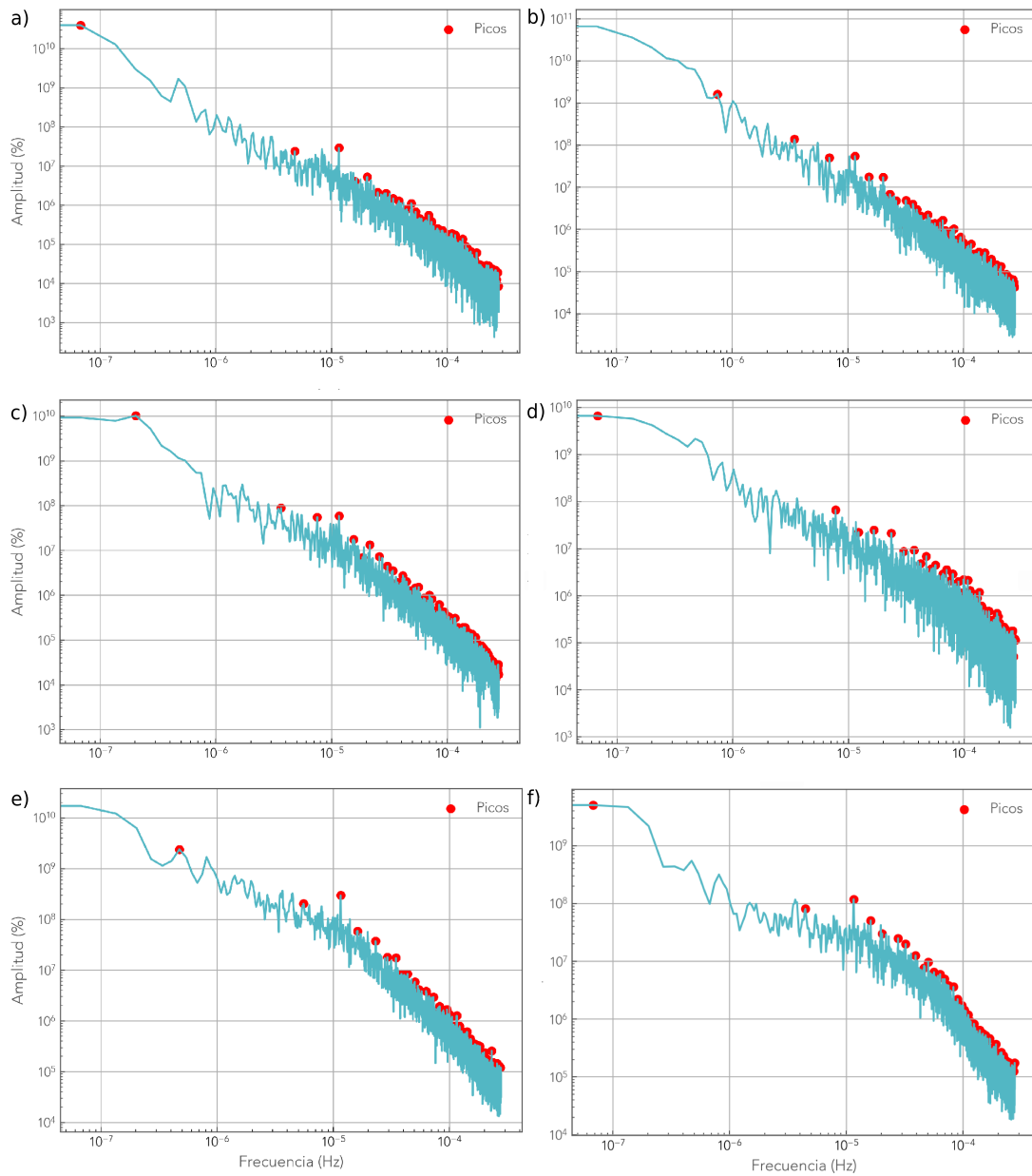


Figura 14: Espectros de Fourier. a)Sensor 613, b)sensor 608, c)sensor 541, d)sensor 532, e)sensor 396-2 y f)sensor 396-1

En la Tabla 3 se pueden ver las frecuencias características en lapsos de días analizados a partir de los espectros de 10 minutos. Algunos picos frecuenciales distinguibles muestran ciclos predominantes alrededor de 170, 55, 24 y 2 días (desde la izquierda a la derecha respectivamente).

Sensor 613	Sensor 608	Sensor 396 - 1	Sensor 396 - 2	Sensor 532	Sensor 541
170	15	170.6	24	170.6	56
2.4	3.3	2.5	2.0	1.4	3
0.9	1.5	0.9	0.9	0.9	1
0.7	1	0.7	0.7	0.7	0.9

Tabla 3: Picos de periodicidad.

Cointegración

En la Tabla 4 se muestran los resultados de la prueba de cointegración de Johansen para 5 estaciones. De manera general, los resultados de los estadísticos de traza y de máxima raíz superan a los valores críticos, indicando una fuerte evidencia de cointegración estadísticamente significativa entre la lluvia y la humedad del suelo.

	ET	val. crítico 95 %	EMRC	val. crítico 95 %	vector de coint.
Sensor 608 y pluviometro 607					
Lluvia	50.313	15.494	45.072	14.263	0.030
Humedad	5.240	3.841	5.240	3.841	0.003
Sensor 532 y pluviometro 540					
Lluvia	348.235	15.494	346.984	14.263	0.214
Humedad	1.251	3.841	1.251	3.841	0.0008
Sensor 396 y pluviometro 43					
Lluvia	764.601	15.494	673.783	14.263	0.153
Humedad	90.818	3.841	90.818	3.841	0.022
Sensor 613 y pluviometro 612					
Lluvia	137.792	15.494	132.268	14.263	0.087
Humedad	5.523	3.841	5.523	3.841	0.003
Sensor 541 y pluviometro 278					
Lluvia	162.582	15.494	153.604	14.263	0.101
Humedad	8.978	3.841	5.240	3.841	0.006

Tabla 4: Resultados del test de cointegración de Johansen.

Análisis de respuesta de humedad por eventos de lluvia

A manera de ejemplo, se exponen los resultados en profundidad del sensor 296, debido a que posee tres profundidades monitorizadas, a continuación se muestra el sensor superficial y el de mayor profundidad. Para detalle de los demás sensores, consulte el Apéndice: Análisis de Humedad y Eventos de lluvia. En la Tabla 5 se puede ver el periodo consultado y la cantidad de eventos categorizados en la base de datos. En la Figura 15 se pueden visualizar las series consultadas.

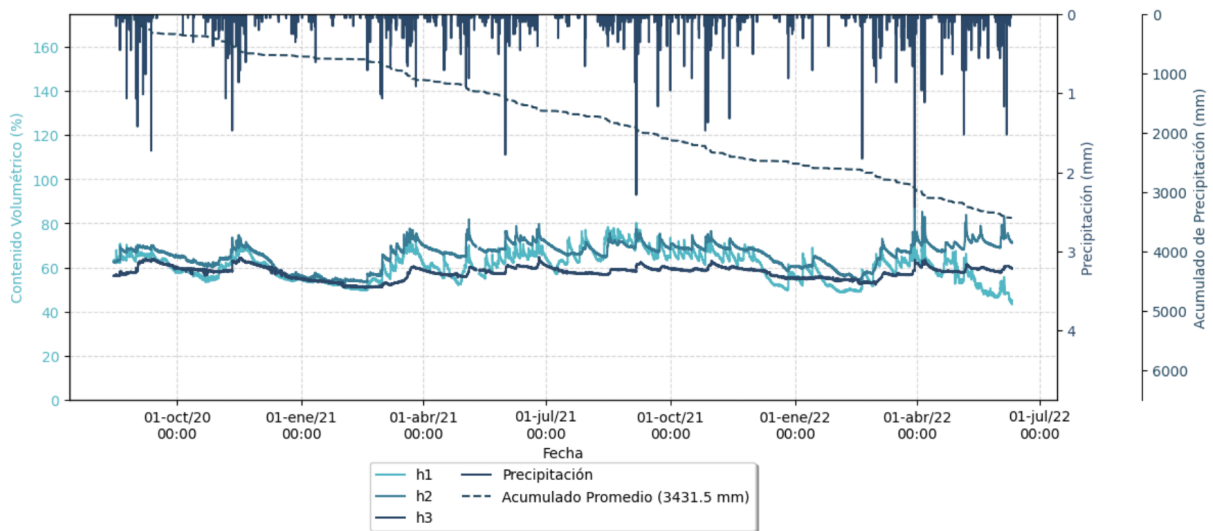


Figura 15: Series de humedad y precipitación para sensor 296.

En la Figura 16 se puede ver un mapa de flujo acumulado, donde se muestra que en ese punto hay al menos 12 m^2 que drenan hacia el punto rojo.

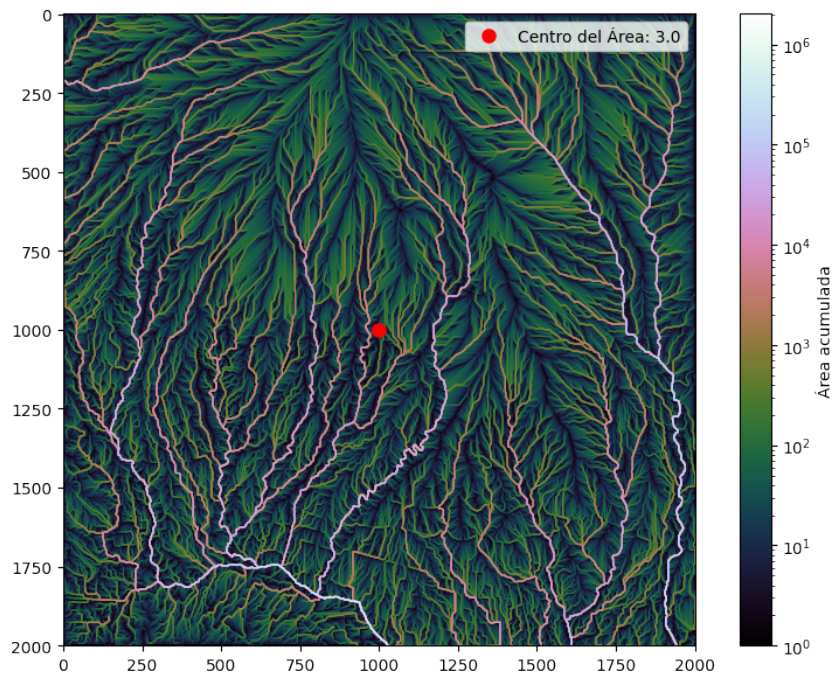


Figura 16: Flujo acumulado cerca del punto 296.

Sensor	Pluviómetro	Fecha Consultada	Débil	Moderado	Fuerte/Muy Fuerte
h1					
h2	295	2020-08-15 - 2022-06-10	37	27	31
h3					

Tabla 5: Cantidad de eventos por categoría según sensor y pluviómetro consultado.

Sensor 296 - h1

Eventos Débiles

En la Tabla 6 se pueden ver los estadísticos de contenido de agua y lluvia dentro de la categoría de eventos débiles de lluvia.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	62.45	2.85	14.75	-180.50	62.70	1.95	6.90
σ	5.10	2.25	6.75	315.00	5.15	1.50	4.10
Med	63.20	2.60	13.10	-290.00	63.10	1.35	5.40
Min	51.10	0.15	5.20	-730.00	51.40	0.20	1.65
Max	74.90	8.20	39.80	1250.00	75.00	7.60	20.10
P_{95}	71.50	6.50	29.00	340.00	71.90	4.10	14.70

Tabla 6: Estadísticos básicos para la categoría 'Débil' del sensor 'h1'.

En la Figura 17 se muestran las funciones de densidad de probabilidad correspondientes a todas las variables. En este caso particular, el delta máximo de humedad está moderadamente relacionado con la humedad antecedente, y el valor inicial al cambio presentó las correlaciones más altas.

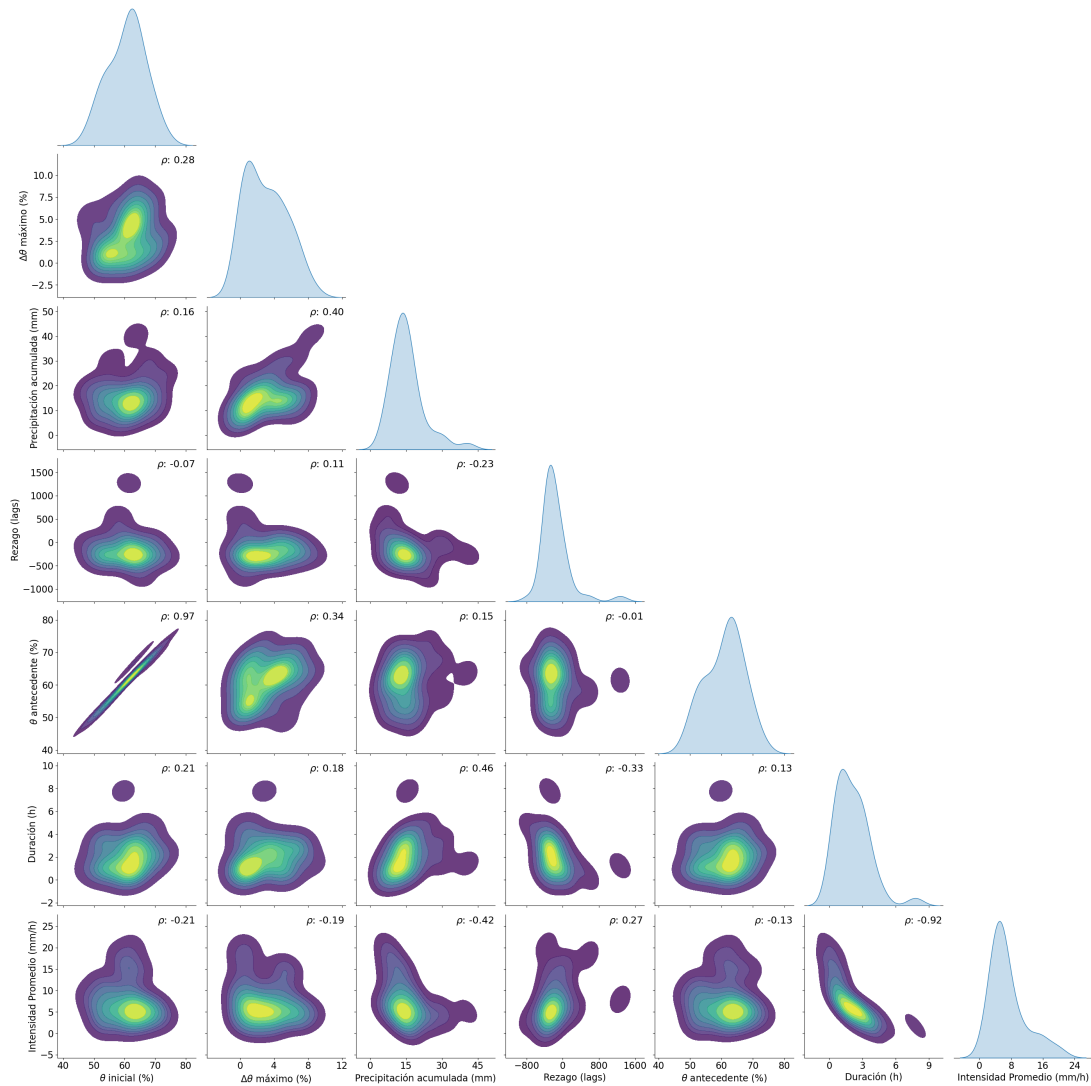


Figura 17: Función de probabilidad y correlación de Spearman para sensor h1 y eventos débiles de lluvia.

Eventos Moderados

En la Tabla 7 se pueden ver los estadísticos de contenido de agua y lluvia dentro de la categoría de eventos débiles. En la Figura 18 se pueden observar las funciones de probabilidad para todas las variables. En este caso particular, el delta máximo de humedad sigue ligado en relaciones moderadas a la humedad antecedente y el valor inicial.

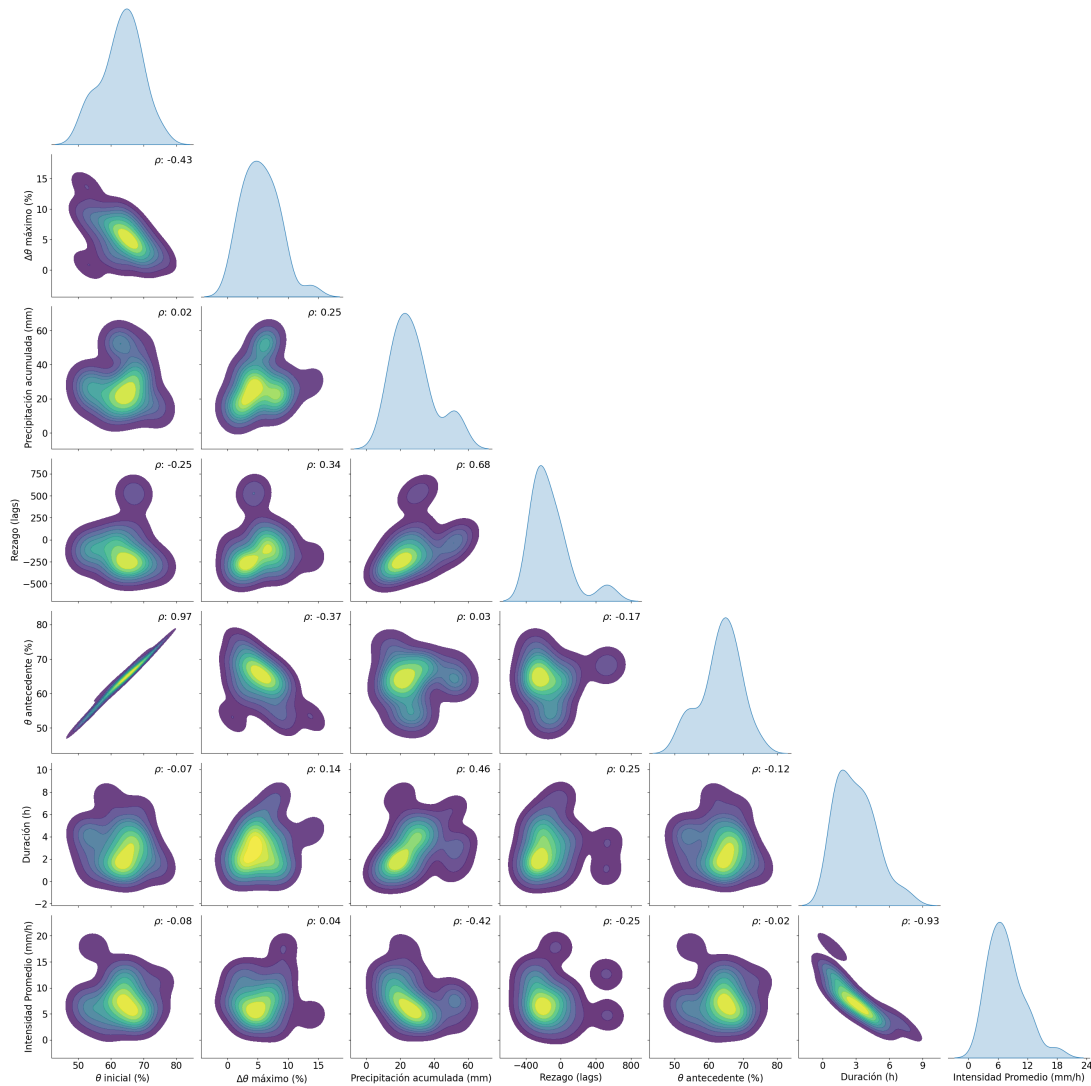


Figura 18: Función de probabilidad y correlación de Spearman para sensor h1 y eventos moderados de lluvia.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	66.50	5.00	28.40	-151.00	66.75	3.15	9.00
σ	4.90	3.10	13.20	201.00	4.70	1.65	4.10
Med	67.30	4.70	24.10	-210.00	67.00	2.90	7.75
Min	59.90	0.90	11.80	-610.00	59.40	0.90	2.50
Max	73.50	12.10	53.10	540.00	73.00	7.50	18.00
P_{95}	72.00	9.20	50.20	365.00	71.70	5.80	13.50

Tabla 7: Estadísticos básicos para la categoría 'Mod' del sensor 'h1'.

Eventos Fuertes y Muy Fuertes

En la Tabla 8 se pueden ver los estadísticos de contenido de agua y lluvia dentro de la categoría de eventos fuertes y muy fuertes. En la Figura 19 se pueden observar las funciones de densidad de probabilidad para todas las variables. El delta máximo de humedad sigue ligado en relaciones con un coeficiente de Spearman ligeramente superiores con la humedad antecedente y el valor inicial al cambio.

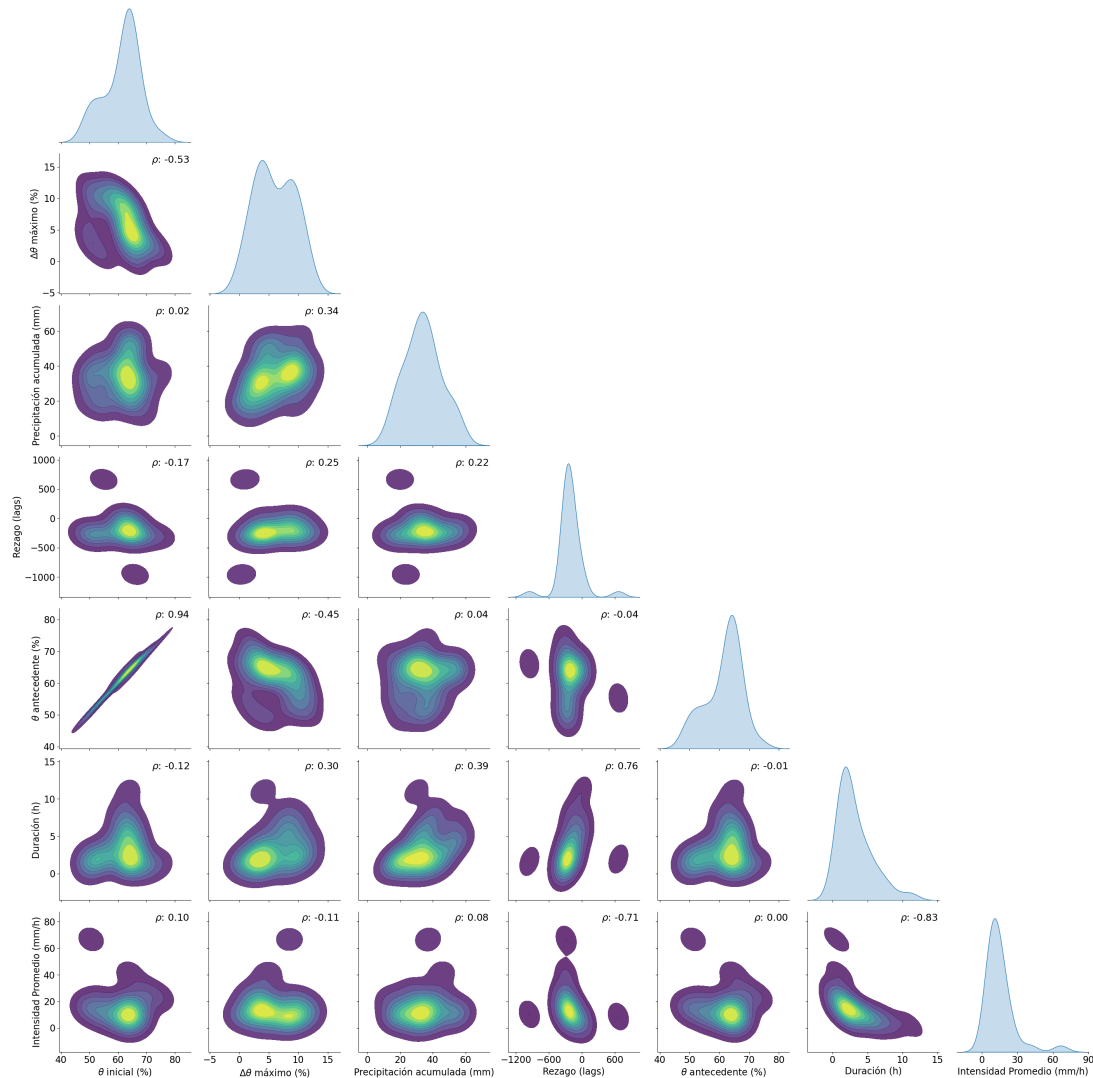


Figura 19: Función de probabilidad y correlación de Spearman para sensor h1 y eventos fuertes y muy fuertes de lluvia.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	65.12	6.15	32.15	-200.12	65.34	3.52	13.60
σ	5.23	3.76	11.52	251.00	5.04	2.11	9.72
Med	65.80	6.18	33.45	-245.00	65.55	2.95	11.00
Min	55.60	1.00	16.80	-740.00	55.80	0.75	3.25
Max	76.90	13.30	55.00	780.00	77.10	10.90	53.60
P_{95}	74.30	11.00	51.10	0.00	74.00	7.20	29.00

Tabla 8: Estadísticos básicos para la categoría 'F. y M.F.' del sensor 'h1'.

Sensor 296 - h3

Eventos Débiles

En la Tabla 9 se pueden ver los estadísticos de contenido de agua y lluvia dentro de la categoría de eventos débiles. En la Figura 20 se pueden observar las funciones de densidad de probabilidad para todas las variables. En este caso particular, el delta máximo de humedad tuvo su mayor correlación con la lluvia acumulada.

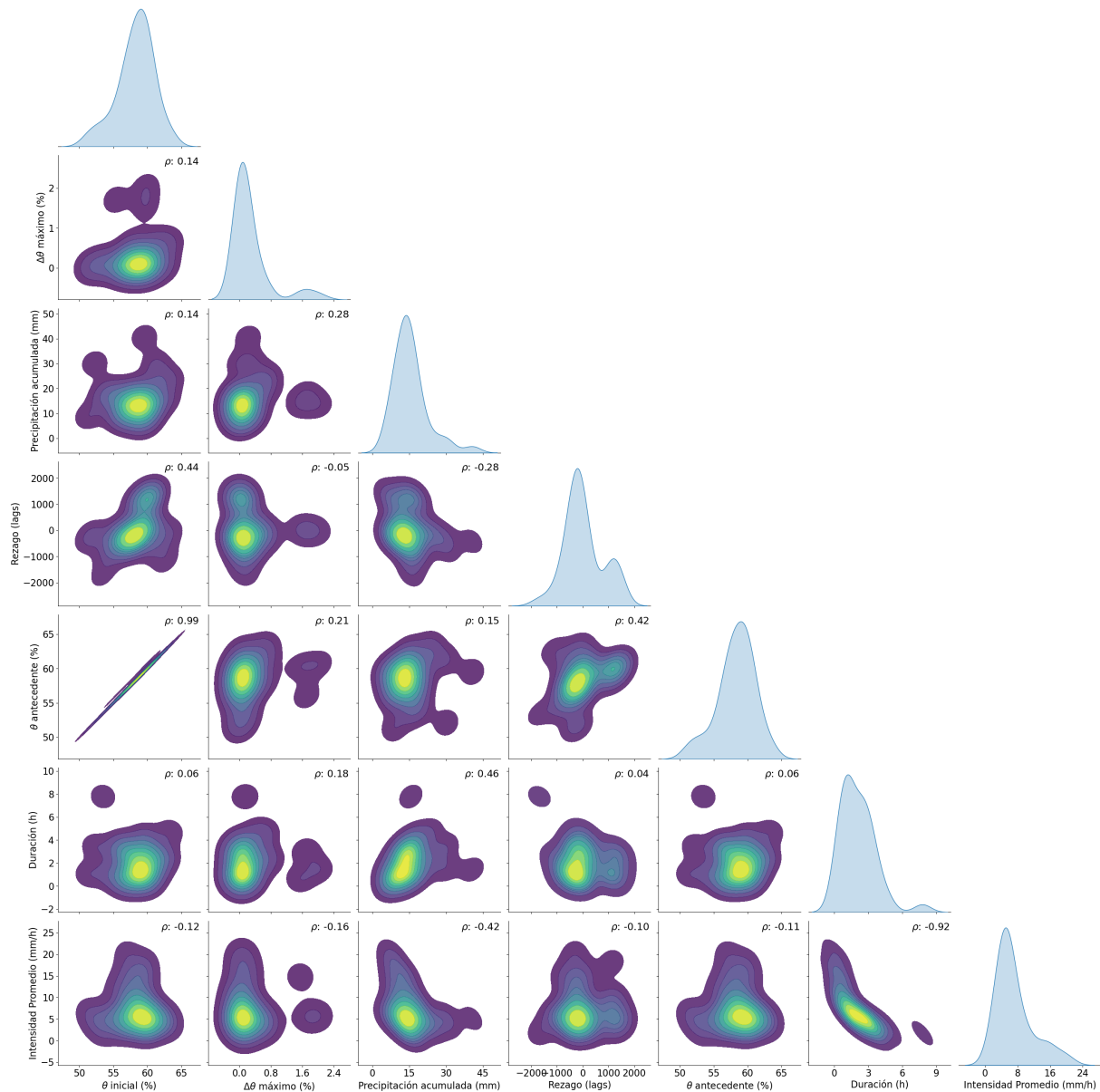


Figura 20: Función de probabilidad y correlación de Spearman para sensor h3 y eventos débiles de lluvia.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	62.45	2.85	14.78	-180.54	62.73	1.95	6.89
σ	5.13	2.25	6.78	315.14	5.15	1.49	4.10
Med	63.20	2.59	13.10	-290.00	63.15	1.34	5.41
Moda	51.11	0.14	12.97	0.00	51.47	0.20	1.65
Min	51.11	0.14	5.20	-730.00	51.47	0.20	1.65
Max	74.90	8.20	39.80	1250.00	75.00	7.60	20.10
P_{95}	71.55	6.50	28.99	340.00	71.92	4.12	14.65

Tabla 9: Estadísticos básicos para la categoría 'Débil' del sensor 'h3'.

Eventos Moderados

En la Tabla 10 se pueden ver los estadísticos de contenido de agua y lluvia dentro de la categoría de eventos débiles. En la Figura 21 se pueden observar las funciones de densidad de probabilidad para todas las variables. En este caso particular, el delta máximo de humedad conserva su mayor correlación con la lluvia acumulada.

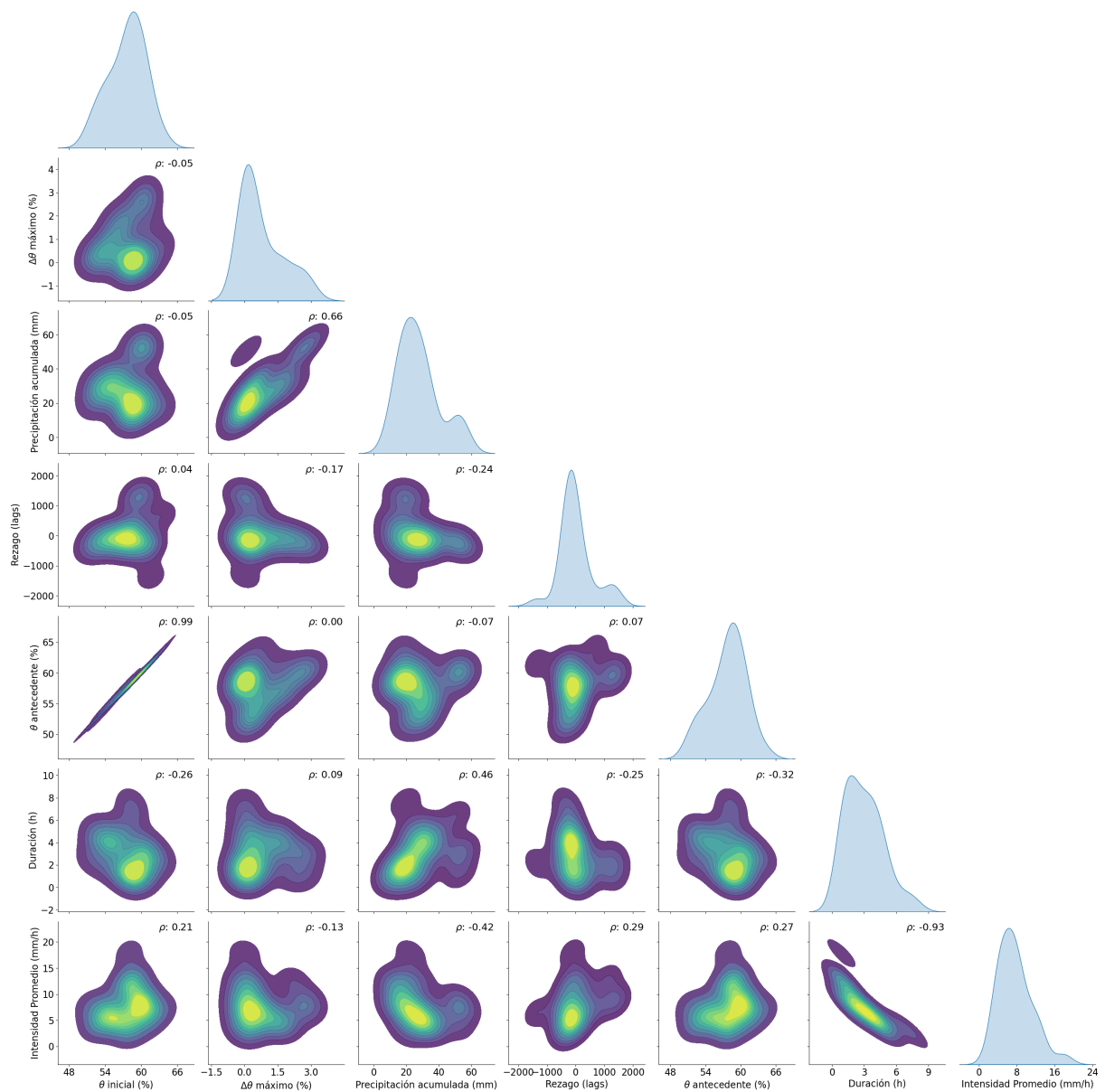


Figura 21: Función de probabilidad y correlación de Spearman para sensor h3 y eventos moderados de lluvia.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	66.52	5.02	28.45	-150.87	66.78	3.18	8.96
σ	4.89	3.13	13.21	200.98	4.72	1.64	4.12
Med	67.34	4.71	24.10	-210.00	67.08	2.92	7.75
Moda	59.87	0.91	53.10	0.00	59.45	1.37	2.54
Min	59.87	0.91	11.78	-610.00	59.45	0.87	2.54
Max	73.49	12.10	53.10	540.00	73.01	7.45	18.02
P_{95}	72.03	9.18	50.19	365.00	71.75	5.83	13.47

Tabla 10: Estadísticos básicos para la categoría 'Mod' del sensor 'h3'.

Eventos Fuertes y Muy Fuertes

En la Tabla 11 se pueden ver los estadísticos de contenido de agua y lluvia dentro de la categoría de eventos débiles. En la Figura 22 se pueden observar las funciones de densidad de probabilidad para todas las variables. En este caso particular, el delta máximo de humedad cambia su mayor correlación a la intensidad promedio de la lluvia.

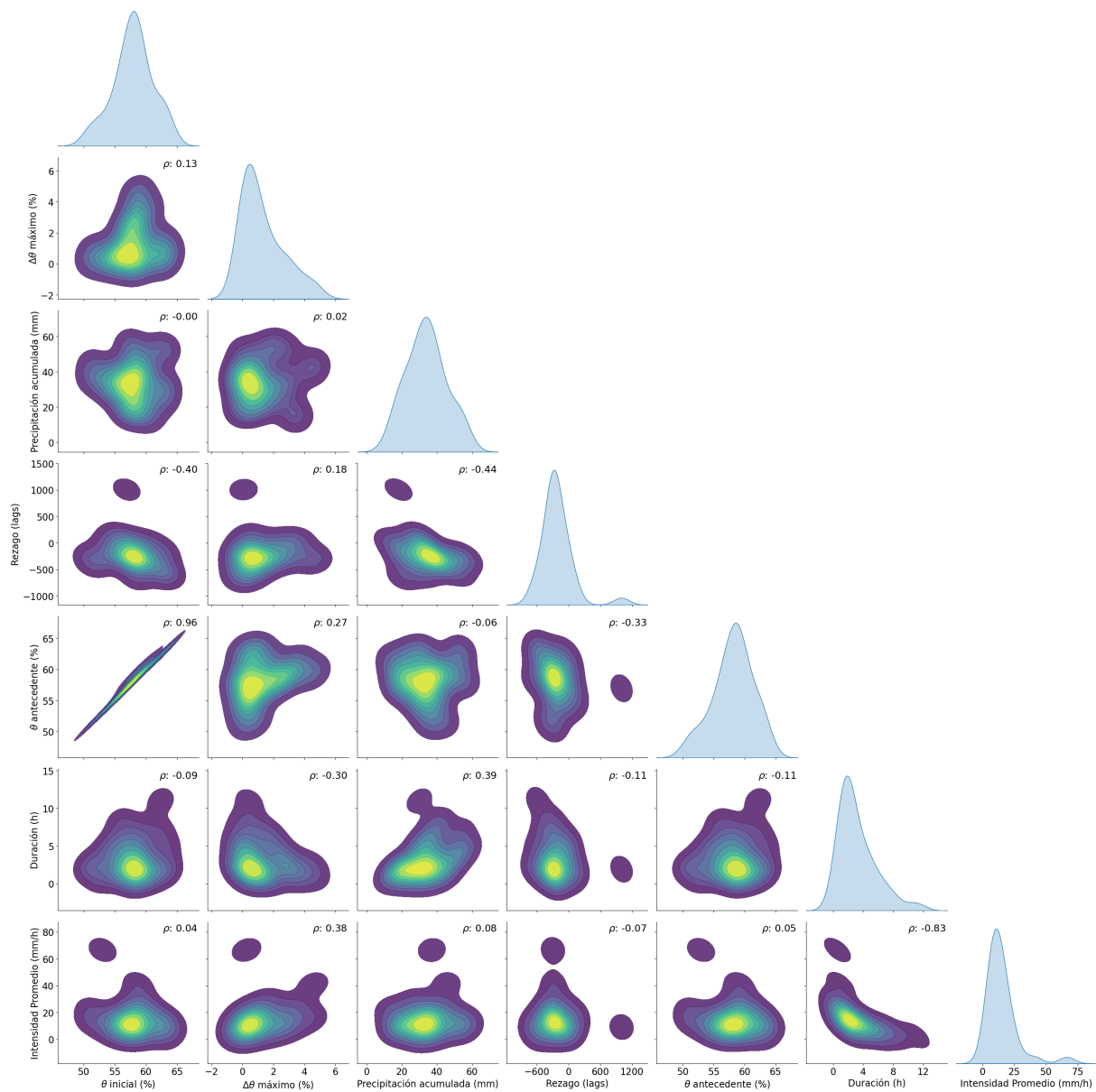


Figura 22: Función de probabilidad y correlación de Spearman para sensor h3 y eventos fuertes y muy fuertes de lluvia.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	65.10	6.11	32.00	-199.45	65.34	3.50	13.55
σ	5.24	3.75	11.55	250.12	5.05	2.12	9.74
Med	65.84	6.18	33.42	-244.00	65.57	2.95	10.98
Moda	55.64	1.02	16.77	0.00	55.86	1.00	3.27
Min	55.64	1.02	16.77	-740.00	55.86	0.75	3.27
Max	76.91	13.27	54.89	780.00	77.14	10.90	53.63
P_{95}	74.29	11.05	51.12	0.00	73.94	7.23	29.04

Tabla 11: Estadísticos básicos para la categoría 'F. y M.F.' del sensor 'h3'.

En la Figura 23 se muestra el comportamiento de un evento catalogado como débil, ocurrido entre el 30 y 31 de septiembre de 2021. En la ventana temporal se puede observar, en función de la profundidad del sensor (A, B y C), la capacidad del agua para aumentar. La Figura 24 presenta la respuesta del contenido volumétrico de agua a un evento moderado ocurrido entre el 30 y 31 de octubre de 2021. Finalmente, en la Figura 25 se puede observar el cambio producido por un evento fuerte ocurrido el 31 de mayo de 2021.

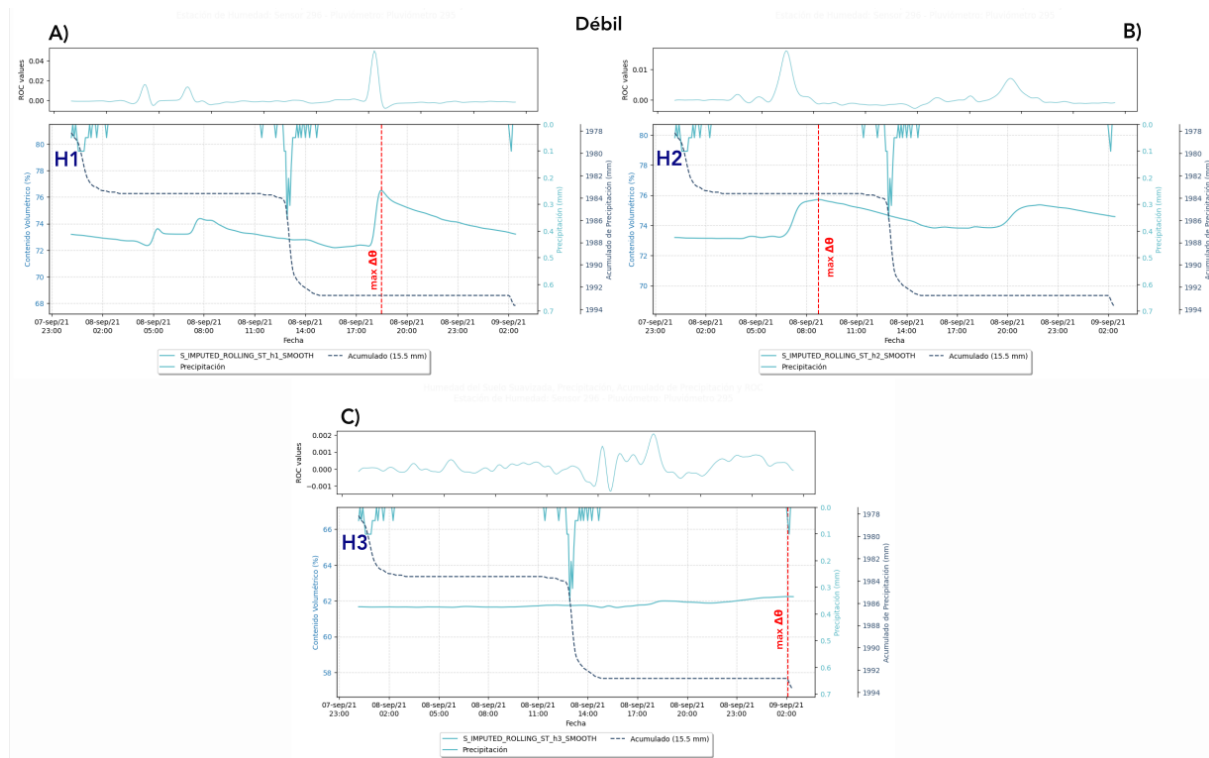


Figura 23: Respuesta de humedad del suelo para evento débil de lluvia en sensor 296 para fecha de 30 de septiembre de 2021.

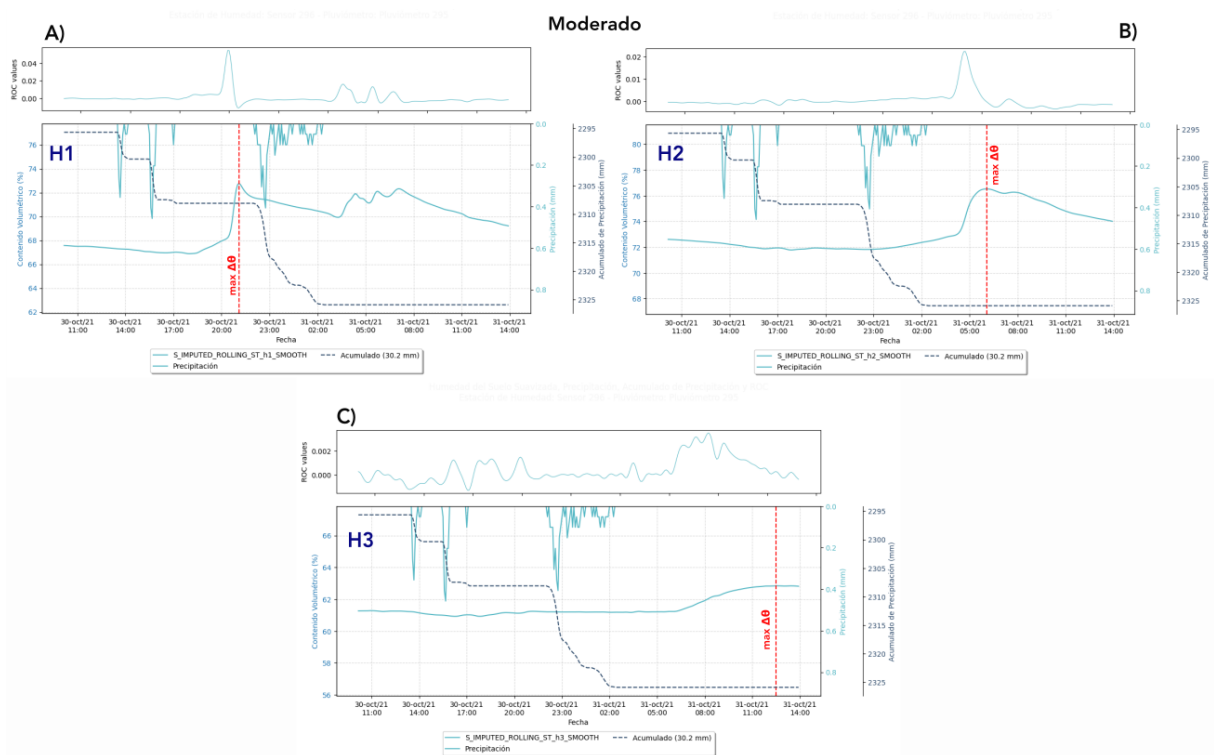


Figura 24: Respuesta de humedad del suelo para evento moderado de lluvia en sensor 296 para fecha de 30 de octubre de 2021.

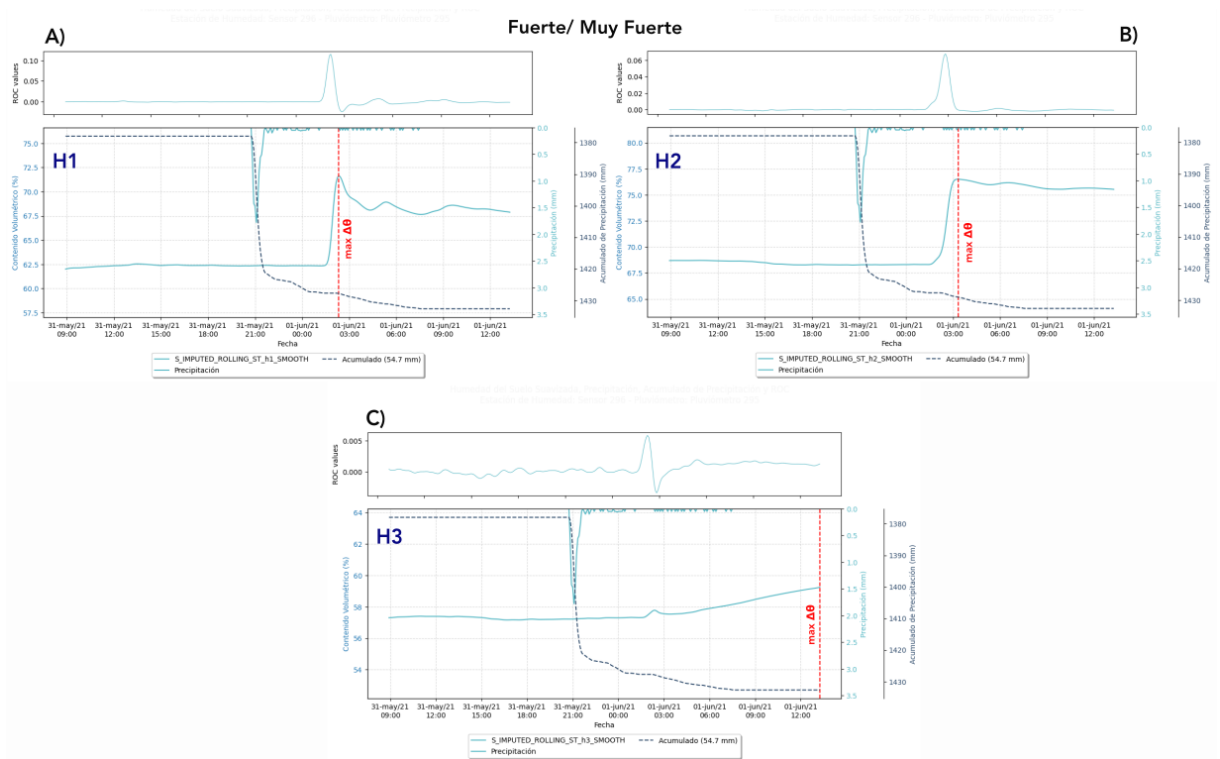


Figura 25: Respuesta de humedad del suelo para evento fuerte de lluvia en sensor 296 para fecha de 31 de mayo de 2021.

Análisis de humedad, tendencia y movimientos en masa

Por otra parte, se utilizó el inventario disponible (1384 eventos) donde se evidenció la siguiente correspondencia temporal: 34 eventos corresponden a la categoría 'Débil', 41 a la categoría 'Moderado', y 1278 a la categoría 'Fuerte y Muy Fuerte'. Solo 31 eventos no cumplieron con los criterios de correspondencia. El 94 % de los eventos registrados están temporalmente asociados a eventos de lluvia clasificados como 'Fuerte' o 'Muy Fuerte', mientras que el 6 % restante corresponde a eventos 'Moderados' y 'Débiles'. En la Figura 26 se puede observar el comportamiento de las variables de lluvia ligadas a estas ocurrencias.

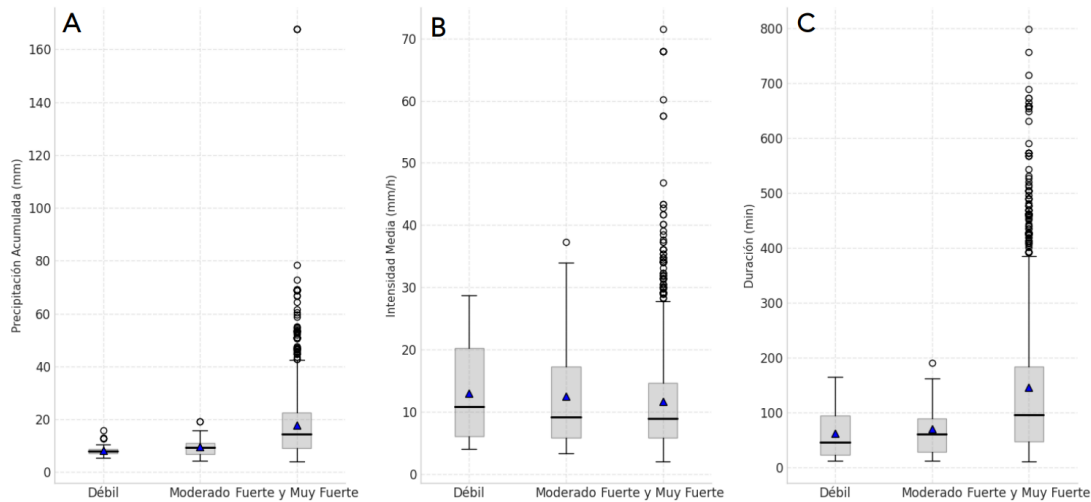


Figura 26: Diagrama de cajas y bigotes de datos de lluvia ligados a ocurrencias de movimientos en masa. A es precipitación acumulada durante el evento, B es intensidad media y C es la duración del evento.

Categoría 'Débil': Los eventos clasificados en la categoría 'Débil' presentan un valor promedio de precipitación acumulada de 8.39 mm, con una duración media de 61.82 minutos. La intensidad media durante estos eventos es de 12.96 mm/h. Los valores mínimos registrados son 5.59 mm de acumulado, 3.98 mm de intensidad y una duración de 13 minutos. En contraste, los valores máximos observados alcanzan 15.75 mm de acumulado, 28.69 mm de intensidad y una duración máxima de 165 minutos.

Categoría 'Moderado': En la categoría 'Moderado', los eventos muestran un promedio de precipitación acumulada de 9.66 mm y una duración media de 70.22 minutos. La intensidad media se ubica en 12.50 mm. Los valores mínimos reportados son de 4.32 mm de acumulado, 3.27 mm/h de intensidad y una duración de 12 minutos, mientras que los máximos alcanzan 19.30 mm de acumulado, 37.25 mm de intensidad y 191 minutos de duración.

Categoría 'Fuerte y Muy Fuerte': Los eventos clasificados como 'Fuerte y Muy Fuerte' se caracterizan por un promedio de precipitación acumulada de 17.81 mm y una duración media de 145.96 minutos, significativamente más extensos que en las categorías anteriores. La intensidad media es de 11.61 mm/h. Los valores mínimos registrados son 4.06 mm de acumulado, 1.98 mm de intensidad y 11 minutos de duración. Sin embargo, los máximos alcanzan niveles elevados con 167.64 mm de acumulado, 71.51 mm de intensidad y una duración de hasta 799 minutos. El análisis también muestra la presencia de eventos más extremos que superan considerablemente los valores típicos, superando los 42 mm de acumulado, 27.81 mm de intensidad y 389 minutos de duración (Figuras 26 A, B y C).

Análisis histórico

En la Figura 27 se muestran los análisis de probabilidad bayesiana. En la matriz A se muestra el intensidad y duración de lluvia. Se observa que los eventos con mayor probabilidad de generar deslizamientos corresponden principalmente a combinaciones de intensidades entre 9 y 45 mm/h con duraciones prolongadas, superiores a 277 minutos. En general, las probabilidades más elevadas se concentran en eventos de lluvia sostenida con intensidades intermedias altas, lo que sugiere que no es necesaria una lluvia extrema para detonar procesos de inestabilidad, sino que la persistencia del evento juega un papel determinante.

Por otro lado, la saturación máxima del suelo con la intensidad de lluvia muestran que los valores más altos de probabilidad se concentran en saturaciones máximas entre superiores a 40 %, combinadas con intensidades de lluvia superiores a 16mm/h. En general las celdas de 1.0 indican que en el histórico analizado, bajo esas condiciones específicas únicamente se registraron eventos con deslizamientos. No obstante, este valor debe interpretarse con cautela, ya que proviene de una muestra limitada en la que no se observaron eventos negativos; con un conjunto de datos más amplio, la probabilidad podría ajustarse a valores menores.

En conjunto, ambas matrices evidencian que los escenarios más propensos a la ocurrencia de movimientos en masa son aquellos donde la lluvia actúa sobre suelos ya húmedos, y donde la intensidad y duración del evento superan ciertos umbrales hidrometeorológicos, aunque no necesariamente extremos. Estos hallazgos refuerzan la importancia de considerar tanto las condiciones previas del suelo como las características del evento de lluvia para estimar la amenaza de deslizamiento.

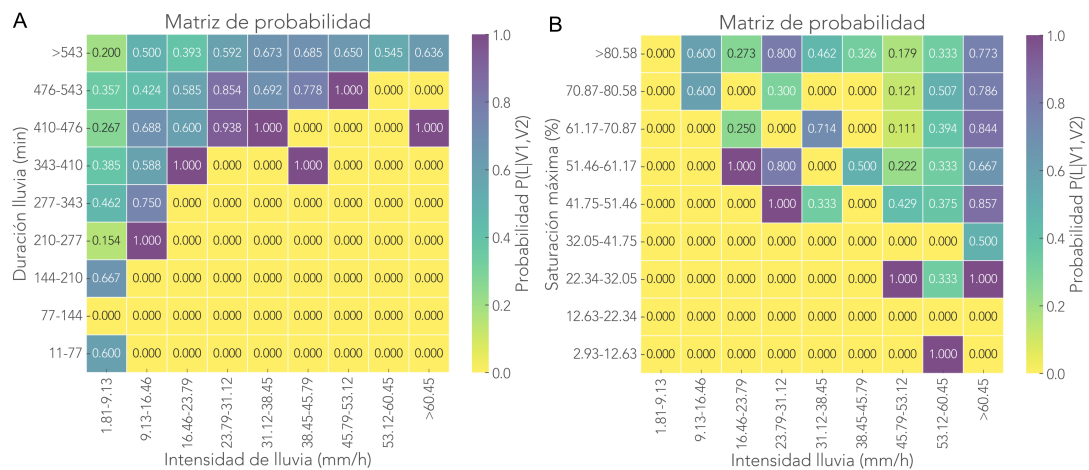


Figura 27: Matrices de probabilidad bayesiana basada en análisis histórico. A es una combinación de intensidad de lluvia y duración y B es una combinación de saturación máxima e intensidad de lluvia.

Adicionalmente, en la Figura 28 se destacan las características particulares de los eventos de lluvia asociados a movimientos en masa, identificados en el apartado B. Se observa que, en la gran mayoría de estos eventos, las condiciones de humedad antecedente superan el 50 %. Esto refuerza la hipótesis de que la ocurrencia de deslizamientos está asociada a situaciones en las que la lluvia actúa sobre suelos previamente húmedos, y en las que tanto la intensidad como la duración del evento superan ciertos umbrales críticos.

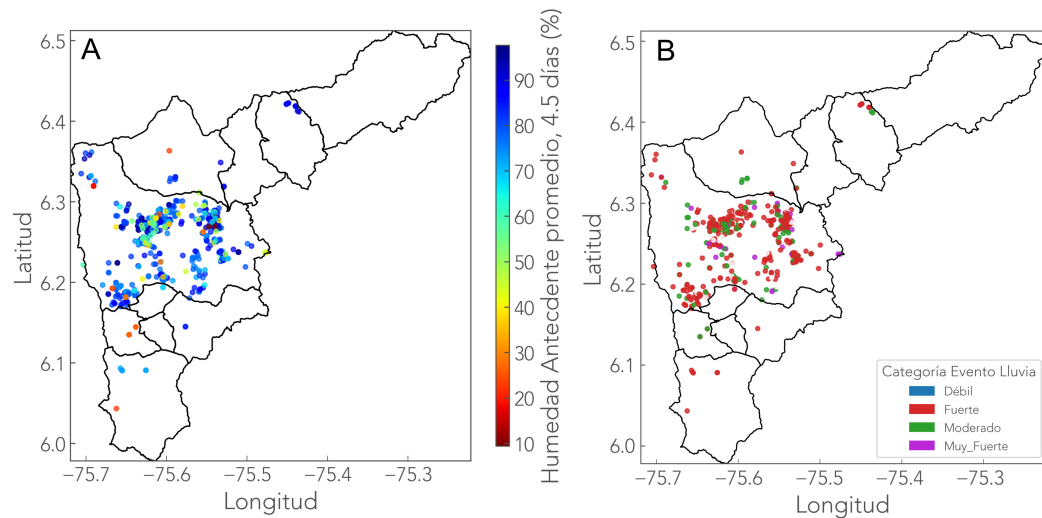


Figura 28: Mapas de análisis histórico de humedad antecedente. A las condiciones de humedad ligada a cada uno y B son los eventos de movimientos en masa clasificados por los eventos de lluvia nombrados en el numeral previo.

Tendencia y categorización

A continuación se muestran los resultados del análisis de tendencia y categorización de la humedad para los sensores Bermejala, Montañita, La Sanín, Pueblo Viejo y Manga Arriba, seleccionados debido a que presentaban histórico durante algunos eventos de movimientos en masa y en un radio de cercanía inferior a 1.5 km.

En el caso del sensor instalado en Montañita (455), se observó que hacia finales de marzo e inicios de abril los valores de contenido volumétrico de agua superaron el 52 %, un valor significativamente superior a los registros históricos, manteniéndose durante varios días en la categoría de muy alto. Además, las imágenes obtenidas de la cámara instalada en Montañita revelan que, a partir del 2 de abril, comenzaron a notarse desplazamientos en el movimiento en masa, que durante marzo acumulo cerca de 50 mm según el extensómetro cercano. En la Figura 29, se presenta la serie de humedad para febrero-marzo e inicios de abril, hasta donde el sensor dejó de transmitir datos.

A pesar de los altos valores observados, el test de Mann-Kendall para marzo indica que la tendencia no es estadísticamente significativa ($Z = 1,28$), esto indicaría que aunque hay aumento, no es tan considerable. Sin embargo, el test de Sen revela un incremento aproximado del 5.66 % en el contenido de humedad en escala mensual. Este comportamiento sugiere que el fenómeno pudo no haber sido progresivo y lento, sino más bien una respuesta rápida a condiciones críticas de precipitación que elevaron considerablemente la saturación del suelo. Es importante destacar que el 3 de abril de 2022 se registró un evento de precipitación de categoría fuerte, con una duración de 2 horas y 20 minutos y un acumulado cercano a los 49 mm, sumado a los valores elevados de humedad, pudo concretarse en los desplazamientos registrados.

Adicionalmente, el 29 de marzo de 2022, el sensor reportó un evento significativo de humedad debido a otro evento fuerte. Los valores de contenido volumétrico de agua iniciales (θ_{inicial}) se encontraban cerca de 41 %, y posterior al evento, el valor máximo reportado ($\theta_{\text{máximo}}$) fue de 50.79 %, con un cambio máximo ($\Delta\theta_{\text{máximo}}$) de 9.38 %. El evento acumuló 48.39 mm de precipitación, con una duración de 6 horas y 57 minutos. Estos datos fueron tomados del pluviómetro 18, ubicado a 2 km de distancia, debido a la falta

de datos en el pluviómetro cercano a Montañita.

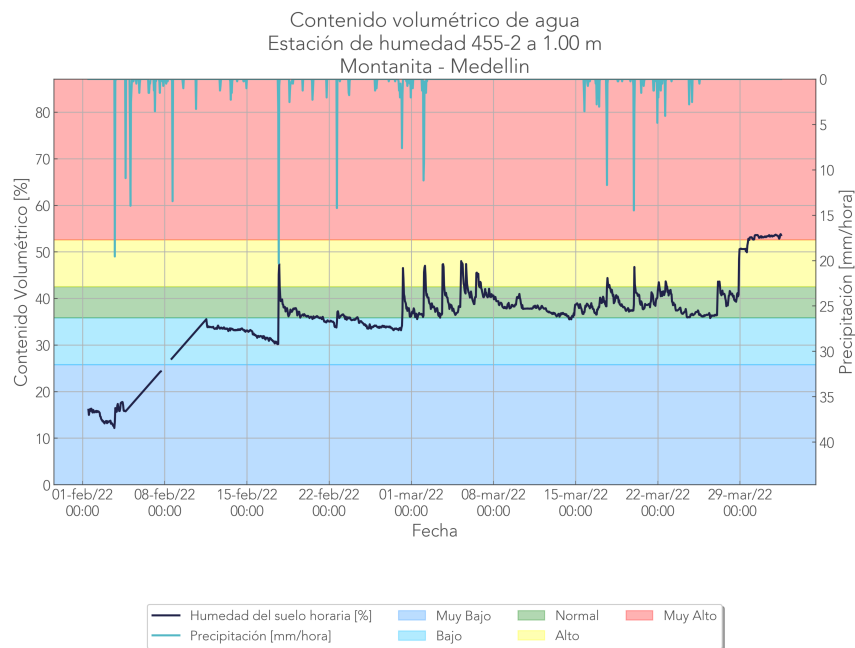


Figura 29: Categorización de histórico de humedad para sensor 455, marzo de 2022.

En la Figura 30 se puede observar el desplazamiento de la masa de suelo posterior a los valores muy altos de humedad registrados 1-2 días antes.



Figura 30: Foto de cámara 100040 entre 3 (A) y 5 (B) de abril de 2022, sector montaña, San Antonio de Prado.

En el caso del sensor de Bermejala (618), se observó que durante noviembre los valores de contenido volumétrico de agua permanecieron en la categoría de alto durante casi 20 días consecutivos, como se puede ver en la Figura 31. Hacia finales de mes, se registraron algunos movimientos en masa que podrían estar correlacionados con esta tendencia de aumento. Según los resultados de Mann-Kendall, esta tendencia es estadísticamente significativa ($Z=2.04$). A la par, durante ese mes la humedad aumentó al menos un 6 % según el test de Sen. El 76 % de los datos durante noviembre se ubicaron en la categoría de alto.

Los movimientos registrados a finales de noviembre se relacionan con eventos 7 eventos de precipitación fuertes/muy-fuertes (6) y moderados (1), que estuvieron presentes durante todo el mes. Los movimientos cercanos al 25 de noviembre tenían localizaciones inferiores a 500 m. Los cercanos al 30 de noviembre, están a una distancia superior a 1000 m, estos se ubicaron temporalmente cuando la tendencia del mes ya comenzaba a descender, aun así estos movimientos se encontraban dentro de la misma subcuenca aguas arriba, en esta sección los patrones son más difusos, pero ocurren cuando los datos aún se encontraban en categoría alta. Por otra parte, el movimiento en masa más alejado (cerca al 8 de noviembre), se registró cuando el contenido de humedad estaba en descenso y la tendencia mensual apenas comenzaba a incrementarse. Esta se ubica en una subcuenca aledaña, en su parte baja y a aproximadamente 806 m

del sensor.

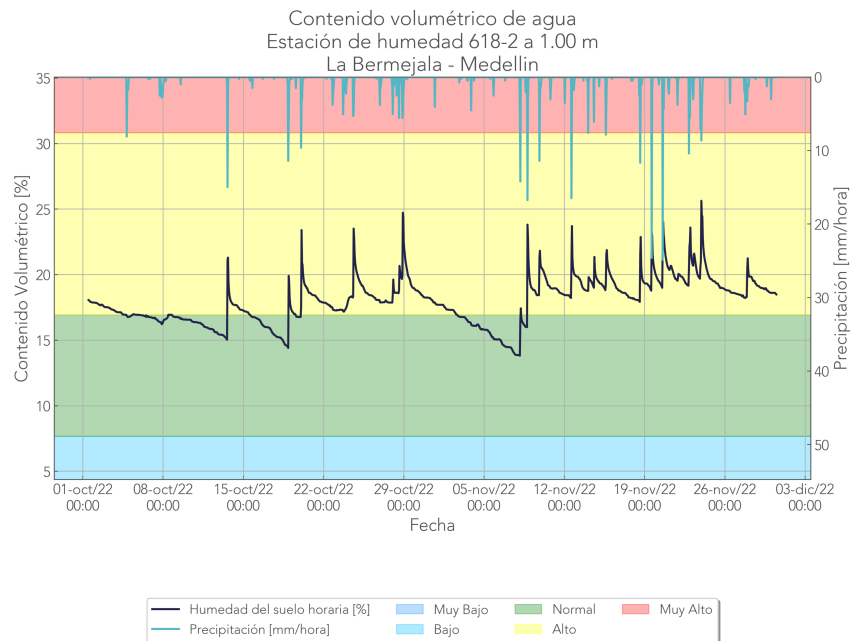


Figura 31: Categorización de histórico de humedad para sensor 618.

Otro ejemplo es el caso del sensor la Sanín (553). La señal no mostró perturbaciones con los eventos localizados a 730 m, más del 80 % de los datos se ubicaron en la categoría normal (Figura 32).

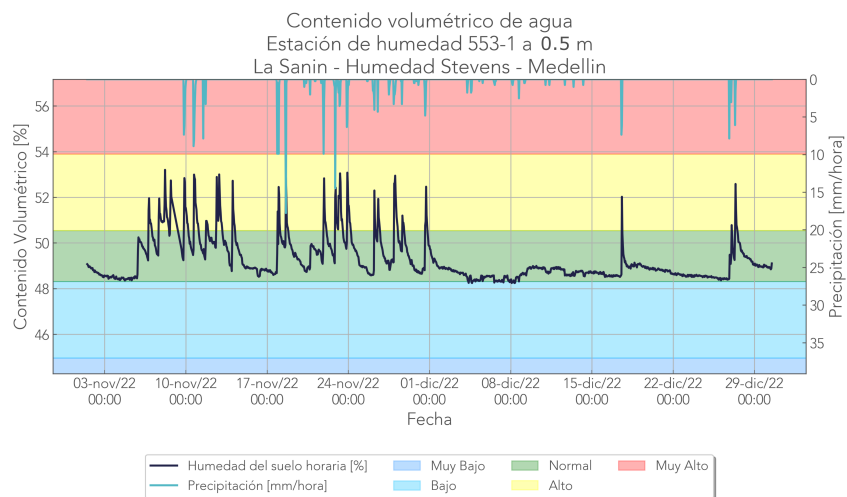


Figura 32: Categorización de histórico de humedad para sensor 553, mes de diciembre de 2022.

En el caso de Pueblo Viejo (555), el análisis histórico para noviembre de 2021 reveló que los valores se ubicaron en un 67 % del registro en niveles de categoría alta, como se puede observar en la Figura 33, manteniéndose así casi hasta finales del mes. Adicionalmente, mediante el registro visual de la cámara cercana

(Figura 34), se identificaron movimientos de material, destacando las fechas del 25 al 26 de noviembre, durante las cuales los niveles de humedad permanecían elevados. Aunque la tendencia hacia finales de mes fue negativa, la saturación progresiva desde octubre, donde los niveles de humedad estuvieron un 72 % del tiempo también en niveles altos, indica un patrón coherente con los movimientos detectados.

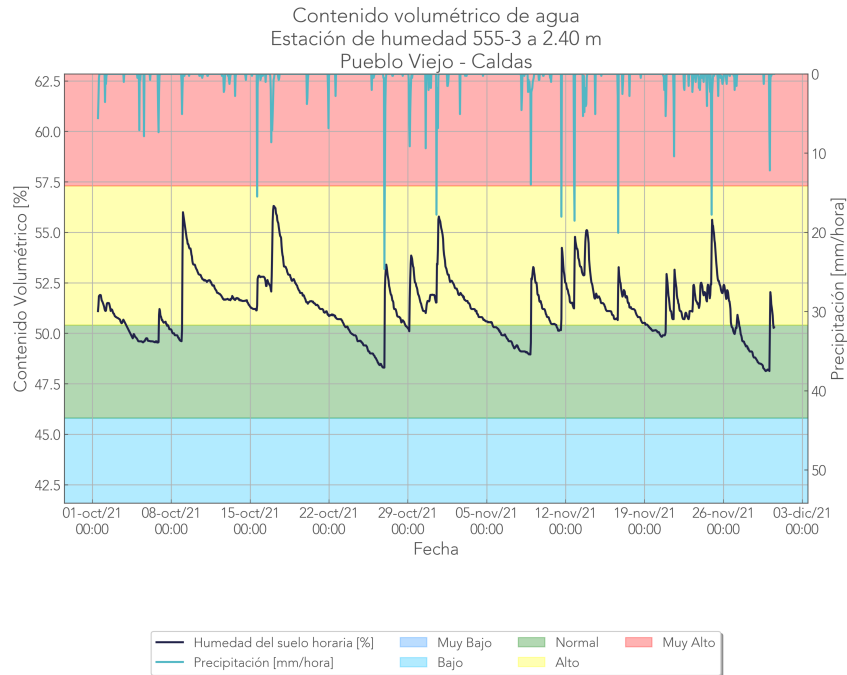


Figura 33: Categorización de histórico de humedad para sensor 555 en 2021.



Figura 34: Imágenes de cámara de monitoreo de Pueblo Viejo para noviembre de 2021. A es para el 17 de noviembre y b para el 26 de noviembre.

Para este mismo punto, se analizó el limitado registro histórico disponible de abril 2022 (Figura 35),

período durante el cual la cámara de inspección detectó movimientos evidentes de material en el movimiento en masa (Figura 36). Si bien la serie temporal no mostró niveles particularmente altos en los días analizados, la cámara registró movimientos hasta después del 6 de abril, días después de la suspensión de envío de datos del sensor. La tendencia calculada para el histórico de abril ($Z=1.35$) sugiere un posible aumento en los niveles de humedad durante el mes, aunque este resultado no es estadísticamente significativo debido a la escasez de datos.

Aun así, en las fechas del 3 y 5 de abril se presentaron 2 eventos de precipitación ligados a esta actividad del movimiento en masa: moderado y fuerte. El primer evento tuvo una intensidad media de 7.851 mm/h, una duración de 2 horas y 12 minutos y un acumulado de 17.2 mm. El segundo evento, presentó valores de una intensidad media de 8.551 mm/h, una duración de 4 horas y 22 minutos y un acumulado de 37.338 mm.

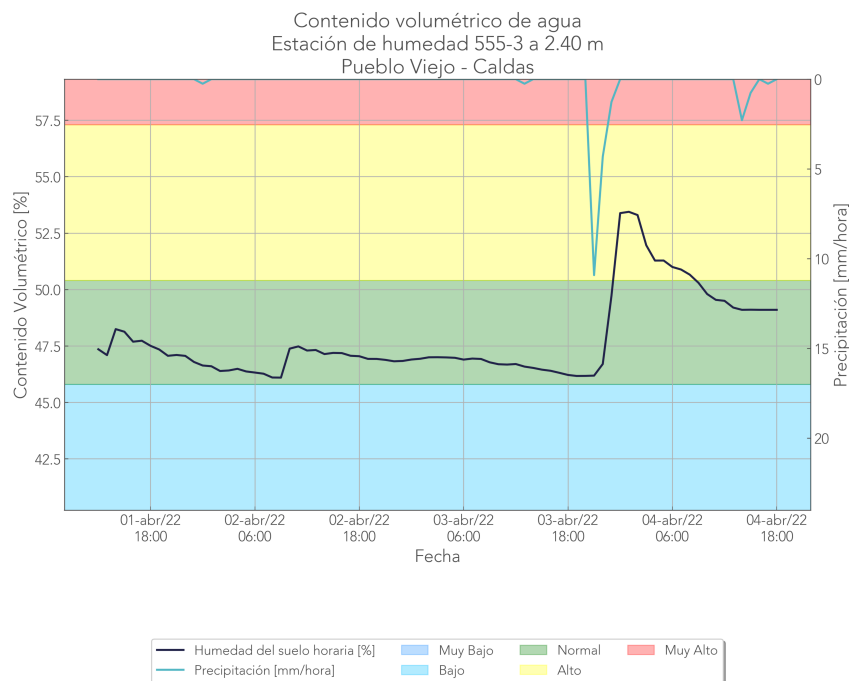


Figura 35: Categorización de histórico de humedad para sensor 555 para 2022.



Figura 36: Imágenes de cámara de monitoreo de Pueblo Viejo para abril de 2022. A es para el 17 de noviembre y b para el 26 de noviembre.

El otro caso fue Manga Arriba (424). Con base en los reportes de monitoreo emitidos en el año, se seleccionaron los primeros meses el año 2021. En la Figura 37 se puede ver la serie de humedad para el mes de abril. Para este mes los valores de humedad estuvieron un 14 % del registro en conjunto para valores altos y muy altos.

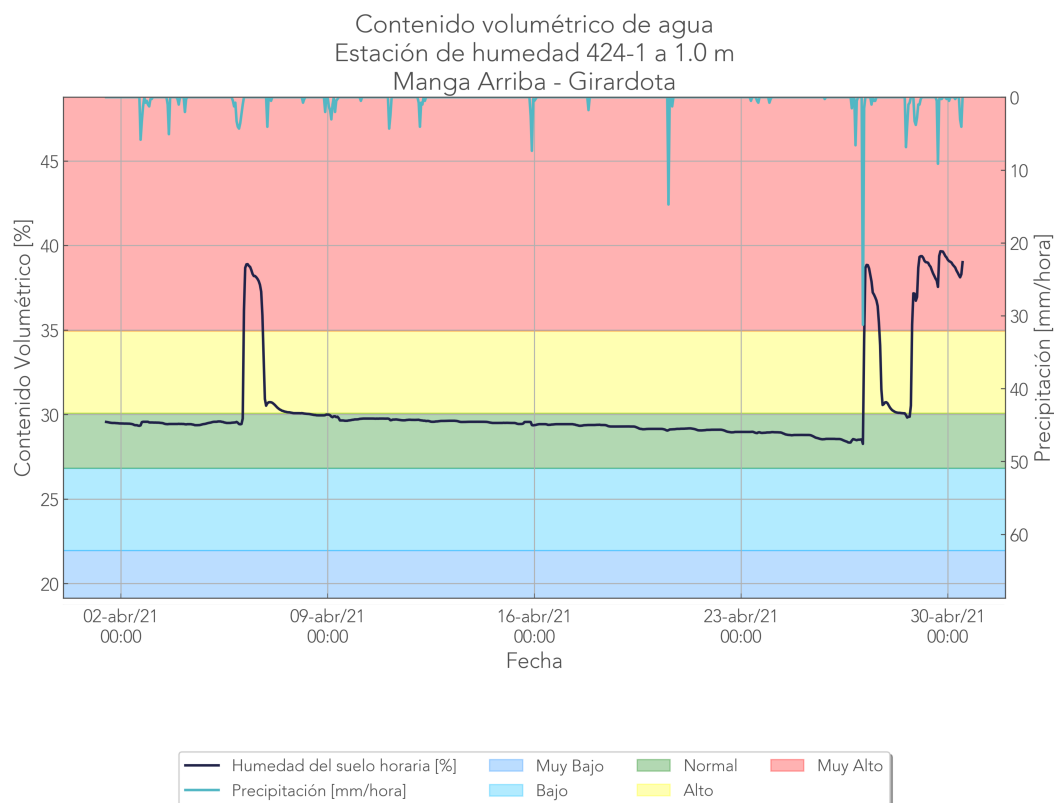


Figura 37: Categorización de histórico de humedad para sensor 424.

Según los reportes periódicos de puntos de monitoreo al rededor de marzo de 2021, se notó cierta actividad del movimiento en masa con base en la información entregada por los extensómetros. Para el mes de abril, el extensómetro 398 reportó desplazamientos de alrededor de 24 cm.

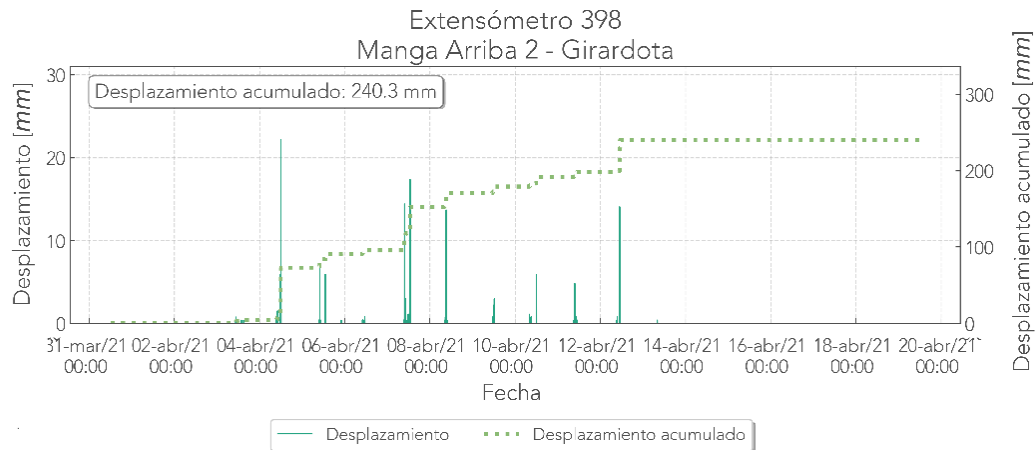


Figura 38: Serie temporal de datos de extensómetro para Manga Arriba durante abril.

Durante abril y mayo, el pluviómetro registró 7 eventos moderados y 4 eventos fuertes. Para los eventos moderados en abril, las intensidades medias estuvieron entre 9.66 y 37.25 mm/h con acumulados entre 8.89 y 11.43 mm, mientras que en mayo mostraron intensidades medias entre 3.07 y 7.91 mm/h con acumulados entre 13.72 y 20.83 mm. En el caso de los eventos fuertes, el primero se presentó día 27 de abril con una intensidad media de 23.77 mm/h y un acumulado de 19.81 mm; los otros 3 ocurrieron en mayo los días 2, 3 y 31, con intensidades medias entre 2.86 y 7.14 mm/h y acumulados entre 30.23 y 47.50 mm, siendo el del día 3 el más significativo del periodo.

Cabe resaltar que en consecuencia hacia finales del mes de mayo se reportó la superficie de falla a 5 metros con de desplazamiento de según el TDR, como se puede ver en la figura 39. Adicionalmente, para este final de mes el sensor de humedad aumentó considerablemente sus valores a categorías de datos altos y muy altos.

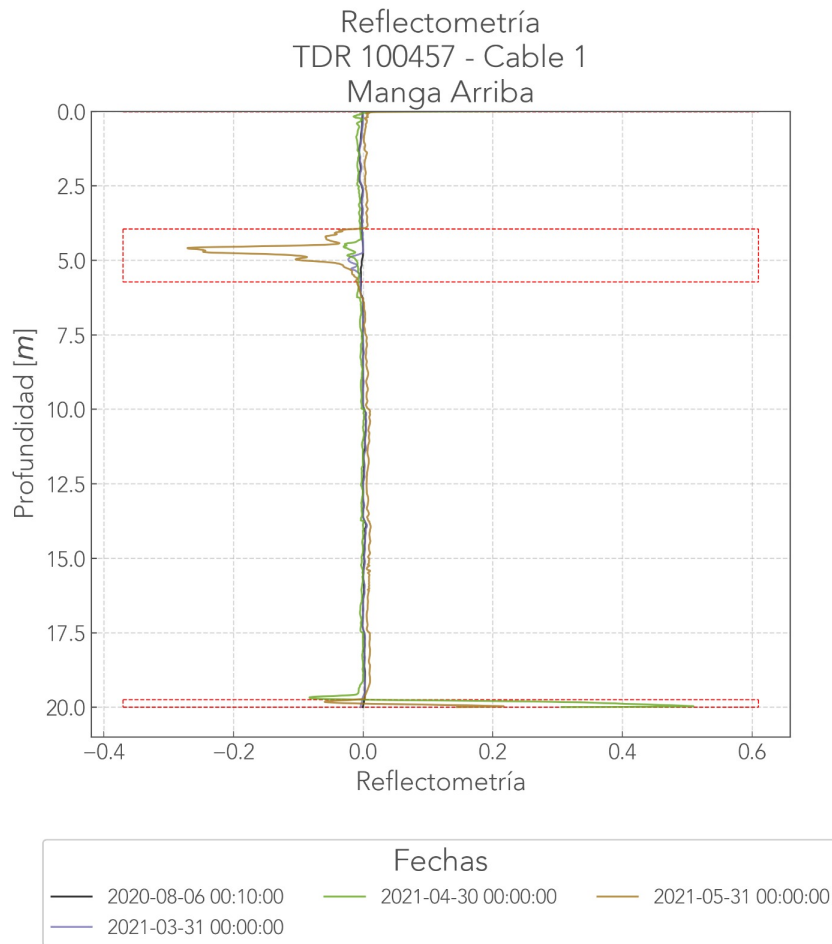


Figura 39: TDR Manga Arriba, para mayo de 2021.

En general, el análisis de umbrales se estableció en la librería redlands para que pueda ejecutarse con cualquier sensor de la red de humedad, activo o inactivo. Para los puntos de monitoreo que cuentan con un sensor activo, se establecieron los umbrales y se dejó operativa como herramienta de visualización en el geovisor SIAMMO. En la Figura 40 se pueden ver un ejemplo de la visualización establecida en escala diaria para los sensores, complementados con la información de la lluvia del pluviometro adyacente. Para los sensores activos, los percentiles se actualizan cada mes, en función de la adquisición de nuevos datos.

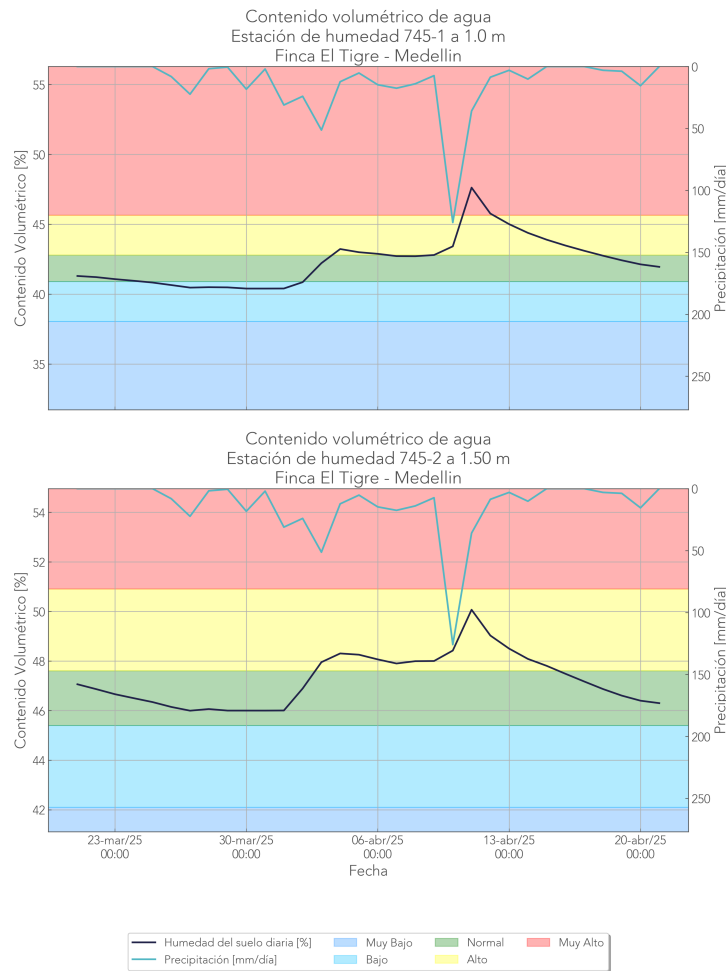


Figura 40: Umbrales de humedad para sensores en punto crítico el Tigre.

Espacialización de humedad

A continuación se muestran los resultados para las herramientas exploradas.

Modelación Hidrológica - SWAT

En el caso de SWAT se utilizó la modelación para la primera capa simulada. En la Figura 41 se puede ver un ejemplo de la espacialización para el 1 de enero de 2018 (primer día de simulación), así mismo en la Figura 42 para el día 27 de agosto de 2018. En la Figura 43, se muestra una serie temporal, a manera de ejemplo, para la HRU 001820004 desde 2018 hasta 2019.

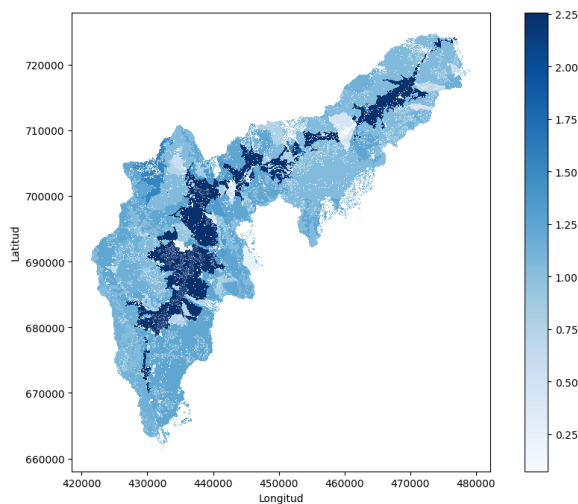


Figura 41: Mapa de humedad con SWAT para 1 de enero de 2018.

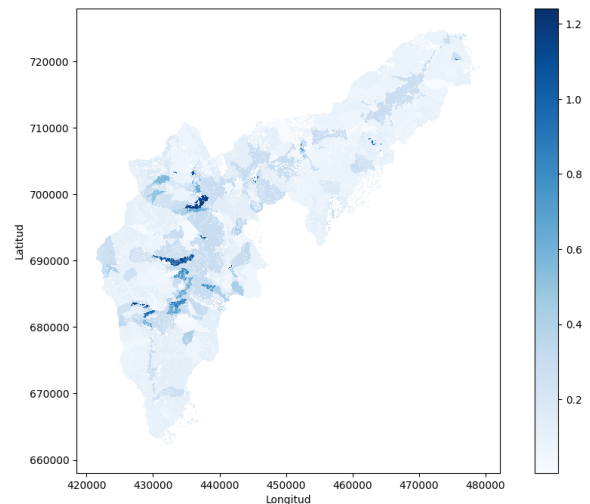


Figura 42: Mapa de humedad con SWAT para 27 de agosto de 2018.

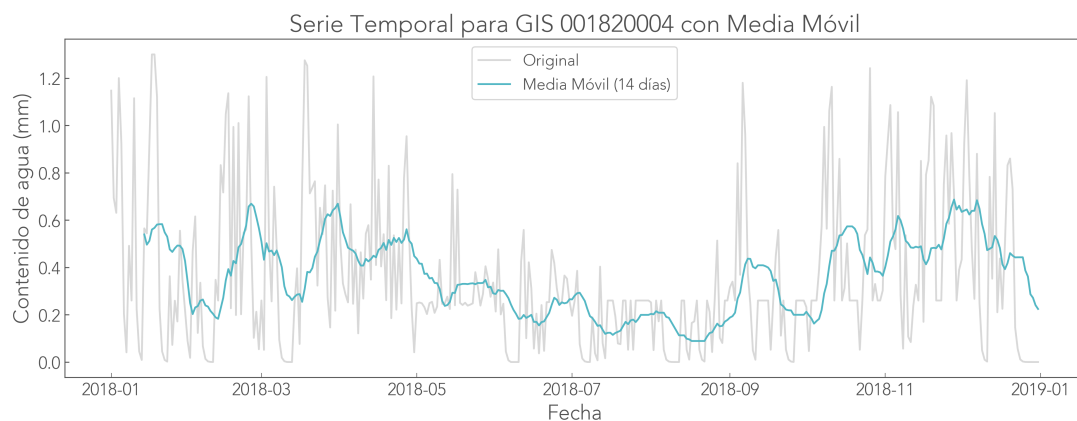


Figura 43: Serie de tiempo para unidad de respuesta 001820004.

Simultáneamente, se evaluaron puntos dentro del dominio modelado, donde se contaban con sensores de humedad, buscando establecer la correlación entre estas mediciones in situ y resultados de la modelación. En este caso se utilizó la 2 capa de modelación. De manera general, los valores de correlación de Spearman arrojaron valores inferiores a 0.36, solo en 2 puntos de los analizados se obtuvieron valores moderados por encima de 0.5 (E y F), como puede observarse en la Figura 44.

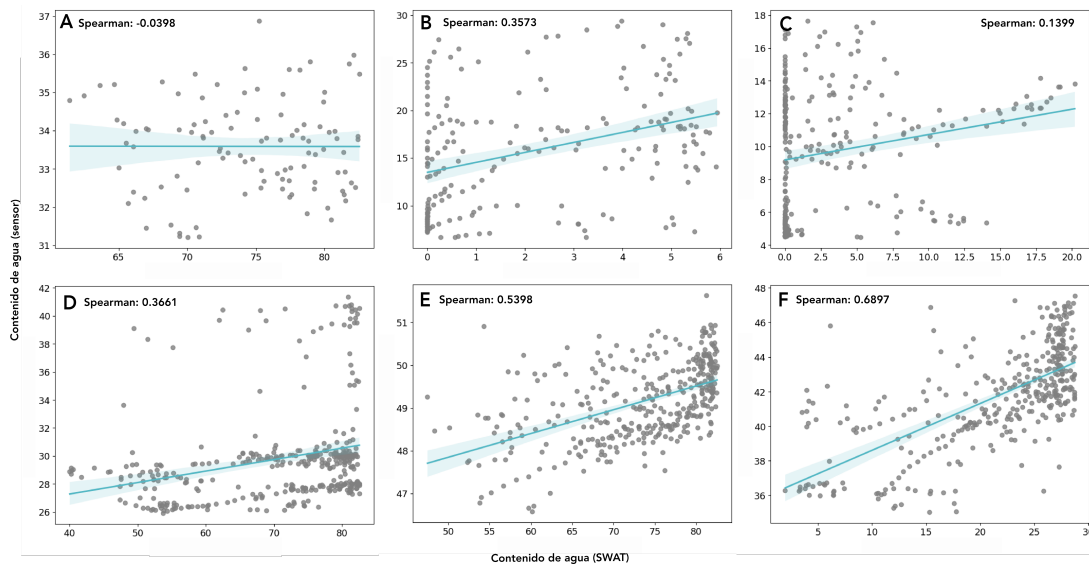


Figura 44: Diagramas de correlación entre valores observados de sensores y valores arrojados por modelo SWAT. A es sensor 532, B sensor 611, C sensor 618, D sensor 424, E sensor 553 y F sensor 396.

Soil Moisture Active Passive - SMAP

En la Figura 45 se pueden observar los gráficos de correlación a escala de 3 horas para algunos puntos del valle donde había disponibilidad de sensores de humedad en tierra. La correlación de Spearman varió entre 0.76 a 0.29. Por lo general, fueron moderado-alto en 3 puntos, débil en uno y escaso en uno.

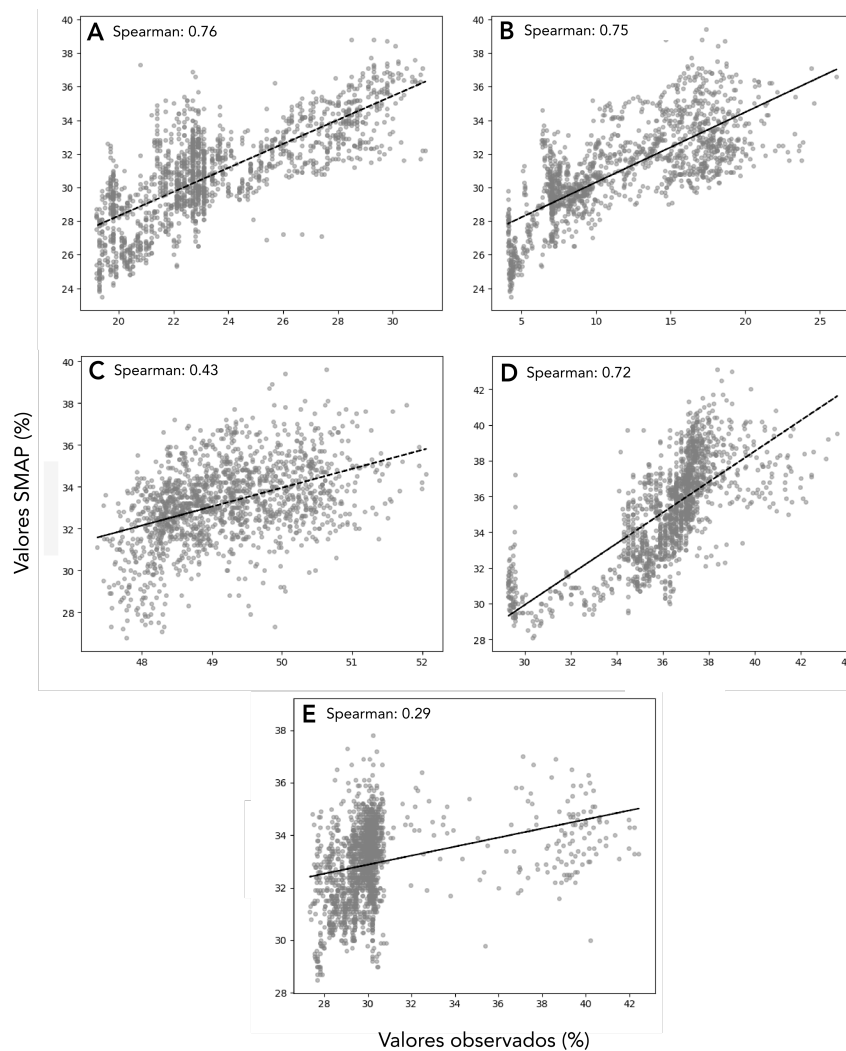


Figura 45: Diagramas de correlación entre datos en tierra y SMAP. A es sensor 611, B sensor 618, C sensor 553, D sensor 541 y E sensor 424.

Modelo TOTRAM

En la Figura 46 se presentan los resultados del modelo TOTRAM para cuatro meses del año. El modelo demostró ser altamente susceptible a la nubosidad, lo que puede llevar a que extensas áreas sean clasificadas erróneamente como zonas húmedas cuando en realidad corresponden a masas nubosas. La interpretación de los resultados se ve limitada por la falta de imágenes con menos del 40 % de nubosidad. Además, estos modelos tienden a retirar o enmascarar zonas urbanas, lo que afecta la confiabilidad de los valores en áreas como el valle de Aburrá. Por lo general, fuera de las masas nubosas y el área urbana, los valores oscilan entre 32 % y 70 % para la humedad a esta escala regional. Los resultados se producen en promedio cada 10 días, dependiendo de la disponibilidad de la imagen de Landsat.

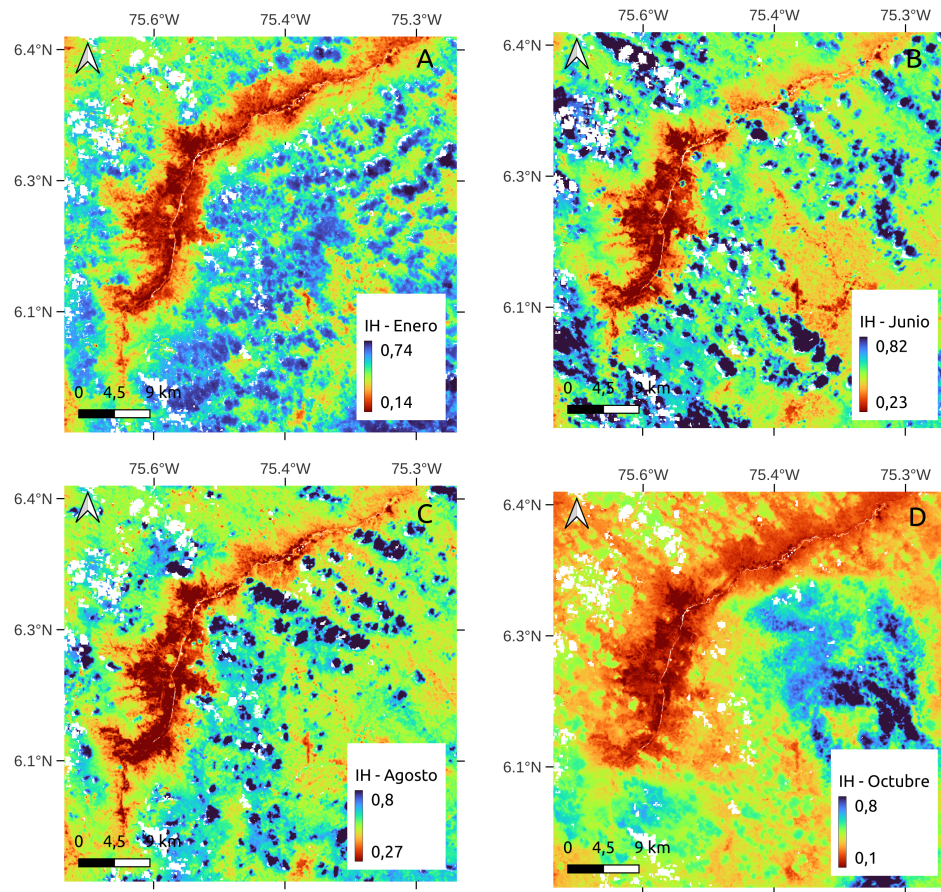


Figura 46: Humedad del suelo a partir de modelo TOTRAM. A es enero, B es junio, C es agosto y D es octubre.

Evaluando el modelo con los puntos en tierra se obtuvieron correlaciones muy bajas y de relación negativa, en todos los casos, TOTRAM subestimo la humedad nunca superando un umbral de 0.35-0.4 y en promedio oscilando entre 0.1 y 0.25. En la Figura 47 se puede ver la correlación entre el modelo y los sensores en donde se denota esta relación.

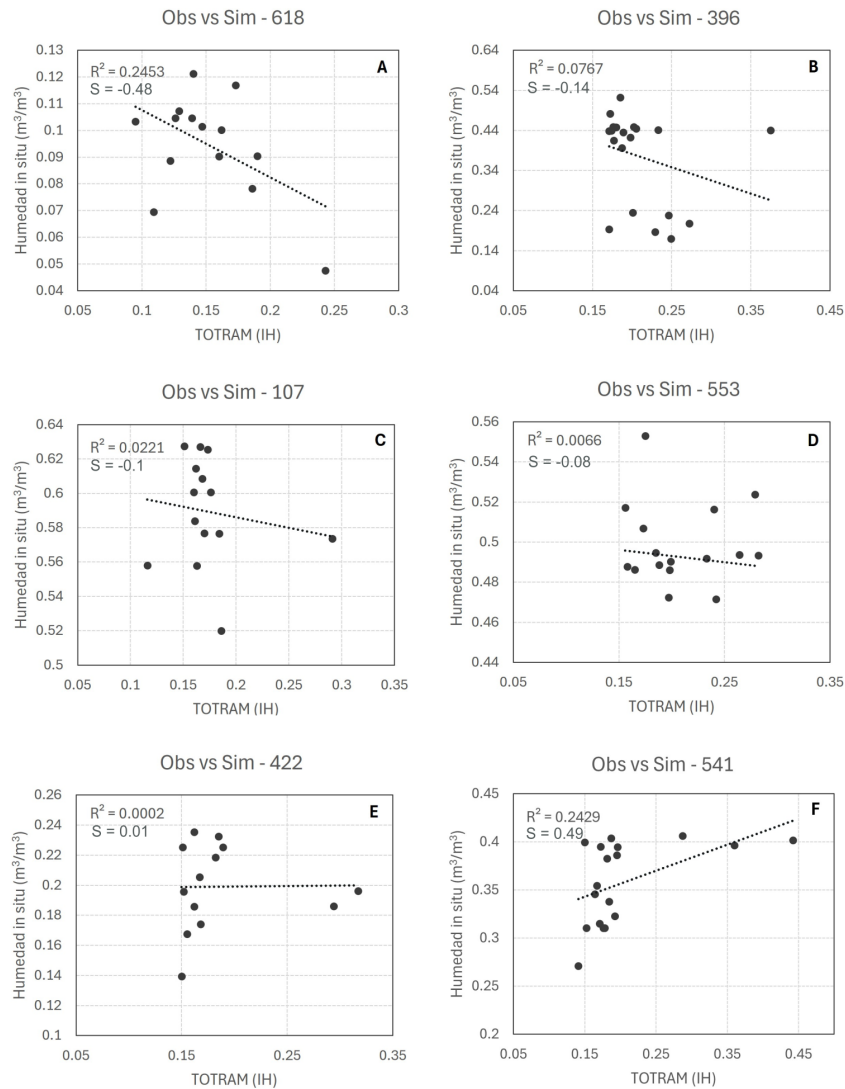


Figura 47: Correlación entre modelo TOTRAM y sensores en tierra.

ERA5

En la Figura 48 se pueden observar los gráficos de correlación a escala horaria para algunos puntos del valle donde había disponibilidad de sensores de humedad en tierra. La correlación de Spearman varió entre -0.56 a 0.73. Por lo general, fueron bajos 3 puntos, fuerte en uno y moderado con tendencia negativa en uno. R^2 indicó que en todos los casos, menos en el sensor 680, se tiene una gran dispersión indicada por valores entre 0.0003 a 0.157.

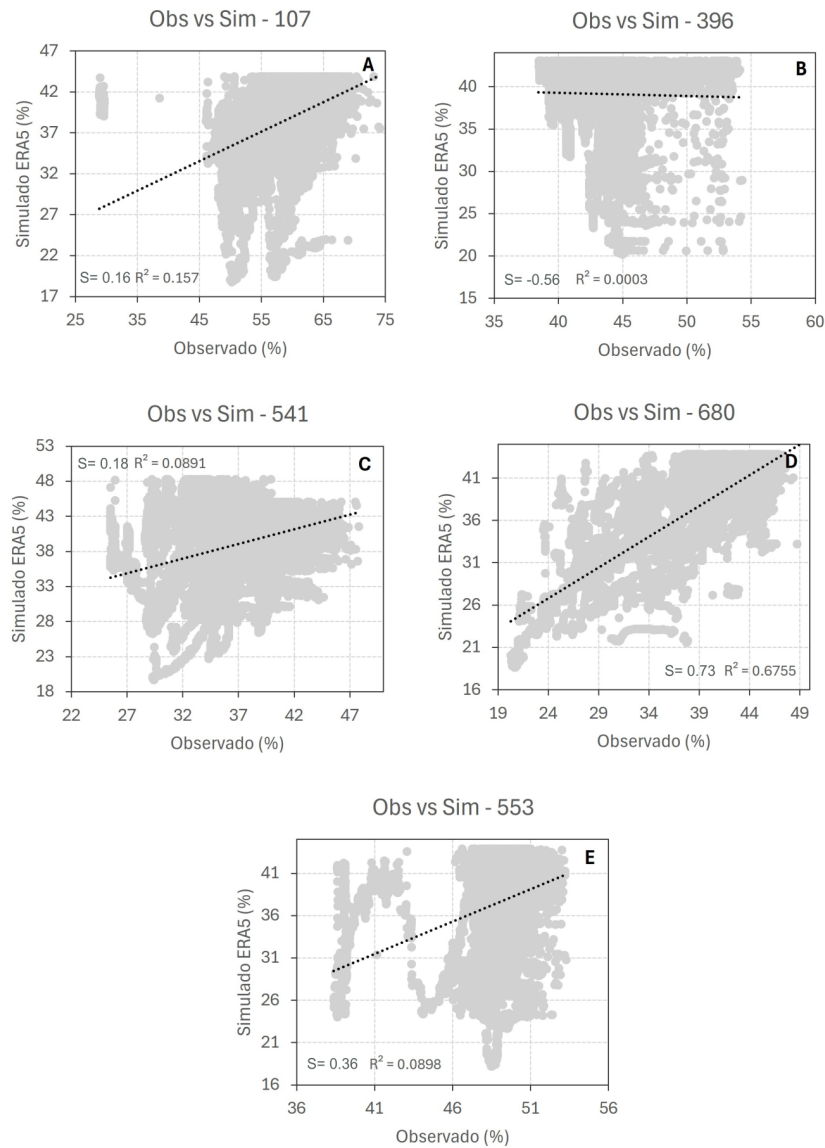


Figura 48: Correlación entre sensores en tierra y datos de ERA-5. A es sensor 107, B sensor 396, C sensor 541, D sensor 680 y E sensor 553.

Downscaling de humedad

En la Figura 49 se presentan los resultados del modelo de Downscaling para 3 fechas, a manera de ejemplo, durante el año 2023 en las fechas 1 de enero, 6 de marzo y 9 de mayo. Eventualmente, en este caso, los espacios en blanco se deben a la nubosidad persistente y a los filtros de calidad aplicados para excluir mediciones con alta incertidumbre desde el propio producto derivado de MODIS. Temporalmente, el producto entrega datos cada 8 días, en función de la disponibilidad de los productos de MODIS y espacialmente queda de 1 km.

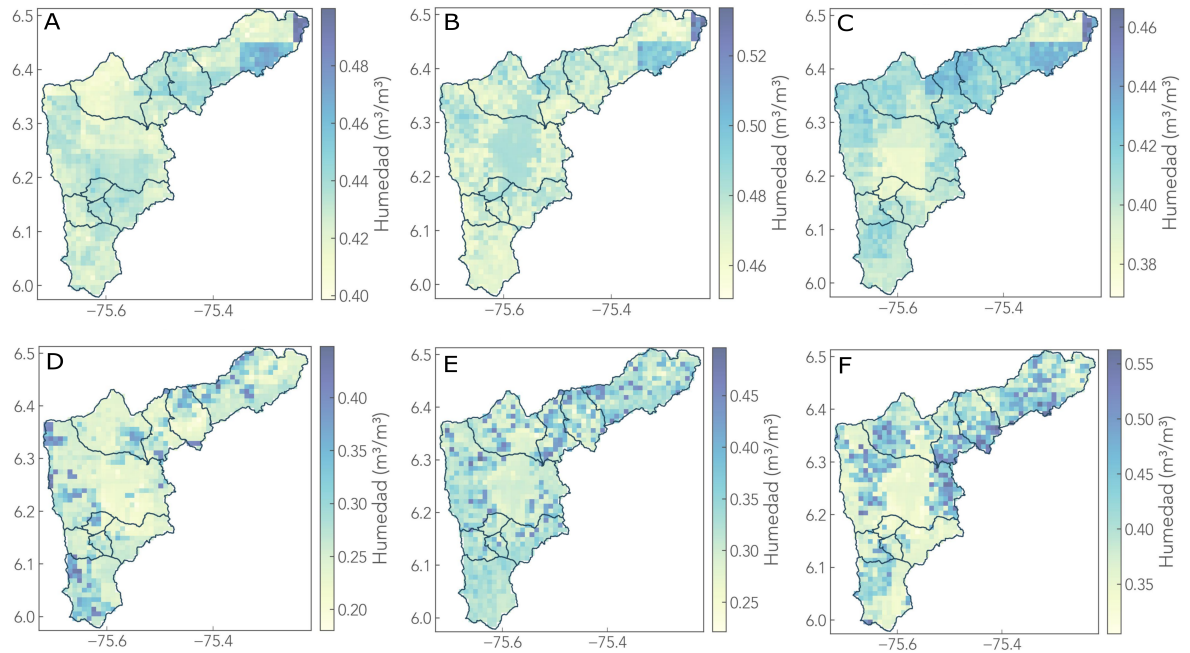


Figura 49: Humedad del suelo con Downscaling derivada de ERA5 y SMAP. A es 01 de enero, B es 06 de marzo y C 09 de mayo para ERA5, D es 01 de enero, E es 06 de marzo y F 09 de mayo para SMAP.

Discusión y conclusiones

Esta investigación se centra en la fase inicial de análisis de datos en señales de humedad del suelo, su relación con la lluvia, los movimientos en masa y su espacialización. El objetivo es validar la eficacia de estas herramientas para establecer una metodología clara en términos de calidad de datos y comprensión del fenómeno y como un eventual insumo para la posterior construcción de umbrales hidrometeorológicos.

Procesamientos de datos de humedad

Inicialmente, se identificaron limitaciones significativas con ARIMA y la librería imputeFin. En rangos prolongados de tiempo estos modelos no reflejan adecuadamente los procesos hidrológicos involucrados de forma interpretable, donde la aleatoriedad de la precipitación y las características de los procesos de infiltración y evaporación vuelven a la humedad una variable no lineal en el espacio y el tiempo, complicándola predicción.

El filtrado estadístico resultó efectivo para reducir datos atípicos, especialmente con el complemento del filtro físico que identificó claramente los valores que superaban el umbral establecido. La señal original, debido a la tasa de muestreo de 1 minuto, presenta ruido de naturaleza sintética, posiblemente ocasionado por la misma instrumentación. El filtro gaussiano fue efectivo para minimizarlo sin incurrir en pérdida de información.

En el caso de los datos en términos de saturación, la relación de vacíos demostró ser el parámetro útil para poder establecer valores coherentes. En general, manejar los datos en esta escala normalizada, permitiría

tener un análisis extrapolado que no dependería de la escala de contenido volumétrico, la cual es muy dependiente de sitio de instalación.

ARIMA requiere un registro prolongado de datos para un ajuste aceptable y una predicción más precisa. Sin embargo, los datos in situ disponibles hasta 2024 tienen pocos años de histórico, lo que afecta su efectividad, presentando dificultades para predecir por fuera de su rango original, dependiendo de datos crudos de alta calidad y completos. Por su parte, imputeFin demostró ser útil para la imputación de datos en escenarios donde la pérdida es inferior a un par de días, manteniendo los estadísticos objetivos aceptables hasta los 5-6 días o menos, mostrando deficiencias en intervalos de más de una semana o pérdidas prolongadas de datos, especialmente en frecuencias de muestreo altas.

Dadas las limitaciones observadas, en casos donde la completitud implique muchas más de 1 semana de predicción, se propone la incorporación de herramientas de Machine Learning o Deep Learning, considerando variables adicionales que modelan la humedad como la precipitación, evapotranspiración y temperatura, para así mejorar la precisión y el rellenado de datos a largo plazo.

Con el análisis de Fourier, se obtuvo una visión limitada del fenómeno, por lo que se plantea la necesidad de explorar otras técnicas de análisis frecuencial. El ruido de alta frecuencia presente en toda la señal se observa como picos ubicados por encima de los $-10^3 Hz$; este límite se establece entendiendo a la humedad como un fenómeno con rezago y que no responde a ciclicidades de tan alta frecuencia (inferior a escala minutal). Este ruido añade componentes que limitan la interpretación de los ciclos reales. Con el remuestreo y el previo filtrado se eliminó significativamente este componente y se lograron identificar algunos ciclos reales, destacando el dominio en frecuencias bajas, posiblemente relacionado con patrones locales de precipitación y evapotranspiración. En algunos sensores como el 608, 396 y 532 se lograron ver frecuencias con un promedio de 170 días (cercano a 6 meses) o en su defecto casi mensuales que muestran más el comportamiento de largo plazo de la señal, en algunos casos se pueden ver algunas frecuencias en plazos más cortos como 15 o 2-3 días. Con esto se ve que la tasa de muestreo afecta directamente la calidad de la señal y la eficiencia de cálculo.

Algunos autores como do Nascimento et al. (2022) han encontrado que tasas de muestreo de 1 hora son efectivas para monitoreo de humedad del suelo ya que los sensores por lo general funcionan mejor a una tasa de adquisición de datos entre 1 y 12 horas, aun así, se considera que esta tasa es demasiado amplia. Para los datos remuestreados a 10 y 30 minutos no se visualizó una gran diferencia en su contenido frecuencial y teniendo en cuenta que se quiere conservar el detalle de la señal y trabajar a escalas de alerta, se proponen tasas de alrededor de 3 o 5 minutos, en donde se conserva mucho el detalle y se trabaja con una serie sin tanto ruido.

Para los resultados de la prueba de cointegración se encontró que existe al menos una fuerte relación a corto y largo plazo entre estas variables para todas las estaciones. Esto es especialmente notable en el sensor 396 y el pluviómetro 43. En general, esto muestra que los pesos de cada serie generan una combinación lineal estacionaria indicando una relación estable y constante. Dado que ambos estadísticos (traza y máxima raíz) para cada localización son consistentemente mayores que los valores críticos al 95 %, se establece que la humedad del suelo y la lluvia presentan una muy alta cointegración.

En el caso de las relaciones a corto plazo los resultados mostraron que un “impulso” de lluvia en la humedad del suelo se observa con un comportamiento rezagado, donde los picos altos característicos de la señal de humedad se presentan, en promedio, 3 horas después de un evento de lluvia. En el caso del sensor 396, se obtuvo la respuesta más corta, con un valor pico de 50 minutos. Para el sensor 608, se obtuvo un valor pico de casi 5 horas. Este rango de respuesta está estrechamente ligado a las condiciones del suelo como granulometría o porosidad y que tan fácil es para el agua infiltrarse. Posterior a los picos, todas las curvas se suavizan y se estabilizan (esto comprende la parte descendente de la señal de humedad).

Análisis de eventos de humedad y lluvia: Sensor 296

Para el análisis puntual del sensor 296 se encontraron los siguientes datos por categoría de evento:

Para la categoría de eventos débiles, los datos combinados de los sensores h1, h2 y h3 muestran que los eventos de corta duración (media de 1.90 a 1.95 h) y baja intensidad (media de 6.85 a 6.89 mm/h) tienen un impacto limitado en la humedad del suelo, con un delta máximo de humedad bajo (media de 2.85 a 2.90 %). Sin embargo, en eventos con mayor duración y acumulación de lluvia (hasta 29.05 mm), el delta máximo de humedad puede llegar a 6.55 %, sugiriendo que algunos eventos débiles más largos pueden generar variaciones significativas en el contenido de agua, perceptibles incluso en sensores a más de 50 cm de profundidad.

En la categoría de eventos moderados, los sensores indican que estos eventos tienen una mayor capacidad de infiltrar agua en el suelo, con duraciones promedio de 3.10 a 3.18 h e intensidades moderadas (media de 8.95 a 9.00 mm/h). El delta máximo de humedad promedio aumenta a 5.02 a 5.05 %, alcanzando hasta 9.18 %, lo que muestra que los eventos moderados más intensos o prolongados logran afectar notablemente la humedad a diversas profundidades, incluyendo los sensores más profundos, que pueden registrar cambios de hasta 9 % en el contenido de humedad.

Para la categoría de eventos fuertes y muy fuertes, los datos combinados de los sensores h1, h2 y h3 muestran que estos eventos, aunque de corta duración (media de 3.45 a 3.52 h), tienen alta intensidad (media de 13.50 a 13.60 mm/h) y presentan un impacto significativo en la humedad del suelo, incluso en profundidades mayores. Los eventos con alta intensidad de lluvia (percentil 75 de hasta 29.04 mm/h) pueden generar una respuesta rápida en las capas superficiales. Sin embargo, los eventos con mayor duración (7.25 h) y acumulados de lluvia (media de 32.00 a 32.20 mm) muestran un delta máximo de humedad significativo, con medias que varían de 6.00 a 6.15 % y alcanzan hasta 11.10 % en el percentil 75. Esto indica que los eventos más prolongados y con mayor intensidad logran afectar significativamente el contenido de agua en todo el perfil del suelo.

A diferencia de lo esperado, el sensor h3, que se encuentra a la mayor profundidad, muestra valores de delta máximo de humedad ($\Delta\theta_{max}$) menores en promedio en comparación con los sensores h1 y h2, que están en posiciones más superficiales. En los eventos débiles, h3 presenta una media de $\Delta\theta_{max}$ de 2.85 %, en comparación con 2.90 % y 2.85 % para h1 y h2, respectivamente. Esta tendencia se mantiene en los eventos moderados, donde h3 tiene una media de $\Delta\theta_{max}$ de 5.02 %, frente a 5.05 % para h2 y 5.00 % para h1. Incluso en los eventos fuertes y muy fuertes, el delta máximo de humedad para h3 es ligeramente inferior (6.11 %) comparado con h2 (6.00 %) y h1 (6.15 %).

Esta discrepancia sugiere que el sensor h3, aunque está a mayor profundidad que los sensores superficiales, podría estar en una zona del perfil del suelo con características particulares de infiltración o retención de agua, como una capa menos permeable o un cambio en la textura del suelo que reduce la capacidad de respuesta a los eventos de lluvia. Alternativamente, podría ser una indicación de que la distribución de humedad en el suelo no es homogénea y que ciertos eventos de lluvia tienen un mayor impacto en la capa más superficial que en las capas intermedias.

Análisis de eventos de humedad y lluvia general

El análisis de los datos históricos disponibles revelan una considerable variación espacial y temporal de las señales. En general, las características que dominan completamente el comportamiento de los datos son: Profundidad de instalación, cobertura vegetal, posición topográfica y propiedades hidráulicas del suelo.

De manera generalizada, los eventos débiles de corta duración y poca intensidad y acumulación (< 38

min, 5.2 mm/h y 10 mm) tienen un efecto despreciable por debajo de los 50 cm de profundidad, e incluso un efecto bajo en los sensores más superficiales. En el caso de los eventos débiles de más larga duración (> 2.2 h, 16 mm/h, 18 mm), estos tienen mayor capacidad de lograr la infiltración de lluvia debido a mayores acumulados de lluvia llegando a acumulados promedios de un evento moderado o incluso fuerte, donde incluso los sensores a más de un metro de profundidad reportan variaciones de al menos 2.8 %.

En el caso de los eventos moderados de más corta duración (< 1.2 h), intensidad (< 6.5 mm/h) y acumulado (< 17.3 mm), por lo general logran infiltrar mayor cantidad de agua. Aun así, en la mayoría de casos, estos eventos son de duraciones en promedio de 2.45 horas, porque lo que incluso los sensores más profundos logran percibir cambios en su contenido volumétrico. Estos eventos, sean cortos e intensos o largos y menos intensos logran percibirse en variadas profundidades, usualmente en varios pulsos de lluvia debido a su naturaleza de mayor duración. Esta clasificación siempre logra cambiar la dinámica de la humedad, con particulares aumentos por encima de 5 % en el delta de contenido volumétrico.

En el caso de los eventos Fuertes y Muy Fuertes de corta duración (< 1.3 h), intensidad (< 22 mm/h) y acumulado (< 28 mm), algunos de ellos pasan desapercibidos, incluso con una acumulación de lluvia considerable. Esto se da en algunos sensores donde es posible que las propiedades hidráulicas del suelo favorecen la escorrentía superficial directa y la infiltración no es tan efectiva. En el caso de los eventos largos (> 4 h) además de intensos (> 32 mm/h), son los que en todos los casos causan un aumento en los contenidos volumétricos de agua, incluso en los sensores más profundos. Este tipo de eventos fue el que causó en promedio los mayores aumentos en los sensores por debajo de 50 cm.

Esta capacidad de infiltración es mucho más rápida en algunos sensores que en otros, debido a diferentes características del punto como la porosidad efectiva/permeabilidad del suelo, vegetación y las propiedades de la zona de raíces. Los primeros 50 cm son más susceptibles a descenso o descarga rápida del contenido volumétrico debido al efecto de succión de agua, las raíces y/o procesos de evapotranspiración rápida (escala de horas). En el caso de los sensores ubicados a mayor profundidad de 50 cm la descarga se da en escala de varios días.

En el caso particular de los rezagos, los valores positivos encontrados en la correlación cruzada (> 0) muestran que el mayor pico de humedad antecede al pico de evento de precipitación, esto significa que el evento de aumento de humedad ocurrieron por eventos previos al consultado y aunque se reporta un aumento, este no es el máximo de la ventana temporal consultada.

Para entender en profundidad como es la respuesta por punto de instalación es necesario hacer análisis adicionales de laboratorio a muestras de suelo. Con esta información sumada a la posición topográfica, la profundidad de zona de raíces y la vegetación adyacente se lograrían entender en profundidad los procesos hidrológicos.

Análisis de humedad y movimientos en masa

En el análisis realizado se observó que, en ciertos intervalos de tiempo, los sensores de humedad no detectaron variaciones significativas en la humedad del suelo cercanas al evento de movimiento en masa, particularmente cuando la distancia al evento superaba los 400 metros y en casos excepcionales, 1000 metros.

Esta espacialidad a su vez depende de múltiples variables como la cobertura, pendiente, áreas de acumulación de flujo, que a su vez reducen considerablemente que el sensor pueda percibir perturbaciones. En contraste, en los casos donde los movimientos en masa ocurrieron a distancias menores, fue posible identificar algunos incrementos más precisos en la humedad posterior a eventos de precipitación fuertes/muy-fuertes. En Bermejala algunos eventos se asociaron a periodos prolongados de acumulación de humedad, excediendo los 20 días. En promedio, los picos de recarga y descarga duran desde 20 horas

hasta 1 o 2 días (desde el inicio del pico hasta su fin) para todos los sensores, aquí los valores pueden alcanzar valores altos o muy altos, pero son bastante rápidos y no son prolongados (pico de humedad).

Un caso particular es el análisis del sensor ubicado en Montañita. Antes del evento de deslizamiento, se observó un aumento sostenido y significativo del contenido de humedad, en un menor rango de días, pero que alcanzó valores superiores al promedio histórico. Esto sugiere que el análisis a escalas puntuales y locales (puntos críticos y laderas) puede proporcionar indicios valiosos a través del monitoreo in-situ de la humedad. Sin embargo, a la escala espacial actual, la cobertura espacial limitada e histórico, no permiten establecer mejor la influencia de múltiples factores como la topografía, la cobertura vegetal, el área de drenaje acumulada y las precipitaciones sobre el comportamiento de la humedad y su correlación con los movimientos en masa.

Para Pueblo Viejo se obtuvieron resultados similares a Montañita. Temporalmente, los movimientos reportados a través de la cámara tienen correspondencia con valores altos y prolongados de humedad, donde en octubre y noviembre más del 60 % del histórico mensual reportó valores altos de humedad. Aunque en abril, la cámara captó los desplazamientos más evidentes y sensor ya no enviaba datos, los disponibles mostraron un indicio de la tendencia al aumento de humedad. La lluvia registrada por el pluviómetro también está ligada a estos movimientos y aumentos de humedad.

En el caso de Manga Arriba, aunque los valores de humedad no fueron altos prolongadamente como en los otros casos, se vio correspondencia temporal en aumentos rápidos de humedad y datos de desplazamientos reportados por los extensómetros y el TDR.

En zonas con antecedentes de deslizamientos, los sensores mostraron patrones mensuales (tendencias) y diarios (eventos) de saturación progresiva. A su vez, este análisis es coherente con la idea que casi el 94 % de los deslizamientos inventariados tienen fechas cercanas a eventos fuertes/muy fuertes de lluvia. Por ejemplo, en Bermejuela algunos eventos se ubicaron temporalmente en intervalos de saturación alta y sostenida ligada a múltiples eventos de lluvia fuerte en la zona.

En general, para todos los puntos analizados, el enfoque de umbralización por percentiles basado en datos históricos arrojó resultados prometedores. En algunos casos, como el de Montañita, se evidenció que en categorías de humedad alta y muy alta se materializaron movimientos, lo cual demuestra la utilidad in situ de los sensores. Esto sugiere que, a escala de ladera o de monitoreo localizado, los sensores de humedad pueden proporcionar información potencialmente valiosa. No obstante, es importante destacar que este tipo de análisis depende en gran medida de la calidad de los datos y de la disponibilidad de un historial mínimo, preferiblemente de al menos un mes, que permita una caracterización estadística suficientemente robusta.

Con el análisis histórico, se puede discutir con mayor claridad las condiciones más representativas que anteceden a los movimientos en masa. En la mayoría de los eventos analizados, se observa que la saturación máxima en promedio del suelo supera el 40 % antes del evento detonante y la antecedente superior al 50 % con una moda por el orden de 80 % hacia arriba, lo cual indica una predisposición del terreno a fallar cuando se presenta lluvia adicional. Por su parte, las combinaciones de intensidad y duración muestran que las condiciones más críticas no necesariamente se asocian a lluvias extremas, sino a eventos de intensidad intermedia y larga duración, lo que sugiere un efecto acumulativo del agua sobre suelos ya comprometidos.

Esta evidencia coincide con estudios previos que destacan el papel de la humedad del suelo como variable condicionante. Con un mayor número de registros, estos valores podrían ajustarse y reflejar un rango de incertidumbre más realista.

En conjunto, los hallazgos refuerzan la necesidad de considerar enfoques multivariantes para los sistemas de alerta temprana, en los que tanto las condiciones iniciales del suelo como las características del evento de lluvia deben ser integradas. Ignorar la interacción entre estas variables puede subestimar escenarios

críticos.

Espacialización de humedad

A partir de las múltiples limitaciones espacio-temporales identificadas con los sensores in-situ, se exploraron y analizaron las dos propuestas para manejar los datos de humedad más comunes: 1) humedad a partir de productos satelitales y 2) humedad a partir de modelos hidrológicos. Con esto se podrían comparar con sus pares de lluvia y explorar los umbrales sin las limitaciones de desbalance y discontinuidad de los sensores en tierra.

SMAP mostró ser una herramienta útil debido a la disponibilidad de datos y en general buena correlación con los sensores en tierra a escala de 3 horas, superior a 0.6, aun así se resalta que la resolución espacial de este producto satelital sigue siendo muy significativa, de esta misma forma se encuentra ERA5. En el caso de SWAT, los valores de humedad para la primera capa dan órdenes de magnitud que no son tan coherentes, siendo muy bajos (menor a 10 mm en promedio). Utilizando los resultados de la capa 2 de modelación, el orden de magnitud da en escalas más coherentes, aún sí, cuando se evaluó la correlación entre los datos simulados del modelo con los sensores en campo para al menos 1 año de datos, en 4 de los 6 puntos se obtuvieron resultados deficientes. En el caso de SMAP el resultado más bajo estuvo cerca de 0.29 y tres puntos estuvieron por encima de 0.7, lo cual muestra en general un mejor nivel de correlación entre el satélite y los sensores que con el modelo.

Cabe resaltar que estas herramientas son consecutivamente nombradas en la literatura científica, siendo insumos muy valiosos para la aplicación en umbrales que involucran la humedad a escalas de ladera, cuenca y mayores extensiones, debido a las limitantes espaciales de los sensores in situ de humedad previamente mencionadas. Por ende, se debe explorar una nueva calibración del modelo actual enfocada a obtener buenos resultados en el balance que hace para la humedad del suelo, ya que la actual no arroja buenos resultados.

A la par, el modelo TOTRAM mostró resultados con limitaciones. En primer lugar, fuera de Landsat y/o MODIS, es difícil encontrar satélites con una banda térmica que permita obtener este valor de manera directa, por lo que podría ser conveniente utilizar modelos que empleen correspondencias o parámetros similares. Además, la nubosidad sesgó significativamente los resultados, mostrando extensas áreas con valores elevados. Por ello, sería recomendable explorar índices derivados de otros satélites o imágenes SAR que no se ven afectados por la nubosidad y podrían ofrecer una mejor aproximación a las condiciones del terreno, evaluando su correlación con los sensores en tierra.

La herramientas satelitales mostraron algunos artificios de interpolación como líneas marcadas los cuales son efectos comunes debido a la variabilidad en la adquisición y procesamiento de datos de bajar de una escala gruesa como 9km. Las discontinuidades pueden atribuirse a diferencias en las fechas de captura y los ángulos de observación, lo que genera bordes bien definidos al combinar múltiples escenas. Así mismo, la presencia de píxeles sin datos se debe principalmente a la nubosidad persistente y a los filtros de calidad aplicados para excluir mediciones con alta incertidumbre en los sensores ópticos. Estas limitaciones pueden impactar la precisión del downscaling de humedad del suelo, ya que la regresión Random Forest depende de la disponibilidad de datos de MODIS. En general el downscaling mostró mejores resultados con SMAP que en ERA5, siendo efectivo para dar un esbozo de como se distribuye la humedad en el valle, eventualmente esos patrones espaciales se pueden corroborar con acumulados de radar y ver si en tiempos particulares hay coincidencia espacial a la lluvia y localizaciones movimientos en masa.

Apéndice: Análisis de Humedad y Eventos de lluvia

107

Para este sensor se calcula que al menos 100 m^2 drenan al punto específico. En la Tabla 12 se pueden ver la cantidad de eventos y rango consultado. Para todas las clasificaciones de lluvia y profundidades de sensores, la humedad inicial fue la variable que mayor correlación mostró con el cambio del contenido volumétrico de agua.

Sensor	Pluviómetro	Fecha Consultada	Débil	Moderado	Fuerte/Muy Fuerte
h1	20	31/12/2020 - 31/12/2021	15	10	13
h2					

Tabla 12: Cantidad de eventos por categoría según sensor y pluviómetro consultado.

Eventos Débiles

En la Tabla 13 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	58.38	3.03	18.26	-234.71	58.57	1.64	9.66
σ	2.31	1.88	19.16	199.39	2.40	1.34	6.40
Med	58.22	3.53	12.70	-260.00	58.73	1.18	6.57
Min	54.36	0.00	4.83	-875.00	53.87	0.28	2.50
Max	63.32	5.06	90.04	0.00	63.32	4.98	21.52
P_{75}	59.31	4.66	17.02	-120.00	60.43	2.73	14.18
P_{25}	56.96	1.58	10.67	-300.00	56.88	0.55	4.35

Tabla 13: Estadísticos básicos para la categoría débil del sensor ‘h1’.

En la Tabla 14 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	62.86	1.68	18.26	-282.35	62.86	1.64	9.66
σ	2.41	2.10	19.16	439.59	2.32	1.34	6.40
Med	63.49	1.05	12.70	-295.00	63.31	1.18	6.57
Min	53.92	0.01	4.83	-1125.00	54.12	0.28	2.50
Max	64.54	8.04	90.04	580.00	64.55	4.98	21.52
P_{75}	63.80	1.74	17.02	-65.00	63.68	2.73	14.18
P_{25}	62.89	0.47	10.67	-470.00	63.06	0.55	4.35

Tabla 14: Estadísticos básicos para la categoría débil del sensor ‘h2’.

Eventos Moderados

En la Tabla 15 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	58.43	4.23	21.94	-207.50	58.54	2.69	9.95
σ	2.19	1.52	7.15	105.15	1.86	1.65	6.82
Med	58.50	4.32	20.89	-255.00	58.54	2.65	7.50
Min	54.75	0.76	12.06	-300.00	55.52	0.52	3.66
Max	62.68	6.72	40.22	0.00	61.34	5.00	23.95
P_{75}	59.77	5.22	24.54	-187.50	59.99	3.93	11.44
P_{25}	57.08	3.70	19.08	-270.00	57.25	1.22	5.59

Tabla 15: Estadísticos básicos para la categoría moderado del sensor ‘h1’.

En la Tabla 16 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	62.67	2.67	21.94	-213.75	62.87	2.69	9.95
σ	1.26	1.69	7.15	403.90	1.18	1.65	6.82
Med	62.71	2.86	20.89	-295.00	63.34	2.65	7.50
Min	60.74	0.00	12.06	-970.00	60.70	0.52	3.66
Max	64.26	5.35	40.22	785.00	64.26	5.00	23.95
P_{75}	63.81	3.63	24.54	-93.75	63.53	3.93	11.44
P_{25}	61.79	1.73	19.08	-367.50	62.28	1.22	5.59

Tabla 16: Estadísticos básicos para la categoría moderado del sensor ‘h2’.

Eventos Fuertes y Muy Fuertes

En la Tabla 17 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	57.10	4.80	34.60	-208.00	57.15	3.39	14.43
σ	2.21	1.47	18.67	93.44	2.07	2.61	7.61
Med	57.41	4.91	29.59	-250.00	57.71	1.95	14.46
Min	52.76	1.96	14.22	-290.00	52.35	0.83	4.08
Max	60.19	6.90	90.30	0.00	59.92	8.27	26.00
P_{75}	58.46	5.57	40.87	-195.00	58.61	5.02	20.73
P_{25}	56.34	4.16	25.02	-262.50	56.55	1.55	7.83

Tabla 17: Estadísticos básicos para la categoría fuerte y muy fuerte del sensor ‘h1’.

En la Tabla 18 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	62.11	3.43	34.60	-90.33	62.28	3.39	14.43
σ	2.49	2.66	18.67	382.46	2.40	2.61	7.61
Med	63.08	3.98	29.59	-230.00	62.88	1.95	14.46
Min	55.50	0.00	14.22	-335.00	55.62	0.83	4.08
Max	64.60	8.73	90.30	1085.00	64.60	8.27	26.00
P_{75}	63.68	5.49	40.87	-120.00	63.75	5.02	20.73
P_{25}	61.69	0.91	25.02	-292.50	61.84	1.55	7.83

Tabla 18: Estadísticos básicos para la categoría fuerte y muy fuerte del sensor ‘h2’.

188

Para este sensor se calcula que al menos 24 m^2 drenan al punto específico. En la Tabla 19 se pueden ver la cantidad de eventos y rango consultado. Para h2, las variables que mostraron mayor correlación con el cambio del contenido volumétrico de agua fueron el rezago y la precipitación acumulada. En el caso de h3 con clasificación de lluvia débil, la humedad inicial fue la variable con mayor correlación. Para las clasificaciones de lluvia moderada, fuerte y muy fuerte en h3, la precipitación acumulada mostró la mayor correlación

Sensor	Pluviómetro	Fecha Consultada	Débil	Moderado	Fuerte/Muy Fuerte
h2	189	2019-05-01 - 2021-07-01	39	38	34
h3					

Tabla 19: Cantidad de eventos por categoría según sensor y pluviómetro consultado.

Eventos Débiles

En la Tabla 20 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	68.29	3.55	15.55	-198.33	68.44	1.26	10.52
σ	2.53	2.79	9.39	407.98	2.61	0.80	7.08
Med	67.83	2.86	13.33	-285.00	68.02	1.12	7.55
Min	62.74	0.00	5.46	-1475.00	62.62	0.22	4.04
Max	74.96	9.12	46.74	1190.00	75.02	3.10	32.17
P_{75}	69.94	5.10	17.91	-25.00	69.88	1.82	12.05
P_{25}	67.05	1.35	8.95	-322.50	66.99	0.60	6.06

Tabla 20: Estadísticos básicos para la categoría débil del sensor ‘h2’.

En la Tabla 21 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	71.11	9.40	15.55	-24.10	72.07	1.26	10.52
σ	5.73	7.55	9.39	425.40	6.09	0.80	7.08
Med	68.77	8.42	13.33	-110.00	70.14	1.12	7.55
Min	62.26	0.01	5.46	-535.00	62.32	0.22	4.04
Max	83.90	23.56	46.74	1245.00	88.95	3.10	32.17
P_{75}	73.75	15.70	17.91	0.00	74.56	1.82	12.05
P_{25}	67.44	2.31	8.95	-295.00	67.60	0.60	6.06

Tabla 21: Estadísticos básicos para la categoría débil del sensor ‘h3’.

Eventos Moderados

En la Tabla 22 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	68.01	5.14	23.81	-72.37	68.54	2.86	10.12
σ	4.11	2.45	10.38	336.25	4.10	2.27	7.83
Med	68.35	5.43	20.26	-160.00	68.81	2.19	7.86
Min	57.68	0.00	6.73	-505.00	58.20	0.40	2.20
Max	76.54	9.11	44.83	1165.00	76.74	9.68	31.07
P_{75}	69.73	6.92	35.81	0.00	70.37	4.42	10.84
P_{25}	66.18	4.22	16.51	-275.00	66.46	1.22	4.59

Tabla 22: Estadísticos básicos para la categoría moderado del sensor ‘h2’.

En la Tabla 23 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	71.34	11.71	23.81	-78.55	71.83	2.86	10.12
σ	8.11	7.24	10.38	410.03	7.62	2.27	7.83
Med	70.43	12.93	20.26	-230.00	71.58	2.19	7.86
Min	54.63	0.00	6.73	-605.00	54.77	0.40	2.20
Max	92.32	24.70	44.83	1420.00	89.85	9.68	31.07
P_{75}	74.95	17.50	35.81	0.00	74.75	4.42	10.84
P_{25}	67.65	7.12	16.51	-285.00	68.21	1.22	4.59

Tabla 23: Estadísticos básicos para la categoría moderado del sensor ‘h3’.

Eventos Fuertes y Muy Fuertes

En la Tabla 24 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	68.55	6.41	33.63	-161.03	68.32	2.53	15.86
σ	3.87	3.19	15.21	324.21	3.44	1.77	8.41
Med	68.11	5.95	31.56	-260.00	68.45	2.22	13.35
Min	61.21	0.35	8.89	-485.00	61.26	0.60	3.86
Max	79.32	11.70	69.47	1315.00	78.92	8.08	40.14
P_{75}	70.03	9.46	42.35	-186.25	69.63	2.99	20.10
P_{25}	66.85	4.06	25.84	-288.75	67.01	1.25	11.18

Tabla 24: Estadísticos básicos para la categoría fuerte y muy fuerte del sensor ‘h2’.

En la Tabla 25 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	71.58	14.10	33.63	-100.88	71.98	2.53	15.86
σ	6.74	6.51	15.21	397.08	5.90	1.77	8.41
Med	69.82	16.41	31.56	-257.50	70.81	2.22	13.35
Min	60.20	1.22	8.89	-310.00	60.44	0.60	3.86
Max	86.68	22.22	69.47	1220.00	85.07	8.08	40.14
P_{75}	75.75	19.03	42.35	-190.00	75.63	2.99	20.10
P_{25}	67.29	11.82	25.84	-278.75	68.63	1.25	11.18

Tabla 25: Estadísticos básicos para la categoría fuerte y muy fuerte del sensor ‘h3’.

235

Para este sensor se calcula que al menos 12 m^2 drenan al punto específico. En la Tabla 26 se pueden ver la cantidad de eventos y rango consultado. Para los eventos de lluvia débil, el delta máximo de los sensores vw1 y vw2 mostró una mayor correlación con la precipitación acumulada. En el caso de los eventos moderados, el rezago fue la variable que presentó una correlación más fuerte con el delta máximo tanto para el sensor vw1 como para el sensor vw2. Por otro lado, en los eventos de lluvia fuerte y muy fuerte, la humedad inicial demostró ser la variable más correlacionada con el delta máximo de los sensores vw1 y vw2

Sensor	Pluviómetro	Fecha Consultada	Débil	Moderado	Fuerte/Muy Fuerte
vw1	43	2020-01-15 - 2021-07-01	35	19	23
vw2					

Tabla 26: Cantidad de eventos por categoría según sensor y pluviómetro consultado.

Eventos Débiles

En la Tabla 27 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	37.92	1.65	15.66	-186.14	38.12	1.43	11.48
σ	4.83	1.34	7.89	329.64	4.89	0.96	8.41
Med	39.18	1.37	12.70	-290.00	39.48	1.40	7.98
Min	28.82	0.00	5.46	-915.00	28.91	0.18	3.23
Max	45.17	6.82	36.70	945.00	45.74	3.70	38.79
P_{75}	41.35	2.27	19.75	-67.50	41.28	1.83	15.41
P_{25}	33.92	0.71	10.73	-330.00	34.84	0.58	5.43

Tabla 27: Estadísticos básicos para la categoría débil del sensor ‘vw1’.

En la Tabla 28 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	16.59	1.33	15.66	0.29	16.74	1.43	11.48
σ	1.48	1.56	7.89	724.53	1.51	0.96	8.41
Med	16.29	0.58	12.70	-275.00	16.46	1.40	7.98
Min	13.58	0.00	5.46	-1135.00	13.59	0.18	3.23
Max	21.54	4.65	36.70	1685.00	20.45	3.70	38.79
P_{75}	16.74	2.49	19.75	235.00	17.11	1.83	15.41
P_{25}	15.82	0.01	10.73	-367.50	15.88	0.58	5.43

Tabla 28: Estadísticos básicos para la categoría débil del sensor ‘vw2’.

Eventos Moderados

En la Tabla 29 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	37.74	2.22	22.35	-247.37	37.84	2.21	13.05
σ	4.81	1.61	9.58	215.77	4.88	2.08	8.00
Med	38.29	2.31	19.43	-290.00	38.74	1.28	11.28
Min	29.93	0.02	12.06	-475.00	30.18	0.37	3.14
Max	45.68	5.41	49.91	585.00	45.71	6.82	31.87
P_{75}	41.66	3.14	25.02	-270.00	41.20	2.33	15.54
P_{25}	33.47	0.82	16.13	-317.50	33.41	0.95	9.43

Tabla 29: Estadísticos básicos para la categoría moderado del sensor ‘vw1’.

En la Tabla 30 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	17.04	2.62	22.35	-192.89	17.08	2.21	13.05
σ	2.19	2.00	9.58	307.59	1.88	2.08	8.00
Med	16.46	2.50	19.43	-290.00	17.00	1.28	11.28
Min	13.49	0.04	12.06	-380.00	13.58	0.37	3.14
Max	21.32	6.55	49.91	1000.00	20.60	6.82	31.87
P_{75}	18.29	4.11	25.02	-277.50	18.31	2.33	15.54
P_{25}	15.79	0.78	16.13	-307.50	15.94	0.95	9.43

Tabla 30: Estadísticos básicos para la categoría moderado del sensor ‘vw2’.

Eventos Fuertes y Muy Fuertes

En la Tabla 31 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	37.91	3.32	34.62	-240.43	37.87	2.90	18.15
σ	4.50	2.01	15.66	109.28	4.42	2.64	12.39
Med	37.46	2.77	32.26	-285.00	37.21	2.40	14.61
Min	29.12	0.61	14.48	-410.00	29.65	0.37	4.58
Max	45.07	7.57	72.09	0.00	45.46	9.85	51.26
P_{75}	41.04	4.85	42.86	-200.00	41.08	3.78	22.34
P_{25}	35.11	1.73	20.64	-302.50	35.00	0.89	8.09

Tabla 31: Estadísticos básicos para la categoría fuerte y muy fuerte del sensor ‘vw1’.

En la Tabla 32 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	16.81	4.23	34.62	-252.17	16.94	2.90	18.15
σ	1.65	1.93	15.66	86.63	1.33	2.64	12.39
Med	16.08	4.70	32.26	-270.00	16.58	2.40	14.61
Min	14.91	1.09	14.48	-335.00	15.24	0.37	4.58
Max	20.67	9.51	72.09	0.00	20.16	9.85	51.26
P_{75}	18.17	5.10	42.86	-247.50	17.87	3.78	22.34
P_{25}	15.52	3.30	20.64	-295.00	15.90	0.89	8.09

Tabla 32: Estadísticos básicos para la categoría fuerte y muy fuerte del sensor ‘vw2’.

396

Para este sensor se calcula que al menos $40 m^2$ drenan al punto específico. En la Tabla 33 se pueden ver la cantidad de eventos y rango consultado. Para los sensores sh1 y sh2, en eventos de lluvia débil y moderada, el rezago mostró la mayor correlación con el delta máximo. Sin embargo, en eventos de lluvia fuerte y muy fuerte, los patrones de correlación difirieron entre los sensores. Para el sensor sh2, tanto

la duración como la humedad inicial presentaron las correlaciones más fuertes con el delta máximo. En contraste, para el sensor sh1 en estos eventos intensos, solo la duración de la lluvia mostró una correlación significativa con el delta máximo.

Sensor	Pluviómetro	Fecha Consultada	Débil	Moderado	Fuerte/Muy Fuerte
sh1	43	2020-08-15 - 2023-07-01	51	36	53
sh2					

Tabla 33: Cantidad de eventos por categoría según sensor y pluviómetro consultado.

Eventos Débiles

En la Tabla 34 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	43.96	1.83	15.28	-263.27	44.11	1.36	12.34
σ	1.61	2.46	7.02	585.04	1.68	0.95	9.15
Med	44.40	1.07	12.83	-300.00	44.60	1.35	9.28
Min	39.30	0.00	5.46	-1720.00	39.30	0.18	3.23
Max	46.32	8.52	36.70	1455.00	47.11	3.70	43.18
P_{75}	44.93	2.09	17.14	-55.00	45.03	1.75	17.32
P_{25}	43.75	0.02	11.18	-470.00	43.75	0.58	5.72

Tabla 34: Estadísticos básicos para la categoría débil del sensor 'sh1'.

En la Tabla 35 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	42.32	4.06	15.28	-212.86	42.53	1.36	12.34
σ	3.16	2.78	7.02	369.31	3.15	0.95	9.15
Med	42.82	4.48	12.83	-285.00	42.96	1.35	9.28
Min	34.89	0.00	5.46	-1720.00	34.78	0.18	3.23
Max	48.67	9.75	36.70	1070.00	48.67	3.70	43.18
P_{75}	43.88	6.06	17.14	-160.00	43.98	1.75	17.32
P_{25}	41.37	1.15	11.18	-310.00	41.42	0.58	5.72

Tabla 35: Estadísticos básicos para la categoría débil del sensor 'sh2'.

Eventos Moderados

En la Tabla 36 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	44.28	3.00	24.32	-216.56	44.38	2.28	12.37
σ	1.80	3.05	10.16	172.88	1.64	1.87	7.58
Med	44.50	1.54	20.11	-290.00	44.99	1.44	10.31
Min	40.15	0.00	12.06	-565.00	40.12	0.37	3.14
Max	49.07	9.04	49.91	315.00	46.79	6.82	31.87
P_{75}	45.14	3.95	33.56	-133.75	45.28	3.06	16.69
P_{25}	43.82	0.94	16.13	-305.00	43.92	0.95	6.96

Tabla 36: Estadísticos básicos para la categoría moderado del sensor ‘sh1’.

En la Tabla 37 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	43.11	4.70	24.32	-212.50	43.03	2.28	12.37
σ	3.43	2.88	10.16	259.18	3.04	1.87	7.58
Med	43.13	4.55	20.11	-280.00	43.60	1.44	10.31
Min	35.26	0.00	12.06	-1095.00	35.37	0.37	3.14
Max	49.27	10.38	49.91	565.00	47.08	6.82	31.87
P_{75}	45.92	6.62	33.56	-146.25	45.18	3.06	16.69
P_{25}	41.90	2.65	16.13	-291.25	42.10	0.95	6.96

Tabla 37: Estadísticos básicos para la categoría moderado del sensor ‘sh2’.

Eventos Fuertes y Muy Fuertes

En la Tabla 38 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	43.87	4.05	35.27	-240.42	44.15	2.76	19.33
σ	1.49	3.07	13.66	185.26	1.59	2.86	11.74
Med	44.23	2.54	33.34	-262.50	44.46	1.47	16.71
Min	38.52	0.16	14.48	-1095.00	38.53	0.37	2.52
Max	45.30	9.80	72.09	125.00	46.36	12.62	51.26
P_{75}	44.67	7.78	44.86	-178.75	44.84	3.05	25.95
P_{25}	43.70	2.02	23.43	-295.00	43.99	0.94	10.26

Tabla 38: Estadísticos básicos para la categoría fuerte y muy fuerte del sensor ‘sh1’.

En la Tabla 39 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	42.01	7.50	35.27	-265.56	42.32	2.76	19.33
σ	3.04	3.20	13.66	259.54	2.87	2.86	11.74
Med	41.95	7.67	33.34	-262.50	42.14	1.47	16.71
Min	33.00	0.34	14.48	-1520.00	33.56	0.37	2.52
Max	48.27	13.16	72.09	265.00	48.11	12.62	51.26
P_{75}	43.65	9.92	44.86	-217.50	43.71	3.05	25.95
P_{25}	40.64	5.70	23.43	-286.25	41.24	0.94	10.26

Tabla 39: Estadísticos básicos para la categoría fuerte y muy fuerte del sensor ‘sh2’.

422

Para este sensor se calcula que al menos 12 m^2 drenan al punto específico. En la Tabla 40 se pueden ver la cantidad de eventos y rango consultado. Para el sensor h1, se observaron diferentes patrones de correlación dependiendo de la intensidad de la lluvia. En eventos de lluvia fuerte y muy fuerte, la duración de los eventos de lluvia mostró la mayor correlación con el delta máximo. Sin embargo, para eventos de lluvia moderada y débil, fue la humedad inicial la que presentó la correlación más fuerte. En contraste, el sensor h2 mostró un patrón más consistente: la lluvia acumulada fue la variable que exhibió la correlación más fuerte con el delta máximo para todas las intensidades de lluvia, incluyendo eventos débiles, moderados, fuertes y muy fuertes.

Sensor	Pluviómetro	Fecha Consultada	Débil	Moderado	Fuerte/Muy Fuerte
vw1	295	2020-08-15 - 2023-07-01	38	28	31
vw2					

Tabla 40: Cantidad de eventos por categoría según sensor y pluviómetro consultado.

Eventos Débiles

En la Tabla 41 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	21.25	3.69	15.23	-53.55	21.52	2.05	7.50
σ	2.92	2.16	7.06	373.84	2.75	1.53	4.83
Med	21.39	3.35	13.33	-142.50	21.75	1.49	5.84
Min	16.13	0.00	5.72	-360.00	16.69	0.23	1.73
Max	27.63	7.69	40.64	1285.00	27.31	7.78	20.32
P_{75}	23.16	4.88	17.53	0.00	23.43	2.78	9.50
P_{25}	18.98	1.99	11.62	-290.00	19.58	0.98	4.29

Tabla 41: Estadísticos básicos para la categoría débil del sensor ‘vw1’.

En la Tabla 42 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	26.60	0.69	15.23	-12.63	26.90	2.05	7.50
σ	3.13	1.42	7.06	681.47	3.08	1.53	4.83
Med	27.23	0.14	13.33	-135.00	27.54	1.49	5.84
Min	16.61	0.00	5.72	-965.00	16.83	0.23	1.73
Max	30.17	7.00	40.64	1295.00	30.14	7.78	20.32
P_{75}	29.07	0.45	17.53	0.00	29.30	2.78	9.50
P_{25}	25.36	0.00	11.62	-523.75	25.63	0.98	4.29

Tabla 42: Estadísticos básicos para la categoría débil del sensor ‘vw2’.

Eventos Moderados

En la Tabla 43 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	21.50	3.93	27.77	-115.18	21.74	3.12	7.49
σ	2.88	2.27	12.11	210.51	2.30	1.83	3.56
Med	21.58	3.26	25.08	-160.00	21.51	2.92	6.95
Min	15.32	0.28	11.94	-415.00	16.22	0.87	2.62
Max	27.18	8.65	52.83	455.00	26.23	7.57	17.88
P_{75}	22.74	5.73	31.20	0.00	23.05	4.32	8.92
P_{25}	20.07	2.36	19.08	-281.25	20.47	1.49	4.65

Tabla 43: Estadísticos básicos para la categoría moderado del sensor ‘vw1’.

En la Tabla 44 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	26.79	1.37	27.77	-160.71	27.06	3.12	7.49
σ	3.11	1.67	12.11	483.92	3.02	1.83	3.56
Med	27.29	0.80	25.08	-315.00	27.76	2.92	6.95
Min	17.61	0.00	11.94	-575.00	17.69	0.87	2.62
Max	30.34	6.57	52.83	1450.00	30.23	7.57	17.88
P_{75}	29.39	1.58	31.20	-26.25	29.52	4.32	8.92
P_{25}	25.74	0.40	19.08	-415.00	26.37	1.49	4.65

Tabla 44: Estadísticos básicos para la categoría moderado del sensor ‘vw2’.

Eventos Fuertes y Muy Fuertes

En la Tabla 45 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	20.89	4.02	33.97	-145.00	21.03	3.24	15.14
σ	3.84	3.13	11.07	379.21	3.49	2.46	12.33
Med	21.24	3.78	34.04	-210.00	20.93	2.15	11.34
Min	13.12	0.27	13.33	-1435.00	13.36	0.58	2.83
Max	27.77	9.99	56.13	1230.00	26.54	11.05	66.62
P_{75}	23.88	6.82	40.00	0.00	23.82	4.56	17.17
P_{25}	18.92	1.27	28.09	-277.50	19.12	1.69	8.87

Tabla 45: Estadísticos básicos para la categoría fuerte y muy fuerte del sensor ‘vw1’.

538

Para este sensor se calcula que al menos 4 m^2 drenan al punto específico. En la Tabla 46 se pueden ver la cantidad de eventos y rango consultado. En el sensor sh2, durante eventos de lluvia débil y moderada, la lluvia acumulada mostró la correlación más significativa con el delta máximo del contenido volumétrico de agua. Sin embargo, en eventos de lluvia fuerte y muy fuerte, estas correlaciones variaron, destacándose la humedad inicial como la variable con mayor correlación con el delta máximo.

Sensor	Pluviómetro	Fecha Consultada	Débil	Moderado	Fuerte/Muy Fuerte
sh2	539	2021-07-17- 2022-06-05	23	10	11

Tabla 46: Cantidad de eventos por categoría según sensor y pluviómetro consultado.

Eventos Débiles

En la Tabla 47 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	42.78	0.80	22.43	-41.96	42.79	2.06	9.09
σ	1.00	1.11	18.70	788.31	0.90	1.53	6.34
Med	42.64	0.15	19.26	0.00	42.68	1.35	6.05
Min	41.32	0.00	7.75	-1750.00	41.38	0.35	3.30
Max	45.34	3.65	93.18	1225.00	44.82	5.08	29.03
P_{75}	43.34	1.36	24.07	317.50	43.33	3.24	11.63
P_{25}	42.01	0.01	11.49	-330.00	42.05	0.83	5.46

Tabla 47: Estadísticos básicos para la categoría débil del sensor ‘sh2’.

Eventos Moderados

En la Tabla 48 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	42.78	1.63	27.53	-1.50	42.87	2.70	9.49
σ	1.08	1.36	7.36	508.12	1.04	1.91	5.15
Med	42.62	1.75	28.70	-267.50	42.83	2.31	7.31
Min	41.37	0.03	14.99	-340.00	41.35	0.78	3.69
Max	45.17	3.43	36.70	1205.00	45.18	7.17	20.10
P_{75}	43.08	2.88	31.94	0.00	43.19	3.26	11.49
P_{25}	42.23	0.23	25.11	-306.25	42.47	1.29	6.37

Tabla 48: Estadísticos básicos para la categoría moderado del sensor ‘sh2’.

Eventos Fuertes y Muy Fuertes

En la Tabla 49 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	42.41	2.45	51.87	-213.64	42.60	4.18	18.58
σ	0.58	1.37	19.61	250.50	0.53	3.20	17.51
Med	42.21	2.91	42.29	-230.00	42.74	3.32	8.88
Min	41.32	0.00	35.73	-890.00	41.39	0.80	4.37
Max	43.43	3.66	88.90	0.00	43.41	9.77	50.80
P_{75}	42.75	3.48	54.86	-50.00	42.92	6.32	32.17
P_{25}	42.04	1.89	39.03	-255.00	42.37	1.05	5.59

Tabla 49: Estadísticos básicos para la categoría fuerte y muy fuerte del sensor ‘sh2’.

541

Para este sensor se calcula que al menos 28 m^2 drenan al punto específico. En la Tabla 50 se pueden ver la cantidad de eventos y rango consultado. Para el sensor sh2, en eventos de lluvia débil y moderada, el rezago mostró la correlación más significativa con el delta máximo del contenido volumétrico de agua. En contraste, en eventos de lluvia fuerte y muy fuerte, la humedad inicial fue la variable con mayor correlación con el delta máximo.

Sensor	Pluviómetro	Fecha Consultada	Débil	Moderado	Fuerte/Muy Fuerte
sh2	278	2021-07-17- 2022-10-05	30	35	35

Tabla 50: Cantidad de eventos por categoría según sensor y pluviómetro consultado.

Eventos Débiles

En la Tabla 51 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	39.41	2.27	15.59	232.17	39.57	1.74	8.62
σ	1.68	1.88	9.43	651.45	1.60	1.69	4.73
Med	39.32	2.28	12.40	-10.00	39.43	1.02	7.54
Min	36.94	0.00	6.48	-455.00	37.07	0.23	2.13
Max	44.85	5.93	44.83	1415.00	44.85	6.45	19.59
P_{75}	39.83	3.50	16.67	1006.25	39.94	2.10	11.88
P_{25}	38.29	0.42	9.14	-285.00	38.86	0.75	5.27

Tabla 51: Estadísticos básicos para la categoría débil del sensor ‘sh2’.

Eventos Moderados

En la Tabla 52 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	39.50	3.19	23.65	-194.71	39.86	2.19	10.48
σ	1.21	1.78	12.04	269.45	1.15	1.65	5.63
Med	39.40	3.10	20.07	-290.00	39.94	1.73	8.26
Min	37.40	0.00	10.54	-855.00	37.48	0.52	2.97
Max	43.33	8.11	60.20	385.00	42.51	7.87	22.06
P_{75}	40.15	3.94	28.96	0.00	40.71	2.73	14.93
P_{25}	38.70	2.29	15.11	-320.00	39.07	0.91	6.59

Tabla 52: Estadísticos básicos para la categoría moderado del sensor ‘sh2’.

Eventos Fuertes y Muy Fuertes

En la Tabla 53 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	39.62	3.98	33.91	-139.71	39.91	3.34	13.74
σ	1.36	2.13	10.11	355.73	1.30	2.42	12.62
Med	39.30	4.30	32.13	-225.00	39.84	2.78	11.75
Min	37.90	0.00	17.14	-910.00	37.86	0.25	3.69
Max	43.30	8.11	66.04	1465.00	43.30	9.85	77.22
P_{75}	40.50	4.93	38.29	0.00	40.49	4.07	15.00
P_{25}	38.68	2.95	27.94	-282.50	38.97	1.53	7.31

Tabla 53: Estadísticos básicos para la categoría fuerte y muy fuerte del sensor ‘sh2’.

553

Para este sensor se calcula que al menos 16 m^2 drenan al punto específico. En la Tabla 54 se pueden ver la cantidad de eventos y rango consultado. Para el sensor SH2, durante eventos de lluvia débil, la lluvia acumulada mostró la correlación más significativa con el delta máximo del contenido volumétrico de agua. En cambio, en eventos de lluvia moderada, fuerte, y muy fuerte, la humedad inicial se destacó como la variable con mayor correlación con el delta máximo.

Sensor	Pluviómetro	Fecha Consultada	Débil	Moderado	Fuerte/Muy Fuerte
sh2	189	2021-07-17- 2022-10-05	40	34	40

Tabla 54: Cantidad de eventos por categoría según sensor y pluviómetro consultado.

Eventos Débiles

En la Tabla 55 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	48.92	1.92	15.65	-46.54	49.06	1.38	11.37
σ	1.10	1.19	12.06	465.06	1.07	1.20	8.08
Med	48.80	1.85	12.32	-265.00	49.08	1.06	7.50
Min	46.44	0.01	5.08	-395.00	46.56	0.22	2.39
Max	50.68	4.18	63.42	1180.00	51.11	4.35	29.63
P_{75}	49.71	2.50	18.03	0.00	49.65	1.74	17.21
P_{25}	48.44	0.94	9.05	-308.75	48.47	0.48	5.56

Tabla 55: Estadísticos básicos para la categoría débil del sensor ‘sh2’.

Eventos Moderados

En la Tabla 56 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	49.29	2.39	24.79	-139.41	49.56	2.35	12.62
σ	1.16	1.16	7.99	173.17	1.19	1.81	16.16
Med	49.42	2.67	22.27	-195.00	49.71	2.22	9.28
Min	47.64	0.00	14.22	-340.00	47.56	0.20	2.62
Max	51.39	3.78	40.05	230.00	51.63	8.05	73.66
P_{75}	50.16	3.39	31.24	0.00	50.28	2.70	10.23
P_{25}	48.39	1.45	18.03	-285.00	48.59	1.27	6.89

Tabla 56: Estadísticos básicos para la categoría moderado del sensor ‘sh2’.

Eventos Fuertes y Muy Fuertes

En la Tabla 57 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	49.47	2.05	35.06	-24.78	49.54	3.73	13.83
σ	1.00	1.09	11.78	425.10	0.76	2.71	12.59
Med	49.38	2.31	33.40	-185.00	49.57	3.52	9.67
Min	47.79	0.11	15.11	-410.00	48.08	0.42	3.89
Max	51.93	3.61	62.48	1135.00	51.15	10.40	50.60
P_{75}	50.00	2.81	39.12	0.00	49.88	5.59	14.35
P_{25}	48.74	1.05	27.88	-270.00	49.12	1.38	5.96

Tabla 57: Estadísticos básicos para la categoría fuerte y muy fuerte del sensor 'sh2'.

576

Para este sensor se calcula que al menos 16 m^2 drenan al punto específico. En la Tabla 58 se pueden ver la cantidad de eventos y rango consultado. Para los sensores vw1 y vw2, en todas las categorías de eventos de lluvia —débil, moderada, fuerte y muy fuerte—, la lluvia acumulada mostró la correlación más significativa con el delta máximo del contenido volumétrico de agua.

Sensor	Pluviómetro	Fecha Consultada	Débil	Moderado	Fuerte/Muy Fuerte
sh2	393	2022-01-05 - 2023-02-05	25	22	31

Tabla 58: Cantidad de eventos por categoría según sensor y pluviómetro consultado.

Eventos Débiles

En la Tabla 59 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	29.06	0.63	15.74	-144.40	29.07	1.58	10.35
σ	1.36	0.61	7.46	579.09	1.34	1.35	7.01
Med	29.52	0.52	14.48	-150.00	29.55	0.83	8.61
Min	24.88	0.00	5.97	-875.00	24.90	0.23	2.19
Max	30.64	1.91	30.73	1180.00	30.59	4.38	25.91
P_{75}	29.90	1.00	22.48	0.00	29.90	2.22	14.83
P_{25}	28.51	0.07	8.51	-540.00	28.50	0.48	4.69

Tabla 59: Estadísticos básicos para la categoría débil del sensor 'vw1'.

En la Tabla 60 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	17.99	1.38	15.74	-21.40	18.15	1.58	10.35
σ	2.01	1.13	7.46	591.82	1.91	1.35	7.01
Med	18.46	1.42	14.48	0.00	18.75	0.83	8.61
Min	11.70	0.00	5.97	-1325.00	12.51	0.23	2.19
Max	20.64	3.86	30.73	1195.00	20.47	4.38	25.91
P_{75}	19.22	2.19	22.48	0.00	19.31	2.22	14.83
P_{25}	16.97	0.46	8.51	-360.00	16.95	0.48	4.69

Tabla 60: Estadísticos básicos para la categoría débil del sensor ‘vw2’.

Eventos Moderados

En la Tabla 61 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	28.96	0.74	20.92	-62.05	28.99	2.45	9.74
σ	1.35	0.67	7.41	500.66	1.32	1.60	8.99
Med	29.30	0.66	19.79	-295.00	29.37	1.97	7.79
Min	25.01	0.00	10.54	-885.00	25.02	0.25	3.48
Max	30.51	2.10	40.13	1215.00	30.28	5.28	45.72
P_{75}	29.92	1.22	23.34	0.00	30.02	3.88	10.89
P_{25}	28.47	0.07	15.34	-320.00	28.60	1.14	4.40

Tabla 61: Estadísticos básicos para la categoría moderado del sensor ‘vw1’.

En la Tabla 62 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	18.15	1.64	20.92	107.50	18.15	2.45	9.74
σ	2.52	1.66	7.41	629.23	2.43	1.60	8.99
Med	18.35	1.15	19.79	-205.00	18.43	1.97	7.79
Min	11.16	0.00	10.54	-655.00	11.18	0.25	3.48
Max	23.14	5.79	40.13	1245.00	23.14	5.28	45.72
P_{75}	18.95	2.62	23.34	500.00	19.02	3.88	10.89
P_{25}	16.85	0.12	15.34	-323.75	17.30	1.14	4.40

Tabla 62: Estadísticos básicos para la categoría moderado del sensor ‘vw2’.

Eventos Fuertes y Muy Fuertes

En la Tabla 63 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	28.82	1.19	32.32	-216.61	28.81	2.99	13.03
σ	1.50	1.00	12.27	252.58	1.41	1.88	11.94
Med	29.10	1.25	29.72	-265.00	29.25	2.50	9.72
Min	24.77	0.02	14.48	-750.00	24.77	0.43	3.50
Max	30.82	4.48	70.06	595.00	30.32	8.35	64.10
P_{75}	29.79	1.71	42.10	-120.00	29.99	3.78	13.54
P_{25}	28.17	0.20	23.69	-302.50	28.17	1.72	7.10

Tabla 63: Estadísticos básicos para la categoría fuerte y muy fuerte del sensor ‘vw1’.

En la Tabla 64 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	17.77	2.70	32.32	-211.45	17.80	2.99	13.03
σ	2.15	2.17	12.27	247.46	2.01	1.88	11.94
Med	17.83	2.16	29.72	-265.00	18.00	2.50	9.72
Min	10.92	0.00	14.48	-760.00	10.97	0.43	3.50
Max	21.75	6.97	70.06	595.00	21.15	8.35	64.10
P_{75}	19.05	4.81	42.10	-157.50	19.18	3.78	13.54
P_{25}	16.59	1.08	23.69	-317.50	16.80	1.72	7.10

Tabla 64: Estadísticos básicos para la categoría fuerte y muy fuerte del sensor ‘vw2’.

608

Para este sensor se calcula que al menos $12 m^2$ drenan al punto específico. En la Tabla 65 se pueden ver la cantidad de eventos y rango consultado. Para el sensor sh2, en eventos de lluvia moderada, la duración del evento mostró la correlación más significativa con el delta máximo del contenido volumétrico de agua. En eventos de lluvia débil, la humedad antecedente fue la variable con mayor correlación, mientras que en eventos de lluvia fuerte/muy fuerte, la humedad inicial se destacó como la principal variable correlacionada con el delta máximo.

Sensor	Pluviómetro	Fecha Consultada	Débil	Moderado	Fuerte/Muy Fuerte
sh2	70	2022-07-10 - 2023-07-05	22	9	21

Tabla 65: Cantidad de eventos por categoría según sensor y pluviómetro consultado.

Eventos Débiles

En la Tabla 66 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	30.25	1.29	14.11	-104.32	30.20	1.58	8.37
σ	3.56	1.84	8.23	884.78	3.46	1.46	4.73
Med	30.75	0.52	12.13	-245.00	30.76	0.96	7.56
Min	21.13	0.00	2.16	-1430.00	21.14	0.27	2.54
Max	36.82	6.10	37.76	1460.00	35.53	5.00	17.14
P_{75}	32.61	1.54	15.38	296.25	32.62	2.42	12.24
P_{25}	28.64	0.03	9.46	-797.50	28.33	0.48	4.41

Tabla 66: Estadísticos básicos para la categoría débil del sensor ‘sh2’.

Eventos Moderados

En la Tabla 67 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	28.86	4.07	19.16	-31.11	29.71	1.43	14.87
σ	5.35	3.93	8.16	691.31	4.39	1.03	12.11
Med	29.01	3.48	17.02	-240.00	30.08	1.37	7.81
Min	20.63	0.03	11.30	-1300.00	21.08	0.28	5.01
Max	35.07	10.14	34.92	1035.00	34.45	3.55	37.65
P_{75}	32.59	6.47	21.42	390.00	33.15	1.92	23.37
P_{25}	26.94	0.80	13.63	-290.00	26.97	0.50	7.06

Tabla 67: Estadísticos básicos para la categoría moderado del sensor ‘sh2’.

Eventos Fuertes y Muy Fuertes

En la Tabla 68 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	27.80	4.50	35.09	-135.00	28.30	3.27	13.54
σ	5.12	4.62	10.24	468.99	4.22	2.33	10.44
Med	29.01	3.88	34.04	-130.00	28.70	3.10	8.28
Min	18.63	0.01	17.65	-1075.00	18.95	0.48	3.47
Max	34.62	13.97	60.71	1210.00	33.73	7.75	42.62
P_{75}	31.79	4.50	40.39	0.00	31.25	5.15	17.45
P_{25}	27.27	0.93	27.94	-310.00	28.16	0.98	5.34

Tabla 68: Estadísticos básicos para la categoría fuerte y muy fuerte del sensor ‘sh2’.

618

Para este sensor se calcula que al menos $28 m^2$ drenan al punto específico. En la Tabla 69 se pueden ver la cantidad de eventos y rango consultado. Para el sensor vw1, en eventos de lluvia débil y fuerte-muy fuerte, el rezago mostró la correlación más significativa con el delta máximo del contenido volumétrico de agua. En eventos de lluvia moderada, la lluvia acumulada se destacó como la variable con mayor correlación. Por otro lado, para el sensor vw2, en eventos de lluvia fuerte-muy fuerte y débil, el rezago fue la variable predominante con mayor correlación, mientras que en eventos de lluvia moderada, la humedad inicial mostró la correlación más significativa con el delta máximo.

Sensor	Pluviómetro	Fecha Consultada	Débil	Moderado	Fuerte/Muy Fuerte
vw1	558	2022-09-05 - 2023-08-01	16	13	12
vw2					

Tabla 69: Cantidad de eventos por categoría según sensor y pluviómetro consultado.

Eventos Débiles

En la Tabla 70 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	9.53	3.77	15.41	-394.69	9.92	1.40	12.52
σ	3.33	5.01	6.97	511.46	3.09	1.53	7.45
Med	10.36	2.39	13.84	-277.50	10.51	0.58	12.65
Min	4.74	0.00	6.35	-1135.00	4.74	0.27	2.45
Max	14.73	17.06	31.88	600.00	13.94	4.87	28.07
P_{75}	12.33	4.42	18.22	-220.00	12.31	1.68	17.56
P_{25}	5.86	0.02	10.99	-902.50	6.86	0.40	6.50

Tabla 70: Estadísticos básicos para la categoría débil del sensor ‘vw1’.

En la Tabla 71 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	14.55	4.71	15.41	-100.62	15.18	1.40	12.52
σ	5.22	5.61	6.97	565.12	4.75	1.53	7.45
Med	16.06	3.03	13.84	-182.50	17.00	0.58	12.65
Min	5.23	0.00	6.35	-975.00	5.48	0.27	2.45
Max	21.47	17.45	31.88	1135.00	20.70	4.87	28.07
P_{75}	18.94	6.45	18.22	0.00	19.26	1.68	17.56
P_{25}	11.25	0.48	10.99	-321.25	11.35	0.40	6.50

Tabla 71: Estadísticos básicos para la categoría débil del sensor ‘vw2’.

Eventos Moderados

En la Tabla 72 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	9.97	3.46	20.23	-43.46	10.27	2.75	7.32
σ	2.24	2.65	7.53	647.51	2.74	1.53	3.03
Med	9.12	3.37	18.41	-275.00	9.40	2.55	7.39
Min	5.41	0.00	15.11	-600.00	5.47	1.10	2.92
Max	14.24	8.74	43.48	1595.00	16.62	6.18	13.16
P_{75}	11.23	5.14	20.45	-240.00	11.20	3.68	9.35
P_{25}	8.85	1.11	15.87	-300.00	8.91	1.42	5.17

Tabla 72: Estadísticos básicos para la categoría moderado del sensor ‘vw1’.

En la Tabla 73 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	16.15	6.30	20.23	-260.00	16.40	2.75	7.32
σ	2.39	3.65	7.53	58.91	2.11	1.53	3.03
Med	15.57	6.14	18.41	-260.00	16.85	2.55	7.39
Min	11.98	0.42	15.11	-360.00	13.14	1.10	2.92
Max	20.96	16.26	43.48	-170.00	20.66	6.18	13.16
P_{75}	17.18	7.11	20.45	-230.00	17.49	3.68	9.35
P_{25}	14.43	4.32	15.87	-280.00	14.78	1.42	5.17

Tabla 73: Estadísticos básicos para la categoría moderado del sensor ‘vw2’.

Eventos Fuertes y Muy Fuertes

En la Tabla 74 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	9.85	3.89	29.10	-416.67	10.07	2.19	14.21
σ	4.24	3.43	6.24	296.08	4.41	1.34	6.14
Med	10.08	3.56	30.31	-285.00	10.09	1.58	13.17
Min	4.49	0.00	16.76	-1135.00	4.62	0.70	6.90
Max	15.51	12.49	36.58	-195.00	16.98	4.95	25.04
P_{75}	13.13	5.36	33.91	-268.75	13.38	2.47	18.46
P_{25}	5.23	1.79	26.00	-406.25	5.31	1.35	9.64

Tabla 74: Estadísticos básicos para la categoría fuerte y muy fuerte del sensor ‘vw1’.

En la Tabla 75 se pueden observar los estadísticos para estos eventos de lluvia y contenido volumétrico.

Estadístico	θ_0 (%)	$\Delta\theta_{max}$ (%)	P_{acum} (mm)	T_{lag}	θ_{ant} (%)	D (h)	I_{prom} (mm/h)
μ	13.56	6.74	29.10	-153.75	14.09	2.19	14.21
σ	4.96	5.31	6.24	299.05	4.69	1.34	6.14
Med	14.46	6.25	30.31	-262.50	15.75	1.58	13.17
Min	6.91	0.18	16.76	-415.00	7.06	0.70	6.90
Max	20.68	16.19	36.58	700.00	19.72	4.95	25.04
P_{75}	16.91	10.18	33.91	-112.50	16.79	2.47	18.46
P_{25}	9.62	2.03	26.00	-296.25	10.63	1.35	9.64

Tabla 75: Estadísticos básicos para la categoría fuerte y muy fuerte del sensor ‘vw2’.

Referencias

- Alexander, D. (1992). On the causes of landslides: Human activities, perception, and natural processes. *Environmental Geology and Water Sciences*, 20(3):165–179.
- Allen, R. G. (1996). Assessing Integrity of Weather Data for Reference Evapotranspiration Estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122(2):97–106.
- Bogaard, T. and Greco, R. (2018). Invited perspectives: Hydrological perspectives on precipitation intensity-duration thresholds for landslide initiation: proposing hydro-meteorological thresholds. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(1):31–39.
- Carmona, A. M. and Poveda, G. (2014). Detection of long-term trends in monthly hydro-climatic series of colombia through empirical mode decomposition. *Climatic Change*, 123(2):301–313.
- Crozier, M. J. (1999). Prediction of rainfall-triggered landslides: a test of the Antecedent Water Status Model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(9):825–833.
- Das, B. M. (2009). *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning, 7th edition.
- do Nascimento, F. A. L., da Silva, A. J. P., Freitas, F. T. O., Fernandes, R. D. M., and Junior, L. A. V. (2022). Sensors and frequencies of soil water content measurement affecting agro-hydrological simulations and irrigation management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 194:106763.
- Godt, J. W., Baum, R. L., and Chleborad, A. F. (2006). Rainfall characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(1):97–110.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(3-4):239–267.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. P. (2008). The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, 5(1):3–17.
- Hemmati, S., Gatmiri, B., Cui, Y.-J., and Vincent, M. (2012). Thermo-hydro-mechanical modelling of soil settlements induced by soil-vegetation-atmosphere interactions. *Engineering Geology*, 139-140:1–16.
- Illston, B. G., Basara, J. B., Fiebrich, C. A., Crawford, K. C., Hunt, E., Fisher, D. K., Elliott, R., and Humes, K. (2008). Mesoscale Monitoring of Soil Moisture across a Statewide Network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(2):167–182.

- James, A. and Tripathi, V. (2021). Time series data analysis and ARIMA modeling to forecast the short-term trajectory of the acceleration of fatalities in Brazil caused by the corona virus (COVID-19). *PeerJ*, 9:e11748.
- Janjić, J. and Tadić, L. (2023). Fields of application of swat hydrological model—a review. *Earth*, 4(2):331–344.
- Johansen, S. (1988). Statistical analysis of cointegration vectors. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 12(2-3):231–254.
- Kaufmann, Robert K. y Stern, D. I. (2002). Cointegration analysis of hemispheric temperature relations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D2):ACL 8–1–ACL 8–14.
- Kontopoulou, V. I., Panagopoulos, A. D., Kakkos, I., and Matsopoulos, G. K. (2023). A Review of ARIMA vs. Machine Learning Approaches for Time Series Forecasting in Data Driven Networks. *Future Internet*, 15(8):255.
- Lindenmaier, F., Zehe, E., Dittfurth, A., and Ihringer, J. (2005). Process identification at a slow-moving landslide in the Vorarlberg Alps. *Hydrological Processes*, 19(8):1635–1651.
- Liu, J., Kumar, S., and Palomar, D. P. (2019). Parameter Estimation of Heavy-Tailed AR Model With Missing Data Via Stochastic EM. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 67(8):2159–2172.
- Marino, P., Peres, D. J., Cancelliere, A., Greco, R., and Bogaard, T. A. (2020). Soil moisture information can improve shallow landslide forecasting using the hydrometeorological threshold approach. *Landslides*, 17(4):899–909. © Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2020.
- Mohseni, F., Ahrari, A., Haunert, J.-H., and Montzka, C. (2024). The synergies of smap enhanced and modis products in a random forest regression for estimating 1 km soil moisture over africa using google earth engine. *Big Earth Data*, 8(1):33–57.
- Palau, R. M., Berenguer, M., Hürlimann, M., and Sempere-Torres, D. (2023). Implementation of hydrometeorological thresholds for regional landslide warning in catalonia (ne spain). *Landslides*, 20:2039–2054. Received: 20 November 2022; Accepted: 28 May 2023; Published online: 16 June 2023.
- Palazzolo, N., Peres, D. J., Creaco, E., and Cancelliere, A. (2023). Using principal component analysis to incorporate multi-layer soil moisture information in hydrometeorological thresholds for landslide prediction: an investigation based on era5-land reanalysis data. *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)*, 23(1):279–291. © Author(s) 2023. This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.
- Pelletier, J. D., Malamud, B. D., Blodgett, T., and Turcotte, D. L. (1997). Scale-invariance of soil moisture variability and its implications for the frequency-size distribution of landslides. *Engineering Geology*, 48(3-4):255–268.
- Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40(10):927–930.
- Ponziani, F., Pandolfo, C., Stelluti, M., Berni, N., Brocca, L., and Moramarco, T. (2012). Assessment of rainfall thresholds and soil moisture modeling for operational hydrogeological risk prevention in the Umbria region (central Italy). *Landslides*, 9(2):229–237.
- Reichle, R. H., Liu, Q., Koster, R. D., Crow, W. T., De Lannoy, G. J. M., Kimball, J. S., Ardizzone, J. V., Bosch, D., Colliander, A., Cosh, M., Kolassa, J., Mahanama, S. P., Prueger, J., Starks, P., and Walker, J. P. (2019). Version 4 of the smap level-4 soil moisture algorithm and data product. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(10):3106–3130.

- Sadeghi, M., Babaeian, E., Tuller, M., and Jones, S. B. (2017). The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to sentinel-2 and landsat-8 observations. *Remote Sensing of Environment*, 198:52–68.
- Sidle, R. C. and Ochiai, H. (2006). *Landslides: processes, prediction, and land use*. Number 18 in Water resources monograph. American Geophysical Union, Washington, DC. OCLC: ocm67392844.
- Van Drongelen, W. (2018). Continuous, Discrete, and Fast Fourier Transform. In *Signal Processing for Neuroscientists*, pages 103–118. Elsevier.
- You, J., Hubbard, K. G., Mahmood, R., Sridhar, V., and Todey, D. (2010). Quality Control of Soil Water Data in Applied Climate Information System—Case Study in Nebraska. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(3):200–209.
- Zeng, T., Zhang, J., Chen, Y., and Zhu, S. (2024). Extraction of spatiotemporal information of rainfall-induced landslides from remote sensing. *Remote Sensing*, 16(16):3089. This article belongs to the Special Issue Study on Hydrological Hazards Based on Multi-source Remote Sensing.
- Zhang, S., Pecoraro, G., Huang, D., Peng, J., and Calvello, M. (2025). Integrating rainfall severity and soil saturation indices to define hydro-meteorological thresholds for landslides. *Journal of Hydrology*, 654:132873.
- Zhu, Q., Nie, X., Zhou, X., Liao, K., and Li, H. (2014). Soil moisture response to rainfall at different topographic positions along a mixed land-use hillslope. *Catena*, 119:61–70.