



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

**Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y
Geográfica**

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

Influencia de tres tratamientos de revegetación con *Festuca dolichophylla* sobre la dinámica hídrica en la capa de suelo superficial de la cabecera de la microcuenca de Piuray Ccorimarca en Urubamba – Cusco

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

AUTOR

Carlos Alberto LAZO OSCANOA

ASESOR

Dra. Giuliana Patricia BECERRA CELIS

Renny Daniel DIAZ AGUILAR (Coasesor)

Lima, Perú

2024



Reconocimiento – No Comercial – Compartir Igual – Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Lazo, C. (2024). *Influencia de tres tratamientos de revegetación con Festuca dolichophylla sobre la dinámica hídrica en la capa de suelo superficial de la cabecera de la microcuenca de Piuray Ccorimarca en Urubamba – Cusco*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Carlos Alberto Lazo Oscanoa
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	70038752
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-2194-0953
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Giuliana Patricia Becerra Celis
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	40745335
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-3646-083X
Datos de coasesor	
Nombres y apellidos	Renny Daniel Diaz Aguilar
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	40192228
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-0045-585X
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Silvia del Pilar Iglesias León
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06018064
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Eric Rendon Schneir

Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09377940
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Alex Segundino Armas Blancas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07568033
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.1.15. Hidrología
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Perú. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM). Programa interno de tesistas en el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña – INAIGEM. CALO-2022
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Cusco Provincia: Urubamba Distrito: Chinchero Centro poblado: Umasbamba Latitud: -13.25233 Longitud: -71.98543
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Febrero 2023 – febrero 2024
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería ambiental y geológica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01 Oceanografía, Hidrología, Recursos hídricos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.11



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS PARA OPTAR EL TITULO **PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**

En el Salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos; el día 18 de Setiembre del año 2024, siendo las 11:30 am, en presencia de los señores docentes designados como miembros del Jurado Calificador:

Dra. SILVIA DEL PILAR IGLESIAS LEÓN
Mg. ALEX SEGUNDINO ARMAS BLANCAS
Dr. ERIC RENDON SCHNEIR

(Presidenta del Jurado)
(Miembro del Jurado)
(Miembro del Jurado)

Reunidos para el acto académico público de colación del Tesista Bachiller CARLOS ALBERTO LAZO OSCANOA quienes sustentaran la Tesis Titulada:

"INFLUENCIA DE TRES TRATAMIENTOS DE REVEGETACIÓN CON FESTUCA DOLICHOPHYLLA SOBRE LA DINÁMICA HIDRICA EN LA CAPA DE SUELO SUPERFICIAL DE LA CABECERA DE LA MICROCUENCA DE PIURAY CCORIMARCA EN URUBAMBA - CUSCO" para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Ambiental.

Los miembros del Jurado, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas:

A. *Satisfacción*

El Jurado procedió a la calificación, cuyo resultado fue:

QUINCE (15) - Aprobado

Habiendo sido aprobada la Sustentación de Tesis por el Jurado Calificador, el presidente recomienda que la Facultad de Ingeniería



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, proponga se le otorgue el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL al Bachiller:

CARLOS ALBERTO LAZO OSCANOA

Siendo las 13:00 horas se dio por concluido el acto académico, expidiéndose dos (03) Actas Originales de la Sustentación de la Tesis.

Dra. Silvia del Pilar Iglesias León
PRESIDENTA DEL JURADO

Mg. Alex Segundino Armas Blancas
MIEMBRO DE JURADO

Dr. Eric Rendon Schneir
MIEMBRO DE JURADO

Dra. Giuliana Patricia Becerra Celis
ASESORA



CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo **Giuliana Patricia Becerra Celis** en mi condición de asesora acreditada con la Resolución Decanal N° 001240-2023-D-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es "Influencia de tres tratamientos de revegetación con *Festuca dolichophylla* sobre la dinámica hídrica en la capa de suelo superficial de la cabecera de la microcuenca de Piuray Ccorimarca en Urubamba – Cusco", presentado por el **bachiller Carlos Alberto Lazo Oscanoa** para optar el título de Ingeniero Ambiental **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual.

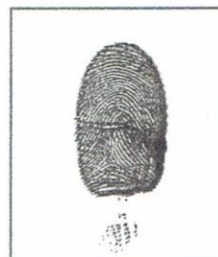
Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de 17 % de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Firma del Asesor

DNI: **40745335**

Nombres y apellidos del asesor: **Giuliana Patricia Becerra Celis**



ÍNDICE

Dedicatoria.....	11
Agradecimientos.....	12
Resumen.....	13
Abstract	14
CAPÍTULO I	15
1. Introducción	15
1.1. Introducción	15
1.2. Planteamiento del problema	16
1.2.1. Descripción de la problemática	16
1.3. Objetivos de la investigación.....	18
1.3.2. Objetivos específicos.....	18
1.4. Importancia y alcance de la investigación	19
2. Marco teórico.....	20
2.1. Antecedentes de la investigación.....	20
2.1.1. Ámbito Internacional.....	20
2.1.2. Ámbito Nacional.....	21
2.2. Bases teóricas	23
2.3. Definición de términos.....	25
CAPÍTULO III	28
3. Hipótesis y variables	28
3.1. Las hipótesis	28
3.1.1. Hipótesis general	28
3.1.2. Hipótesis específicas	28
3.2. Las variables	28
3.2.1. Variables Dependientes.....	29
3.2.2. Variables Independientes	29
3.3. Operacionalización de variables.....	30
CAPÍTULO IV	31
4. Materiales y métodos	31
4.1. Área de estudio	31
4.1.1. Ubicación geográfica.....	31
4.1.2. Aspectos socioeconómicos	31
4.1.3. Aspectos físicos	33
4.2. Diseño de investigación	38
4.3. Población y muestra	38

4.4. Procedimiento, técnicas e instrumentos de recolección de información	38
4.4.1. Instrumentos	38
4.4.2. Softwares.....	40
4.4.3. Instalaciones	41
4.4.4. Tratamientos experimentales	49
4.4.5. Descripción del experimento	52
4.4.6. Recolección, procesamiento y análisis de datos	55
CAPÍTULO V.....	71
5. Resultados	71
5.1. Balance hídrico del suelo	71
5.1.1. Precipitación (P)	71
5.1.2. Escorrentía superficial (ES)	73
5.1.3. Precipitación efectiva (Pe)	81
5.1.4. Capacidad de campo (CC)	83
5.1.5. Capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo (STx)	83
5.1.6. Contenido de humedad (θ) y Cambio de humedad del suelo ($\Delta\theta$)	84
5.1.7. Percolación (Per)	85
5.1.8. Evapotranspiración de referencia (ET _o) y evapotranspiración real (ETR)	88
5.2. Resultados de vegetación	92
5.2.1. Mortalidad de esquejes translocados.....	92
5.2.2. Vigor de los esquejes translocados.....	93
5.3. Resultados estadísticos.....	94
5.3.1. Evaluación estadística del modelo de balance hídrico.....	94
5.3.2. Análisis de componentes principales (ACP)	95
5.3.3. Prueba T de student para muestras relacionadas	98
5.3.4. Prueba de Chi-cuadrado para evaluar la mortalidad de los esquejes.....	99
5.4. Validación del instrumento de investigación.....	100
CAPÍTULO VI	102
6. Discusión.....	102
6.1. Mortalidad total de los esquejes de la parcela P03.....	102
6.2. Componentes del balance hídrico.....	103
6.2.1. Escorrentía superficial (ES)	103
6.2.2. Contenido de humedad (θ) y Cambio de humedad del suelo ($\Delta\theta$)	104
6.2.3. Percolación (Per)	105
6.2.4. Evapotranspiración real (ET).....	106
6.3. Vigor y mortalidad de los esquejes translocados	106
6.3.1. Mortalidad de esquejes translocados.....	106
6.3.2. Vigor de los esquejes translocados.....	107
6.4. Análisis estadístico	107
6.4.1. Evaluación estadística del modelo de balance hídrico.....	107
6.4.2. Análisis de componentes principales (ACP)	108
6.4.3. Validación del instrumento de investigación.....	108
6.5. Limitaciones del estudio	109
6.6. Posibles beneficios sociales y económicos.....	109

7. Conclusiones.....	111
8. Recomendaciones	113
9. Referencias bibliográficas.....	115
10. Anexos	123
10.1. Anexo 1. Fotografías.....	123
10.2. Anexo 2. Códigos para la limpieza y ordenamiento de datos hidrológicos .	127
10.3. Anexo 3. Calibración de sensores de humedad	130
10.4. Anexo 4. Cálculo de variables hidrológicas	131
10.5. Anexo 5. Análisis de la vegetación	139
10.7. Anexo 7. Proceso de calibración de equipos	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estratos del suelo.....	25
Figura 2. Ubicación geográfica de la microcuenca Piuray Ccorimarca.....	32
Figura 3. Mapa de las comunidades campesinas de la Microcuenca de Piuray Ccorimarca.....	33
Figura 4. Mapa con los climas de la microcuenca Piuray Ccorimarca	35
Figura 5. Mapas de precipitación en cuatro estaciones de la microcuenca de Piuray Ccorimarca.....	36
Figura 6. División hidrológica de la cabecera de la microcuenca Piuray Ccorimarca ..	37
Figura 7. Características del sensor TMS4	39
Figura 8. Estructura del pluviómetro HOBO con registrador de datos.....	40
Figura 9. Análisis NDVI de las cabeceras de la microcuenca Piuray Ccorimarca.....	43
Figura 10. Ubicación de las parcelas experimentales P01 y P03 y pluviómetros HOBO	46
Figura 11. Tipos de cobertura de la parcela 01 obtenidas en la evaluación de línea base de mayo de 2021.....	48

Figura 12. Tipos de cobertura de la parcela 03 obtenidas en la evaluación de línea base de mayo de 2021.....	49
Figura 13. Diseño experimental de las parcelas de investigación.....	53
Figura 14. Distanciamiento de los sensores TMS4 de las translocaciones	54
Figura 15. Distribución de las translocaciones y los sensores TOMST por subparcela	55
Figura 16. Sensor TMS4 instalado en el área de estudio.....	56
Figura 17. Variables del balance hídrico del suelo	58
Figura 18. Gráfico de dispersión y regresión lineal de los pluviómetros HOBO.....	72
Figura 19. Precipitación durante el periodo de investigación en la cabecera de la microcuenca Piuray Ccorimarca.....	72
Figura 20. Análisis del NDVI del tratamiento T01 para identificar coberturas	74
Figura 21. Análisis del NDVI del tratamiento T02 para identificar coberturas	75
Figura 22. Análisis del NDVI del tratamiento T03 para identificar coberturas	76
Figura 23. Análisis del NDVI del control para identificar coberturas	77
Figura 24. Escorrentía superficial acumulada durante el periodo de investigación de los tratamientos de la parcela P01	78
Figura 25. Variación de la escorrentía superficial a lo largo de la investigación del tratamiento T01	79
Figura 26. Variación de la escorrentía superficial a lo largo de la investigación del tratamiento T02	79
Figura 27. Variación de la escorrentía superficial a lo largo de la investigación del tratamiento T03	80
Figura 28. Variación de la escorrentía superficial a lo largo de la investigación del control	80
Figura 29. Precipitación efectiva (Pe) acumulada durante el periodo de investigación de los tratamientos experimentales de la parcela P01.....	81

Figura 30. Variación de la precipitación efectiva y escurrentía superficial del tratamiento T01 durante el periodo de investigación.....	81
Figura 31. Variación de la precipitación efectiva y escurrentía superficial del tratamiento T02 durante el periodo de investigación.....	82
Figura 32. Variación de la precipitación efectiva y escurrentía superficial del tratamiento T03 durante el periodo de investigación.....	82
Figura 33. Variación de la precipitación efectiva y escurrentía superficial del control durante el periodo de investigación.....	83
Figura 34. Contenido de humedad del suelo (θ) de los tratamientos y el control de la parcela P01 durante el periodo de investigación.	84
Figura 35. Resultados de Percolación (Per) acumulada de los tratamientos experimentales de la parcela P01	85
Figura 36. Percolación (Per), contenido de humedad del suelo (θ) y precipitación (P) del tratamiento experimental T01 a lo largo del periodo de investigación.....	86
Figura 37. Percolación (Per), contenido de humedad del suelo (θ) y precipitación (P) del tratamiento experimental T02 a lo largo del periodo de investigación.....	86
Figura 38. Percolación (Per), contenido de humedad del suelo (θ) y precipitación (P) del tratamiento experimental T03 a lo largo del periodo de investigación.....	87
Figura 39. Percolación (Per), contenido de humedad del suelo (θ) y precipitación (P) del control (Ctrl) a lo largo del periodo de investigación	87
Figura 40. Evapotranspiración real (ETR) acumulada de todos los tratamientos experimentales de la parcela P01	88
Figura 41. Evapotranspiración de referencia (ET _o) y evapotranspiración real (ETR) del tratamiento T01 durante el periodo de investigación.....	88
Figura 42. Evapotranspiración de referencia (ET _o) y evapotranspiración real (ETR) del tratamiento T02 durante el periodo de investigación.....	89
Figura 43. Evapotranspiración de referencia (ET _o) y evapotranspiración real (ETR) del tratamiento T03 durante el periodo de investigación.....	89

Figura 44. Evapotranspiración de referencia (ET _o) y evapotranspiración real (ET _R) del control durante el periodo de investigación.....	90
Figura 45. Resultados de mortalidad de esquejes al final del periodo de investigación	92
Figura 46. Variación de la mortalidad de esquejes translocados a lo largo del periodo de investigación.....	93
Figura 47. Vigor de los esquejes translocados por tratamiento experimental	93
Figura 48. Variación del volumen de los esquejes translocados por tratamiento durante el periodo de investigación	94
Figura 49. Matriz de correlaciones del ACP	96
Figura 50. Gráfico de sedimentación del ACP	97
Figura 51. Gráfico de componentes principales.....	98
Figura 52. Categorías del SPI.....	102
Figura 53. Índice de sequía SPI de diciembre de 2022 para todo el Perú.....	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables	30
Tabla 2. Grupos especiales de edad del distrito de Chinchero	31
Tabla 3. Humedad relativa mensual de la microcuenca Piuray Ccorimarca	36
Tabla 4. Cabeceras de la microcuenca de Piuray Ccorimarca con su respectiva área tributaria	43
Tabla 5. Ubicación geográfica de las parcelas seleccionadas.....	45
Tabla 6. Ubicación de las estaciones pluviométricas HOBO	45
Tabla 7. Resultados del análisis de suelos de las parcelas 01 y 03	46
Tabla 8. Características fisicoquímicas del estiércol de bovino	51
Tabla 9. Composición de nutrientes del fosfato diamónico.....	51
Tabla 10. Dosificación del fertilizante para cada parcela	52

Tabla 11. Cantidad en Kg de fertilizante por parcela según el contenido de nutrientes.	52
Tabla 12. Rangos aceptables para los parámetros de precipitación, temperatura y humedad volumétrica	57
Tabla 13. Números de curva (NC(II)) según condiciones hidrológicas y grupo de suelo según SCS	60
Tabla 14. Grupos de suelo según la SCS	60
Tabla 15. Clasificación del rendimiento de la estadística recomendada para evaluar el modelo de balance hídrico	66
Tabla 16. Interpretación del coeficiente de validez de contenido (CVC)	69
Tabla 17. Indicadores de los ítems y escala de valores	69
Tabla 18. Ítems evaluados con el método CVC	69
Tabla 19. Clasificación de coberturas según análisis fotogramétrico	73
Tabla 20. Porcentajes de las coberturas de todos los tratamientos y el control de la parcela P01	73
Tabla 21. Números de curva de los tratamientos experimentales y el control de la parcela P01	78
Tabla 22. Capacidad de campo y clase textural de los tratamientos experimentales de la parcela P01	83
Tabla 23. Capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo (STx) de los tratamientos de la parcela de investigación P01	84
Tabla 24. Acumulado del cambio de contenido de humedad del suelo ($\Delta\theta$) de los tratamientos y el control de la parcela P01 durante el periodo de investigación	85
Tabla 25. Componentes del balance hídrico de todos los tratamientos y el control de la parcela P01 acumulados durante el periodo de investigación	90
Tabla 26. Componentes del balance hídrico del tratamiento T01 a nivel mensual	90
Tabla 27. Componentes del balance hídrico del tratamiento T02 a nivel mensual	91
Tabla 28. Componentes del balance hídrico del tratamiento T03 a nivel mensual	91

Tabla 29. Componentes del balance hídrico del control a nivel mensual.....	92
Tabla 30. Resultados estadísticos de la evaluación del modelo de balance hídrico.....	94
Tabla 31. Variables y valores considerados en el ACP	95
Tabla 32. Varianza total explicada del ACP	96
Tabla 33. Matriz de componentes del ACP	97
Tabla 34. Valores (t) y de significancia (p) de la prueba T de student para los componentes del balance hídrico de todos los tratamientos experimentales y el control.	98
Tabla 35. Variables categóricas de tratamientos de revegetación y mortalidad de esquejes	99
Tabla 36. Tabla de contingencia de tratamientos y mortalidad	99
Tabla 37. Pruebas de Chi-cuadrado.....	100
Tabla 38. Resultados de la validación por cada experto	101
Tabla 39. Resultados del CVC de cada ítem evaluado	101

Dedicatoria

A mis queridos padres, German Aquiles Lazo Calle y Esther Julia Oscanoa Galarza:

Con todo mi amor y gratitud, dedico esta tesis a ustedes. Gracias por su apoyo incondicional, sus sacrificios y por creer en mí siempre. Su amor y guía han sido la base de todos mis logros. Sin ustedes, este sueño no habría sido posible. Con todo mi cariño,

Carlos Alberto Lazo Oscanoa

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que han contribuido al desarrollo de esta tesis.

En primer lugar, quiero agradecer a mi asesora de tesis, la Dra. Giuliana Becerra Celis, por su constante apoyo, guía y paciencia a lo largo de este proceso. Su conocimiento y experiencia han sido fundamentales para la realización de este trabajo.

De igual manera, agradezco a mi co-asesor, el Ing. Renny Díaz Aguilar, quien me apoyó constantemente en cada etapa de esta investigación. Su orientación y experiencia fueron de gran importancia en este proyecto.

Agradezco también a la Oficina Desconcentrada Macro Región Sur (ODMRS) del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) por el apoyo logístico y financiero brindado durante toda mi investigación. En particular, quiero mencionar al equipo de ecosistemas de montaña, cuyos recursos y conocimientos han sido invaluable.

Un especial agradecimiento a mis colegas del INAIGEM, Víctor Bustinza y Ángela Mendoza. Sus aportes y críticas constructivas han mejorado significativamente la calidad de este trabajo.

A mis amigos y familiares, gracias por su apoyo incondicional y por creer en mí en todo momento. En especial, quiero agradecer a mis padres, quienes me han brindado el soporte emocional y financiero necesario para llegar hasta aquí.

Finalmente, agradezco a todas las personas que de alguna manera contribuyeron a la realización de esta tesis. Sin su ayuda, este logro no habría sido posible.

Resumen

La microcuenca Piuray Ccorimarca abastece de agua al 37.7% de la población de la ciudad de Cusco a través del servicio ecosistémico de regulación hídrica proporcionado por los ecosistemas presentes, especialmente el pajonal de puna. Sin embargo, este importante ecosistema muestra indicios de degradación debido a la pérdida de cobertura vegetal. Por ello, resulta imperativo desarrollar investigaciones ecohidrológicas para la recuperación de pastos nativos y su contribución hídrica.

En este sentido, esta investigación evaluó la dinámica hídrica en la capa de suelo superficial mediante tres tratamientos de revegetación con el pasto nativo *Festuca dolichophylla* en parcelas ubicadas en la cabecera de la microcuenca Piuray Ccorimarca. Durante un año, se monitorearon la precipitación, temperatura y humedad volumétrica cada 15 minutos para su uso en un modelo de balance hídrico. Asimismo, se evaluaron el vigor y la mortalidad de los esquejes revegetados.

Los resultados muestran que el tratamiento T01, que incluía la adición de abono orgánico, tuvo los mejores resultados en la generación de agua gravitacional para la percolación y en la supervivencia de esquejes. En contraste, el tratamiento T03, sin ningún tipo de abono, presentó muy bajos niveles de percolación y una alta mortalidad de esquejes.

En conclusión, la revegetación con *Festuca dolichophylla* tiene una influencia significativa en la dinámica hídrica de la capa de suelo superficial, siendo el tratamiento T01 el más recomendable para la revegetación en la cabecera de la microcuenca Piuray Ccorimarca.

Palabras clave: **Microcuenca Piuray Ccorimarca, dinámica hídrica, *Festuca dolichophylla*, revegetación, ecohidrología.**

Abstract

The Piuray Ccorimarca microbasin supplies water to 37.7% of the population of the city of Cusco through the ecosystem service of water regulation provided by the existing ecosystems, especially the puna grassland. However, this important ecosystem shows signs of degradation due to the loss of vegetation cover. Therefore, it is imperative to develop ecohydrological research for the recovery of native grasses and their water contribution.

In this context, this research evaluated the water dynamics in the topsoil layer using three revegetation treatments with the native grass *Festuca dolichophylla* in plots located at the head of the Piuray Ccorimarca microbasin. Over the course of a year, precipitation, temperature, and volumetric humidity were monitored every 15 minutes for use in a water balance model. Additionally, the vigor and mortality of the revegetated cuttings were assessed.

The results show that treatment T01, which included the addition of organic fertilizer, had the best results in generating gravitational water for percolation and in the survival of cuttings. In contrast, treatment T03, without any type of fertilizer, presented very low percolation levels and high cutting mortality.

In conclusion, revegetation with *Festuca dolichophylla* has a significant influence on the water dynamics of the topsoil layer, with treatment T01 being the most recommended for revegetation at the head of the Piuray Ccorimarca microbasin.

Keywords: Piuray Ccorimarca microbasin, water dynamics, *Festuca dolichophylla*, revegetation, ecohydrology.

CAPÍTULO I

1. Introducción

1.1. Introducción

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en promedio, el 10% de la población mundial habita en países con un estrés hídrico que va desde elevado hasta crítico, e incluso aquellos países que podrían ser considerados seguros pueden tener cuencas muy sometidas al estrés de manera total o parcial, como el caso de Perú y Chile, poniendo en riesgo de manera significativa diversas actividades económicas, la seguridad alimentaria e incluso aspectos sanitarios ya que el agua es fundamental para hacer frente a enfermedades como el COVID-19 (FAO, 2021).

El Perú ocupa el octavo lugar del mundo respecto a la disponibilidad de agua dulce, y el tercero en América Latina, no obstante, la disponibilidad de los recursos hídricos se verá afectada con el progresivo cambio climático. Según el Ministerio del Ambiente (MINAM) entre los escenarios proyectados de disponibilidad hídrica para el periodo 2035 – 2065, se estima que los promedios de escorrentía anual en la sierra y la selva disminuirán en algunos casos hasta 52% respecto a otros periodos (MINAM, 2016).

En este contexto, resultan necesarias iniciativas que busquen mejorar o recuperar los servicios ecosistémicos de regulación hídrica, según Forest Trends en 2020 en el Perú se invirtieron casi S/ 36 millones en infraestructura natural para alcanzar la seguridad hídrica, siendo los proyectos que buscan promover la infiltración de agua los más mencionados (56%) seguidos por los que buscan incrementar la capacidad natural de regulación hídrica (41%). Estos proyectos de infraestructura natural son en su mayoría de revegetación, reforestación o forestación, zanjas de infiltración, prácticas de siembra y cosecha de agua, y la construcción de qochas (Forest Trends, 2021).

Sin embargo, según (Ma *et. al*, 2020) cada método de recuperación de cobertura vegetal tiene una influencia distinta en la dinámica hídrica del suelo, siendo para las zonas montañosas, una revegetación con pastos naturales la más recomendada, puesto que permite un mayor almacenamiento de agua en el suelo y conduce a la conservación del

agua a escala de cuenca, además de facilitar la restauración ecológica, en comparación de la forestación con especies arbóreas que retienen poca agua en el suelo.

Considerando los hallazgos de la última Evaluación del Estado de Conservación y Estrategias de Manejo de los Ecosistemas de la microcuenca de la laguna Piuray (MINAM, 2020), donde se determinó que las coberturas vegetales de césped de puna (21.23%) y pajonal de puna (78.77%) presentan diversos niveles de conservación, desde muy buenos hasta pobres, resulta necesario desarrollar investigaciones sobre tratamientos para la recuperación de cobertura vegetal, especialmente utilizando especies nativas de pajonal de puna, y evaluar su influencia sobre la recarga hídrica en la microcuenca Piuray Ccorimarca.

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Descripción de la problemática

Según información del MINAM (2020), uno de los ecosistemas más afectados en la microcuenca de Piuray Ccorimarca es el pajonal de puna, el cual sufre constantes daños debido a prácticas de sobrepastoreo y agricultura. Asimismo, según la evaluación diagnóstica realizada por INAIGEM (2022) en la quebrada de Umasbamba, en la cabecera la microcuenca Piuray Ccorimarca, se observó que las coberturas predominantes en el suelo eran aquellas que incluían elementos abióticos como grava y suelo desnudo (18.75%), seguidas por coberturas compuestas por especies indicadoras de degradación, como *Muhlenbergia peruviana* y *Aciachne pulvinata* (12.8%) que representan en conjunto más del 30% de la cobertura total del suelo. Esto evidencia el estado de degradación en el que se encuentra este ecosistema en términos de cobertura vegetal. Además, se destaca que las coberturas correspondientes a especies que componen el ecosistema de pajonal de puna, como *Calamagrostis vicunarum* y *Festuca dolichophylla*, solo representan el 3.89% del total de la cobertura.

Cervantes *et al.* (2021) indica por su lado, que los ecosistemas altoandinos por encima de los 3900 m.s.n.m. contribuyen significativamente a la regulación hídrica, siendo el ecosistema de pajonal de puna el más extenso en territorio y el que más aporta en la regulación hídrica de las cuencas. Sin embargo, pese al gran valor que tienen los ecosistemas altoandinos sobre el aprovisionamiento de agua, aún existe una gran carencia

de conocimiento sobre la hidrología en este tipo de ecosistemas, situación que se ve agravada por el alto gradiente espacio temporal y la mutabilidad de las condiciones geográficas e hidrometeorológicas (Ochoa *et al.*, 2016).

En este contexto, resulta imperativo desarrollar investigaciones científicas centradas en la recuperación de los ecosistemas altoandinos en la microcuenca Piuray Ccorimarca, con un enfoque de técnicas de recuperación de pajonales utilizando especies nativas como *Festuca dolichophylla*, y su influencia sobre la dinámica hídrica. La información obtenida será de gran importancia para la gestión y recuperación de este ecosistema, lo que a su vez contribuirá a mejorar la regulación hídrica en la microcuenca.

1.2.2. Formulación del problema

1.2.2.1 Problema general

¿La revegetación con *Festuca dolichophylla* tiene influencia sobre la dinámica hídrica de la capa de suelo superficial de la cabecera de la microcuenca Piuray Ccorimarca, Urubamba - Cusco?

1.2.2.2. Problemas específicos

- a. ¿Los tratamientos de revegetación con *Festuca dolichophylla* tienen influencia sobre el contenido de humedad en la capa de suelo superficial de la cabecera en la microcuenca Piuray Ccorimarca, Urubamba – Cusco?
- b. ¿Los tratamientos de revegetación con *Festuca dolichophylla* tienen influencia sobre la percolación de agua en la capa de suelo superficial de la cabecera en la microcuenca Piuray Ccorimarca, Urubamba – Cusco?
- c. ¿Los tratamientos de revegetación con *Festuca dolichophylla* tienen influencia sobre la evapotranspiración real de la capa de suelo superficial de la cabecera en la microcuenca Piuray Ccorimarca, Urubamba – Cusco?

d. ¿Los tratamientos de revegetación con *Festuca dolichophylla* tienen influencia sobre la escorrentía superficial en la capa de suelo superficial de la cabecera en la microcuenca Piuray Ccorimarca, Urubamba – Cusco?

e. ¿Los tratamientos de revegetación tienen influencia sobre el desarrollo vegetal de los esquejes de *Festuca dolichophylla* en la cabecera de la microcuenca Piuray Ccorimarca, Urubamba – Cusco?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la influencia de la revegetación con *Festuca dolichophylla* sobre la dinámica hídrica de la capa de suelo superficial en la cabecera de la microcuenca Piuray Ccorimarca, Urubamba – Cusco.

1.3.2. Objetivos específicos

a. Evaluar la influencia de cada tratamiento de revegetación con *Festuca dolichophylla* sobre el contenido de humedad en la capa de suelo superficial de la cabecera de la microcuenca de Piuray Ccorimarca, Urubamba – Cusco.

b. Evaluar la influencia de cada tratamiento de revegetación con *Festuca dolichophylla* sobre la percolación de agua en la capa de suelo superficial de la cabecera de la microcuenca de Piuray Ccorimarca, Urubamba – Cusco.

c. Evaluar la influencia de cada tratamiento de revegetación con *Festuca dolichophylla* sobre la evapotranspiración real en la capa de suelo superficial de la cabecera de la microcuenca de Piuray Ccorimarca, Urubamba – Cusco.

d. Evaluar la influencia de cada tratamiento de revegetación con *Festuca dolichophylla* sobre la escorrentía superficial en la capa de suelo superficial de la cabecera de la microcuenca Piuray Ccorimarca, Urubamba – Cusco

e. Evaluar la influencia de cada tratamiento de revegetación sobre el desarrollo vegetal de los esquejes de *Festuca dolichophylla* en la cabecera de la microcuenca Piuray Ccorimarca, Urubamba - Cusco

1.4. Importancia y alcance de la investigación

De acuerdo al MINAM (2016) en las proyecciones climáticas para los periodos de 2035 y 2065, la cuenca del rio Urubamba en Cusco tendrá una reducción considerable de sus caudales en época de lluvias y un aumento de los periodos secos y de inicio de lluvias. Bajo este panorama resulta imperativo el desarrollo de proyectos que reduzcan nuestra vulnerabilidad y permitan adaptarnos al cambio climático y garantizar una seguridad hídrica. Además, la microcuenca Piuray Ccorimarca es el segundo mayor abastecedor de agua de la ciudad de Cusco, aportando 9 033 450 m³ de agua (37.7%), solo después del sistema del Vilcanota con 12 439 539 m³ (51.9%) según la empresa prestadora de servicios EPS SEDACUSCO (2021).

Además, según la Evaluación del Estado de Conservación de la microcuenca de Piuray (MINAM, 2020), se identifica que es necesario contar con estudios que proporcionen información crucial sobre la hidrología y su relación con la cobertura vegetal, con la finalidad de contar con un diagnóstico exhaustivo de la Microcuenca de Piuray Ccorimarca.

En este contexto, resulta necesario y esencial fomentar la investigación científica que busque resolver la problemática relacionada a la regulación hídrica en la microcuenca Piuray Ccorimarca, con el objetivo de alcanzar seguridad hídrica y adaptación al cambio climático, destacando la importancia de la infraestructura natural. La revegetación con especies nativas de pastizales emerge como una alternativa prometedora tanto por su eficiencia en tolerar el estrés ambiental de las zonas altoandinas, así como también por mantener la biodiversidad de la cobertura vegetal y su impacto positivo en la dinámica hídrica.

CAPÍTULO II

2. Marco teórico

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Ámbito Internacional

En el estudio titulado “La implementación de cultivos intercalados mantiene el equilibrio del agua del suelo al tiempo que mejora múltiples servicios ecosistémicos”, Wen *et al.* (2022) evaluaron como los cultivos intercalados de caucho (*Hevea brasiliensis*) y una hierba medicinal (*Alpinia oxyphylla*), en la isla de Haiman en China, tenían influencia en los servicios ecosistémicos relacionados al agua, la materia orgánica del suelo, la densidad de la longitud de la raíz y la densidad del dosel sobre la retención del agua y la fertilidad del suelo. Como parte de su metodología utilizaron sensores de humedad para monitorear diariamente el contenido de agua del suelo a tres profundidades. También, realizaron caracterizaciones continuas de las propiedades del suelo y la vegetación. Los resultados obtenidos mostraron que los cultivos intercalados aumentaron y redujeron significativamente el consumo de agua del suelo en un 54,34 % y un 36,78 % en las capas superficial y media del suelo, respectivamente. Asimismo, la absorción de agua aumentó un 52,93% y disminuyó un 39,58% en las capas superficial y media del suelo, respectivamente. Por lo tanto, se repuso el agua y se mantuvo el equilibrio hídrico en todas las capas del suelo. Finalmente, se concluyó que los cultivos intercalados mejoran la distribución de agua en el suelo y por lo tanto mejoran varios servicios ecosistémicos sin aumentar el consumo de agua. De esta investigación podemos reconocer la influencia directa que tiene la cobertura vegetal sobre la dinámica hídrica en el suelo, especialmente sobre el consumo y la absorción.

En la investigación desarrollada por Guarderas (2016) titulada “Evaluación del efecto producido por cuatro técnicas de recuperación de la cobertura vegetal en la retención de agua del suelo en el páramo oeste del nevado Antisana, Cantón Archidona, provincia de Napo” realizada en Ecuador, se instaló 4 parcelas piloto (dos activas y dos pasivas) con técnicas de recuperación de cobertura vegetal, con el objetivo de evaluar cuáles ayudarían a la retención y regulación hídrica del suelo. Para ello, el autor utilizó equipos de medición

continua de la humedad del suelo, datos de las propiedades físicas y químicas del suelo, así como de la precipitación y el estado de la vegetación. Los resultados de este estudio muestran que las técnicas de recuperación activa, como la revegetación con *Calamagrostis intermedia*, condujeron a una disminución de 30% en la retención de la humedad del suelo en comparación con las técnicas de recuperación pasivas, utilizando cercos. No obstante, con el tiempo los valores de humedad tienden a regresar gradualmente a un estado previo a la intervención. Por otro lado, las parcelas con técnicas pasivas no presentan cambios significativos en la retención hídrica. Este estudio sugiere que, a mediano plazo, los tratamientos pasivos tienen influencia limitada o nula sobre la retención hídrica. Sin embargo, los tratamientos activos, como la revegetación con *Calamagrostis intermedia*, si bien disminuyen inicialmente la retención hídrica, a mediano y largo plazo pueden incrementarla.

En cuanto a Lahuatte y Recalde (2015) en la tesis titulada “Propiedades físico-químicas del suelo como instrumentos de evaluación a las estrategias de restauración implementadas en áreas degradadas de páramo, caso de estudio: microcuencas Antisana y Pita” desarrollada en Quito, Ecuador, su trabajo buscó evaluar la efectividad de la recuperación de las propiedades físico-químicas del suelo con diferentes tratamientos, dentro de los cuales se incluían técnicas pasivas como cercos para eliminar el pastoreo, remoción de suelo y translocaciones con distintas especies. Como parte de la metodología utilizada se establecieron líneas base de todas las parcelas experimentales, se instalaron los tratamientos y se evaluó la efectividad de estos en base a la variación de parámetros físicos, químicos y curvas de humedad con respecto a los valores iniciales. Los resultados mostraron que no hay variaciones significativas que permitan determinar la viabilidad de las técnicas de restauración a macro escala. No obstante, se muestran ciertas tendencias en la humedad del suelo que tienen que ser evaluadas a largo plazo. Este estudio indica que la investigación sobre aspectos fisicoquímicos e hidrológicos puede ser poco concluyente a macro escala y en periodos de tiempo relativamente cortos. Esto sugiere que es necesario llevar a cabo este tipo de investigaciones durante periodos considerablemente más largos para obtener resultados más precisos y relevantes.

2.1.2. Ámbito Nacional

En el trabajo titulado “Influencia de la revegetación con especies nativas y la incorporación de materia orgánica en la recuperación de pastizales degradados” de Tácuma *et al.*, (2015) realizado en la Cordillera Blanca, Ancash, se evaluaron los efectos de la revegetación con especies de gramíneas nativas (*Festuca humilior* y *Calamagrostis macrophylla*) y la utilización de orina y estiércol de ovino como fertilizante para la recuperación de un pastizal degradado. El experimento se realizó en parcelas experimentales donde se evaluó la función hidrológica (humedad del suelo y tasa de infiltración) y las variaciones en la vegetación (vigor y mortalidad). Los resultados mostraron que las translocaciones de *Festuca humilior* superaron a los de *Calamagrostis macrophylla* en vigor, mortalidad y en los factores hidrológicos. Además, se muestra una respuesta potenciada con la adición del fertilizante de origen ovino. Así, se concluyó que la estrategia de translocaciones de especies nativas de gramíneas con adición de materia orgánica en forma de estiércol y orina de ovino es una técnica efectiva para recuperar las condiciones y funciones hídricas de los pastizales degradados. De esta investigación podemos rescatar que, entre las gramíneas nativas, las especies de *Festucas* superan en los aspectos hidrológicos y de desarrollo vegetal a las especies de *Calamagrostis*, y que la adición de fertilizantes potencia estos aspectos.

García (2015), en la tesis titulada “Influencia de la revegetación con *Festuca humilior* y la incorporación de fertilizantes en la recuperación de pastizales degradados” desarrollada en la comunidad de Marcapomacocha en Junín, evaluó los efectos de la revegetación de *Festuca humilior* con nutrientes y encalado para la mejora del estado ecológico. En este estudio se utilizaron los tratamientos de adición de nitrógeno (N), fósforo (P), un encalado y un control en parcelas experimentales, para evaluar la respuesta vegetativa y productiva de *Festuca humilior*. Los resultados obtenidos muestran una mejor respuesta con la aplicación de N y P en la producción de biomasa. Se concluyó que la incorporación de nutrientes es un factor fundamental en la revegetación de *Festuca humilior*. De esta investigación podemos rescatar que una fertilización de origen químico también puede favorecer la revegetación de especies de *Festucas*.

En cuanto a Paucar (2019), en la tesis titulada “Efecto de la revegetación con *Festuca dolichophylla* en la disminución de *Aciachne pulvinata* en un área de pastoreo de una comunidad campesina en la región de Huancavelica” desarrollada en la comunidad campesina de Pastales Huando en Huancavelica, se buscó evaluar el efecto de la revegetación con *Festuca dolichophylla* para la disminución de *Aciachne pulvinata* (una

especie indicadora de degradación). Para ello, se establecieron 12 parcelas experimentales en una zona invadida por *Aciachne pulvinata*, 6 parcelas con revegetación de *Festuca dolichophylla* y 6 parcelas sin revegetación. Los resultados obtenidos 9 meses después, evidenciaron una reducción de -4.69% en la cobertura de *Aciachne pulvinata* en las parcelas con revegetación y un incremento de 3.6% en las parcelas sin revegetación. Se concluyó que la revegetación con *Festuca dolichophylla* contribuye a la reducción de *Aciachne pulvinata*. En esta investigación se evidencia nuevamente lo beneficioso que es la revegetación con especies de Festucas, incluso en la reducción de la cobertura de especies indicadoras de degradación.

2.2. Bases teóricas

a. Revegetación

El término de revegetación se ha definido de diferentes formas como lo indica Saavedra (2006), con definiciones como: “Práctica ecológico-forestal, que consiste en devolver el equilibrio o restaurar la cubierta vegetal de una zona donde estas formaciones vegetales están degradadas o alteradas, en todos o alguno de sus componentes”, o como “El establecimiento artificial de vegetación en un terreno apto para ello” o “Conjunto de actividades tendiente a restablecer la cubierta vegetal de un sitio en particular”. En términos generales se debe entender como revegetación a la recuperación de la cobertura vegetal y debe distinguirse de otros términos más específicos como son la “restauración” y la “reforestación” que tienen otros fines.

Para esta tesis se considerará la definición proporcionada por Alejo *et. al* (2014) por estar más acorde a los objetivos de esta investigación. Esta definición de revegetación explica que se trata del repoblamiento de un pastizal en un área carente de vegetación, con el propósito de recuperar la cobertura vegetal, considerando las características de vegetación propias de cada zona, de tal forma que se mantengan la estructura, composición y diversidad vegetal originales.

b. Microcuenca

En el Perú la gestión del agua tiene como eje central las cuencas hidrográficas según lo establece la Ley de Recursos Hídricos (2009). Ahora, si bien se menciona la figura de microcuenca como espacio para la organización de comunidades campesinas y nativas,

no existe mayor desarrollo normativo de este término, a diferencia de países como Ecuador, Colombia o México que si contemplan el nivel de microcuenca como parte de su marco normativo.

Por ello, para esta investigación, consideraremos aquellas definiciones que se ajusten a la realidad de la microcuenca de Piuray Ccorimarca, como la presentada por FAO (2008) que indica que una microcuenca es una pequeña unidad geográfica delimitada por un enfoque hidrológico donde habitan un grupo de familias que maneja los recursos de agua suelo y vegetación principalmente. Asimismo, utilizaremos la definición presentada por el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (2015) que define una microcuenca como el área de aguas superficiales que vierten a una red hidrográfica natural, de manera continuo o intermitente, que puede desembocar en un río principal o en un depósito natural de aguas, y está delimitada por la línea de divorcio de aguas. Por tamaño, se considera microcuenca cuando el área de drenaje es menor a 500 Km².

c. Suelo superficial

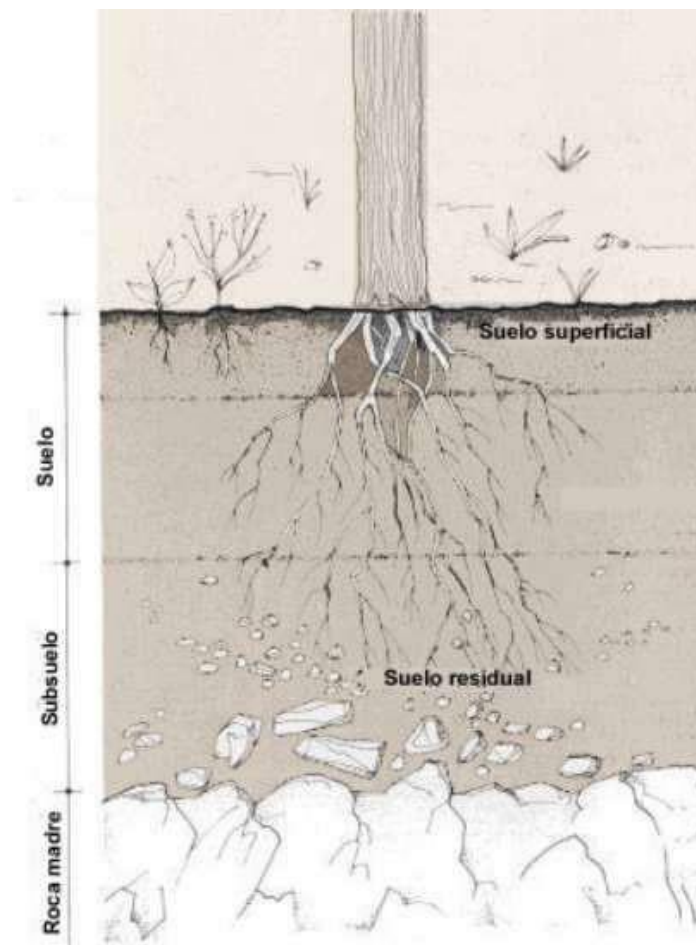
El suelo superficial está comprendido dentro del estrato superior del suelo, que es donde ocurren la mayor parte de interacciones biológicas, entre animales, raíces de las plantas, descomposición de materia orgánica, cultivos humanos, etc. La capa de suelo superficial o capa superior es aquella que está en contacto directo con la atmosfera, es poco profunda y alberga la mayoría de las raíces secundarias de las plantas, suele ser de color oscuro e incluso negro y en el fondo de esta capa puede existir una capa de grava (FAO, s.f.).

d. *Festuca dolichophylla*

Es una especie botánica de gramínea cespitosa de la familia Poaceae que habita en Perú y Bolivia. Se encuentra en paramos y laderas rocosas, abundante en la puna húmeda entre los 3600 y 4800 m s.n.m. Tiene una altura de entre 50 y 120 cm y espiguillas elíptico-elongadas de 10 a 12 mm de largo. (Renvoize, 1998)

Esta especie y otras del mismo género ya cuentan con experiencias positivas en revegetación en las zonas andinas, ya que tienen una especial resistencia a los factores ambientales propios de los Andes.

Figura 1. Estratos del suelo



Nota. Obtenido de (FAO, s.f.)

2.3. Definición de términos

a. Cabecera de cuenca

Según la Autoridad Nacional del Agua (ANA) una cabecera de cuenca se define como aquella zona ubicada en las nacientes de los cursos de agua y perimétricas de una unidad hidrográfica mayor, drenadas por cursos de agua de orden 1 y de regímenes perennes o intermitentes (ANA, 2021).

b. Capacidad de campo

Se entiende como capacidad de campo a la cantidad de agua que el suelo es capaz de retener luego de una precipitación que lo lleve a saturación, luego de que haya drenado

evitando la evapotranspiración, es decir cuando se estabilice el potencial hídrico (pasado entre 24 y 48 horas). Los poros del suelo se llenan de agua con una succión de 1/3 bar, que es accesible para las plantas (FAO, s.f.).

c. Cobertura vegetal

La cobertura vegetal se puede definir como aquella capa de vegetación que cubre la superficie de la tierra, y comprende una amplia variedad de biomasa con diferentes características fisonómicas y ambientales, y pueden ser desde pastizales andinos hasta bosques naturales, incluido aquellas áreas con intervención del hombre como los cultivos (Bennet, 1999).

d. Escorrentía superficial

La escorrentía superficial, o flujo superficial es aquella parte de la precipitación que fluye sobre la superficie del suelo durante o después de un evento de precipitación (WMO, 2012)

e. Evapotranspiración

Allen *et al.* (2006), define a la evapotranspiración (ET) como la combinación de los procesos por los cuales se pierde el agua de la superficie del suelo, que son la evaporación y la transpiración de las plantas. Estos procesos ocurren en simultaneo y es difícil distinguir entre ambos procesos, se mide en milímetros (mm) por unidad de tiempo que puede ir desde horas hasta años. La evapotranspiración es afectada por factores climáticos y del tipo de cobertura vegetal.

f. Humedad volumétrica

Según Flores & Alcalá (2010), la humedad del suelo se entiende como la masa de agua contenida por unidad de masa de sólidos del suelo, y puede expresarse volumétricamente como humedad volumétrica del suelo que se calcula en base al volumen total del suelo y se expresa en porcentaje, como se muestra en la siguiente ecuación

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{V_w}{V_s + V_f}$$

Donde:

θ :es el contenido de agua del suelo (humedad volumétrica)

Vw: el volumen de agua

Vs: volumen de sólidos

Vf: volumen de poros

Vt: el volumen total de la muestra representativa

g. Percolación

Se entiende como percolación, infiltración o filtración al flujo de un líquido a través de un medio poroso que no se encuentre saturado, como es el caso del flujo de agua por el suelo a causa de la gravedad (WMO, 2012).

h. Precipitación efectiva

Según FAO (1978) la precipitación efectiva es aquella porción total de lluvia anual o estacional que es útil directa y/o indirectamente para la producción de cultivos en el sitio donde cae. Depende de factores como la evapotranspiración, la escorrentía superficial, percolación y el agua interceptada por la vegetación viva o seca.

i. Regulación hídrica

Según el (MINAM, s.f.) se entiende como regulación hídrica cuando un ecosistema almacena agua en temporada de lluvias y la libera paulatinamente en los periodos secos o de estiaje, proporcionando un balance natural entre los caudales de la época lluviosa como seca. Con una mayor capacidad de regulación, los caudales base serán mayores y a su vez los caudales en crecidas se controlarán mejor. La regulación hídrica dependerá de factores como la precipitación, la cobertura vegetal y de la profundidad y tipo de suelo superficial.

j. Textura del suelo

Según De Petre *et al.* (2012) la textura del suelo se puede definir como la porción relativa de las fracciones de arena, limo y arcilla que integran la masa del suelo, y entre las muchas combinaciones de estas tres fracciones se establecieron las “clases texturales” o “texturas”, delimitadas según las proporciones de sus tres componentes. Las texturas básicas son: arcillosa, arenosa, limosa y franca.

CAPÍTULO III

3. Hipótesis y variables

3.1. Las hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

Existe una influencia directa de la revegetación con *Festuca dolichophylla* sobre la dinámica hídrica de la capa de suelo superficial de la cabecera de la microcuenca de Piuray Ccorimarca, Urubamba – Cusco.

3.1.2. Hipótesis específicas

- a. Existe influencia de los tratamientos de revegetación con *Festuca dolichophylla* sobre el contenido de humedad en la capa de suelo superficial de la cabecera de la microcuenca Piuray Ccorimarca, Urubamba – Cusco.
- b. Existe influencia de los tratamientos de revegetación con *Festuca dolichophylla* sobre la percolación de agua en la capa de suelo superficial de la cabecera de la microcuenca Piuray Ccorimarca, Urubamba – Cusco.
- c. Existe influencia de los tratamientos de revegetación con *Festuca dolichophylla* sobre la evapotranspiración real en la capa de suelo superficial de la cabecera de la microcuenca Piuray Ccorimarca, Urubamba – Cusco.
- d. Existe influencia de los tratamientos de revegetación con *Festuca dolichophylla* sobre la escorrentía superficial en la capa de suelo superficial de la cabecera de la microcuenca Piuray Ccorimarca, Urubamba – Cusco.
- e. Existe influencia de los tratamientos de revegetación sobre el desarrollo vegetal de los esquejes de *Festuca dolichophylla* en la cabecera de la microcuenca Piuray Ccorimarca, Urubamba – Cusco.

3.2. Las variables

3.2.1. Variables Dependientes

- Percolación (Per)
- Evapotranspiración real (ET)
- Escorrentía superficial (ES)
- Vigor de esquejes
- Mortalidad de esquejes

3.2.2. Variables Independientes

- Revegetación con fertilizante orgánico
- Revegetación con fertilizante inorgánico
- Revegetación sin fertilizantes

3.3. Operacionalización de variables

Tabla 1. Operacionalización de variables

Variable dependiente	Definición	Dimensiones	Indicadores
Contenido de humedad en el suelo (θ)	Agua contenida en el suelo	Lámina de agua (mm)	- Humedad del suelo
Percolación (Per)	Agua gravitacional que infiltra y pasa a las capas de suelo inferiores	Lámina de agua (mm)	- Precipitación - Capacidad de campo - Humedad del suelo
Evapotranspiración real (ET)	Agua que regresa a la atmósfera a través de evaporación y transpiración	Lámina de agua (mm)	- Evapotranspiración potencial - Punto de marchitez permanente - Precipitación efectiva
Escorrentía superficial (ES)	Agua que circula encima del suelo	Lámina de agua (mm)	- Número de curva - Precipitación efectiva
Vigor de esquejes	Índice de desarrollo vegetal en base al volumen	Volumen del esqueje (cm ³)	- Diámetro basal - Diámetro aéreo - Altura
Mortalidad de esquejes	Esquejes muertos	Porcentaje de esquejes muertos (%)	- Conteo de esquejes muertos
Variable independiente	Definición	Dimensiones	Indicadores
Revegetación con fertilizante orgánico	Adición de estiércol de bovino como fuente de nutrientes en la revegetación	- Dosis de estiércol aplicada a cada esqueje (Kg) - Número de esquejes translocados	Recuperación de cobertura vegetal
Revegetación con fertilizante inorgánico	Adición de fosfato diamónico dosificado como fuente de P y N en la revegetación	- Dosis de fosfato diamónico aplicado a cada esqueje (Kg) - Número de esquejes translocados	Recuperación de cobertura vegetal
Revegetación sin fertilizantes	Revegetación simple sin adición de ningún tipo de fertilizante	Número de esquejes translocados	Recuperación de cobertura vegetal

Nota. Elaboración propia, 2023

CAPÍTULO IV

4. Materiales y métodos

4.1. Área de estudio

4.1.1. Ubicación geográfica

El área de estudio es la microcuenca de Piuray Ccorimarca, que alberga a la laguna de Piuray. Se encuentra ubicada políticamente en el distrito de Chinchero, provincia de Urubamba, Región Cusco, entre las coordenadas 13°25'10" latitud sur y 72°01'01" longitud oeste, y tiene una extensión de 42.57 km²; altitudinalmente se encuentra entre los 3575 y los 4550 msnm, como se muestra en la figura N°2 (Centro de Educación y Comunicación Guamán Poma de Ayala, 2013).

4.1.2. Aspectos socioeconómicos

4.1.2.1. Demografía

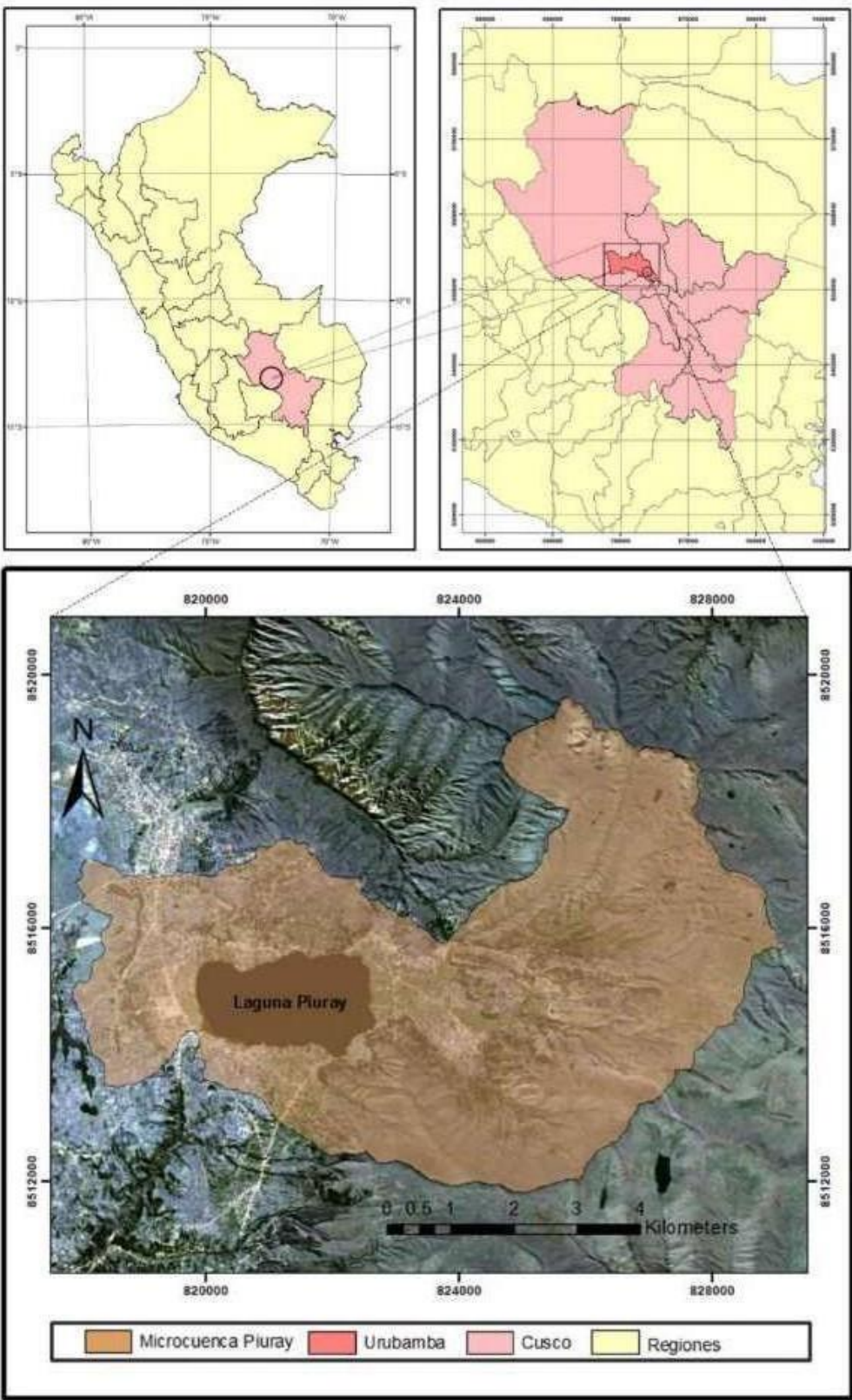
Según el Censo nacional de población, vivienda y comunidades indígenas del 2017 elaborado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), en el distrito de Chinchero habitan 11652 personas, de las cuales 7169 (61.52%) habitan en las zonas rurales. La mayor parte de la población se encuentra entre los grupos especiales de edad entre infantil y joven (54.09%) como se muestra en la tabla N°2. Entre las principales actividades económicas se encuentra la agricultura la ganadería y el turismo (INEI, 2017).

Tabla 2. Grupos especiales de edad del distrito de Chinchero

Población total por grupos especiales de edad en el distrito de Chinchero					
Grupo especial de edad	Infantil (0 - 14)	Joven (15- 29)	Adulta joven (30 - 44)	Adulta (45 - 59)	Adulta mayor (60 a más)
Porcentaje de la población (%)	28.27	25.82	20.15	14.78	10.98

Nota. Elaboración propia en base a datos del INEI (2017)

Figura 2. Ubicación geográfica de la microcuenca Piuray Ccorimarca

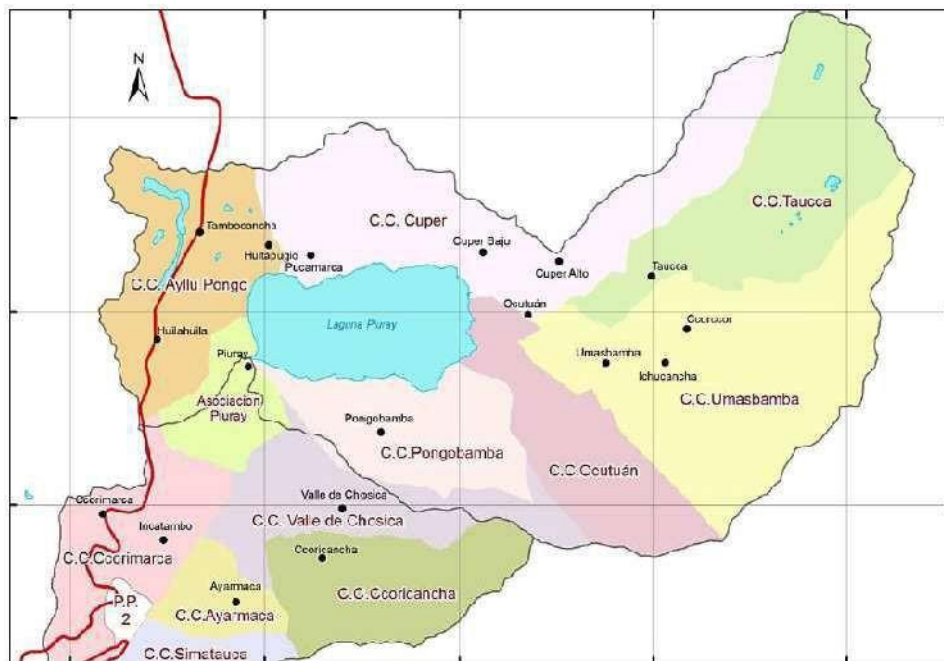


Nota. Elaboración propia

4.1.2.2. Comunidades

La microcuenca de Piuray Ccorimarca alberga a 11 comunidades, todas ellas ubicadas en las áreas circundantes a la laguna Piuray, que comprende el área rural del distrito de Chinchero. Estas comunidades son: Cuper Alto, Cuper Bajo, Pucamarca, Ccorccor, Huilahuila, Umasbamba, Pongobamba, Piuray, Ocutuán, Tauca y Huitapugio. Estos a su vez comprenden las comunidades campesinas de Tauca, Ayllupongo, Ocutuán, Huilahuila, Cuper, Pongobamba y Umasbamba, siendo esta última donde se realizará el estudio, como se muestra en la figura N°3 (Centro de Educación y Comunicación Guamán Poma de Ayala, 2013).

Figura 3. Mapa de las comunidades campesinas de la Microcuenca de Piuray Ccorimarca.



Nota. Extraído del Centro de Educación y Comunicación Guamán Poma de Ayala (2013)

4.1.3. Aspectos físicos

4.1.3.1. Geología

Las características geológicas de la microcuenca Piuray Ccorimarca muestran principalmente la presencia de rocas sedimentarias, y escasas rocas intrusivas, así como depósitos cuaternarios de origen glaciar, lacustre, eluviales, coluviales, y aluviales. Una

parte de las rocas presentes tiene características mecánicas consideradas malas, lo que las hace vulnerables ante la erosión, produciendo deslizamientos y cárcavas que conforman parte de la problemática de la microcuenca. No obstante, también existen rocas favorables como las pertenecientes a la formación de Kayra, que por sus características pueden ser explotadas como sal, yeso o material de construcción.

La microcuenca también posee fallas geológicas activas que tienen el potencial de producir sismos locales o regionales, por lo que se deben tener en cuenta en el momento de la construcción de obras de gran infraestructura y en la gestión de riesgo por parte de las autoridades (Centro de Educación y Comunicación Guamán Poma de Ayala, 2013).

4.1.3.2. Geomorfología

Como parte del relieve de la microcuenca Piuray Ccorimarca se reconocieron montañas, lomas, cerros, planicies y valles quebradas con sus laderas, todos estos relieves rodean la laguna Piuray. Resaltan las quebradas que nacen en las zonas con presencia de cárcavas y tienen su final en conos aluviales antiguos y recientes, formando aluviones. Estas unidades geomorfológicas han contribuido controlando los suelos y la cobertura vegetal, así como su uso actual (Centro de Educación y Comunicación Guamán Poma de Ayala, 2013).

4.1.3.3. Clima

Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) el clima de la microcuenca Piuray Ccorimarca se definió en base a los parámetros meteorológicos de temperatura, precipitación, humedad relativa, altitud y latitud (SENAMHI, 2021a); y al encontrarse a una altura por encima de los 3700 msnm presenta los climas de:

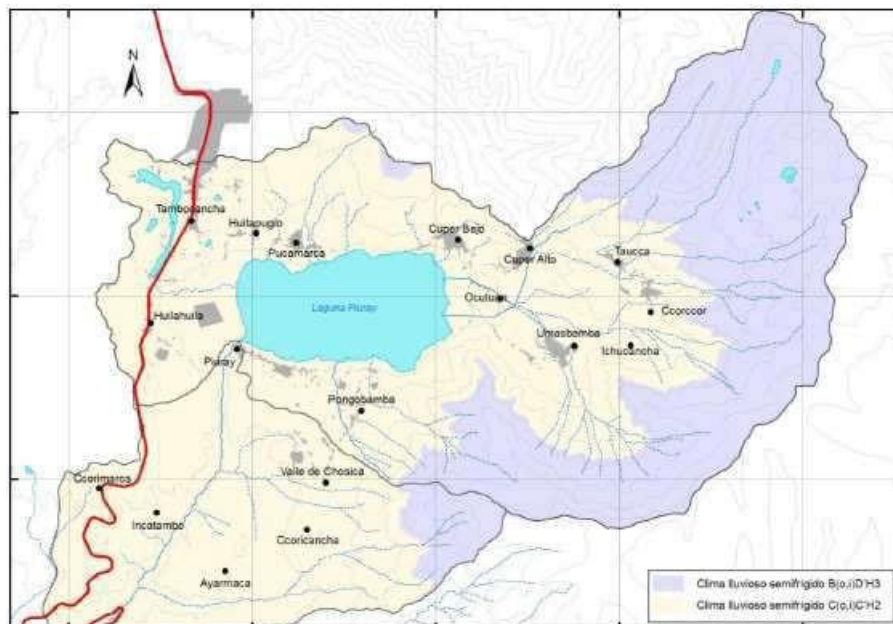
a. Clima lluvioso semifrío C (o,i) C´H2

Clima propio de altitudes entre los 3000 a 4000 msnm, con características semisecas con una humedad relativa catalogada como seca y con temperaturas consideradas frías. En la microcuenca Piuray Ccorimarca se encuentra en las partes bajas alrededor de la laguna como se muestra en la figura 4.

b. Clima lluvioso semifrío B (o,i) D'H3

Clima propio de altitudes entre los 4000 a 5000 con escasas precipitaciones en otoño e invierno y con una humedad relativa calificada como húmeda. En la microcuenca Piuray Ccorimarca se encuentra en la cabecera de la microcuenca como se muestra en la figura 4.

Figura 4. Mapa con los climas de la microcuenca Piuray Ccorimarca



Nota. Obtenido del Centro de Educación y Comunicación Guamán Poma de Ayala (2013)

Además, según el Centro de Educación y Comunicación Guamán Poma de Ayala (2013) la microcuenca Piuray Ccorimarca presenta los siguientes parámetros climatológicos:

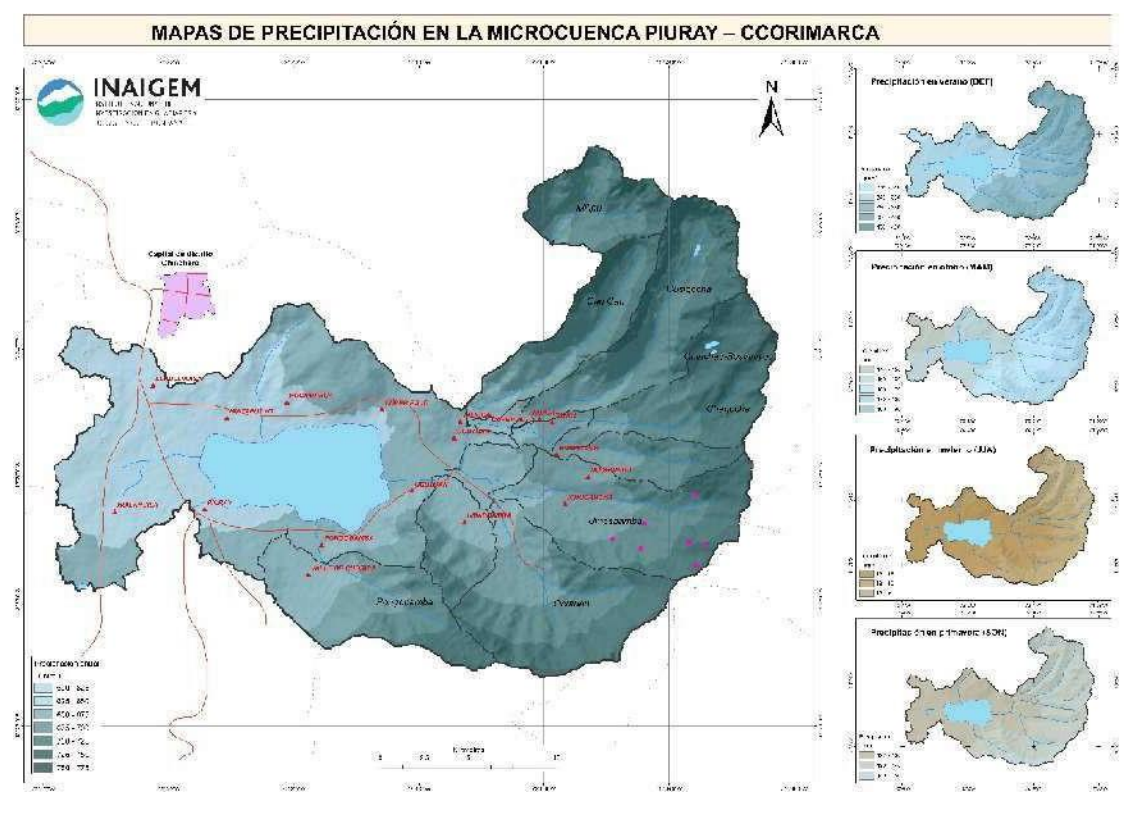
a. Precipitación

La precipitación en la microcuenca es más abundante entre los meses de noviembre hasta marzo y más escasa en los meses de mayo a agosto, con eventos acumulados mensuales que pueden superar los 700 mm en sus valores máximos, y ser casi inexistentes en los meses más secos. Las zonas de cabecera de cuenca tienden a presentar una mayor precipitación acumulada promedio que en la parte baja, como se muestra en la figura 5.

b. Temperatura

La temperatura media anual en la microcuenca Piuray Ccorimarca es de 8.66 °C y alcanza una temperatura máxima media anual de 9.75°C y una mínima media anual de 7 °C. Los valores máximos registrados oscilan entre los 21°C y los mínimos en 2.1°C.

Figura 5. Mapas de precipitación en cuatro estaciones de la microcuenca de Piuray Ccorimarca



Nota. Elaborado por INAIGEM

c. Humedad relativa

La humedad relativa media anual está estrechamente relacionada con la altura, teniendo al igual que la temperatura una relación inversamente proporcional a la altura, al alcanzar sus valores más altos en las zonas más bajas. La estacionalidad también es un factor influyente en los valores de la humedad relativa, presentando sus valores más altos en los meses de mayo a noviembre (73%) y los más bajos de diciembre a abril (68%) como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Humedad relativa mensual de la microcuenca Piuray Ccorimarca

Meses	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
H.R. (%)	74.4	80.8	73.7	73.6	70.8	72.7	69.4	71.1	70.6	69.2	73.5

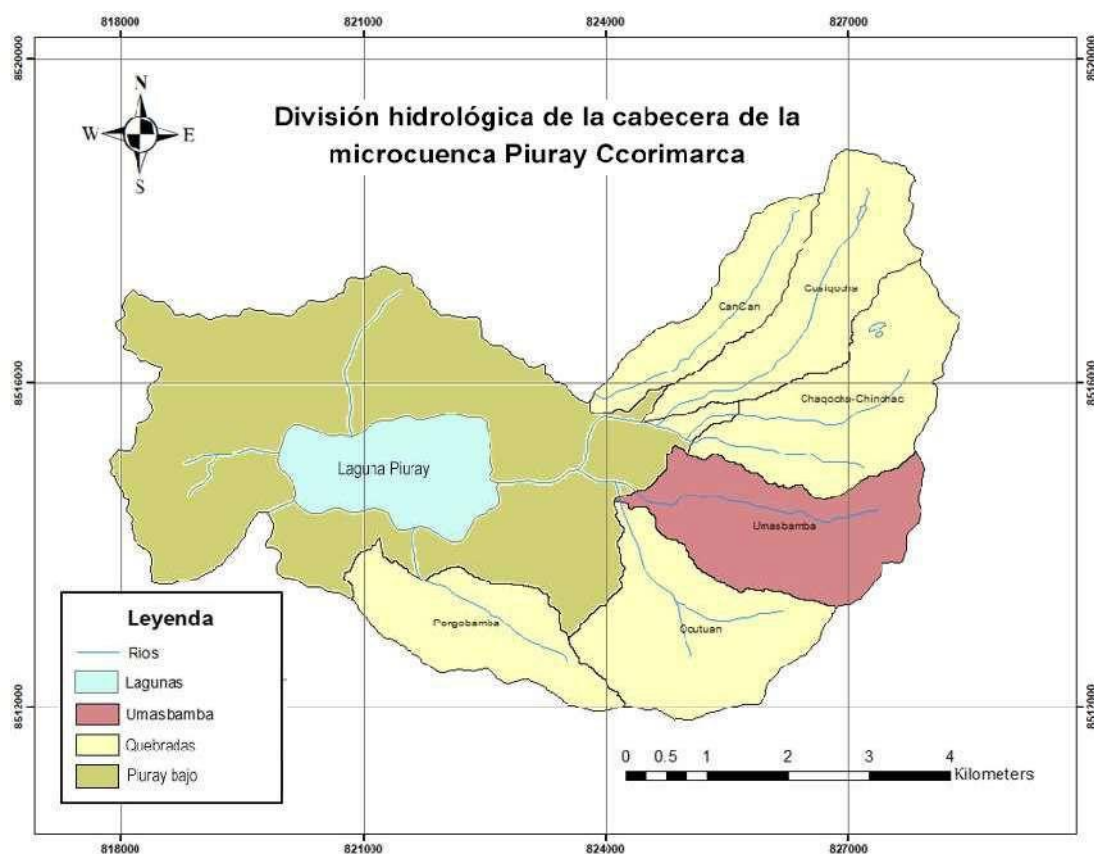
Nota. Obtenido del Centro de Educación y Comunicación Guamán Poma de Ayala (2013)

4.1.3.4. Hidrología

Según el Centro de Educación y Comunicación Guamán Poma de Ayala (2013) la microcuenca de la laguna de Piuray, como parte de sus principales fuentes de alimentación, tiene manantiales, lagunas, quebradas y ríos, alimentados por la precipitación estacional que cae en la zona y por la infiltración proveniente de la cabecera de la microcuenca. Hidrográficamente, la microcuenca pertenece a la parte alta del río Ccorimarca, cuyo origen radica en las cabeceras de la laguna Piuray sobre cotas que superan los 4000 msnm.

Con fines hidrológicos se dividió la parte alta de la microcuenca Piuray Ccorimarca en 6 cabeceras de acuerdo a la topografía y a un modelo de elevación, mostrándose las cabeceras de CanCan, Cusiqocha, Chaqocha-Chinchac, Ocutuan, Pongobamba y Umasbamba; siendo esta última nuestra área de estudio como se muestra en la figura 6.

Figura 6. División hidrológica de la cabecera de la microcuenca Piuray Ccorimarca



Nota. Elaboración propia

4.2. Diseño de investigación

El diseño de investigación de este trabajo es de tipo experimental puro de series cronológicas sin repetición de estímulos y de tipo descriptiva con diseño longitudinal.

La investigación de tipo experimental puro de series cronológicas sin repetición de estímulos hace referencia a aquella investigación que tiene un estricto control sobre sus grupos y la manipulación de variables. Se aplica un estímulo a un grupo experimental (parcelas de investigación) para posteriormente realizar varias mediciones a través del tiempo (humedad del suelo y desarrollo vegetal). Así mismo la investigación es descriptiva con diseño longitudinal debido a que se evaluarán las variables mediante mediciones periódicas y se describirán sus propiedades en base los estímulos aplicados.

4.3. Población y muestra

a. Población

Para el presente estudio se consideró como población al área comprendida en la parte alta de la comunidad de Umasbamba, en la cabecera de la microcuenca de Piuray Ccorimarca que tiene un área tributaria de 435.92 ha.

b. Muestra

Las muestras seleccionadas en este estudio son dos parcelas experimentales de 160 m² cada una, ubicadas en la parte alta de la comunidad de Umasbamba, cada una con tres subparcelas de 9 m² revegetadas con esquejes de *Festuca dolichophylla* y una subparcela de control fuera de la parcela experimental.

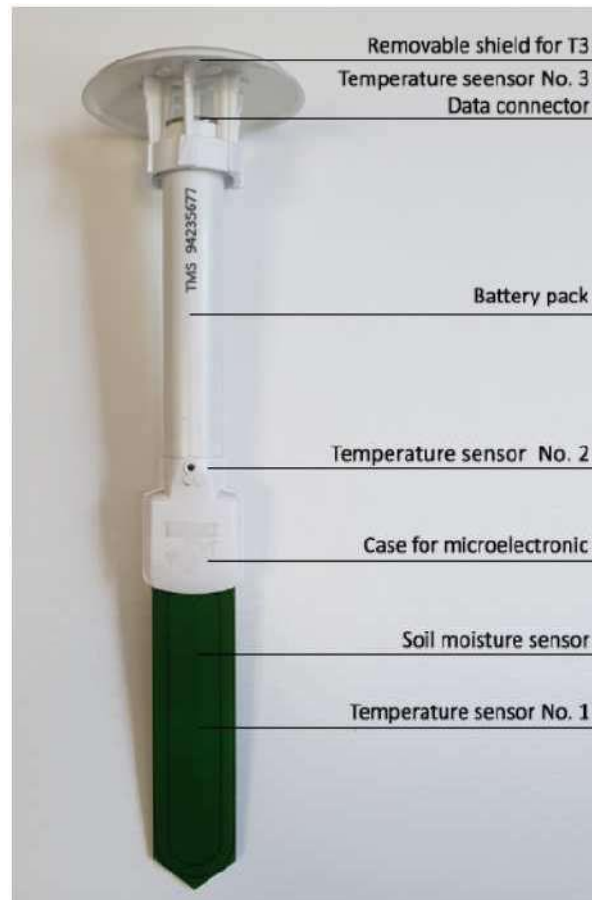
4.4. Procedimiento, técnicas e instrumentos de recolección de información

4.4.1. Instrumentos

4.4.1.1. Registrador de datos TMS4

Es un registrador de datos que mide la temperatura del aire y del suelo a tres niveles de altura, además de la humedad volumétrica del suelo a 10 cm de profundidad en una amplia gama de condiciones de campo, el registro de datos en campo se puede realizar en un intervalo de tiempo de 15 minutos, proporcionando datos fiables a largo plazo según Wild *et al.* (2019). El proceso de calibración de este equipo realizado por el fabricante (TOMST Ltd) y se muestra en el anexo 7.

Figura 7. Características del sensor TMS4



Nota. Obtenido del sitio web del fabricante TOMST (2022)

4.4.1.2. Pluviómetro HOBO con registrador de datos

Es un sistema de registro y almacenamiento de datos de precipitación con un registrador de datos marca Onset HOBO, que mide la precipitación por eventos desde 0.2mm, y la temperatura ambiental a una altura de 1.5 m cada 15 minutos. Este equipo fue calibrado

por ultima vez el 04/07/2023 por el laboratorio de meteorología “DMEDIA” como se detalla en el anexo 7

Figura 8. Estructura del pluviómetro HOBO con registrador de datos



Nota. Fotografía propia

4.4.2. Softwares

4.4.2.1. Lolly 1.32

Es un software diseñado para los dataloggers TMS4, que permite controlar los registradores de datos, además de recopilar y dar una evaluación rápida a los datos recolectados (temperatura del aire y suelo, humedad del suelo), TOMST (2022).

4.4.2.2. HOBOWare

Es un software de control para los registradores de datos Onset HOB0, que permite ver, graficar y analizar los datos registrados por los sensores (Onsetcomp, 2022).

4.4.2.3. Microsoft Excel

Es una hoja de cálculo desarrollada por Microsoft para Windows donde se ordenará los datos registrados por los sensores, para posteriormente elaborarse gráficos de la evolución de los parámetros a lo largo del tiempo.

4.4.2.4. R Studio

Es un entorno de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) dedicado al lenguaje de programación R utilizado para el análisis estadístico y la visualización de datos.

4.4.2.5. ETo Calculator

Es un software libre desarrollado por la División de Tierras y Aguas de la FAO, y sirva para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) a partir de datos meteorológicos utilizando la ecuación FAO Penmmman-Monteith (FAO, 2023).

4.4.2.6. Google Colab

Es una herramienta desarrollada por Google para la creación de Inteligencia Artificial (IA) y procesamiento de datos, que permite la utilización de GPU (unidad de procesamiento gráfico) y TPU (unidad de procesamiento tensorial) mediante el lenguaje de programación en Python.

4.4.3. Instalaciones

4.4.3.1. Selección del área de estudio

Para la determinación del área donde se establecieron las parcelas experimentales, se tomó en cuenta las áreas definidas por INAIGEM en el marco del “Estudio de evaluación de prácticas de recuperación de servicios ecosistémicos en un año hidrológico en parcelas experimentales de la microcuenca Piuray Ccorimarca” realizado en el año 2021. Para la selección del área de estudio se consideraron principalmente tres condiciones de similitud (INAIGEM, 2021), las cuales son:

a. Representatividad fisiográfica entre las cabeceras de la microcuenca de Piuray Ccorimarca.

La microcuenca de Piuray Ccorimarca está compuesta por 14 cabeceras, de las cuales 9 son consideradas como esenciales para el servicio ecosistémico de regulación hídrica. Estas 9 cabeceras comparten un mismo rango altitudinal que va desde 3800 a 4200 m.s.n.m. y la mayoría tiene un rango de pendiente entre 0 y 25 grados. Por ello, se determinó que el área de estudio debe encontrarse entre estas 9 cabeceras.

b. Estado de cobertura vegetal en las cabeceras de la microcuenca de Piuray Ccorimarca.

La pérdida de cobertura vegetal es uno de los factores que influyen en la reducción de los caudales de la microcuenca de Piuray Ccorimarca, por lo que resulta necesario escoger un área de estudio que presente degradación en su cobertura vegetal para poder evaluar la efectividad de las intervenciones. En este sentido se realizó un Análisis de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) para determinar de manera cualitativa que cabeceras presentan los valores más bajos de NDVI y por lo tanto una cobertura vegetal más degradada.

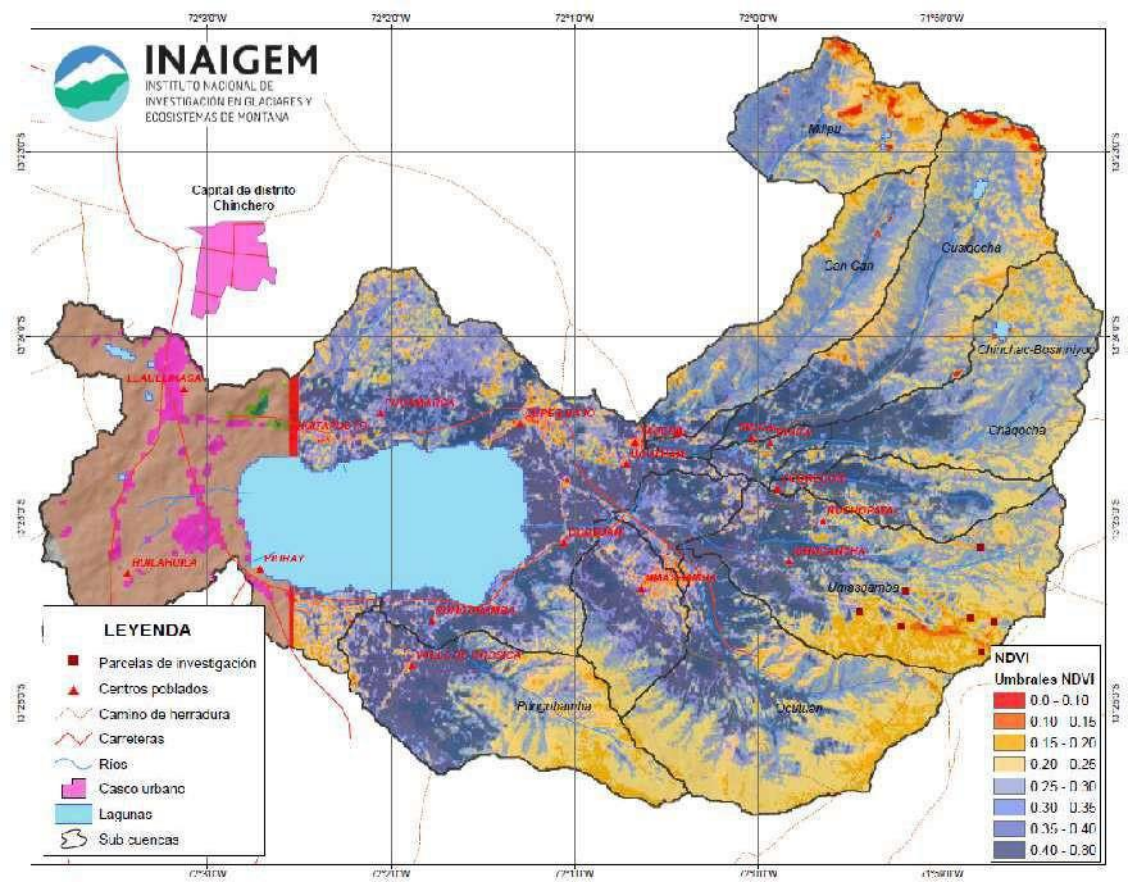
El resultado del análisis mostró que las cabeceras de Pongobamba, Ocutuan, Umasbamba y Chinchabosinnyoc presentaban como valor dominante de NDVI de 0.4 (el más bajo entre las cabeceras) como se muestra en la figura N°9, dejando estas 4 cabeceras como posibles candidatas para establecer el área de estudio.

c. Contribución de las cabeceras de la microcuenca de Piuray Ccorimarca a la regulación y recarga hídrica.

Para determinar que cabecera tiene el mayor aporte a la regulación y recarga hídrica, se tomó como base la relación positiva que existe entre el tamaño del área tributaria y el aporte de esta al caudal. En ese sentido, la cabecera que presenta una mayor área tributaria

es Umasbamba con 435.92 ha como se muestra en la tabla 4, por lo que resulta más favorable su selección como área de estudio.

Figura 9. Análisis NDVI de las cabeceras de la microcuenca Piuray Ccorimarca



Nota. Elaborado por INAIGEM

Tabla 4. Cabeceras de la microcuenca de Piuray Ccorimarca con su respectiva área tributaria

Comunidad	Cabeceras	Area tributaria (ha)
Umasbamba	Umasbamba	435.92
Tauca	Cusicocha	292.79
Ocutuan	Occotuan	279.17
Cuper	Millpu	222.47
Pongobamba	Pongobamba	182.04
Umasbamba	Ccopipata	159.60
Cuper	Can Can	146.68
Umasbamba	Chaqocha	141.24

Nota. Elaboración propia en base a datos de SEDACUSCO (2017)

Bajo los criterios mencionados líneas arriba, se definió a la cabecera de Umasbamba como el área de estudio más idónea para el establecimiento de las parcelas experimentales.

4.4.3.2. Determinación de la ubicación de las parcelas experimentales

Ahora bien, para seleccionar los lugares donde se establecieron las parcelas experimentales se consideraron 3 criterios:

a. Condiciones de la cobertura vegetal

Se elaboró un NDVI para la cabecera de Umasbamba y se seleccionaron aquellas zonas que presentaban una cobertura con algún tipo de degradación (valores de NDVI inferiores a 0.14) de tal forma que se puedan evidenciar los efectos de los tratamientos aplicados en las parcelas.

b. Condiciones de los rangos de las pendientes

Se seleccionaron las zonas con un rango de pendientes que sean representativas para la cabecera de Umasbamba, y que no impliquen un riesgo para las actividades de translocación y monitoreo ($<20^\circ$).

c. Condiciones de acceso al área de intervención

Por la misma naturaleza de los experimentos y la necesidad de un complejo trabajo logístico y un continuo monitoreo, era necesario que las zonas donde se establecerían las parcelas experimentales se encuentren accesibles a través de las trochas carrozables de la cabecera de Umasbamba, por lo que se consideró solo a aquellas áreas cercanas a la trocha.

Así, tomando en cuenta los tres criterios, se seleccionaron 6 ubicaciones para la instalación de las parcelas experimentales, como se muestra en la tabla N°5, todas con

diferentes altitudes y cobertura vegetal. En todas ellas se realizaron análisis de suelos y de vegetación.

Además, en cada ubicación se construyeron cercas con alambre de púas bordeando las parcelas y se instalaron 48 sensores TMS4 y 3 sensores HOBO en la parte baja, media y alta de la cabecera. En todas las parcelas se realizó un monitoreo periódico de humedad volumétrica del suelo, precipitación y cobertura vegetal por un periodo de aproximadamente 1 año. Tras el periodo de evaluación, se seleccionaron dos parcelas experimentales (P01 y P03) para el presente trabajo, por ser las parcelas que mostraron datos más homogéneos durante todo el periodo de evaluación. También se seleccionaron dos pluviómetros HOBO para este estudio, debido a su cercanía a las parcelas P01 y P03.

Tabla 5. Ubicación geográfica de las parcelas seleccionadas.

Parcela	Coordenadas	
	UTM x	UTM y
P01	176548	8514109
P02	176507	8513754
P03	177187	8513844
P04	177296	8513523
P05	177423	8513799
P06	177272	8514541

Nota. Obtenido de INAIGEM (2022)

Tabla 6. Ubicación de las estaciones pluviométricas HOBO

Pluviómetro HOBO	Altura (msnm)	Coordenadas	
		UTM x	UTM y
Parte baja	4008	176563	8514126
Parte media	4148	176987	8513805

Nota. Obtenido de INAIGEM (2022)

Figura 10. Ubicación de las parcelas experimentales P01 y P03 y pluviómetros HOBO



Nota. Elaboración propia con Google Earth Pro

4.4.3.3. Caracterización de las parcelas experimentales

a. Análisis de suelos

En cada parcela experimental como parte de la línea base general, se realizó un análisis de suelo en el Laboratorio de Análisis Químico, Físico de Suelos Aguas y Plantas de Cusco que incluía análisis de fertilidad, caracterización físico-mecánica, entre otros como se muestra en la tabla N°7.

Tabla 7. Resultados del análisis de suelos de las parcelas 01 y 03

Parámetro	Unidad	Valor
Parcela 01		
Conductividad hidráulica (k)	cm/s	0.0002884
Conductividad eléctrica (CE)	mmhos/cm	0.04
pH	-	5.8
CaCO ₃	%	0
Materia orgánica	%	4.41
N total	%	0.22
Fosforo disponible (P ₂ O ₅)	ppm	16.1
Potasio soluble (K ₂ O)	ppm	258

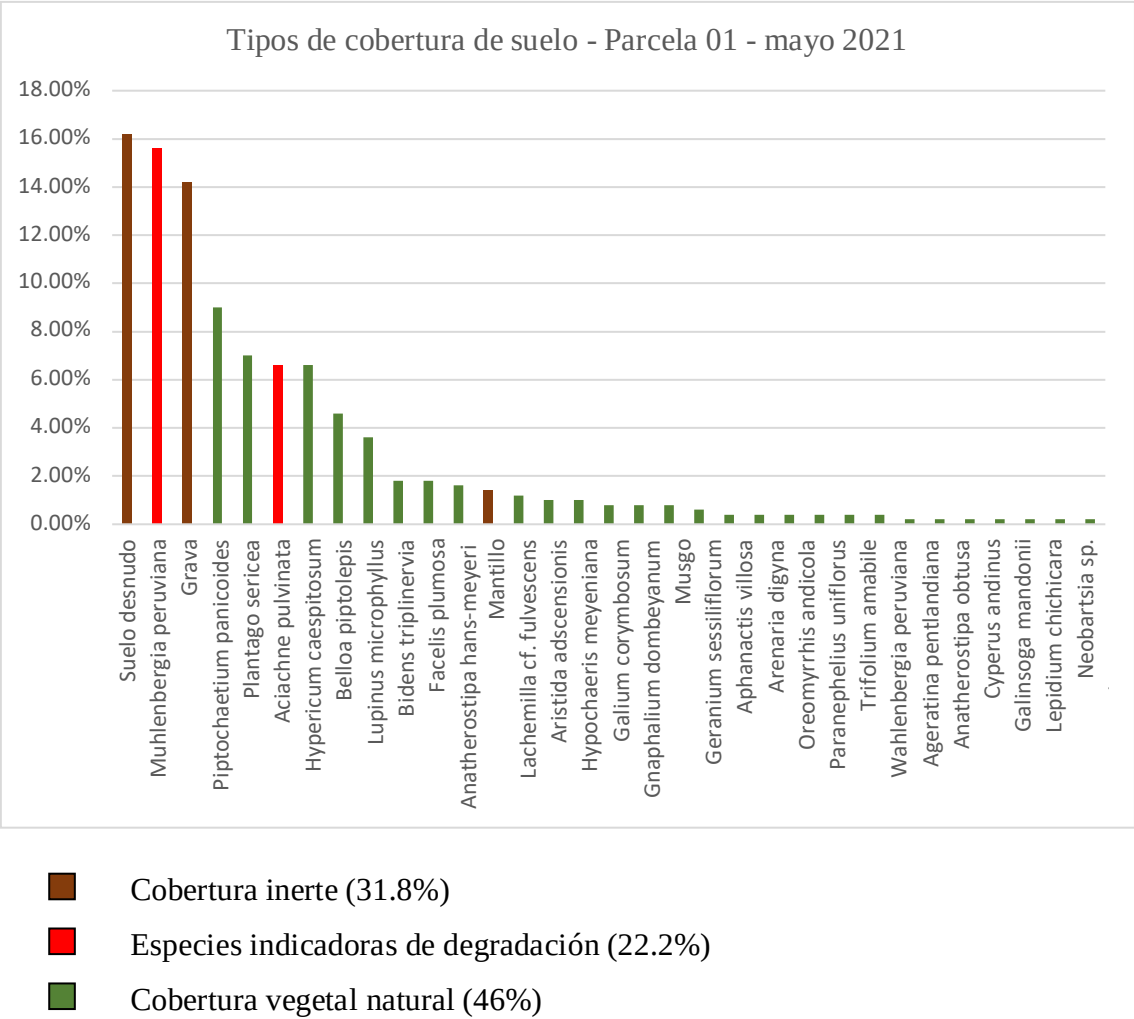
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	meq/100	9.45
Análisis mecánico - arena	%	53
Análisis mecánico - limo	%	32
Análisis mecánico - arcilla	%	15
Análisis mecánico – clase textural	-	Franco-arenoso
Densidad aparente	g/cm ³	1.10
Porosidad	%	45.63
Parcela 03		
Conductividad hidráulica (k)	cm/s	0.0003053
Conductividad eléctrica (CE)	mmhos/cm	0.02
pH	-	5.3
CaCO ₃	%	0
Materia orgánica	%	5.38
N total	%	0.27
Fosforo disponible (P ₂ O ₅)	ppm	13.6
Potasio soluble (K ₂ O)	Ppm	224
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	meq/100	6.97
Análisis mecánico - arena	%	57
Análisis mecánico - limo	%	35
Análisis mecánico - arcilla	%	8
Análisis mecánico – clase textural	-	Franco-arenoso
Densidad aparente	g/cm ³	1.10
Porosidad	%	46

Nota. Elaboración propia en base a los datos del Laboratorio de Análisis Químico, Físico de Suelos Aguas y Plantas de Cusco

b. Análisis de coberturas del suelo

Adicionalmente en cada parcela se realizaron 4 análisis de cobertura del suelo con plots de vegetación de 1x1m registrando datos del tipo de cobertura del suelo (%) incluyendo suelo desnudo, cobertura vegetal por especie, fragmentos de roca, musgo, mantillo, entre otros como se muestra en las figuras 11 y 12.

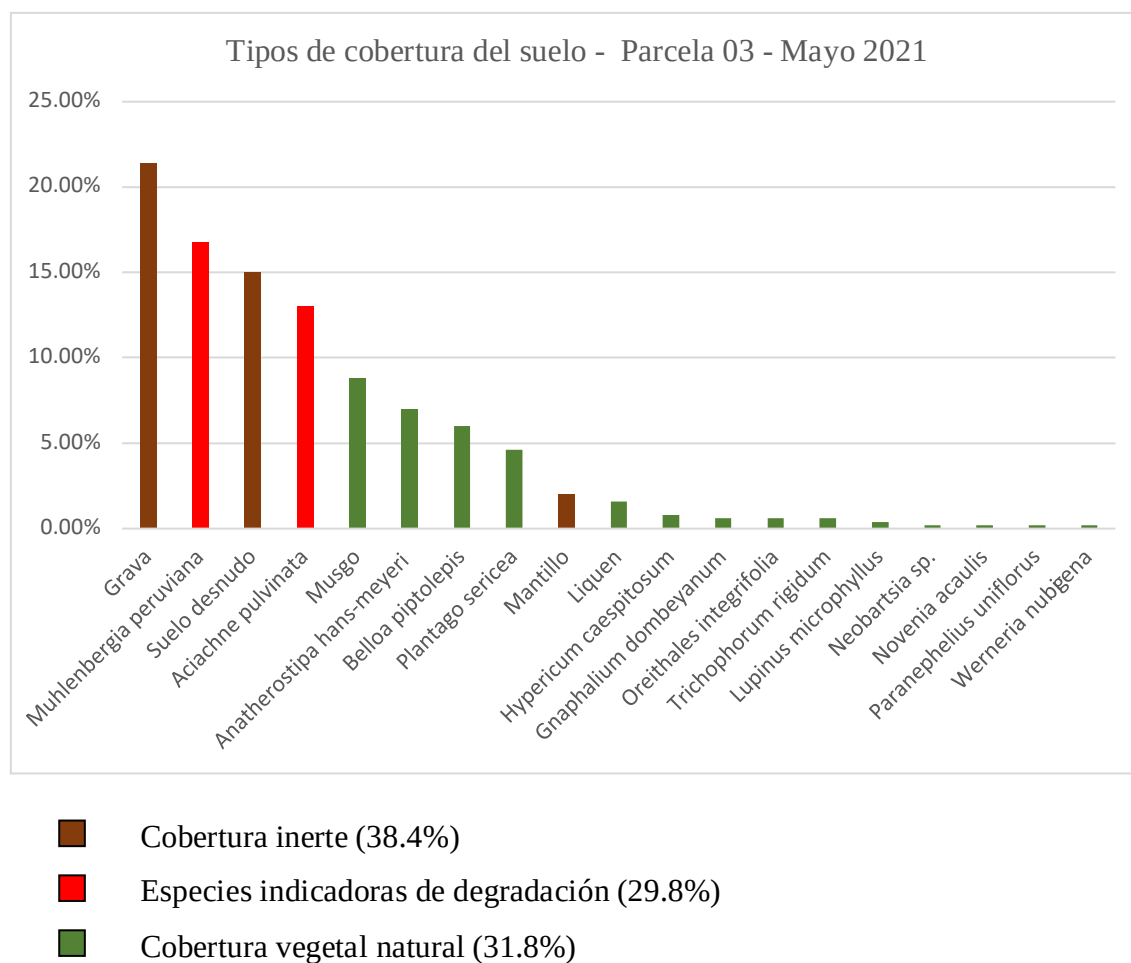
Figura 11. Tipos de cobertura de la parcela 01 obtenidas en la evaluación de línea base de mayo de 2021



Nota. Elaboración propia en base a datos de INAIGEM (2022)

Se evidencia, según la evaluación diagnóstico de tipos de cobertura vegetal, que la parcela P01 se encuentra con una cobertura vegetal degradada, al tener más del 50% de su cobertura entre especies indicadoras de degradación y elementos inertes, lo que amerita una intervención para la restauración de la cobertura del suelo.

Figura 12. Tipos de cobertura de la parcela 03 obtenidas en la evaluación de línea base de mayo de 2021



Nota. Elaboración propia en base a datos de INAIGEM (2022)

Según la evaluación de tipos de cobertura vegetal de la parcela P03, más del 60% corresponde a coberturas inertes o de especies indicadoras de degradación, por lo que se entendería que se trata de una cobertura de suelo degradada, en tal sentido es justificada una intervención para la recuperación de cobertura vegetal.

4.4.4. Tratamientos experimentales

4.4.4.1. Selección de especie para la revegetación

Se consideró la utilización de la especie pajonal de *Festuca dolichophylla*, por ser una de las especies más abundantes de poáceas encontradas en las cuatro evaluaciones de

vegetación realizadas para todas las parcelas desde el año 2021 (INAIGEM, 2022), también es una especie capaz de prosperar en condiciones ambientales adversas como sequías, temperaturas extremas y suelos escasos en nutrientes (Eduardo *et al.*, 2024).

Además, es una de las especies con mayores experiencias positivas en revegetación de ecosistemas altoandinos mostrando altos niveles de sobrevivencia (Paucar *et al.*, 2023), desarrollo vegetal (Trillo *et al.*, 2020a), asimilación positiva de nutrientes N, P y K (Trillo *et al.*, 2020b) e incluso favoreciendo la reducción de especies indicadoras de degradación (Paucar, 2019).

Los esquejes de *Festuca dolichophylla* para las translocaciones provinieron de áreas circundantes a las parcelas experimentales, de lugares con condiciones ambientales semejantes al de las parcelas experimentales.

Los esquejes tenían un diámetro aproximado de 5 cm, y se extrajeron de las macollas separando las pajas. Antes de ser plantados, recibieron un corte de uniformización dejando 5 cm en las raíces y 15 cm de altura.

4.4.4.2. Selección de tratamientos

La revegetación con esquejes de *Festuca dolichophylla* se realizó utilizando distintas técnicas en base a experiencias previas que abordaron la revegetación con especies de pajonales. Por un lado, tomando en cuenta que en la investigación de Tácuna *et al.* (2015) se obtuvieron resultados positivos con el uso de un fertilizante orgánico, un primer tratamiento consideró la adición de estiércol de bovino (fertilizante orgánico) como fuente de nutrientes (N, P y K). Por otro lado, tomando como referencia los resultados beneficiosos obtenidos en la investigación de García (2015), un segundo tratamiento consideró fosfato diamónico (fertilizante inorgánico) como fuente de (N y P). Finalmente, para tener una fuente de control respecto a las translocaciones con los tratamientos que involucran el uso de fertilizantes, se plantaron esquejes sin ningún fertilizante, los cuales fueron monitoreados con los mismos parámetros, en el mismo periodo de tiempo.

A continuación, se describirán las características de cada fertilizante seleccionado:

a. Fertilizante orgánico (estiércol de bovino)

Para el presente estudio, se consideró la utilización de estiércol de bovino madurado como fertilizante orgánico, puesto que es uno de los fertilizantes más utilizados por las comunidades que habitan en la microcuenca Piuray Ccorimarca. Para conocer la composición de nutrientes del estiércol, se realizó un análisis en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Agua y Fertilizantes (LASPAF) de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) cuyos resultados se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Características fisicoquímicas del estiércol de bovino

Análisis de nutrientes – estiércol de bovino		
Parámetros	Unidad	Valor
pH		7.65
Conductividad eléctrica (C.E.)	dS/m	4.13
Materia orgánica	%	61.31
N	%	2.25
P ₂ O ₅	%	0.57
K ₂ O	%	1.32
CaO	%	2.52
MgO	%	1.05
Hd	%	38.24
Na	%	0.04

Nota. Elaboración propia en base a datos del LASPAF de la UNALM.

b. Fertilizante inorgánico (fosfato diamónico)

Para el fertilizante químico se consideró uno que sea de fácil acceso a través de compra en tiendas de productos agroquímicos, por lo que se escogió el fosfato diamónico ((NH₄)₂HPO₄). Además de ser uno de los más usados y accesibles, presenta una composición química conocida que satisfacía los requerimientos de nutrientes para las translocaciones en las parcelas experimentales.

Tabla 9. Composición de nutrientes del fosfato diamónico

Fuente	Nutrientes (%)		
	N	P₂O	K₂O
Fosfato diamónico	18	46	-

Nota. Elaboración propia en base a datos del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) (2011)

4.4.4.3. Dosificación de fertilizantes

Para determinar la cantidad necesaria de fertilizante a aplicar en cada parcela, se utilizó el manual de nutrición de Sánchez (s.f.) y los valores recomendados de N, P y K para pasturas andinas según el INIA (2011), además de los valores de nutrientes del suelo de cada parcela obtenidos previamente. La dosis necesaria para cada parcela se muestra en la tabla N°10.

Tabla 10. Dosificación del fertilizante para cada parcela

Nutriente	Dosificación
Parcela 01	
N	37.5Kg/Ha
P ₂ O	229.16Kg/Ha
K ₂ O	No se requiere
Parcela 02	
N	37.5Kg/Ha
P ₂ O	240.16Kg/Ha
K ₂ O	No se requiere

Nota. Elaboración propia

Tabla 11. Cantidad en Kg de fertilizante por parcela según el contenido de nutrientes.

Fertilizante	Cantidad necesaria (Kg)	
	Parcela 01	Parcela 03
Estiércol de bovino madurado	36.14Kg	37.89Kg
Fosfato diamónico	0.448Kg	0.469Kg

Nota. Elaboración propia

4.4.5. Descripción del experimento

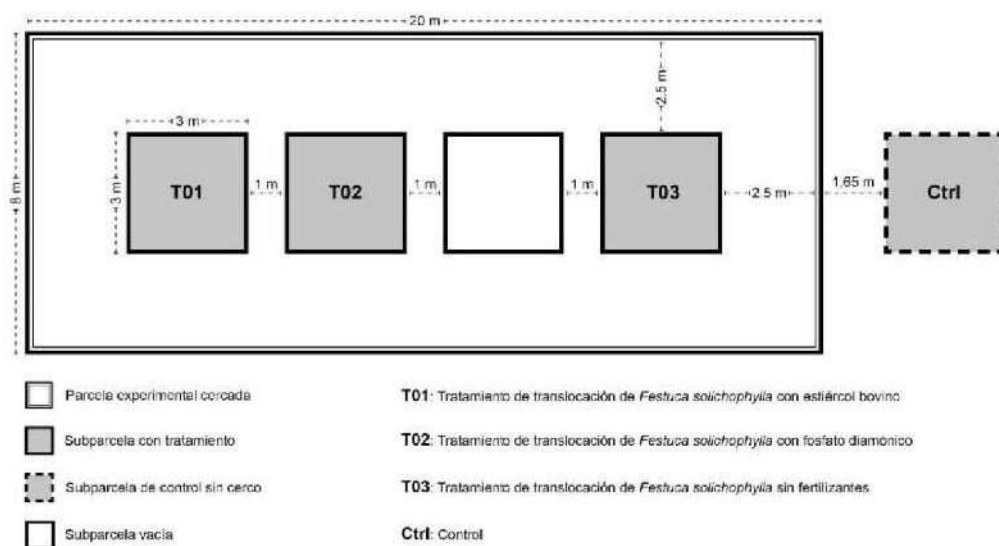
4.4.5.1. Unidades experimentales

Se establecieron 2 parcelas experimentales cercadas, Parcela 01 y Parcela 03 ambas con un área de 160 m² (20 m x 8 m) donde se aplicaron tres tratamientos diferentes y un control fuera del área de la parcela, distribuidos en subparcelas de 3 m x 3 m de la siguiente manera

- T01: Cerco y translocación de *Festuca dolichophylla* con abono orgánico (estiércol de bovino madurado).
- T02: Cerco y translocación de *Festuca dolichophylla* con abono inorgánico (fosfato diamónico)
- T03: Cerco y translocación de *Festuca dolichophylla* sin ningún abono.
- Ctrl: Control.

Las subparcelas están ubicadas a más de 1 m de distancia de la cerca para evitar el efecto borde. En ambas parcelas se aplicaron los mismos tratamientos conformando dos repeticiones.

Figura 13. Diseño experimental de las parcelas de investigación



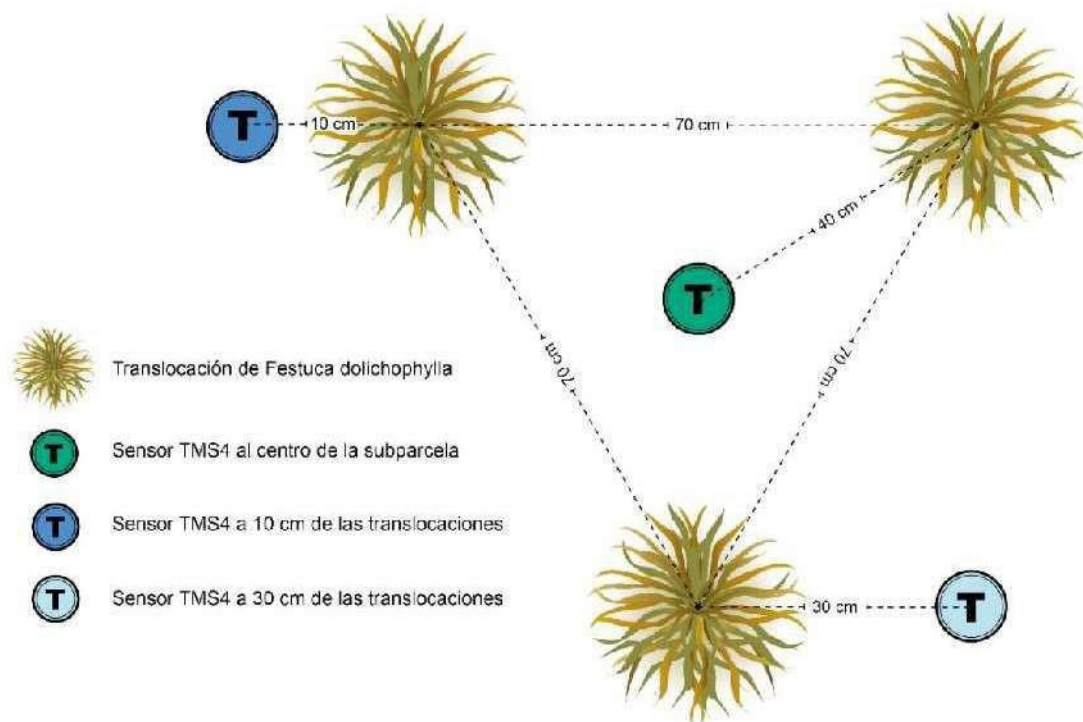
Nota. Elaboración propia

La distribución de las macollas de *Festuca dolichophylla* fue bajo la técnica a distancia de tresbolillo, es decir las translocaciones están separadas 0.7 m una de otra conformando un triángulo equilátero, esta técnica de plantación permite dar labores de cultivo en tres direcciones, lo que reduce el riesgo de dejar el terreno desnivelado y por lo tanto reduce

la erosión (Carbo & Vidal, 1978), esto es favorable en terrenos con altos niveles de degradación como las parcelas experimentales.

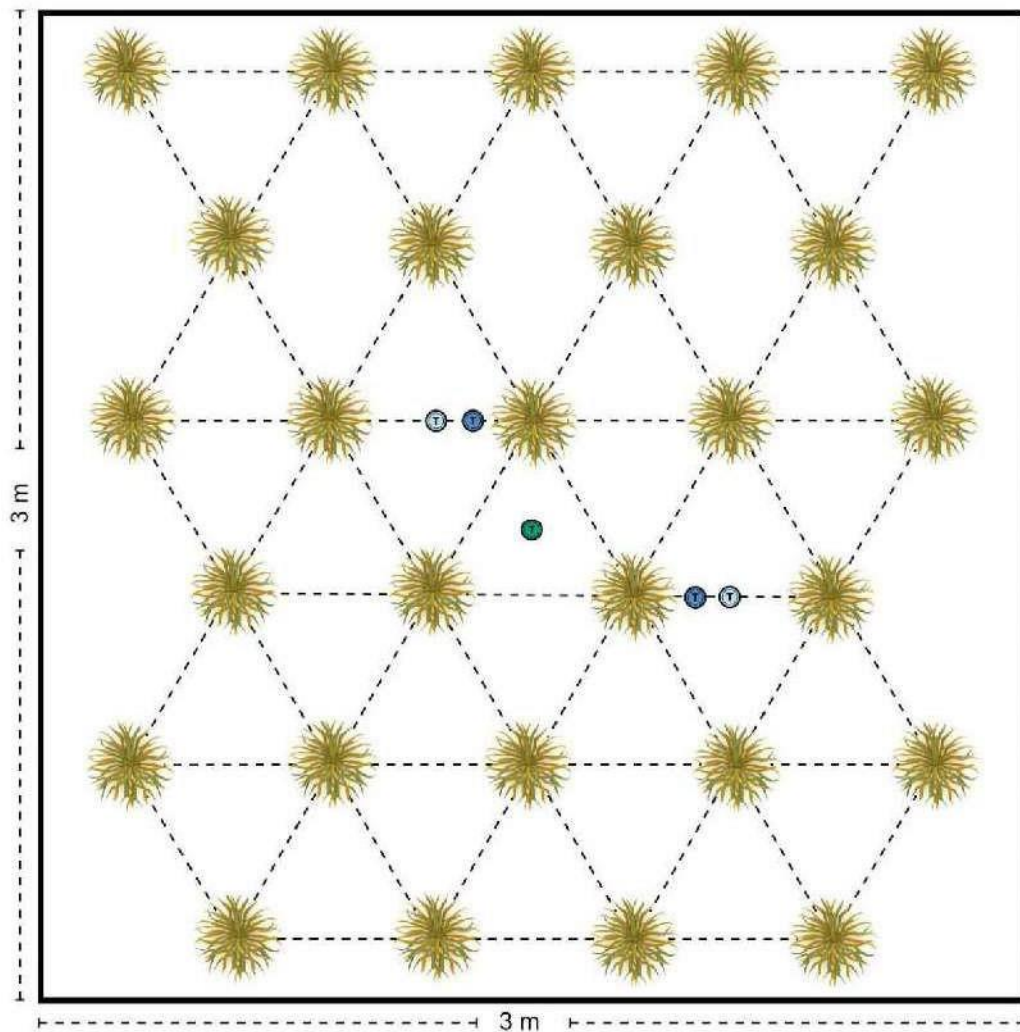
Se utilizaron 27 macollas por subparcela y 81 por parcela. Inicialmente se instaló un sensor en el espacio de cada tratamiento en el año 2021, a fin de caracterizar la humedad del suelo de manera histórica antes de iniciar los tratamientos. Ya iniciado los experimentos en 2023, se ubicaron 5 sensores TMS4 por cada subparcela, ubicados equidistantemente de las macollas translocadas, 2 sensores a 10 cm y 2 sensores a 30 cm. También se ubicó un sensor justo en el centro de la subparcela, como se muestra en la figura N°14.

Figura 14. Distanciamiento de los sensores TMS4 de las translocaciones.



Nota. Elaboración propia

Figura 15. Distribución de las translocaciones y los sensores TOMST por subparcela



Nota. Elaboración propia

4.4.6. Recolección, procesamiento y análisis de datos

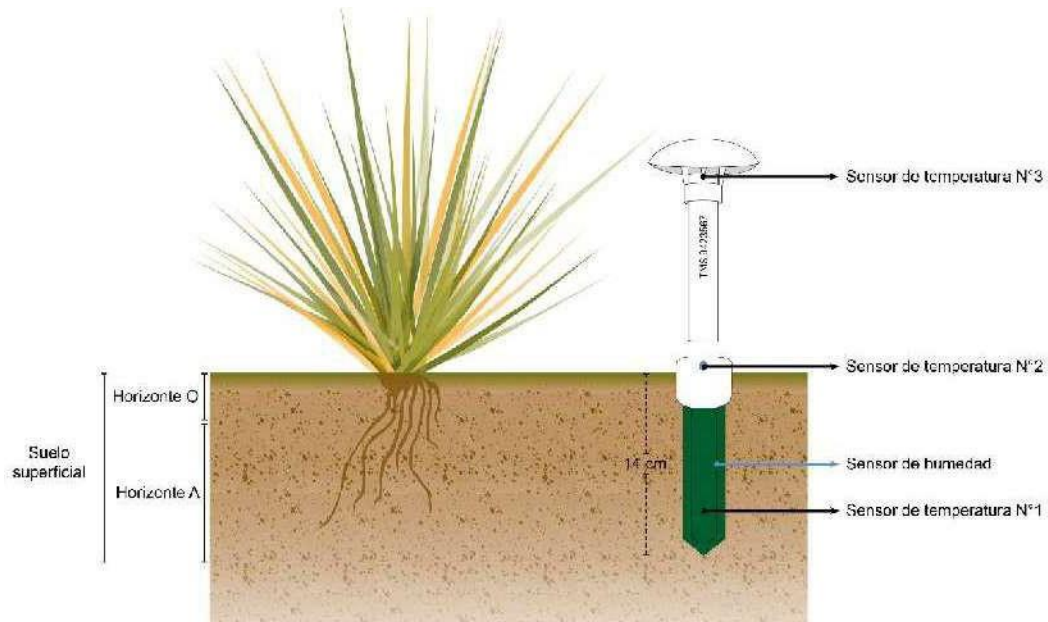
4.4.6.1. Recolección de información

a. Datos de humedad superficial del suelo

La humedad del suelo fue registrada por los sensores TMS4 instalados en cada parcela, con una frecuencia de registro cada 15 minutos a una profundidad de 10 cm. Los datos fueron recolectados periódicamente en campo utilizando el software Lolly 1.32 y procesados en gabinete con la herramienta TMS3calibr1-11 en Excel, proporcionada por el fabricante de los sensores TMS4. Así, se obtuvieron valores de humedad volumétrica

del suelo de acuerdo a una curva de calibración en base a la clase textural y densidad aparente del suelo.

Figura 16. Sensor TMS4 instalado en el área de estudio



Nota. Elaboración propia

b. Datos de precipitación

La precipitación fue registrada por los dos pluviómetros HOBO desde eventos de 0.2 mm instalados desde el año 2021. Los datos fueron recolectados en campo de manera periódica utilizando el software HOBOWare, el cual también sirvió para ordenarlos y exportarlos a una hoja de cálculo en Excel.

c. Datos de temperatura

La temperatura (C°) fue medida por el sensor TMS4 a 3 niveles de profundidad (+15, 0 y -8 cm) del suelo. Adicionalmente se registró la temperatura del aire a 1.5 m de altura por el recolector de datos del pluviómetro HOBO, ambos sensores registraron la temperatura en un intervalo de tiempo de 15 minutos y sus datos fueron recolectados en campo de manera periódica.

d. Datos de vegetación

La evaluación del desarrollo vegetal se llevó a cabo en aquellos esquejes que sobrevivieron a la translocación, los cuales fueron monitoreados periódicamente en vigor y mortalidad.

4.4.6.2. Procesamiento de datos

Debido a la gran cantidad de datos recolectados por varios equipos, se utilizó un código en Python utilizando Google Colab para filtrar y reconocer datos erróneos. Este código detectaba y eliminaba datos y fechas repetidas, así como identificaba y corregía datos vacíos o incorrectos.

Asimismo, se utilizó el manual técnico MT-DRD-003 de control de calidad automático de datos de estaciones meteorológicas convencionales en el centro de procesamiento de datos del SENAMHI (SENAMHI, 2021b), para evaluar los datos de precipitación y temperatura; y las recomendaciones formuladas por Wild *et al.* (2019), para los datos de humedad volumétrica del suelo. Los rangos de valores considerados buenos y aceptables para los diferentes parámetros se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Rangos aceptables para los parámetros de precipitación, temperatura y humedad volumétrica

Parámetro	Rangos aceptables
Precipitación (mm)	$0.0 \leq pp \leq 560$
Temperatura (°C)	$-30 \leq T^{\circ} \leq 45$
Humedad volumétrica (%)	$0.0 \leq Hvol \leq 50$

Nota. Elaboración propia con (SENAMHI, 2021b) y (Wild *et al.*, 2019)

Es importante mencionar que al tener más de un equipo midiendo los mismos parámetros en un mismo espacio y tiempo, los datos deberían ser meteorológicamente compatibles entre sí, de lo contrario pueden ser considerados dudosos o malos (SENAMHI, 2021b). Por ellos, se desarrollaron regresiones lineales entre los grupos de datos con el mismo parámetro para verificar su compatibilidad y su idoneidad para la investigación.

Las ecuaciones de regresión obtenidas de los grupos de datos evaluados sirvieron para completar los datos faltantes o erróneos encontrados con el código en Python.

4.4.6.3. Análisis de información

a. Balance hídrico del suelo

Según Segura (2017) podemos entender como modelo de balance hídrico de cuenca a aquel proceso mediante el cual los flujos y los cambios en el almacenamiento se equilibran en una cuenca hidrológica. El cálculo de este balance se puede realizar a cualquier escala de tiempo (horas a años) y a cualquier escala espacial (parcelas a cuencas grandes) de donde se tenga conocimiento de los flujos y cambios de almacenamiento. La ecuación para el balance hídrico en cuenca es la siguiente:

$$P - ETR - ES - \Delta\theta - Per = \mu$$

Donde:

P: precipitación

ETR: evapotranspiración real

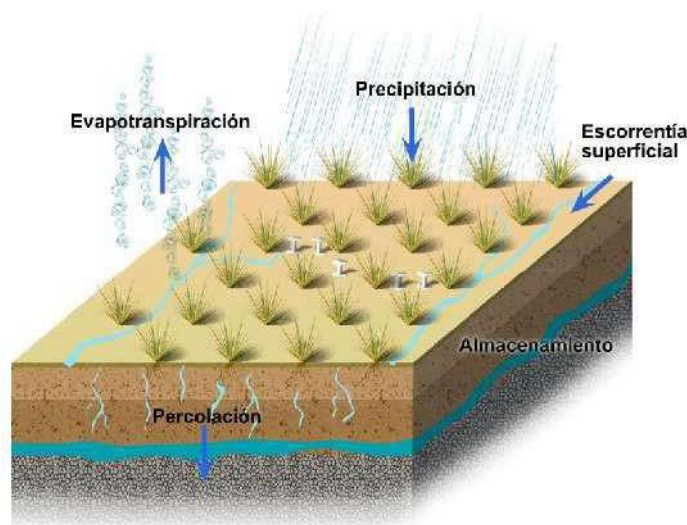
ES: escorrentía

$\Delta\theta$: cambio de humedad del suelo

Per: percolación

μ : discrepancia del balance hídrico

Figura 17. Variables del balance hídrico del suelo



Nota. Elaboración propia

b. Escorrentía superficial (ES)

Para determinar la escorrentía superficial se utilizó el método de número de curva (NC) propuesto por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos descrito en Chow *et al.* (1994). Este método se basa en el cálculo directo de la escorrentía superficial (ES) basado en la hipótesis de que existe la relación de que dos cantidades reales y dos potenciales son iguales, refiriéndose a mediciones directas como la precipitación y estimaciones como la escorrentía. Este método considera variables como el estado de compactación del terreno, medidas de conservación, clase textural e infiltración.

Para determinar la escorrentía (ES) en cada paso del tiempo (t) se utilizó la ecuación mostrada en Forest Trends (2022):

$$S: P_{(t)} > 0.05 \cdot S, \quad ES_{(t)} = \frac{(P_{(t)} - 0.05 \cdot S)^2}{P_{(t)} + 0.95 \cdot S}$$
$$S = 254 \left(\frac{100}{NC} - 1 \right)$$

Donde:

t: paso del tiempo

ES_(t): escorrentía superficial en el paso de tiempo actual (mm)

P_(t): precipitación total en el paso de tiempo actual (mm)

S: retención potencial máxima (mm), relacionada con el NC

Según (Chow *et al.*, 1994) el número de curva (NC) es un número adimensional establecido según la impermeabilidad de las coberturas del suelo, que va desde $0 \leq NC \leq 100$, tomando a las superficies impermeables o cuerpos de agua como $NC = 100$ y a las superficies naturales con $NC \leq 100$. Se emplea un NC distinto para cada temporada, existiendo un NC para condiciones normales (NC(II)) obtenido como dato bibliográfico, y otros dos para condición seca (NC(I)) que se considera desde mayo a septiembre, y para condiciones húmedas (NC(III)) que va de octubre a abril; ambos valores se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$NC(I) = \frac{4.2NC(II)}{10 - 0.058CN(II)}$$

$$NC(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)}$$

Tabla 13. Números de curva (NC(II)) según condiciones hidrológicas y grupo de suelo según SCS

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Pastizales en condiciones pobres	68	79	86	89
Pastizales en condiciones óptimas	39	61	74	80
Grava	76	85	89	91
Suelo	72	82	87	89

Nota. Elaboración propia en base a datos de Chow *et al.* (1994).

Tabla 14. Grupos de suelo según la SCS

Grupos de suelo según SCS	
Grupo A	Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados
Grupo B	Suelos pocos profundos depositados por el viento, marga arenosa.
Grupo C	Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con alto contenido de arcilla.
Grupo D	Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

Nota. Elaboración propia en base a datos de Chow *et al.* (1994).

En una misma área pueden existir diferentes coberturas con sus propios valores de número de curva (NC), por lo que resulta más preciso determinar el porcentaje de cada cobertura y multiplicarlo por su valor de número de curva correspondiente, luego sumar los resultados y dividirlos por el 100% para obtener un valor de número de curva representativo para el área.

En el caso de los tratamientos experimentales, al estar en un ecosistema de pastizal, era necesario diferenciar dentro del tratamiento que proporción del área era pastizal en

condiciones pobres u óptimas. Para obtener dicha información, se utilizó un dron Phantom 4 Multiespectral que tomó fotografías de cada subparcela captando diferentes longitudes de onda del área, incluyendo luz visible (RGB) e infrarrojo cercano (NIR) a una resolución de hasta 2 cm² por pixel; la combinación de las bandas de estas fotografías utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) nos permitió diferenciar que porcentaje del área de los tratamientos era pastizal en condiciones pobres, pastizal en condiciones óptimas, suelo y grava.

Ecuación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI):

$$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Donde:

NIR: Longitud de onda del infrarrojo cercano (750 a 2500 nm)

RED: Longitud de onda de la luz roja (640 a 700 nm)

c. Precipitación efectiva (PE)

La precipitación efectiva se calculó según la metodología descrita en Mallqui (2022) que muestra la siguiente formula:

$$PE_{(t)} = P_{(t)} - ES_{(t)}$$

Donde:

PE_(t): precipitación efectiva en el paso del tiempo actual (mm)

P_(t): precipitación total en el paso del tiempo actual (mm)

ES_(t): escorrentía superficial en el paso del tiempo actual (mm)

d. Capacidad de campo (CC)

Para obtener la capacidad de campo del suelo de cada tratamiento experimental, se extrajeron 5 muestras de suelo superficial (15 cm) del área de cada tratamiento y se homogenizaron en una sola muestra de medio kilogramo. Cada muestra fue almacenada en una bolsa ziploc, se rotuló y fueron enviadas al LASPAF de la Facultad de Agronomía

de la UNALM, donde se determinó la capacidad de campo con métodos gravimétricos y la clase textural de cada muestra.

e. Capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo (STx)

La capacidad máxima de almacenamiento de agua en la capa superficial del suelo se calculó utilizando el valor de la capacidad de campo (CC) de la capa superficial multiplicado por el espesor de la capa (Forest Trends, 2022), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$STx = \frac{CC}{100} \times Pr_{\eta\eta}$$

Donde:

STx: capacidad máxima de almacenamiento de agua (mm)

CC: capacidad de campo (%)

Prof: profundidad de la capa superficial del suelo (mm)

f. Contenido de humedad del suelo (θ) y cambio de humedad del suelo ($\Delta\theta$)

El cambio de humedad del suelo ($\Delta\theta$) está determinado por el contenido de humedad en el suelo (θ) y su cambio a través del tiempo (Forest Trends, 2022). θ es calculado con la humedad volumétrica (Hvol), medida directamente por los sensores de humedad en porcentaje, y la profundidad de la capa del suelo.

El contenido de humedad del suelo (θ) y el cambio de humedad del suelo ($\Delta\theta$) se calcularon según las siguientes ecuaciones:

$$\theta_{(t)} = \left(\frac{Hv_{(t)}}{100} \right) \times Prof$$

$$\Delta\theta_{(t)} = \theta_{(t)} - \theta_{(t-1)}$$

Donde:

$\theta_{(t)}$: contenido de humedad del suelo en el paso del tiempo actual (mm)

Prof: profundidad de la capa superficial del suelo (mm)

$Hvol_{(t)}$: humedad volumétrica del suelo en el paso del tiempo actual (%)

$\Delta\theta_{(t)}$: cambio de humedad del suelo en el paso del tiempo actual (mm)

$\theta_{(t-1)}$: contenido de humedad del suelo en el paso del tiempo previo (mm)

g. Percolación (Per)

La percolación a las capas profundas del suelo se calculó según Mallqui (2022) en base al agua excedente de la precipitación que supere la capacidad máxima de almacenamiento del suelo (STx), mediante la siguiente ecuación:

$$P_{\gamma}^{\delta} r_{(t)} = \gamma_{(t)}^{\delta} - STx \quad S^i P_{\gamma}^{\delta} r_{(t)} < 0 = 0$$

Donde:

$Per_{(t)}$: percolación en el paso del tiempo actual (mm)

$\theta_{(t)}$: contenido de humedad del suelo en el paso del tiempo actual (mm)

STx: capacidad máxima de almacenamiento de agua (mm)

h. Evapotranspiración de referencia (ETo)

La evapotranspiración de referencia (ETo) se calculó utilizando el software ETo calculator elaborado por la FAO, que utiliza el método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006). Se utilizaron los datos de temperatura máxima (T_{max}) y temperatura mínima (T_{min}) obtenidos de los sensores TMS4 medidos al nivel del suelo. Los datos de humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, fueron estimados por el mismo programa. A continuación, se muestra la ecuación combinada de Penman-Monteith para determinar la ETo a nivel diario.

$$ET_{\gamma}^{\delta} = \frac{0.408 \cdot \Delta(R_n - G) + \gamma_{\gamma}^{\delta} \frac{900}{T + 273} \cdot u_2(\gamma_s^{\delta} - \gamma_a^{\delta})}{\Delta + \gamma_{\gamma}^{\delta} (1 + 0.34 \cdot u_2)}$$

Donde:

ETo: evapotranspiración de referencia (mm/día)

R_n : radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m²día)

G: flujo del calor del suelo (MJ/m²día)

T: temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

u₂: velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)

e_s: presión de vapor de saturación (kPa)

e_a: presión real de vapor (kPa)

Δ: pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)

γ: Constante psicométrica (kPa/°C)

i. Evapotranspiración real (ETR)

De acuerdo a la metodología descrita por Mallqui (2022), la evapotranspiración real (ETR) se calculó utilizando los datos de evapotranspiración de referencia (ET_o), precipitación (P), precipitación efectiva (PE), percolación (Per) y el cambio de almacenamiento de agua (Δθ). También se consideró al punto de marchitez permanente (PMP) como valor limitante inferior, puesto que teóricamente no puede existir evapotranspiración si la humedad del suelo es inferior al PMP.

Se utilizó las siguientes ecuaciones:

$$S \nmid P_{(t)} > ET_{\nmid(t)}, \quad ET_{\nmid(t)} = ETR_{(t)}$$

$$S \nmid P_{(t)} \leq ET_{\nmid(t)}, \quad ET_{\nmid(t)} = PE_{(t)} - (P_{\nmid}r_{(t)} + \Delta_{\nmid(t)})$$

$$S \nmid ETR_{(t)} \leq PMP, \quad ETR_{(t)} = 0$$

Donde:

P_(t): precipitación total en el paso del tiempo actual (mm)

ET_{o(t)}: Evapotranspiración de referencia en el paso del tiempo actual (mm)

ETR_(t): Evapotranspiración real en el paso del tiempo actual (mm)

PE_(t): precipitación efectiva en el paso del tiempo actual (mm)

Per_(t): percolación en el paso del tiempo actual (mm)

$\Delta\theta_{(t)}$: cambio de almacenamiento de agua en el paso del tiempo actual (mm)

PMP: Punto de marchitez permanente

j. Vigor y mortalidad de *Festuca dolichophylla*

De acuerdo con la metodología descrita en Tácuma *et al.* (2015), la mortalidad y el vigor se evaluaron periódicamente a lo largo de la investigación. La mortalidad se determinó en porcentaje, considerando visualmente como muertas a las plantas senescentes o marchitas. El vigor se determinó según la variación del volumen de la planta en cada evaluación. El volumen se obtuvo en función al diámetro aéreo, diámetro basal y altura del esqueje, con la siguiente ecuación:

$$VE = \left(\frac{D + d}{2} \right)^2 \pi h$$

Donde:

VE: volumen del esqueje

D: diámetro basal

d: diámetro aéreo

h: altura

4.4.6.4. Análisis estadístico

a. Evaluación estadística del modelo de balance hídrico

Según (Moriasi *et al.*, 2007) para evaluar si un modelo hidrológico es satisfactorio en base a la comparación de los datos simulados y los datos medidos, se recomienda la utilización de las siguientes estadísticas cuantitativas: la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, por sus siglas en inglés), el sesgo porcentual (PBIAS, por sus siglas en inglés) y la relación entre el error cuadrático medio y la desviación estándar de los datos medidos (RSR, por sus siglas en inglés). A los resultados de estos análisis estadísticos se le asignaron valores cualitativos para determinar la eficiencia del modelo, como se muestra en la tabla 15.

Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Sesgo porcentual (PBIAS)

$$PBIAS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n O_i}$$

Relación entre el error cuadrático medio y la desviación estándar de los datos medidos (RSR)

$$RSR = \frac{RMSE}{STD_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}}$$

Donde:

O_i = variable observada

S_i = variable simulada

$\bar{O}$ = media de la variable observada

$RMSE$ = raíz del error cuadrático medio

STD_{obs} = desviación estándar de la variable observada

En esta investigación, se consideró como variable observada (O_i) a los valores diarios de precipitación (P) y como variable simulada (S_i) a la suma de la escorrentía superficial (Es), percolación (Per), evapotranspiración real (ETR) y cambio de humedad el suelo ($\Delta\theta$) a nivel diario; como indica la ecuación del balance hídrico.

Tabla 15. Clasificación del rendimiento de la estadística recomendada para evaluar el modelo de balance hídrico

Clasificación de rendimiento	Estadísticas recomendadas		
	NSE	PBIAS (%)	RSR
Muy bien	$0.75 < NSE < 1.00$	$PBIAS < \pm 10$	$0.00 < RSR < 0.50$
Bien	$0.65 < NSE < 0.75$	$\pm 10 < PBIAS < \pm 15$	$0.5 < RSR < 0.60$
Satisfactorio	$0.50 < NSE < 0.65$	$\pm 15 < PBIAS < \pm 25$	$0.60 < RSR < 0.70$

b. Análisis de componentes principales

Es un método que sirve para la reducción de dimensiones. Se analiza un grupo de variables para evaluar cuales son las dimensiones principales de la variación, obteniéndose a partir de un grupo grande de datos original, un nuevo conjunto de datos más reducido y con una pérdida mínima de información, permitiendo así la evaluar la relación entre variables, entre casos y entre variables y casos (IBM, 2022).

c. Prueba T de student para muestras relacionadas

Esta prueba estadística permite comparar la media de dos grupos de datos emparejados examinados en dos momentos diferentes en el tiempo (Ross & Willson, 2017). En este caso, se evaluará cada componente del balance hídrico en dos momentos diferentes: el primer grupo de datos corresponderá al periodo antes de iniciar la intervención de revegetación (2022), y el segundo grupo de datos al periodo después de la revegetación (2023). De esta manera, se analizará si hubo una influencia significativa de los tratamientos de revegetación sobre los componentes del balance hídrico. Los datos utilizados para esta prueba provendrán de los sensores individuales instalados desde el año 2021 en cada área de tratamiento, y que continuaron registrando información hasta la finalización del experimento. Para esta prueba, la hipótesis nula y alterna se evaluarán con un nivel de confianza del 95% ($p < 0.05$).

- Hipótesis nula (H_0): No hay diferencia significativa entre las medias de los dos grupos (antes y después de la intervención con revegetación).
- Hipótesis alternativa (H_a): Hay una diferencia significativa entre las medias de los dos grupos (antes y después de la intervención con revegetación).

d. Prueba de Chi – cuadrado

La prueba de Chi-cuadrado, es una prueba estadística no paramétrica que se utiliza para evaluar si existe una relación significativa entre variables categóricas (tratamientos de revegetación y mortalidad de los esquejes) al comparar frecuencias observadas con frecuencias esperadas (Pearson, 1900). Para esta prueba se tomará un nivel de confianza del 95% ($p < 0.05$) en la hipótesis alterna y nula.

- Hipótesis nula (H_0): No hay asociación entre los tratamientos y la mortalidad de esquejes
- Hipótesis alternativa (H_a): Hay una asociación entre la mortalidad y los tratamientos.

4.4.6.5. Validación del instrumento de investigación

La validación del proceso metodológico empleado se hizo utilizando el Coeficiente de Validez de Contenido (CVC) desarrollado por Hernández-Nieto (2002) y descrito por (Pedrosa *et al.*, 2014), este método de validación permite valorar el grado de confianza por parte de expertos (entre 3 y 5 expertos) de cada uno de los ítems evaluados, así como el instrumento de manera general. Para ellos, se hizo uso de una escala tipo Likert con 5 alternativas como se muestra en la tabla 17 y se evaluaron 10 ítems correspondientes al proceso metodológico de esta investigación que se muestran en la tabla 18. Así, se realizó la validación con 4 expertos investigadores del INAIGEM cuya especialidad estaba vinculada a la investigación (hidrología, ecología y agronomía).

El CVC se calculó con las siguientes formulas, y los resultados se interpretaron de acuerdo a la tabla 16.

$$CVC_i = M_x / V_{max}$$

$$Pe_i = (1/j)^j$$

$$CVC = CVC_i - Pe_i$$

Donde:

CVC_i = Coeficiente de validez de contenido inicial

M_x = media del elemento en la puntuación dada por los expertos

V_{max} = puntuación máxima que el ítem podría alcanzar

Pe_i = error asignado a cada ítem

j = número de expertos participantes

CVC = Coeficiente de validez de contenido

Tabla 16. Interpretación del coeficiente de validez de contenido (CVC)

CVC (%)	Validez y concordancia
$CVC < 60$	Inaceptable
$60 \leq CVC \leq 70$	Deficiente
$71 \leq CVC \leq 80$	Aceptable
$81 \leq CVC \leq 90$	Buena
$90 < CVC$	Excelente

Nota. Elaboración propia en base a Hernández-Nieto (2002)

Tabla 17. Indicadores de los ítems y escala de valores

Indicadores				
Coherencia	El ítem mide alguna variable/ categoría coherente con la investigación			
Claridad	El ítem es claro (no genera confusión o contradicciones)			
Escala	El ítem puede ser respondido de acuerdo a la escala que presenta el instrumento			
Relevancia	El ítem es relevante para cumplir con las preguntas y objetivos de la investigación			
Escala de valores				
1 = Inaceptable	2 = Deficiente	3 = Regular	4 = Bueno	5 = Excelente

Nota. Elaboración propia en base a Hernández-Nieto (2002).

Tabla 18. Ítems evaluados con el método CVC

ítem	Descripción
1	Balance hídrico del suelo
2	Escorrentía superficial (ES)
3	Precipitación efectiva (PE)
4	Capacidad de campo (CC)
5	Capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo (STx)

6	Contenido de humedad del suelo (θ) y cambio de humedad del suelo ($\Delta\theta$)
7	Percolación (Per)
8	Evapotranspiración de referencia (ET _o)
9	Evapotranspiración real (ETR)
10	Vigor y mortalidad de <i>Festuca dolichophylla</i>

Nota. Elaboración propia.

CAPÍTULO V

5. Resultados

Aunque la metodología inicial contemplaba dos repeticiones del experimento utilizando las parcelas P01 y P03, finalmente se optó por trabajar únicamente con los datos hidrológicos y ecológicos de la parcela P01. Esto se debió a la alta mortalidad de los esquejes translocados en la parcela P03, causada por una prolongada temporada seca entre los años 2022 y 2023.

5.1. Balance hídrico del suelo

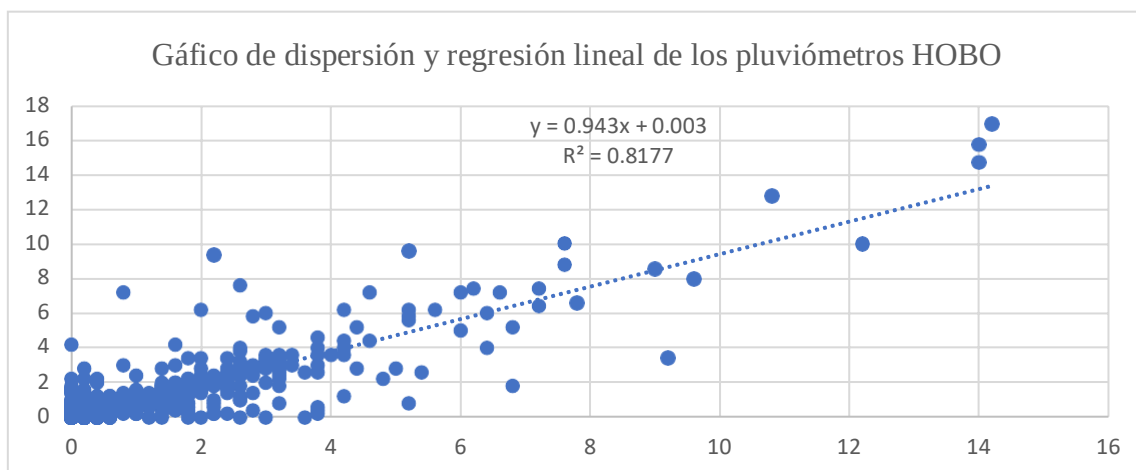
Los resultados obtenidos de todos los parámetros dentro del balance hídrico del suelo son los siguientes:

5.1.1. Precipitación (P)

La precipitación total acumulada registrada por el pluviómetro HOBO en la parte baja, desde el 1 de febrero de 2023 (inicio del experimento) hasta 1 de febrero de 2024 (final del experimento), fue de 781.4 mm. Este valor se encuentra dentro del rango promedio acumulativo anual para la cabecera de la microcuenca. Así, se registraron un total de 608 eventos de precipitación con un máximo de 14.2 mm y un mínimo de 0.2 mm, sin datos faltantes o erróneos.

Asimismo, se utilizaron los datos de precipitación del HOBO de la parte alta para validar los datos del HOBO de la parte baja mediante una regresión lineal, obteniendo un valor de R^2 de 81.77%. Esto indica que ambos conjuntos de datos son altamente compatibles y que la medición de la precipitación se realizó correctamente.

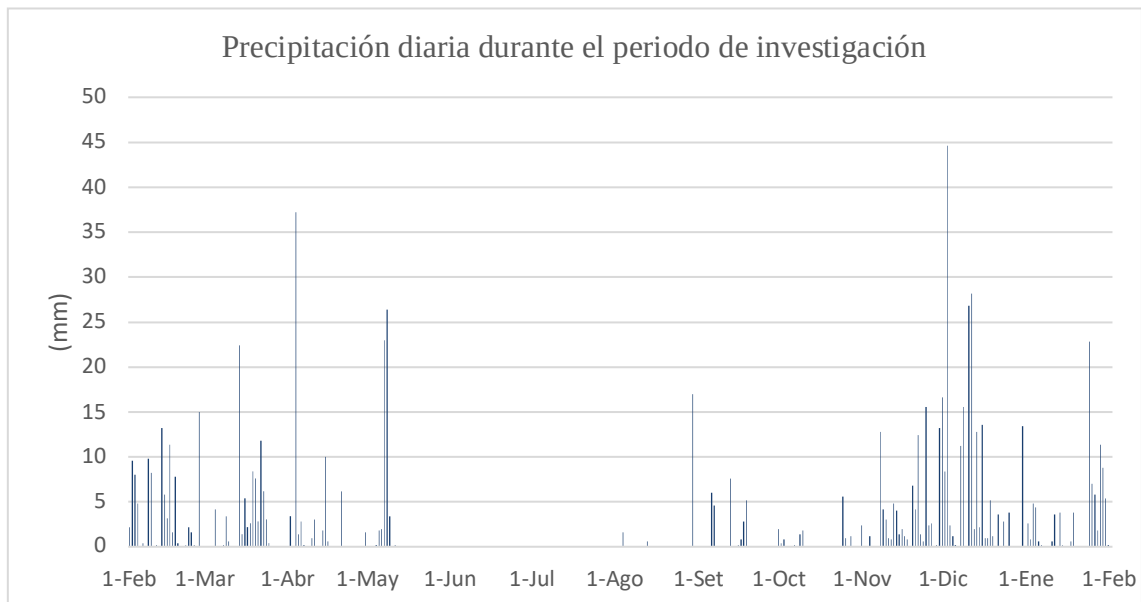
Figura 18. Gráfico de dispersión y regresión lineal de los pluviómetros HOBO



Nota. Elaboración propia.

A continuación, en la figura 19 se muestra la variación de la precipitación medida por el pluviómetro HOBO en la parte baja, a lo largo del periodo de evaluación.

Figura 19. Precipitación durante el periodo de investigación en la cabecera de la microcuenca Piuray Ccorimarca



Nota. Elaboración propia.

5.1.2. Escorrentía superficial (ES)

a. Coberturas presentes en los tratamientos experimentales

Se realizó un análisis fotogramétrico para determinar los rangos de valores del NDVI correspondientes a cada cobertura en las imágenes de cada tratamiento. Para ello, se compararon los resultados del NDVI con imágenes en color real de alta definición de los tratamientos. Los resultados se presentan en la tabla 19.

Tabla 19. Clasificación de coberturas según análisis fotogramétrico

Clasificación	Valor
Grava	< 0.15
Suelo	0.15 – 0.25
Pastizales en condiciones pobres	0.25 – 0.35
Pastizales en condiciones óptimas	> 0.35

Nota. Elaboración propia.

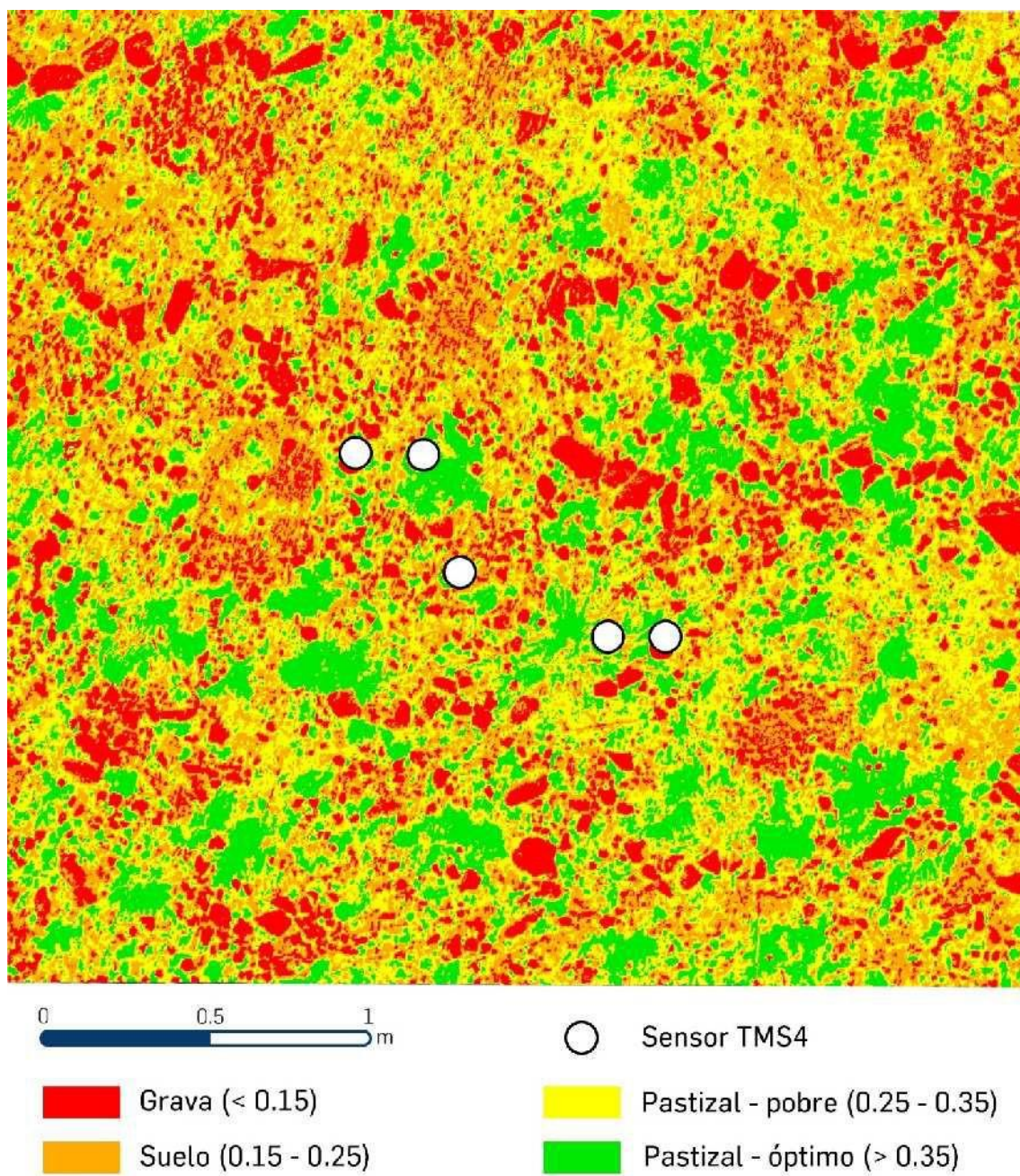
A continuación, se muestran los resultados del análisis de fotogrametría de todos los tratamientos experimentales:

Tabla 20. Porcentajes de las coberturas de todos los tratamientos y el control de la parcela P01

Coberturas	Tratamientos			
	T01	T02	T03	Ctrl
Pastizales en condiciones pobres	31.38%	26.12%	29.76%	20.57%
Pastizales en condiciones óptimas	17.20%	22.41%	15.75%	27.86%
Suelo	32.70%	33.83%	40.30%	31.76%
Grava	18.72%	17.64%	14.20%	19.81%

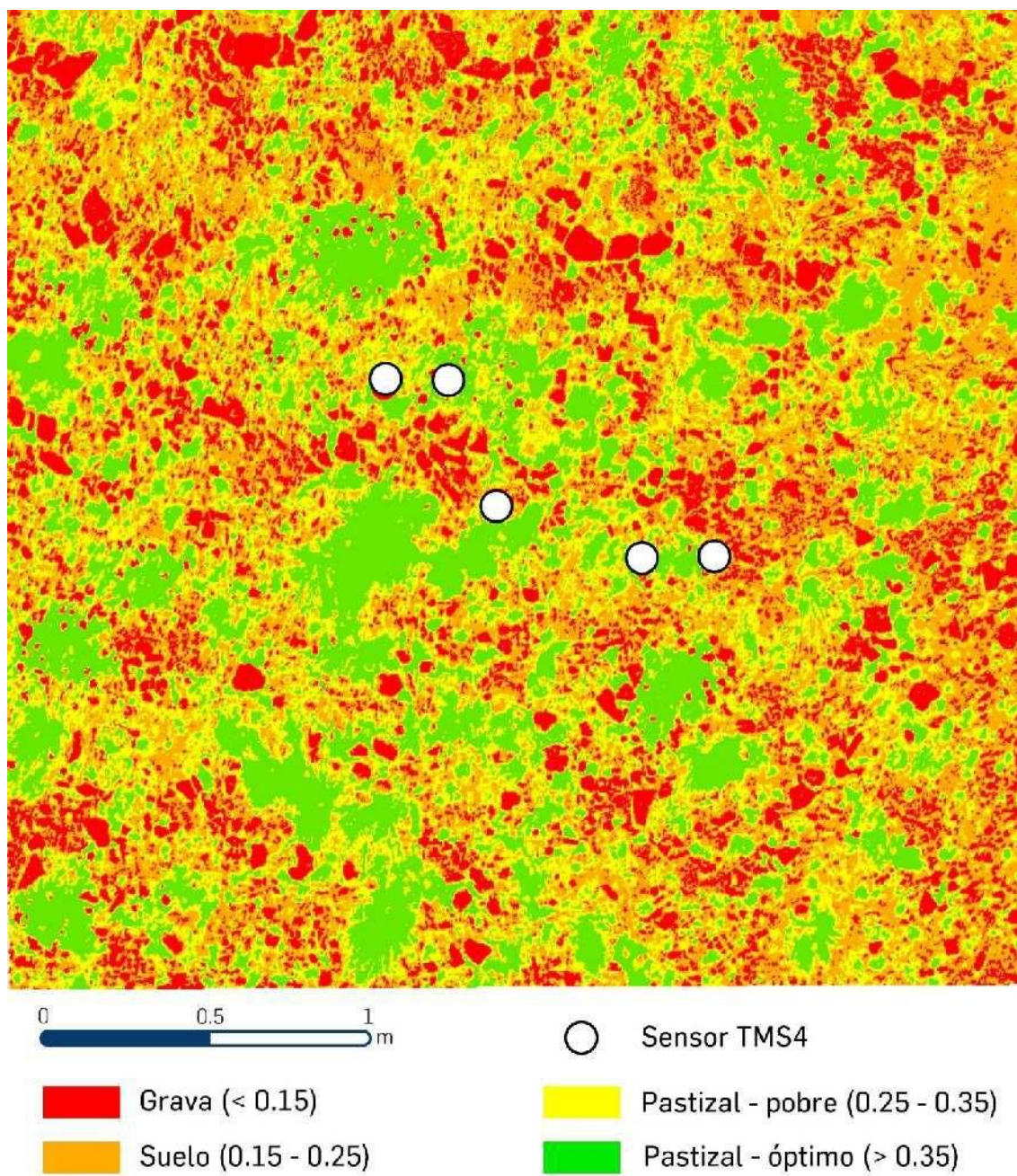
Nota. Elaboración propia.

Figura 20. Análisis del NDVI del tratamiento T01 para identificar coberturas



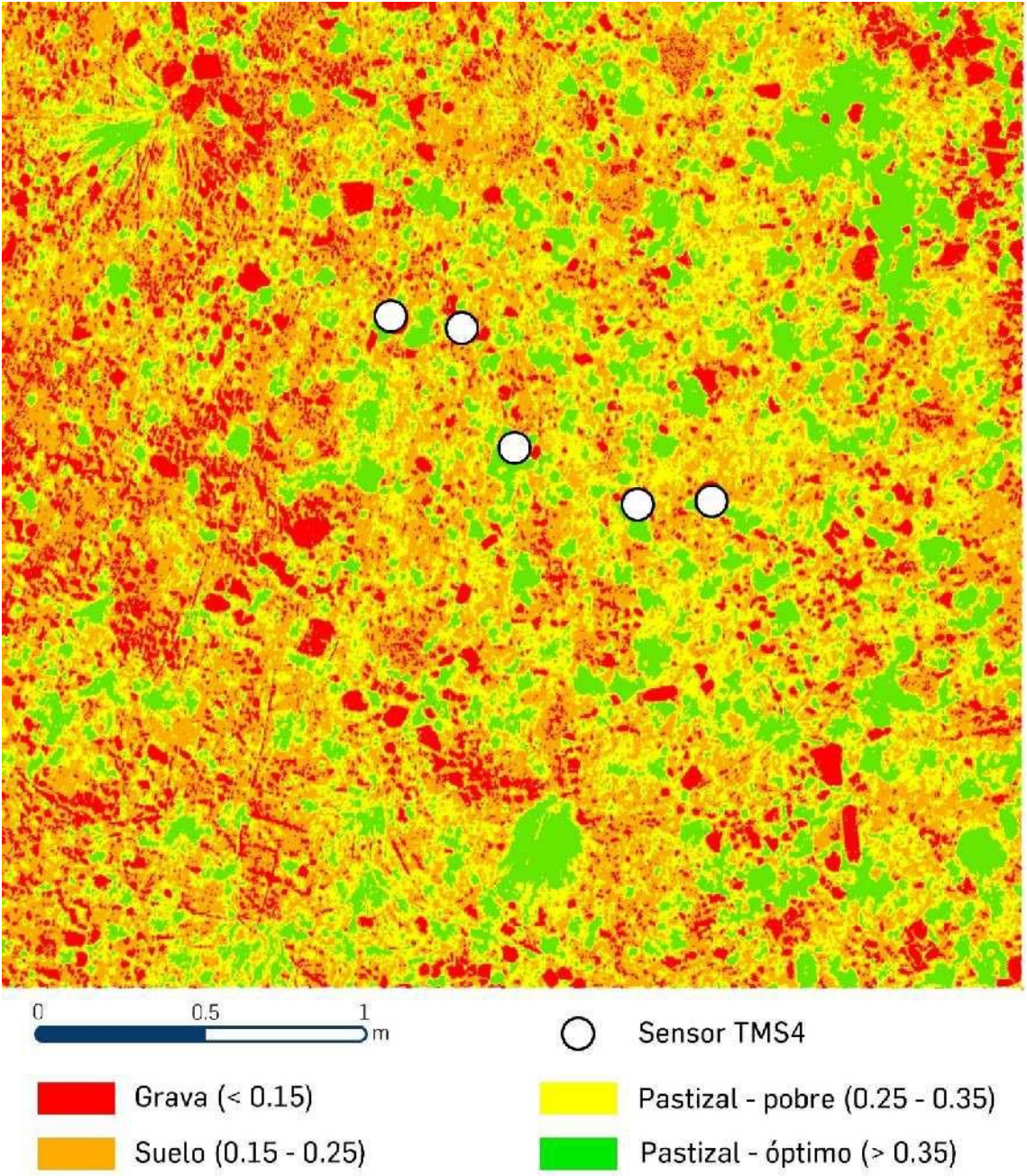
Nota. Elaboración propia.

Figura 21. Análisis del NDVI del tratamiento T02 para identificar coberturas



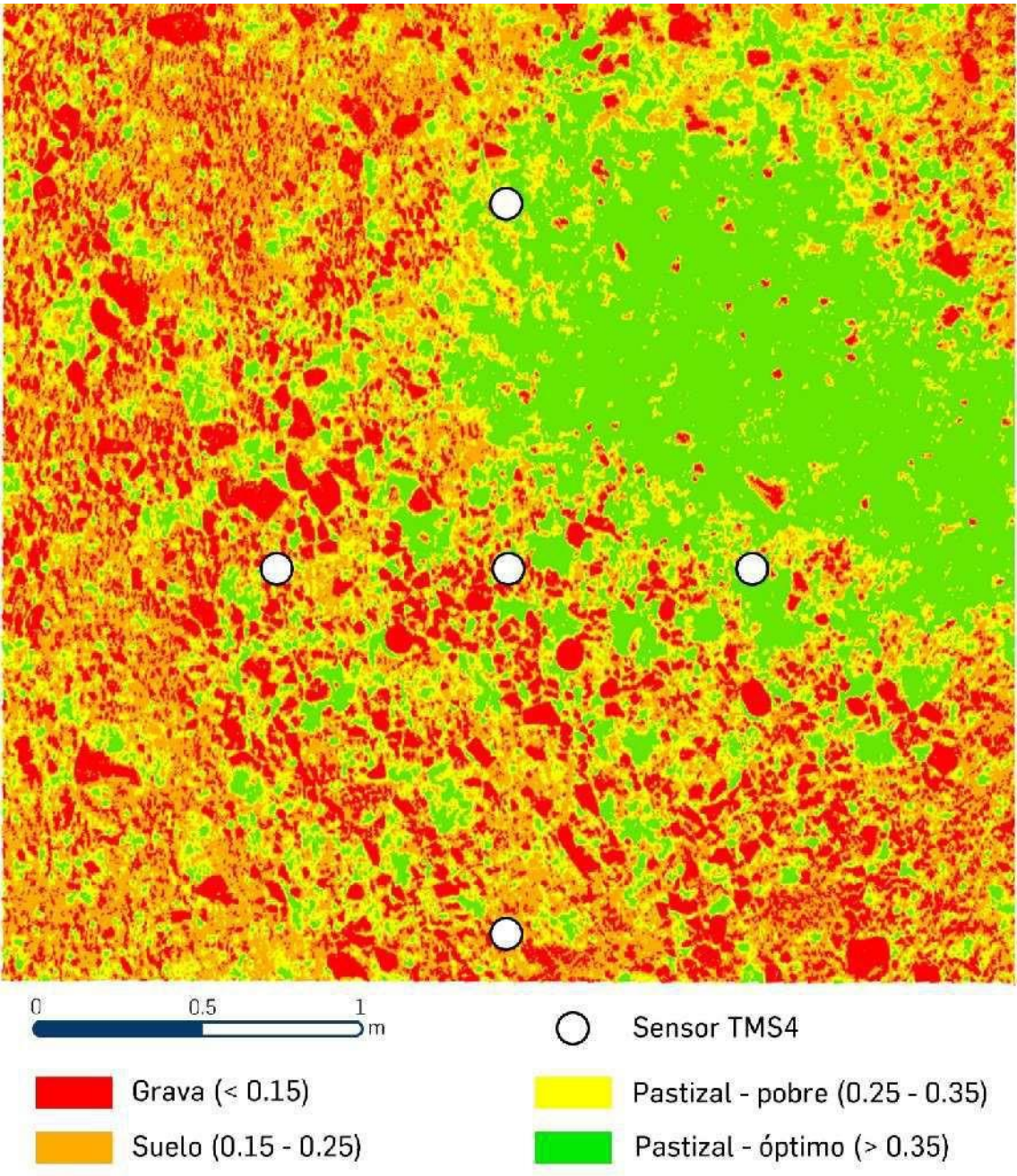
Nota. Elaboración propia.

Figura 22. Análisis del NDVI del tratamiento T03 para identificar coberturas



Nota. Elaboración propia.

Figura 23. Análisis del NDVI del control para identificar coberturas



Nota. Elaboración propia.

b. Determinación del número de curva para todos los tratamientos experimentales

En base al porcentaje de las coberturas presentes en cada tratamiento, se calcularon los números de curva correspondientes para cada tratamiento, como se muestra en la tabla 21.

Tabla 21. Números de curva de los tratamientos experimentales y el control de la parcela P01

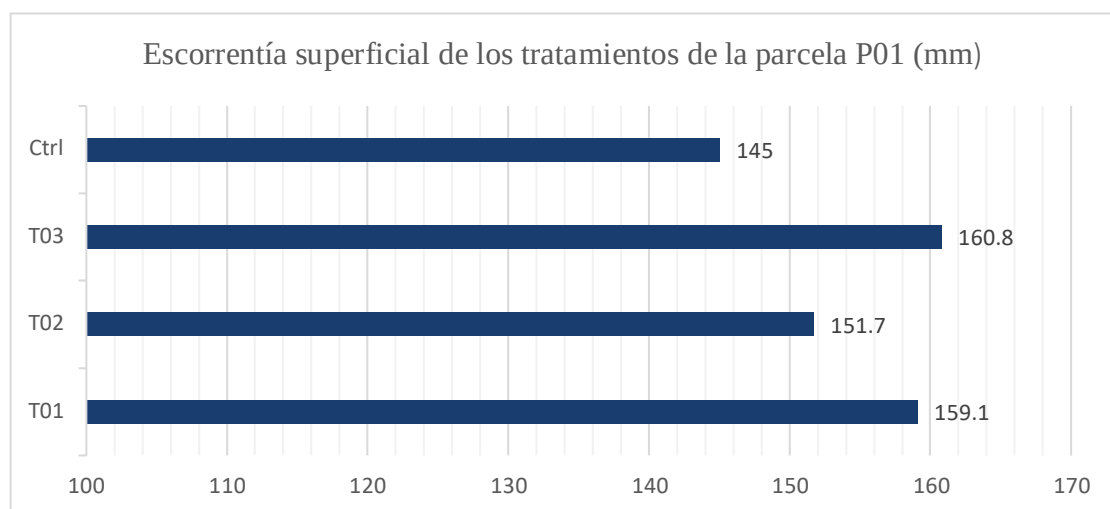
Tratamiento	Números de curva (CN)		
	Condiciones normales NC (II)	Condiciones Secas NC (I)	Condiciones húmedas NC (III)
T01	78	59.83	89.08
T02	77	58.49	88.52
T03	78.22	60.14	89.2
Ctrl	76.12	57.25	88

Nota. Elaboración propia.

c. Determinación de la escorrentía superficial (ES) de todos los tratamientos experimentales de la parcela P01

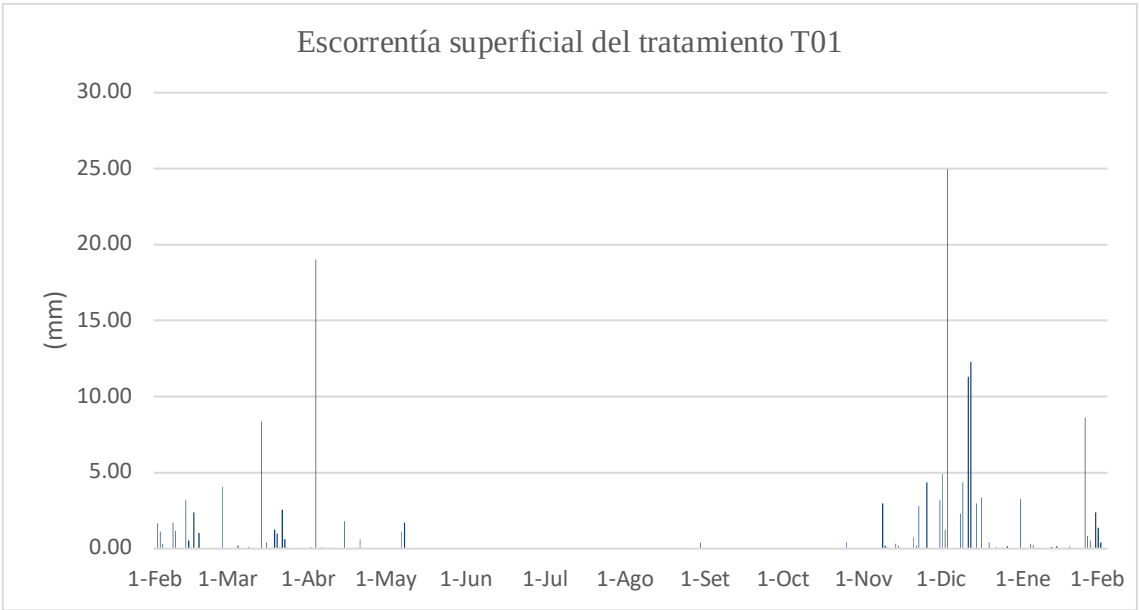
En base a los números de curva calculados en el paso previo, se calculó la escorrentía superficial para todos los tratamientos experimentales. Los resultados se muestran a continuación:

Figura 24. Escorrentía superficial acumulada durante el periodo de investigación de los tratamientos de la parcela P01



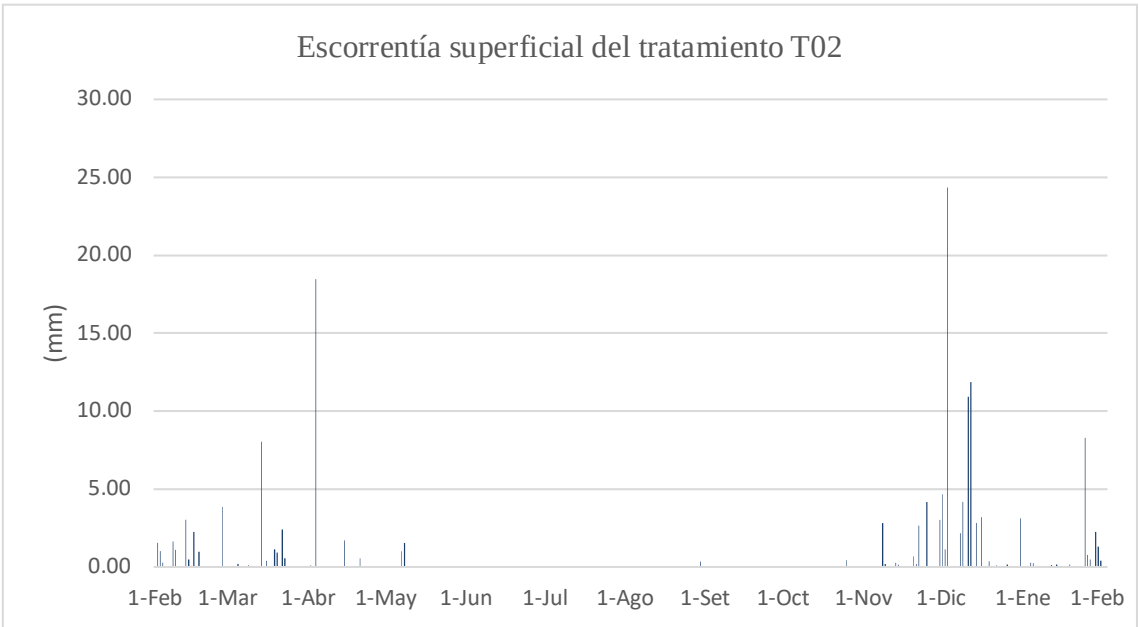
Nota. Elaboración propia.

Figura 25. Variación de la escorrentía superficial a lo largo de la investigación del tratamiento T01



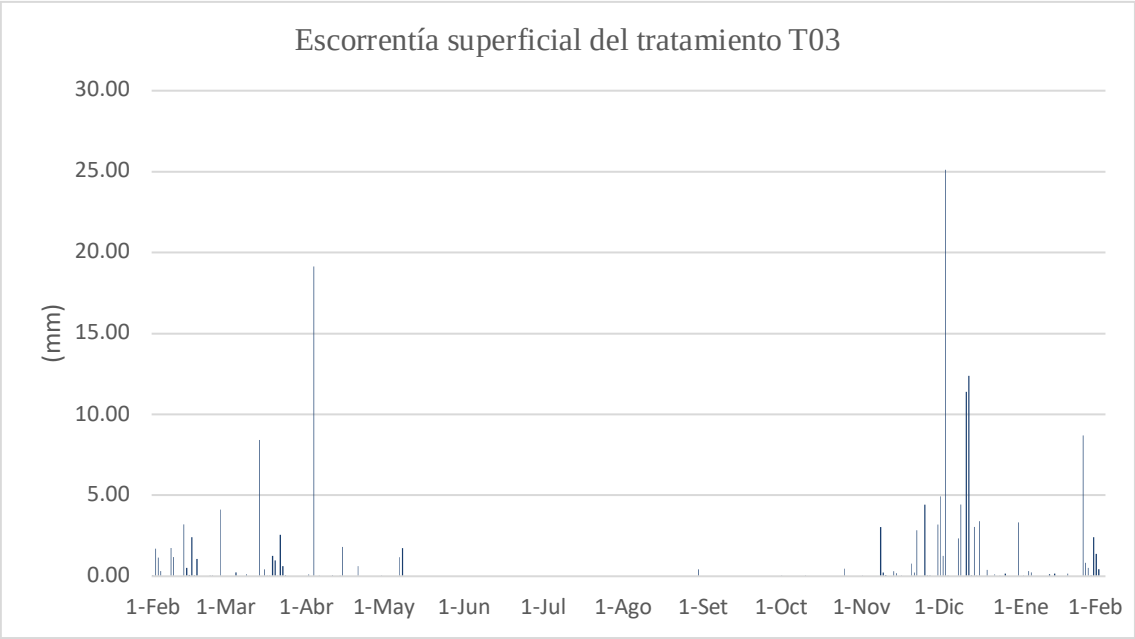
Nota. Elaboración propia.

Figura 26. Variación de la escorrentía superficial a lo largo de la investigación del tratamiento T02



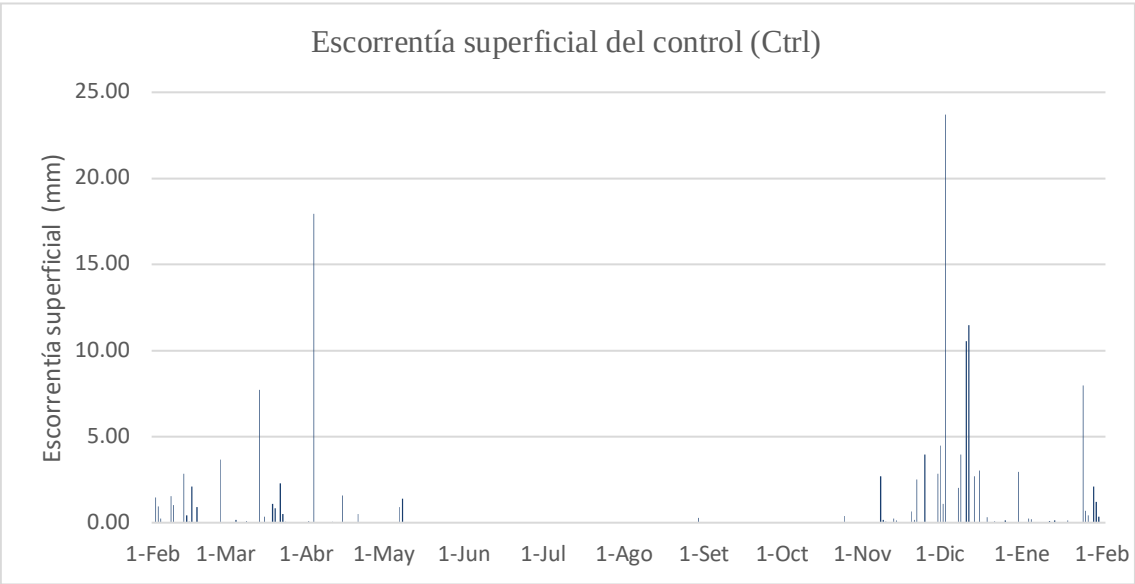
Nota. Elaboración propia.

Figura 27. Variación de la escorrentía superficial a lo largo de la investigación del tratamiento T03



Nota. Elaboración propia.

Figura 28. Variación de la escorrentía superficial a lo largo de la investigación del control.

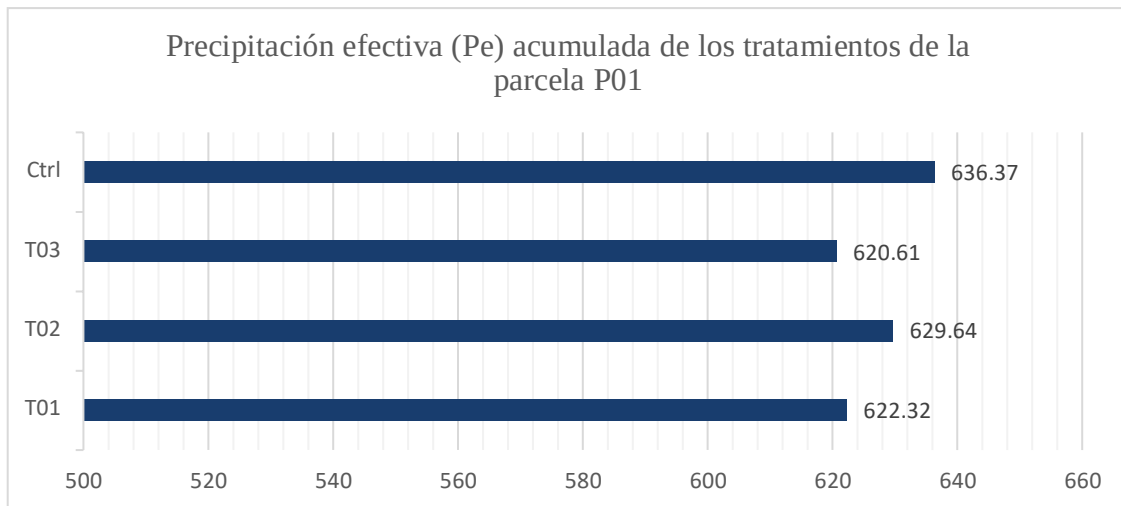


Nota. Elaboración propia.

5.1.3. Precipitación efectiva (Pe)

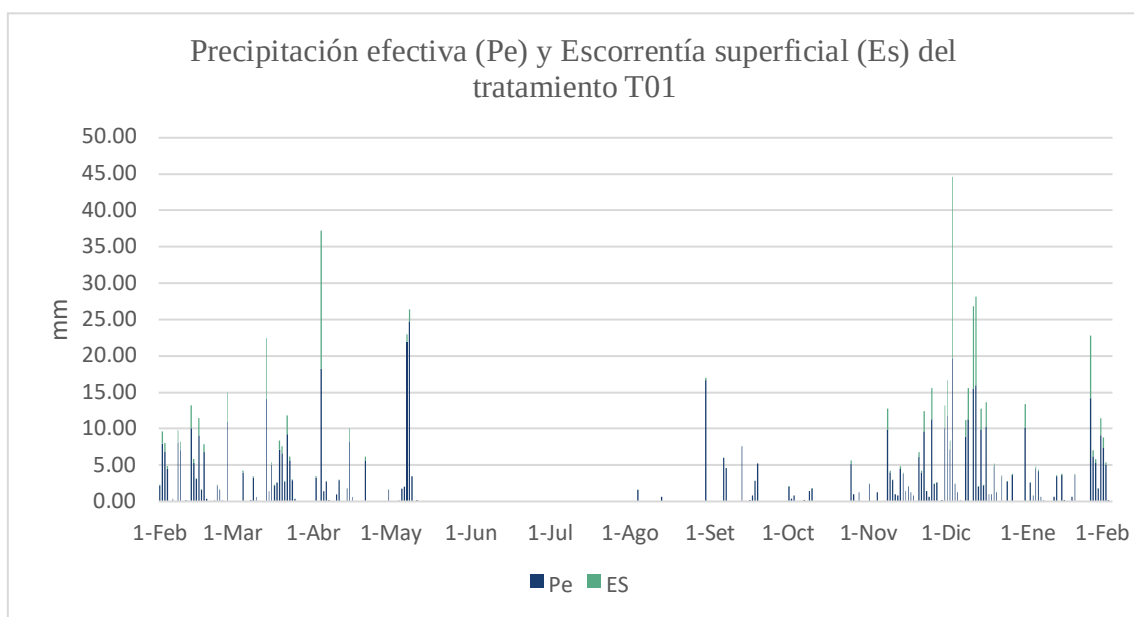
Utilizando los datos de precipitación (P) de la parcela P01 y la escorrentía superficial (Es) de los tratamientos experimentales, se calculó la precipitación efectiva (Pe) para cada tratamiento, teniendo como resultados lo que se muestra a continuación:

Figura 29. Precipitación efectiva (Pe) acumulada durante el periodo de investigación de los tratamientos experimentales de la parcela P01.



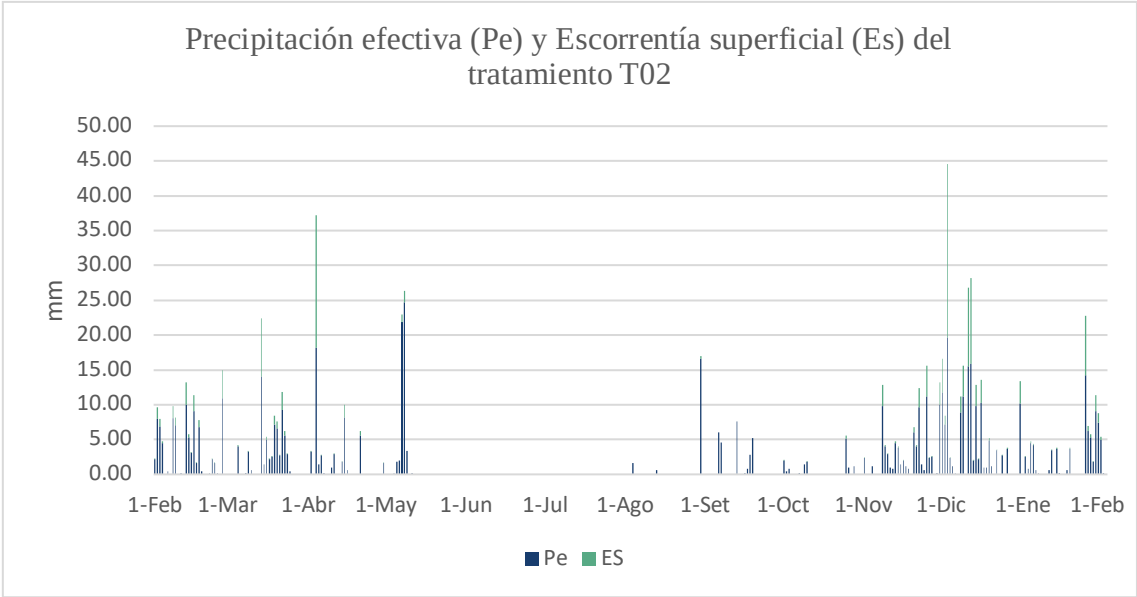
Nota. Elaboración propia.

Figura 30. Variación de la precipitación efectiva y escorrentía superficial del tratamiento T01 durante el periodo de investigación



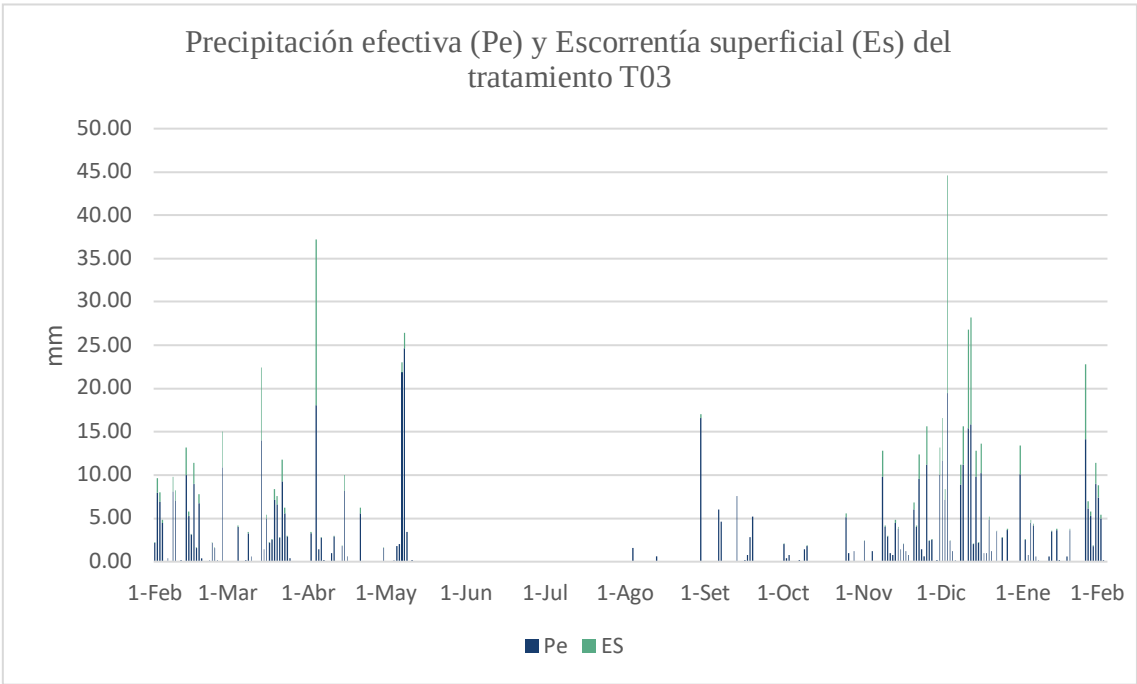
Nota. Elaboración propia.

Figura 31. Variación de la precipitación efectiva y escorrentía superficial del tratamiento T02 durante el periodo de investigación



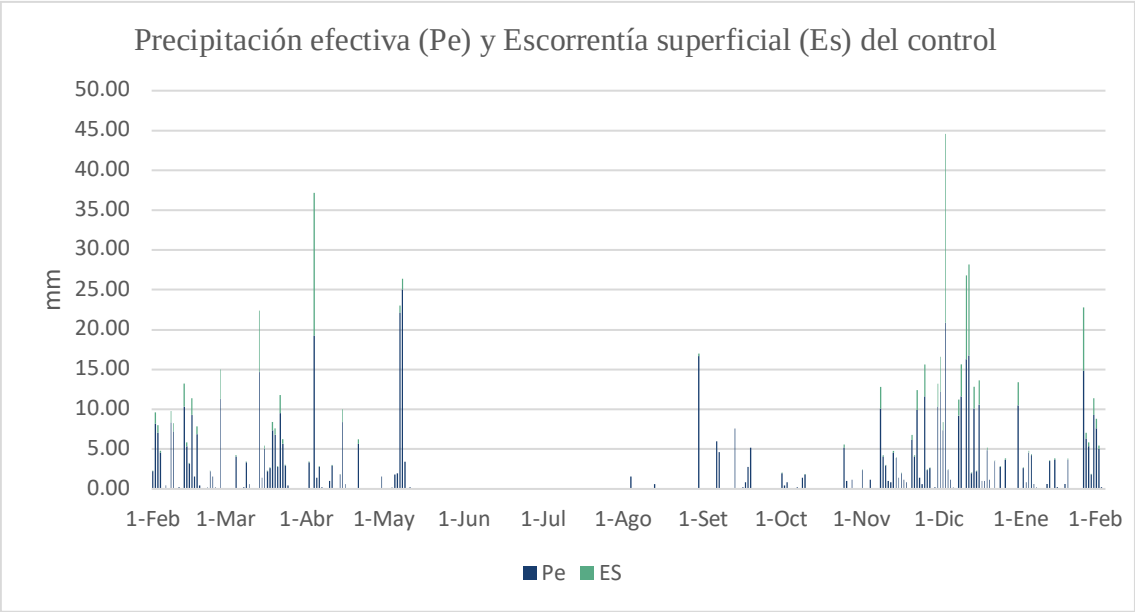
Nota. Elaboración propia.

Figura 32. Variación de la precipitación efectiva y escorrentía superficial del tratamiento T03 durante el periodo de investigación



Nota. Elaboración propia.

Figura 33. Variación de la precipitación efectiva y escorrentía superficial del control durante el periodo de investigación



Nota. Elaboración propia.

5.1.4. Capacidad de campo (CC)

Respecto a la capacidad de campo y clase textural, los resultados del análisis de las muestras de suelo de cada tratamiento y el control son los siguientes:

Tabla 22. Capacidad de campo y clase textural de los tratamientos experimentales de la parcela P01

Tratamiento	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase textural	C.C. (%)
T01	59	30	11	Fr.A.	20.24
T02	57	32	11	Fr.A.	20.59
T03	53	36	11	Fr.A.	22.80
Ctrl	59	30	11	Fr.A.	18.88

Nota. Elaboración propia en base a los resultados del LASPAF de la Facultad de Agronomía de la UNALM.

5.1.5. Capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo (STx)

El cálculo de la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo se realizó con los valores de capacidad de campo del suelo de cada tratamiento y la altura a la que

estaban enterrados los sensores de humedad TMS4 (10 cm, distancia del sensor de humedad respecto a la superficie de la tierra). Los resultados son los siguientes:

Tabla 23. Capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo (STx) de los tratamientos de la parcela de investigación P01

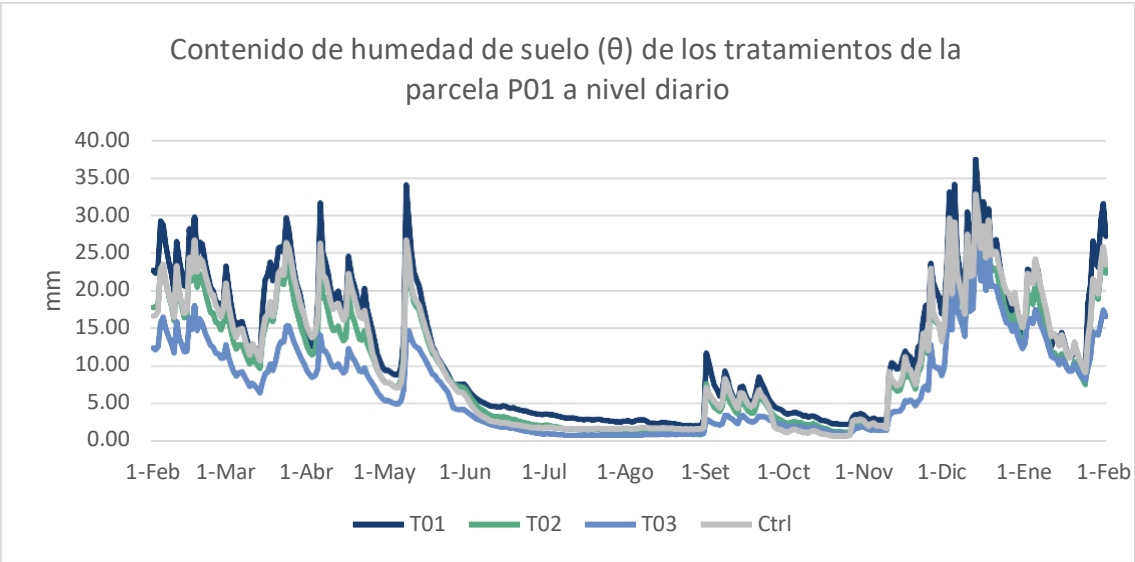
Tratamiento	CC (%)	Altura (mm)	STx (mm)
T01	20.24	100	20.24
T02	20.59	100	20.59
T03	22.80	100	22.8
Ctrl	18.88	100	18.88

Nota. Elaboración propia.

5.1.6. Contenido de humedad (θ) y Cambio de humedad del suelo (Δθ)

El contenido de humedad (θ) para cada tratamiento se obtuvo del promedio de la humedad volumétrica registrada por los 5 sensores TMS4 ubicados en cada tratamiento. La compatibilidad de los datos entre sensores era superior al 90% según el R². En total, entre los sensores de los 3 tratamientos y el control, se registraron un total de 700 800 datos de humedad volumétrica del suelo durante el periodo de evaluación.

Figura 34. Contenido de humedad del suelo (θ) de los tratamientos y el control de la parcela P01 durante el periodo de investigación.



Nota. Elaboración propia.

A continuación, se muestra el acumulado total del cambio de contenido de humedad del suelo ($\Delta\theta$) de todos los tratamientos y el control de la parcela P01 durante el periodo de investigación.

Tabla 24. Acumulado del cambio de contenido de humedad del suelo ($\Delta\theta$) de los tratamientos y el control de la parcela P01 durante el periodo de investigación

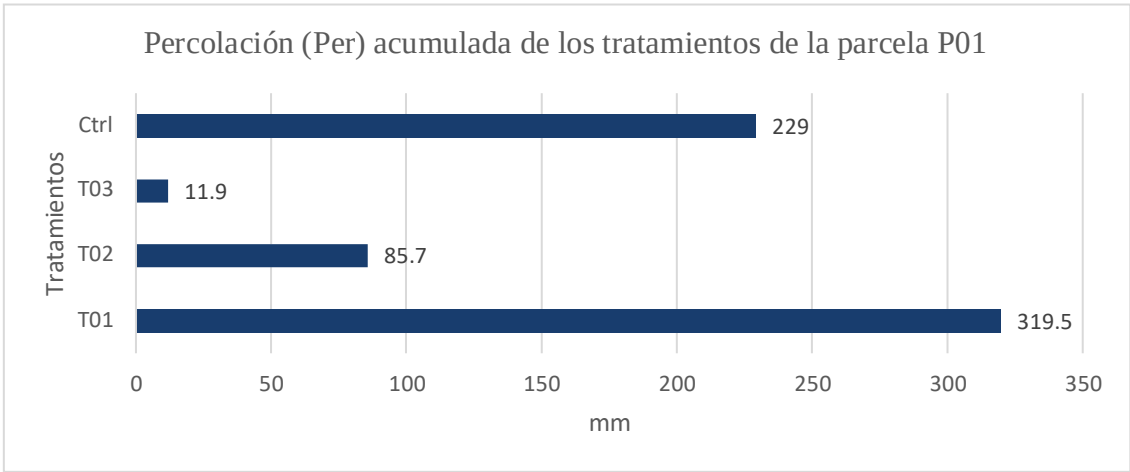
Tratamiento	$\Sigma\Delta\theta$ (mm)
T01	4.5
T02	4.5
T03	4.2
Ctrl	6.7

Nota. Elaboración propia.

5.1.7. Percolación (Per)

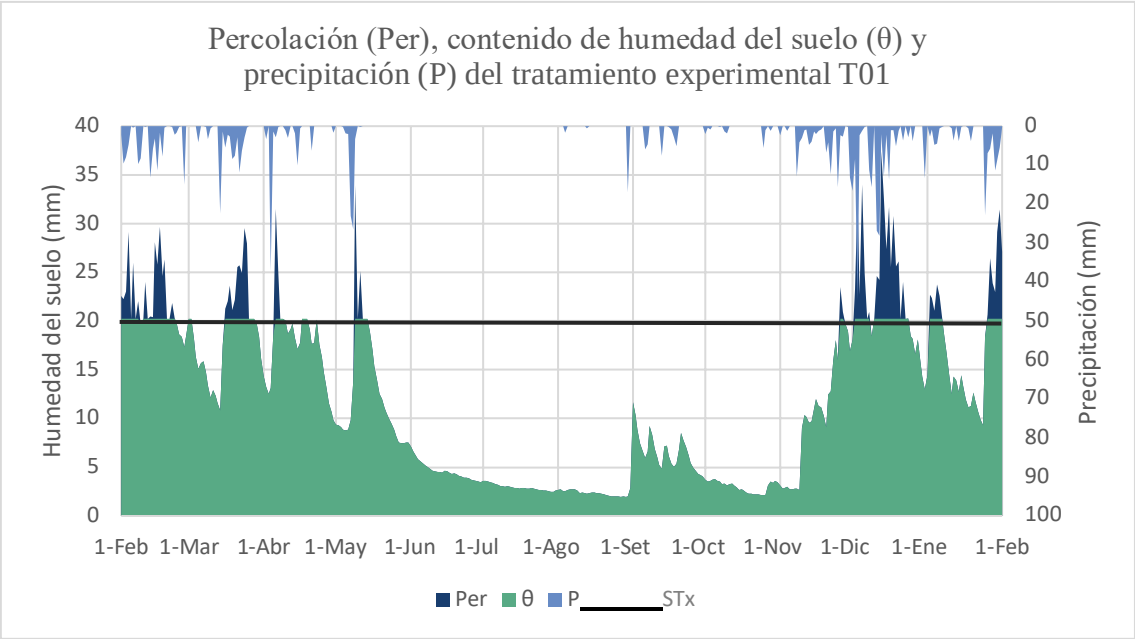
Con los valores del contenido de humedad del suelo (θ) de todos los tratamientos experimentales y la capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo (ST_x), se calculó la percolación para cada tratamiento experimental, obteniéndose los resultados que se muestran a continuación:

Figura 35. Resultados de Percolación (Per) acumulada de los tratamientos experimentales de la parcela P01



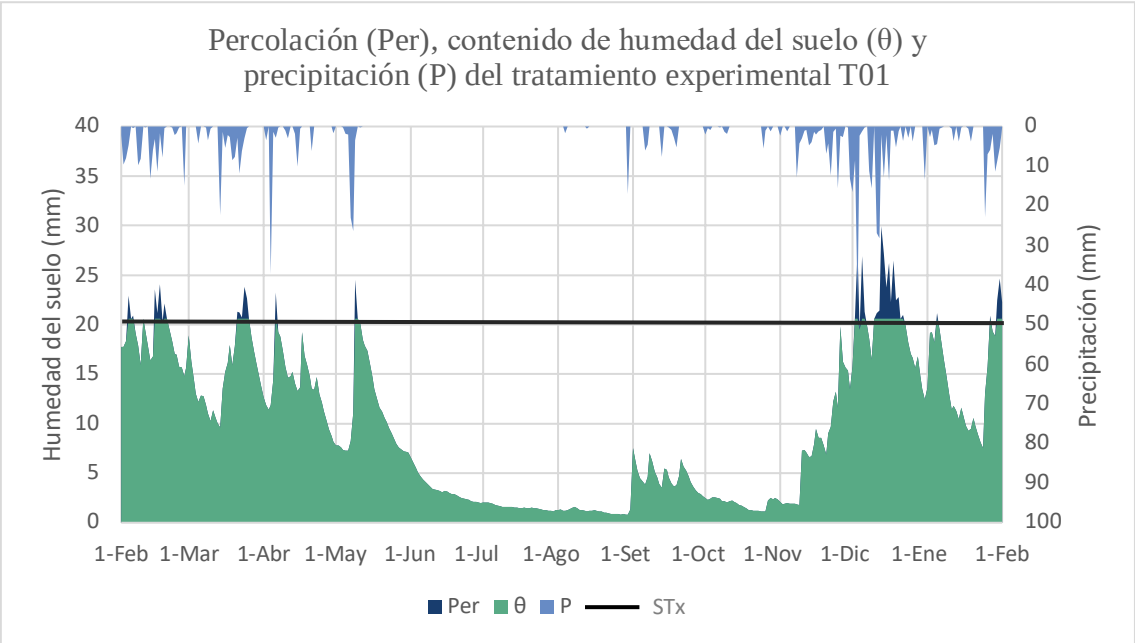
Nota. Elaboración propia.

Figura 36. Percolación (Per), contenido de humedad del suelo (θ) y precipitación (P) del tratamiento experimental T01 a lo largo del periodo de investigación.



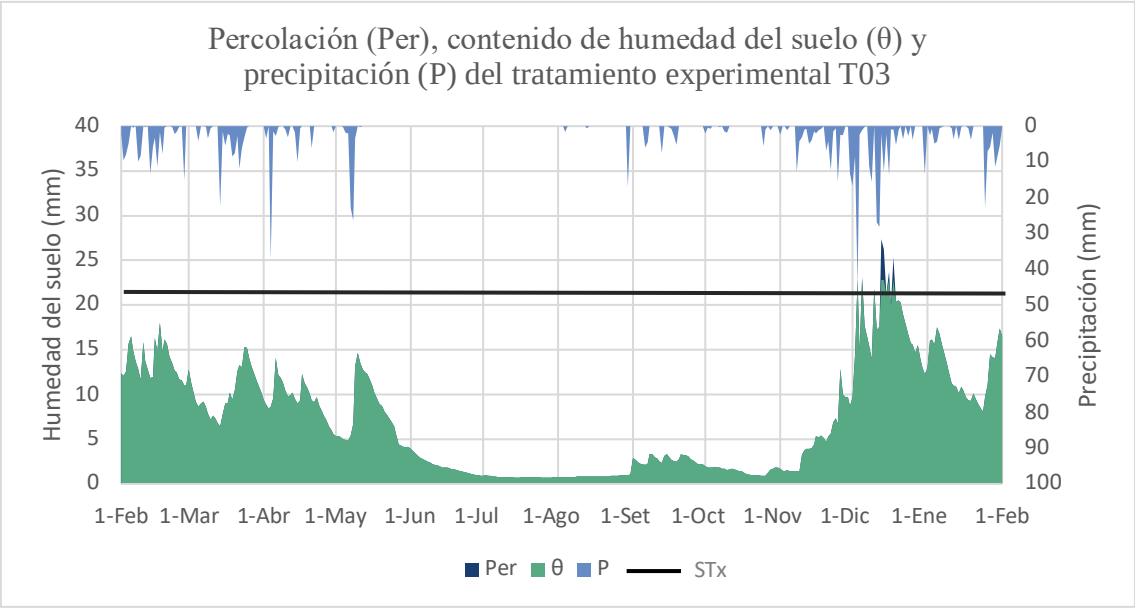
Nota. Elaboración propia.

Figura 37. Percolación (Per), contenido de humedad del suelo (θ) y precipitación (P) del tratamiento experimental T02 a lo largo del periodo de investigación



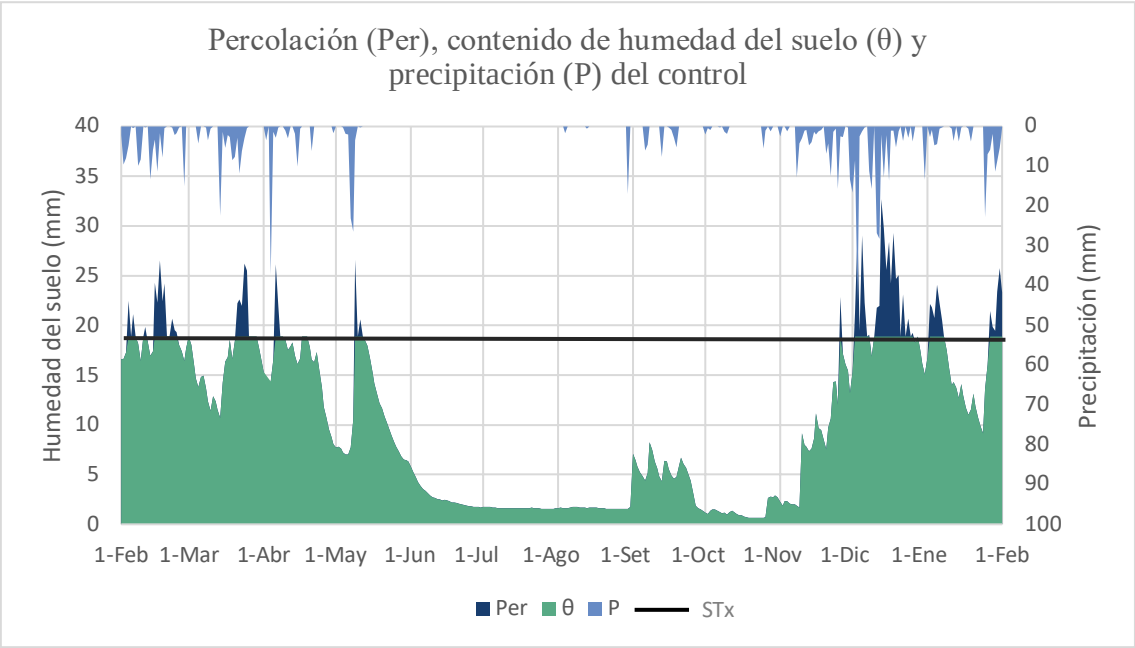
Nota. Elaboración propia.

Figura 38. Percolación (Per), contenido de humedad del suelo (θ) y precipitación (P) del tratamiento experimental T03 a lo largo del periodo de investigación



Nota. Elaboración propia.

Figura 39. Percolación (Per), contenido de humedad del suelo (θ) y precipitación (P) del control (Ctrl) a lo largo del periodo de investigación

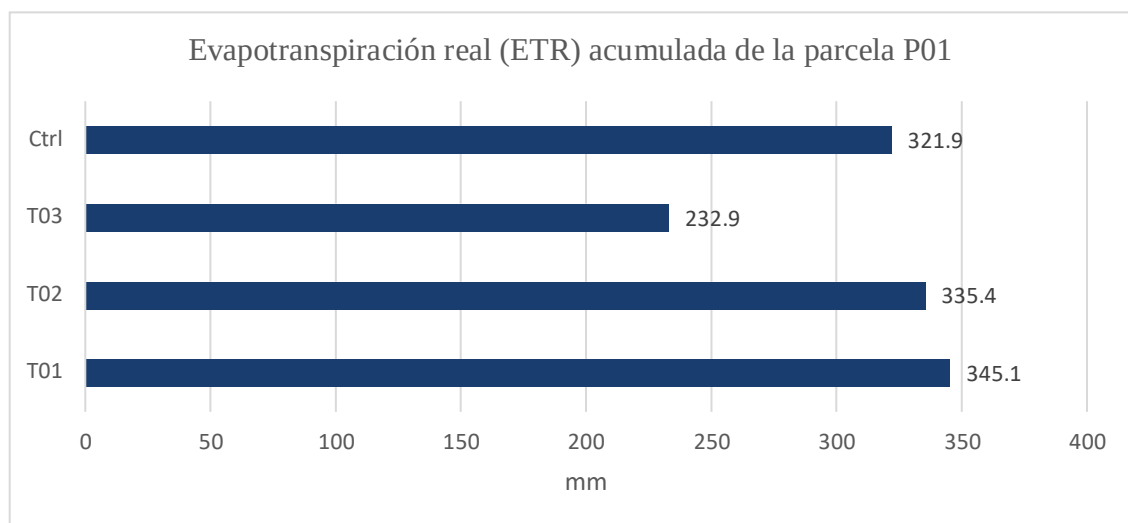


Nota. Elaboración propia.

5.1.8. Evapotranspiración de referencia (ET_o) y evapotranspiración real (ET_R)

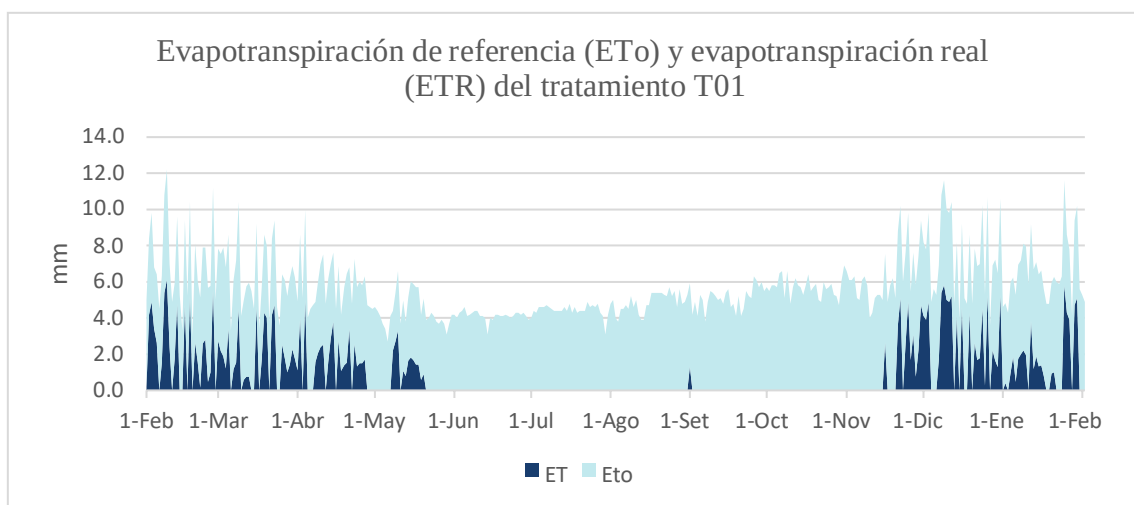
La evapotranspiración de referencia (ET_o) se calculó utilizando principalmente la temperatura registrada por los sensores TMS4 a nivel del suelo para cada tratamiento. Entre los tres tratamientos y el control, se registraron un total de 700 800 datos de temperatura a nivel del suelo. A partir de la ET_o, se calculó la evapotranspiración real (ET) de todos los tratamientos experimentales y del control, cuyos resultados se presentan a continuación:

Figura 40. Evapotranspiración real (ET_R) acumulada de todos los tratamientos experimentales de la parcela P01



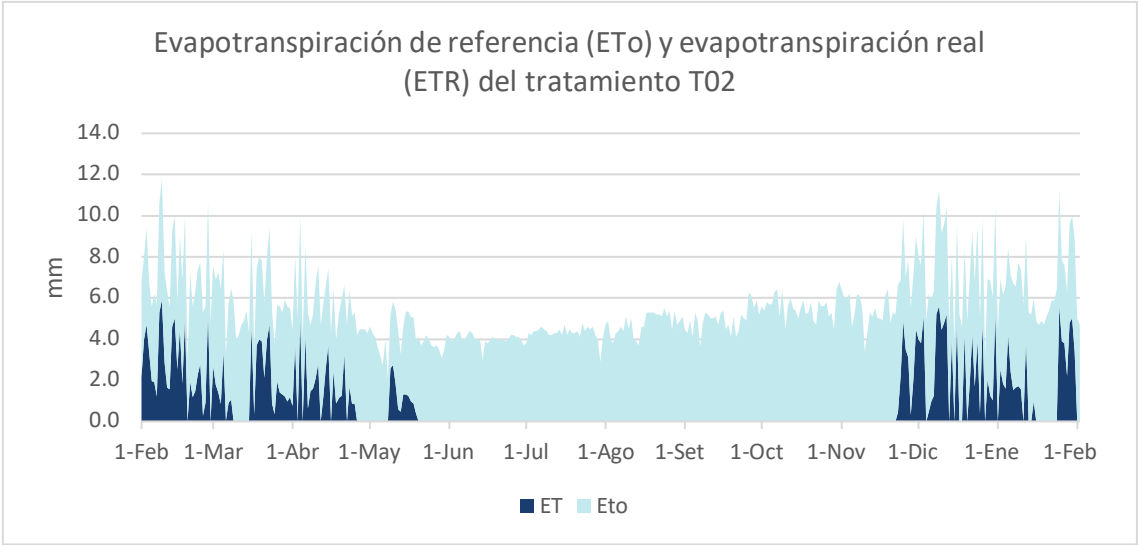
Nota. Elaboración propia.

Figura 41. Evapotranspiración de referencia (ET_o) y evapotranspiración real (ET_R) del tratamiento T01 durante el periodo de investigación



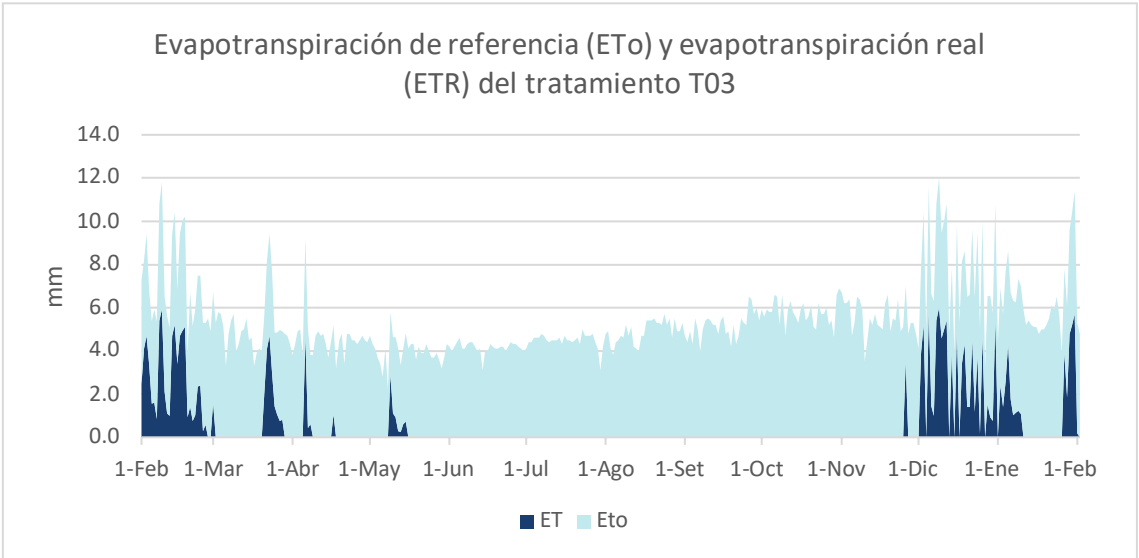
Nota. Elaboración propia.

Figura 42. Evapotranspiración de referencia (ETo) y evapotranspiración real (ETR) del tratamiento T02 durante el periodo de investigación



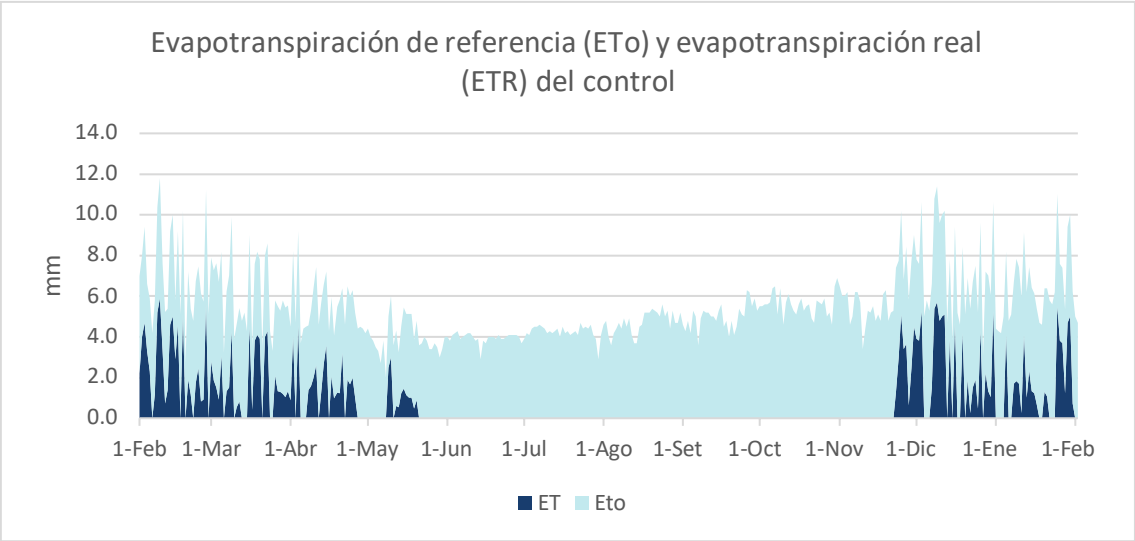
Nota. Elaboración propia.

Figura 43. Evapotranspiración de referencia (ETo) y evapotranspiración real (ETR) del tratamiento T03 durante el periodo de investigación



Nota. Elaboración propia

Figura 44. Evapotranspiración de referencia (ETo) y evapotranspiración real (ETR) del control durante el periodo de investigación



Nota. Elaboración propia.

5.1.9. Resumen de componentes del balance hídrico

A continuación, se muestran todos los elementos que componen la ecuación general del balance hídrico para todos los tratamientos y el control, de forma acumulada durante el año de investigación, y a nivel mensual.

Tabla 25. Componentes del balance hídrico de todos los tratamientos y el control de la parcela P01 acumulados durante el periodo de investigación

Tratamiento	Componentes del balance hídrico (mm)				
	P	Es	ET	Per	$\Delta\theta$
T01	781.4	159.1	345.1	319.5	4.5
T02	781.4	151.7	335.4	85.7	4.5
T03	781.4	160.8	232.9	11.9	4.2
Ctrl	781.4	145.0	321.9	229.0	6.7

Nota. Elaboración propia.

Tabla 26. Componentes del balance hídrico del tratamiento T01 a nivel mensual

Fecha	Componentes del balance hídrico del tratamiento T01 (mm)				
	P	Es	ET	Per	$\Delta\theta$
Feb-23	105.80	17.20	63.94	62.74	0.53
Mar-23	82.60	14.60	54.96	41.61	-8.72
Abr-23	69.20	21.65	45.72	15.97	-5.04

May-23	57.00	2.83	19.51	18.61	-2.23
Jun-23	0.00	0.00	0.00	0.00	-3.54
Jul-23	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.93
Ago-23	19.20	0.40	0.00	0.00	9.05
Set-23	27.20	0.00	1.32	0.00	-8.00
Oct-23	14.40	0.47	0.00	0.00	-0.56
Nov-23	99.00	15.12	31.36	3.94	14.88
Dic-23	217.80	71.70	80.43	125.12	-3.60
Ene-24	89.20	15.10	47.85	51.45	12.67
Suma	781.4	159.1	345.1	319.5	4.5

Nota. Elaboración propia.

Tabla 27. Componentes del balance hídrico del tratamiento T02 a nivel mensual

Fecha	Componentes del balance hídrico del tratamiento T02 (mm)				
	P	Es	ET	Per	$\Delta\theta$
Feb-23	105.80	16.17	76.30	11.18	1.17
Mar-23	82.60	13.82	48.80	6.77	-6.32
Abr-23	69.20	20.89	42.11	2.63	-4.80
May-23	57.00	2.54	14.41	3.93	-1.22
Jun-23	0.00	0.00	0.00	0.00	-4.54
Jul-23	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.77
Ago-23	19.20	0.34	0.00	0.00	6.25
Set-23	27.20	0.00	0.00	0.00	-5.07
Oct-23	14.40	0.43	0.00	0.00	-0.33
Nov-23	99.00	14.24	21.05	0.00	13.63
Dic-23	217.80	68.96	80.08	52.70	-2.14
Ene-24	89.20	14.27	52.67	8.48	8.61
Suma	781.4	151.7	335.4	85.7	4.5

Nota. Elaboración propia.

Tabla 28. Componentes del balance hídrico del tratamiento T03 a nivel mensual

Fecha	Componentes del balance hídrico del tratamiento T03 (mm)				
	P	Es	ET	Per	$\Delta\theta$
Feb-23	105.80	17.45	72.02	0.00	0.41
Mar-23	82.60	14.79	19.45	0.00	-3.40
Abr-23	69.20	21.82	6.69	0.00	-4.05
May-23	57.00	2.90	6.83	0.00	-1.45
Jun-23	0.00	0.00	0.00	0.00	-2.96
Jul-23	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.18
Ago-23	19.20	0.42	0.00	0.00	2.13
Set-23	27.20	0.00	0.00	0.00	-0.90
Oct-23	14.40	0.48	0.00	0.00	-0.28
Nov-23	99.00	15.32	3.50	0.00	7.98
Dic-23	217.80	72.33	85.83	11.89	3.25
Ene-24	89.20	15.29	38.58	0.00	3.66
Suma	781.4	160.8	232.9	11.9	4.2

Nota. Elaboración propia.

Tabla 29. Componentes del balance hídrico del control a nivel mensual

Fecha	Componentes del balance hídrico del control (mm)				
	P	Es	ET	Per	$\Delta\theta$
Feb-23	105.80	15.25	71.11	34.98	4.25
Mar-23	82.60	13.13	51.98	23.98	-5.56
Abr-23	69.20	20.20	40.00	10.32	-7.59
May-23	57.00	2.28	13.86	9.47	-1.94
Jun-23	0.00	0.00	0.00	0.00	-4.01
Jul-23	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.13
Ago-23	19.20	0.29	0.00	0.00	5.46
Set-23	27.20	0.00	0.00	0.00	-5.96
Oct-23	14.40	0.39	0.00	0.00	1.10
Nov-23	99.00	13.47	23.98	3.95	13.04
Dic-23	217.80	66.47	73.59	108.20	1.46
Ene-24	89.20	13.54	47.37	38.06	6.56
Suma	781.4	125.0	321.9	229.0	6.7

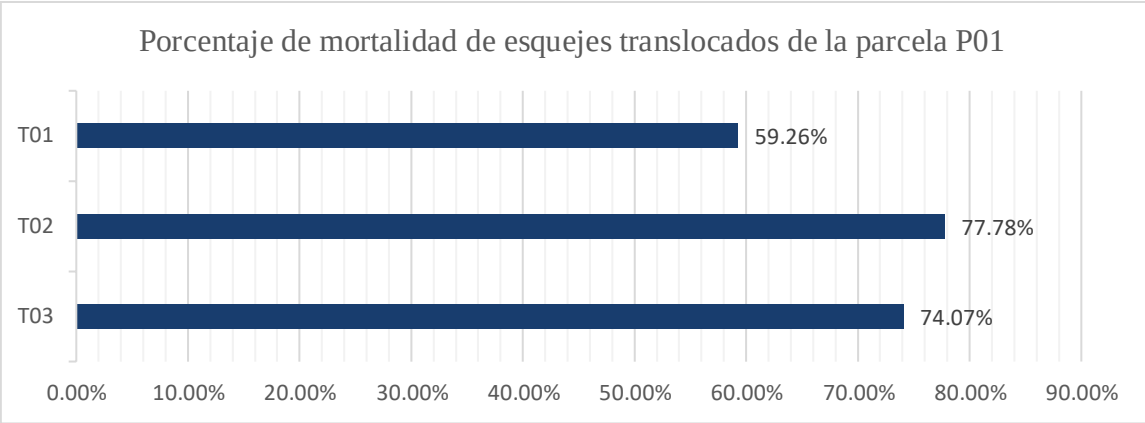
Nota. Elaboración propia.

5.2. Resultados de vegetación

5.2.1. Mortalidad de esquejes translocados

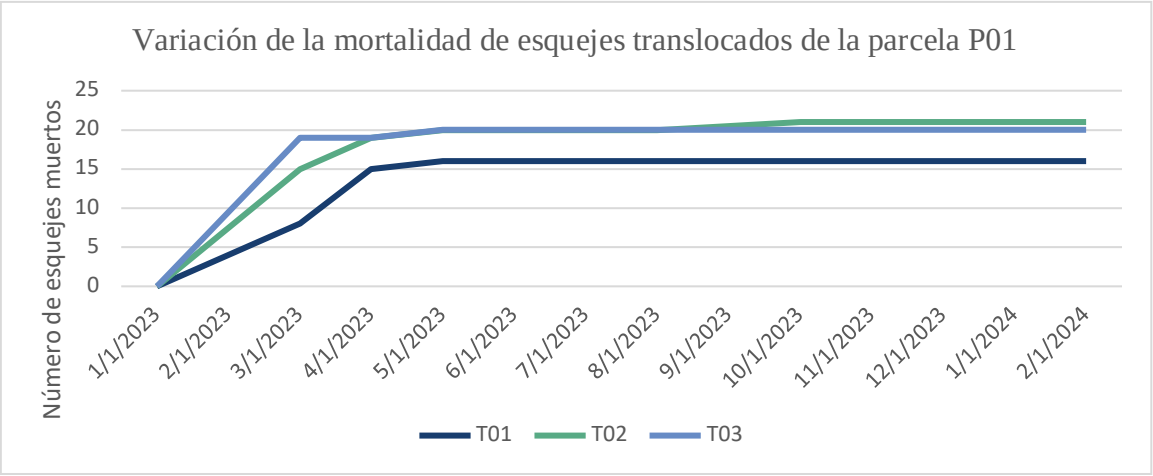
Inicialmente, cada tratamiento comenzó con 27 esquejes translocados, sin embargo, como se mencionó previamente, muchos esquejes fueron muriendo debido a un retraso considerable de la temporada de lluvias entre el año 2022 y el año 2023. Los esquejes sobrevivientes fueron monitoreados periódicamente durante el periodo de la investigación. La mortalidad de los esquejes por tratamiento durante el periodo objeto de estudio fue el siguiente:

Figura 45. Resultados de mortalidad de esquejes al final del periodo de investigación



Nota. Elaboración propia.

Figura 46. Variación de la mortalidad de esquejes translocados a lo largo del periodo de investigación

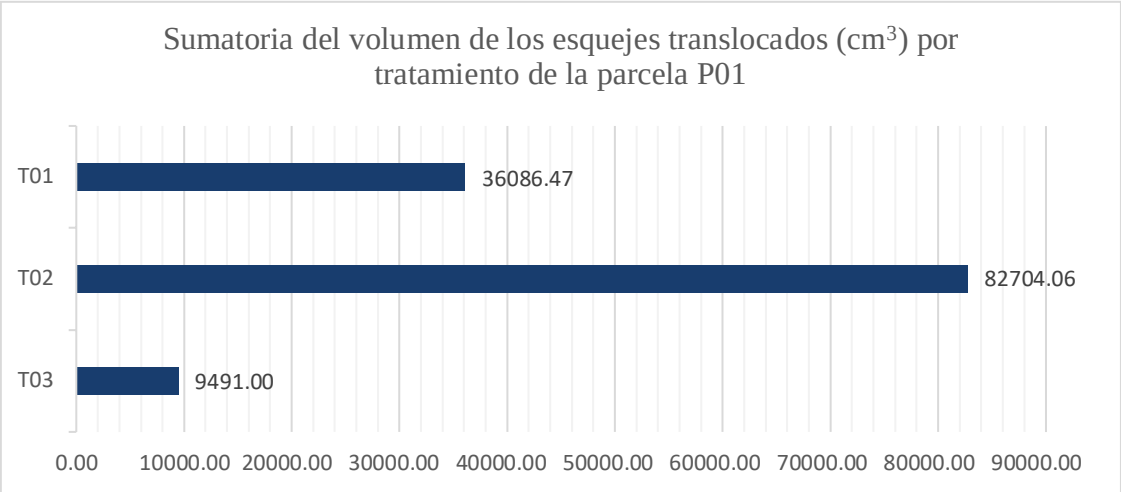


Nota. Elaboración propia.

5.2.2. Vigor de los esquejes translocados

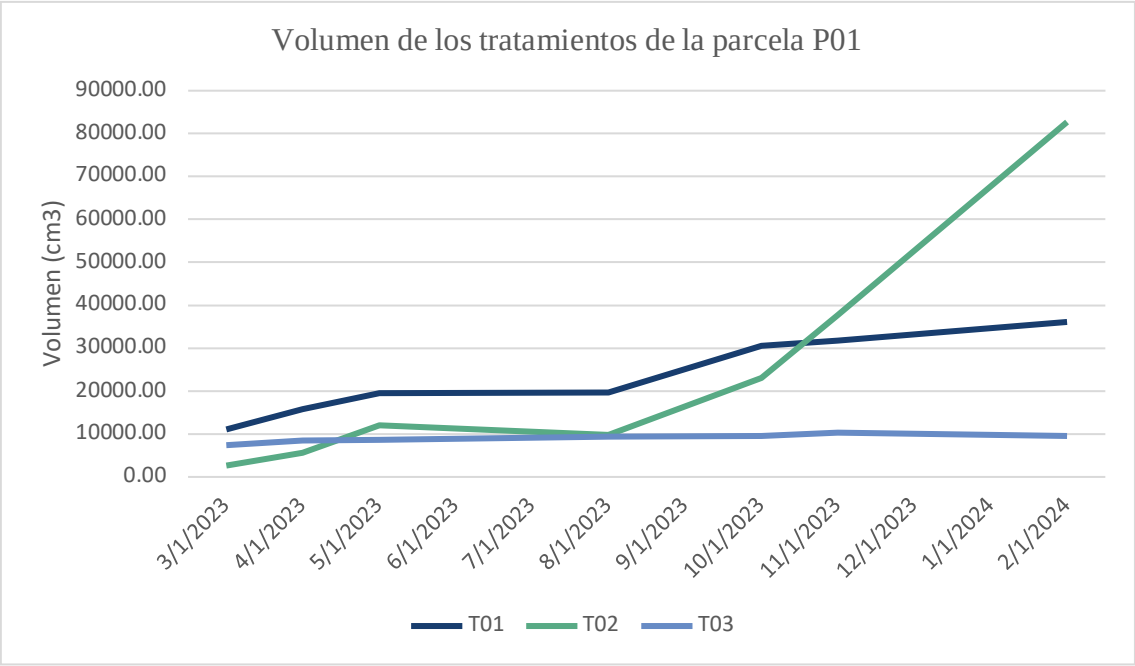
El vigor de los esquejes para cada tratamiento se determinó mediante la sumatoria del volumen de todos los esquejes por tratamiento experimental, a lo largo del período de investigación. Los resultados de esta sumatoria se muestran en la figura 47, mientras que la variación del volumen de los esquejes a lo largo del tiempo se presenta en la figura 48.

Figura 47. Vigor de los esquejes translocados por tratamiento experimental



Nota. Elaboración propia.

Figura 48. Variación del volumen de los esquejes translocados por tratamiento durante el periodo de investigación



Nota. Elaboración propia.

5.3. Resultados estadísticos

5.3.1. Evaluación estadística del modelo de balance hídrico

De las tres pruebas estadísticas realizadas para evaluar el modelo de balance hídrico en cada tratamiento, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 30. Resultados estadísticos de la evaluación del modelo de balance hídrico

Tratamiento	NSE	PBIAS	RSR
T01	Bueno	Muy bueno	Bueno
T02	Muy bueno	Satisfactorio	Muy bueno
T03	Satisfactorio	Insatisfactorio	Bueno
Ctrl	Bueno	Bueno	Bueno

Nota. Elaboración propia.

5.3.2. Análisis de componentes principales (ACP)

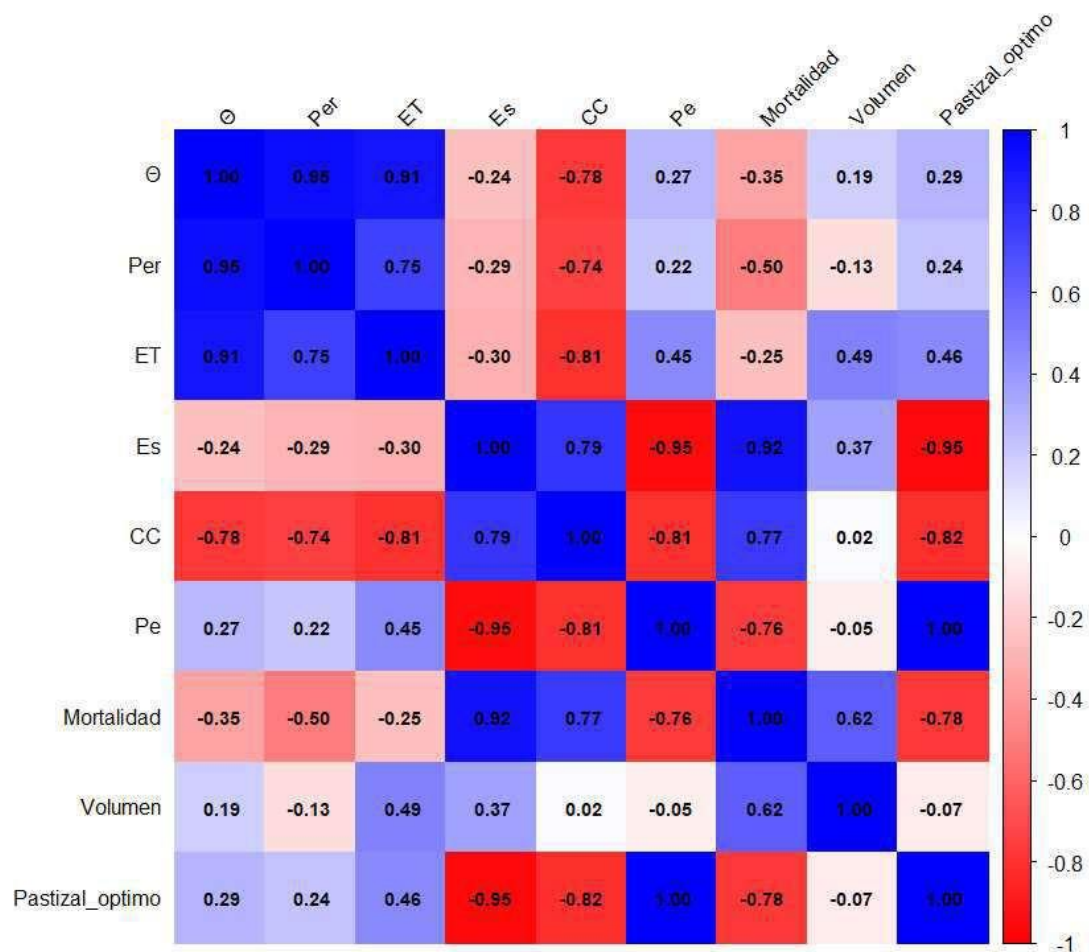
Para el análisis de componentes principales, se consideraron las variables que se muestran en la tabla 31. La correlación de estas variables llevó a dos componentes principales que en suma explican el 84.72% del comportamiento de todas las variables tanto hidrológicas como ecológicas.

Tabla 31. Variables y valores considerados en el ACP

Variable	Tratamientos			
	T01	T02	T03	Ctrl
ES (mm)	159.1	151.7	160.8	145
ET (mm)	345.1	335.4	232.9	321.9
Θ (mm)	4421.3	3533.9	2581.1	3819.7
Per (mm)	319.5	85.7	11.9	229
CC (%)	20.24	20.59	22.80	18.88
Pe (mm)	622.32	629.64	620.61	636.37
Mortalidad (%)	59.6	77.78	74	0
Volumen (cm ³)	36086.47	82704.06	9491	0
Pastizal óptimo (%)	17.20%	22.41%	15.75%	27.86%

Nota. Elaboración propia.

Figura 49. Matriz de correlaciones del ACP



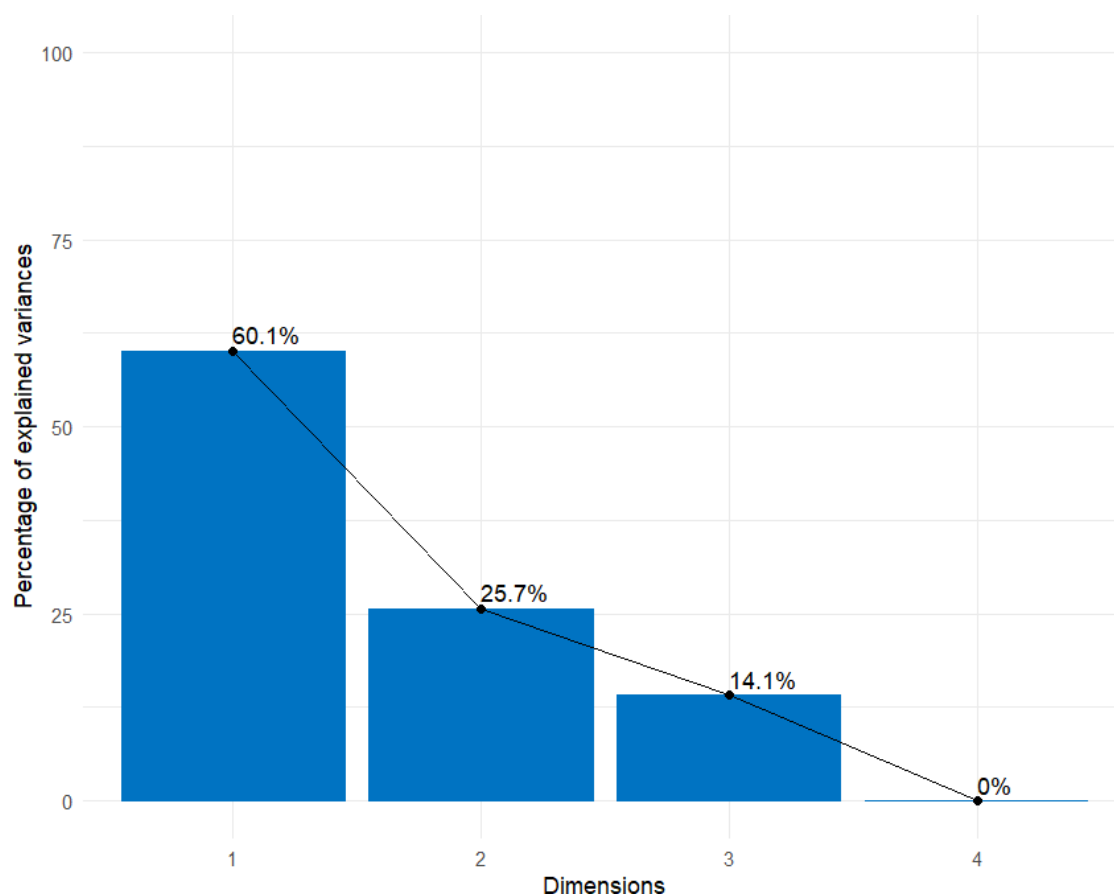
Nota. Elaboración propia.

Tabla 32. Varianza total explicada del ACP

Componente	Auto valores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de	%	Total	% de	%
		varianza	acumulado		varianza	acumulado
1	5.401	60.100	60.100	5.401	60.009	60.100
2	2.224	25.712	85.812	2.224	24.712	85.812
3	1.375	15.278	100.000			

Nota. Elaboración propia.

Figura 50. Gráfico de sedimentación del ACP



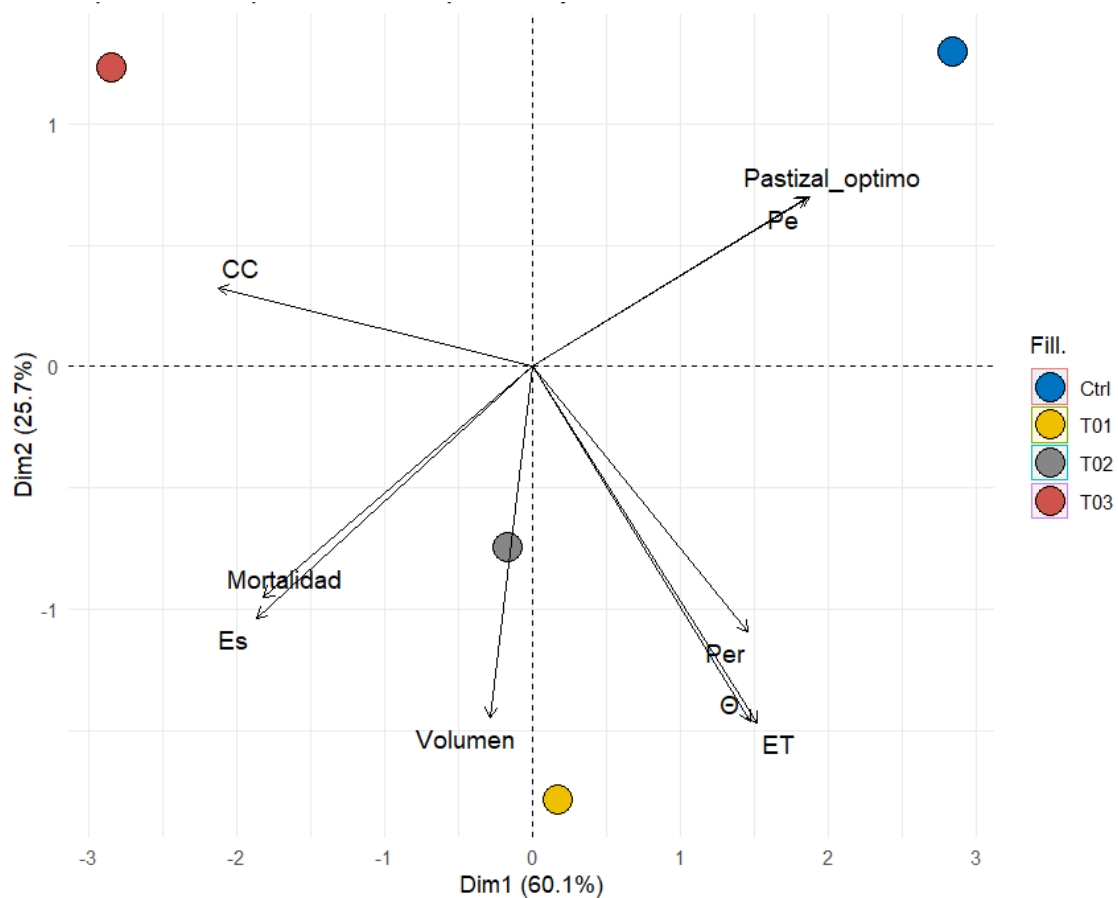
Nota. Elaboración propia.

Tabla 33. Matriz de componentes del ACP

	Componente	
	1	2
Θ	.694	.687
Per	.666	.545
ET	.739	.645
ES	-.870	.385
CC	-.992	-.124
Pe	.871	-.385
Mor	-.816	.432
Vol	-.073	.598
PasOp	.871	-.427

Nota. Elaboración propia.

Figura 51. Gráfico de componentes principales



Nota. Elaboración propia.

5.3.3. Prueba T de student para muestras relacionadas

Inicialmente se desarrolló una prueba de Kolmogorov-Smirnov para evaluar si los datos presentaban una distribución normal, esta condición se describe como idónea para la realización de la prueba T de student, sin embargo, en grandes grupos de datos como en los de esta investigación, no representa una condición limitante para el desarrollo de la prueba. En todos los casos, los datos de los componentes del balance hídrico demostraron no tener una distribución normal ($p < 0.05$).

A continuación, se muestran los resultados de la prueba T de student para todos los componentes del balance hídrico en la tabla 35.

Tabla 34. Valores (t) y de significancia (p) de la prueba T de student para los componentes del balance hídrico de todos los tratamientos experimentales y el control.

Tratamientos	Per		Es		Θ		ET	
	t	p	t	p	t	p	t	p
T01	-5.359	.000	-.774	.439	-22.124	.000	-1.247	.213
T02	-2.472	.014	-.810	.418	-16.512	.000	-1.348	.179
T03	3.783	.000	-.809	.419	1.337	.182	.781	.435
Ctrl	-1.771	.077	-.811	.418	-6.518	.000	-.154	.878

Nota. Elaboración propia.

5.3.4. Prueba de Chi-cuadrado para evaluar la mortalidad de los esquejes

Se ordenaron las variables categóricas considerando los tratamientos de revegetación y la mortalidad de los esquejes en la tabla XX. Los resultados de la prueba de Chi-cuadrado indican que no existe una asociación entre los tratamientos de revegetación y la mortalidad de los esquejes.

Tabla 35. Variables categóricas de tratamientos de revegetación y mortalidad de esquejes

	T01	T02	T03
Sobrevive	11	6	7
Muere	16	21	20

Nota. Elaboración propia.

Tabla 36. Tabla de contingencia de tratamientos y mortalidad

		Sobrevivencia		Total	
		Si	No		
Tratamientos	T01	Recuento	11	16	27
		Frecuencia esperada	8,0	19,0	27,0
		% dentro de Tratamiento	40,7%	59,3%	100,0%
		% dentro de mortalidad	45,8%	28,1%	33,3%
		% del total	13,6%	19,8%	33,3%
	T02	Recuento	6	21	27
		Frecuencia esperada	8,0	19,0	27,0
		% dentro de Tratamiento	22,2%	77,8%	100,0%
		% dentro de mortalidad	25,0%	36,8%	33,3%

T03	% del total	7,4%	25,9%	33,3%
	Recuento	7	20	27
	Frecuencia esperada	8,0	19,0	27,0
	% dentro de Tratamiento	25,9%	74,1%	100,0%
	% dentro de mortalidad	29,2%	35,1%	33,3%
	% del total	8,6%	24,7%	33,3%
Total	Recuento	24	57	81
	Frecuencia esperada	24,0	57,0	81,0
	% dentro de Tratamiento	29,6%	70,4%	100,0%
	% dentro de mortalidad	100,0%	100,0%	100,0%
	% del total	29,6%	70,4%	100,0%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 37. Pruebas de Chi-cuadrado

	Valor	gl	p asintótica (bilateral)	P exacta (bilateral)	P exacta (unilateral)	Probabilidad en el punto
Chi-cuadrado de Pearson	2,487	2	,288	,397		
Razón de verosimilitudes	2,440	2	,295	,397		
Estadístico exacto de Fisher	2,384			,397		
Asociación lineal por lineal	1,404	1	,236	,300	,150	,059
N de casos válidos	81					

Nota. Elaboración propia.

5.4. Validación del instrumento de investigación

Los resultados de la validación del instrumento de investigación, realizada por 4 expertos en los 10 ítems seleccionados, se presentan en la tabla 35. El CVC promedio final obtenido de estos 10 ítems es de 96.36%, lo que indica una validez y concordancia excelentes del instrumento de investigación.

Tabla 38. Resultados de la validación por cada experto

Ítems	Expertos			
	R. Diaz	O. Vilca	V. Bustinza	A. Mendoza
1	20	19	19	20
2	19	18	19	20
3	18	20	20	20
4	19	19	19	20
5	19	19	20	20
6	20	19	19	20
7	19	20	20	20
8	18	19	19	20
9	19	19	19	20
10	19	20	18	20

Nota. Elaboración propia.

Tabla 39. Resultados del CVC de cada ítem evaluado

Ítems	MX	Vmax	CVCi	Pei	CVC
1	19.5	20	0.975	0.00390625	0.97109375
2	19	20	0.95	0.00390625	0.94609375
3	19.5	20	0.975	0.00390625	0.97109375
4	19.25	20	0.9625	0.00390625	0.95859375
5	19.5	20	0.975	0.00390625	0.97109375
6	19.5	20	0.975	0.00390625	0.97109375
7	19.75	20	0.9875	0.00390625	0.98359375
8	19	20	0.95	0.00390625	0.94609375
9	19.25	20	0.9625	0.00390625	0.95859375
10	19.25	20	0.9625	0.00390625	0.95859375
Promedio CVC (%)					96.36

Nota. Elaboración propia.

CAPÍTULO VI

6. Discusión

6.1. Mortalidad total de los esquejes de la parcela P03

El proceso de revegetación con translocaciones de *Festuca dolichophylla* se desarrolló en diferentes momentos para cada parcela. En el caso de la parcela P03, las plantaciones se realizaron durante la segunda semana de diciembre; y para la parcela P01, las plantaciones se efectuaron durante la segunda semana de enero. Se realizaron en fechas distintas por la complejidad logística que implicaba extraer y plantar ordenadamente 81 esquejes a más de 4000 m.s.n.m.

Se escogieron los meses de diciembre y enero para las plantaciones puesto que coinciden con la llegada de temporada de lluvias, que en años regulares inicia entre octubre y noviembre. Sin embargo, el inicio de la temporada de lluvias a finales del año 2022 se retrasó considerablemente en la sierra sur del Perú, tal como lo indica el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, Por sus siglas en ingles) de diciembre de 2022 elaborado por SENAMHI (2022). Este índice indica condiciones secas severas y extremas en el área de estudio, como se muestra en la figura 52.

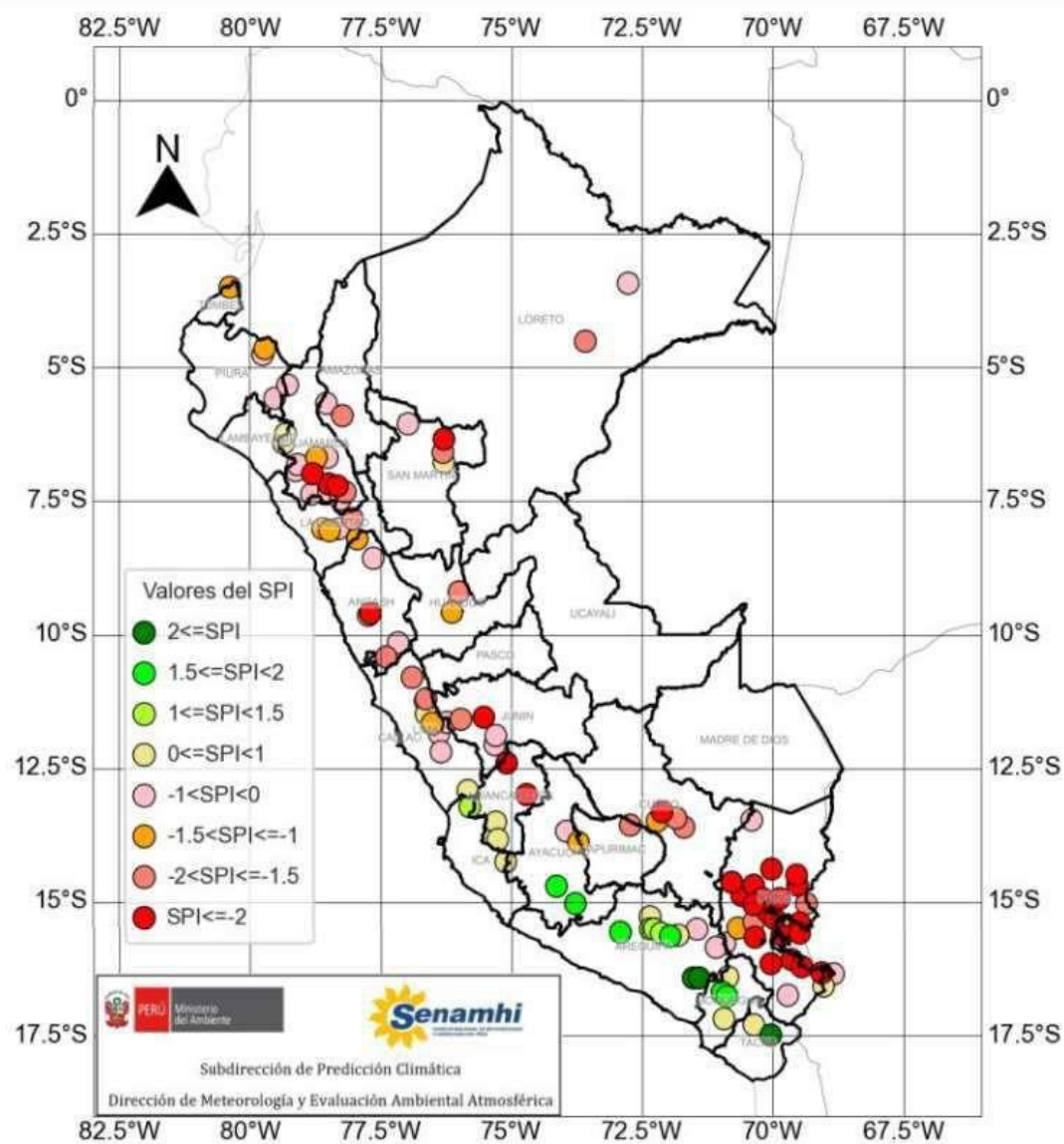
Como ocurre con muchas anomalías climáticas, resulta complicado e incluso imposible predecirlas y prevenir sus consecuencias. En esta investigación, las condiciones de sequía severa resultaron en una alta mortalidad de los esquejes plantados durante los meses de diciembre y enero.

Figura 52. Categorías del SPI.

Extrem HÚMEDO	$\geq +2$
Muy HÚMEDO	1.5 a 1.99
Moderadamente HÚMEDO	1.0 a 1.49
Cercano a lo NORMAL	-0.99 a 0.99
Moderadamente SECO	-1.0 a -1.49
Severamente SECO	-1.5 a -1.99
Extrem SECO	≤ -2.0

Nota. Obtenido de (SENAMHI, 2022).

Figura 53. Índice de sequía SPI de diciembre de 2022 para todo el Perú



Nota. Obtenido de (SENAMHI, 2022).

6.2. Componentes del balance hídrico

6.2.1. Escorrentía superficial (ES)

Los valores resultantes de ES para todos los tratamientos y el control son muy similares entre sí (desviación estándar ± 7.26 mm), además no existe una diferencia significativa de la ES del periodo previo y posterior a todos los tratamientos de revegetación ($p > 0.05$). Esto se debe principalmente a que el método del número de curva (NC) empleado para el cálculo de la ES, considera los tipos y proporción de coberturas presentes y el tipo de

suelos (Chow *et al.*, 1994), los cuales son muy semejantes entre los tratamientos y el control en ambos periodos de tiempo.

6.2.2. Contenido de humedad (θ) y Cambio de humedad del suelo ($\Delta\theta$)

El contenido de humedad del suelo (θ) a nivel diario tuvo fluctuaciones en sincronía con la precipitación. Los valores más altos de humedad del suelo se presentaron en los meses más lluviosos de ese año (noviembre a mayo) y los valores más bajos, en los meses secos (abril a octubre). Los valores más altos de humedad acumulada diaria (832.27 mm más que la media) y en promedio (2.27 mm más que la media) corresponden al tratamiento T01. Además, se evidencia una diferencia significativa entre el periodo previo y posterior a la intervención con revegetación ($p < 0.05$), con un incremento en la media de los datos ($t = -22.124$). Consideramos que esto se debe principalmente a la influencia que tuvo la intervención con revegetación. Así, la aplicación de grandes cantidades de abono orgánico mejoró en cierta medida la clase textural del suelo, lo que permitió una mejor retención de humedad.

Los valores más bajos de humedad del suelo tanto acumulado (1007.92 mm menos que la media) como en promedio (2.76 mm menos que la media) corresponden al tratamiento T03. Además, según la prueba T de student, no habría una diferencia significativa en el contenido de humedad entre el periodo previo y posterior a la revegetación ($p > 0.05$). Esto se debe posiblemente a la escasa sobrevivencia de esquejes translocados y al poco volumen que estos presentan, lo que no provocó ningún cambio en el almacenamiento de agua en el suelo en este tratamiento, manteniéndose en las mismas condiciones desde el año 2022.

En el caso del tratamiento T02 y el Ctrl, si se evidencio un cambio significativo en el contenido de humedad del suelo en el periodo antes y después de las intervenciones ($p < 0.05$), aunque los valores de humedad de ambos estuvieron cerca a la media de todos los tratamientos. Es posible que el control presentara un cambio positivo en el incremento de las medias ($t = -6.518$) debido al desarrollo de cobertura vegetal natural en el año de la intervención con revegetación.

Finalmente, el cambio de humedad del suelo ($\Delta\theta$) en todos los tratamientos es muy similar (desviación estándar ± 1.15 mm), debido a que, en todos los casos, los valores positivos

de la temporada de lluvias se compensaron con los valores negativos de la temporada seca.

6.2.3. Percolación (Per)

Los valores de percolación de todos los tratamientos y del control son claramente diferenciados entre sí (desviación estándar ± 168.5 mm). El tratamiento T01 presentó los valores más altos, con 157.97 mm por encima de la media. Además, según la prueba T de Student, este tratamiento mostró un cambio significativo en la percolación entre el periodo previo y posterior a la revegetación ($p < 0.05$), con una fuerte tendencia al incremento de la media ($t = -5.359$). Este incremento se debe principalmente a los altos valores de humedad registrados en este tratamiento.

Por otro lado, el tratamiento T03 mostró los valores más bajos, con 149.62 mm por debajo de la media, casi alcanzando el punto de no tener percolación. También presentó diferencias significativas entre el periodo previo y posterior a la revegetación ($p < 0.05$), pero con una tendencia a la reducción de las medias ($t = 3.783$). Esta reducción está influenciada por los bajos valores de humedad y por tener la capacidad de campo (CC) más alta entre todos los tratamientos (22.8%), lo que elevó la capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo (STx) y dificultó la generación de agua gravitacional y, por lo tanto, de la percolación.

El tratamiento T02 mostró valores inusualmente bajos de percolación, con 75.82 mm por debajo de la media. Sin embargo, presentó una diferencia significativa entre el periodo previo y posterior a la revegetación ($p < 0.05$), con una ligera tendencia al incremento ($t = -2.472$). Esto podría deberse a los bajos valores de supervivencia de esquejes. Aunque los esquejes sobrevivientes mostraron un volumen superior al de los otros tratamientos, estaban ubicados principalmente en la parte baja de la subparcela y alejados de los sensores TMS4 de humedad. Además, el fosfato diamónico, aplicado en volúmenes muy reducidos, no influye en la textura del suelo ni en la retención de humedad.

En el control, no se encontró evidencia de un cambio significativo en la percolación entre el periodo previo y posterior a la revegetación ($p > 0.05$). Aunque generó una percolación superior a la media (67.47 mm por encima de la media), esto se debió más a la reducción de la media causada por los bajos valores de percolación del tratamiento T03. Estos

resultados indican que, en ausencia de intervención con revegetación, no hubo cambios en la percolación del control. Es posible que el control presente una percolación superior a los tratamientos T02 y T03 debido a la presencia de cobertura vegetal natural, principalmente *Muehlenbeckia volcanica*, que se desarrolló en el área del control.

6.2.4. Evapotranspiración real (ET)

Los valores de evapotranspiración real (ET) son muy similares entre el tratamiento T01, T02 y el control (desviación estándar ± 11.65 mm), sin embargo, son inusualmente bajos para el tratamiento T03 (75.92 mm menos que la media). Esto podría deberse a la escasa cobertura vegetal en condiciones óptimas que posee (15.75 %), que es la más baja de todas. Por otro lado, no se encontró una diferencia significativa entre los valores de ET en el periodo previo y posterior a la revegetación en todos los casos ($p > 0.05$).

6.3. Vigor y mortalidad de los esquejes translocados

6.3.1. Mortalidad de esquejes translocados

Como los resultados de la prueba de Chi-cuadrado indican, no existe una asociación entre los tratamientos de revegetación y la mortalidad de los esquejes ($p > 0.05$), esto se debe posiblemente a la intervención del factor de las críticas condiciones de sequía registradas a finales del año 2022 que tuvieron una fuerte influencia sobre la mortalidad de los esquejes. Sin embargo, en un análisis más exhaustivo de las razones de mortalidad a nivel del detalle de los tratamientos, podemos decir cómo se muestran en los resultados de la parcela P01, que el tratamiento T01 tuvo una menor mortalidad. Esto se debe principalmente al mayor contenido de humedad del suelo que presentaba este tratamiento, y a las mejores condiciones de textura del suelo que proporciono el estiércol de bovino, así como los nutrientes presentes en el tratamiento.

En el caso del tratamiento T02, este presentó una alta mortalidad. Según Brady y Weil (2002) la adición de fertilizantes de origen sintético puede incrementar la salinidad del suelo y por lo tanto la presión osmótica, lo que reduce el flujo y disponibilidad de agua para las plantas. Así, el fuerte estrés hídrico producto del incremento de la presión osmótica fue lo que posiblemente ocasiono la alta mortalidad en el tratamiento T02. Esto

también fue evidenciado por Trillo (2021) donde también se presentó una alta mortalidad en macollos basales de *Festuca dolichophylla* que fue atribuido a la salinidad producto de fertilizantes sintéticos.

Por otro lado, el tratamiento T03, al igual que el tratamiento T02, mostró altos niveles de mortalidad. Sin embargo, en el caso de T03, esto se debió principalmente a la prolongada temporada seca que ocurrió a finales de 2022 y a la falta de apoyo con fertilizantes y materia orgánica para el establecimiento de los esquejes.

6.3.2. Vigor de los esquejes translocados

El vigor de los esquejes translocados representado por la sumatoria de los volúmenes muestra que el vigor de los esquejes del tratamiento T02 es el más alto (82 404.06 cm³) a pesar de tener pocos esquejes vivos en comparación con el tratamiento T01. Esto nos permite interpretar que, si bien el abono inorgánico aplicado en el tratamiento T02 no facilitó la supervivencia de esquejes, si ayudó en el desarrollo vegetal de los sobrevivientes, obteniendo mejores resultados que con el abono orgánico. En contraste, los esquejes del tratamiento T03 que no recibieron ningún tipo de fertilizantes, no solo sufrieron una alta mortalidad, sino que también presentaron un bajo vigor.

6.4. Análisis estadístico

6.4.1. Evaluación estadística del modelo de balance hídrico

El resultado de las tres pruebas estadísticas (NSE, PBIAS y RSR) empleadas para determinar la efectividad del modelo de balance hídrico, indican valores que van desde satisfactorio hasta muy bueno, con excepción de la prueba PBIAS para el tratamiento T03. Esto puede explicarse debido a que los rangos de calificación de la prueba PBIAS requieren ajustarse cuando los datos presentan una incertidumbre muy baja o alta (Moriasi *et al.*, 2007). En efecto, es el caso de los datos modelados del tratamiento T03 que, a causa de valores tan bajos de humedad, difiere mucho de los otros tratamientos evaluados.

Considerando esta excepción, los resultados de la evaluación estadística del balance hídrico, resultan apropiados para esta investigación.

6.4.2. Análisis de componentes principales (ACP)

La correlación de los valores comparables de cada tratamiento experimental y del control resultó en la identificación de dos componentes principales que, en conjunto, explican más del 80% de las variables analizadas. Este análisis resulta propicio para una ponderación de variables y la determinación de un tratamiento más efectivo.

Así, las variables de evapotranspiración real (ET), contenido de humedad del suelo (θ) y percolación (Per) se agrupan juntas en el gráfico de componentes, lo cual resulta entendible puesto que estas variables dependen principalmente de la disponibilidad de agua (variables hidrológicas). La precipitación efectiva (Pe) y las condiciones del pastizal se agrupan juntas, mostrando la estrecha relación entre la cobertura vegetal y la parte de la precipitación que puede ser aprovechada.

El tratamiento T01 se ubica en la mejor posición respecto a las demás variables, mostrando los mejores valores relacionados a la hidrología, como contenido de humedad del suelo y percolación. Por ello, considerando que el propósito es encontrar un tratamiento que mejore la dinámica hídrica de la capa superficial del suelo el tratamiento T01 resulta el más indicado.

6.4.3. Validación del instrumento de investigación

La validación del instrumento de investigación fue realizada por 4 expertos profesionales de INAIGEM, quienes tienen experiencia en investigación sobre temas asociados a la hidrología y ecología. Si bien existen varios métodos para validar instrumentos, como el análisis factorial (Tucker, 1961), el índice de validez de contenido (Lawshe, 1975), y el índice de congruencia ítem-objetivo (Rovinelli y Hambleton, 1977), entre otros, estos suelen requerir la participación de alrededor de 10 expertos, lo cual puede ser difícil de alcanzar en el campo de la ecohidrología. Por tanto, se optó por utilizar el método del coeficiente de contenido (Hernández-Nieto, 2002), el cual fue considerado el más adecuado.

Los resultados de la validación indican que el instrumento obtuvo un valor de 96.36%, clasificado como excelente según Hernández-Nieto (2002). Por lo tanto, se concluye que el instrumento utilizado ha sido validado satisfactoriamente.

6.5. Limitaciones del estudio

Al ser esta investigación de tipo experimental y tener como área de estudio un ambiente natural no controlado, se presentan múltiples limitaciones, como indica Segura (2003). En efecto, cuando se utilizan grupos naturalmente formados se corre el riesgo de presentarse sesgos en la selección de los grupos experimentales (subparcelas), por lo que es importante igualar en la medida de lo posible los grupos experimentales y el control en las variables con mayor importancia. También se debe tener en cuenta que el desarrollo de una investigación en un ambiente natural genera la posibilidad de la intervención de variables ajenas al estudio en las cuales no se puede ejercer control (ej. desarrollo de vegetación natural en la parcela de control).

Otro factor a tomar en cuenta es la significativa variabilidad que tiene la humedad volumétrica del suelo a nivel superficial. Así, según Largaespada y Henríquez (2015), la correspondencia de la medición de la humedad volumétrica con técnicas de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) y métodos tradicionales, muestra una menor correspondencia (alrededor del 40%) cuando se emplea en los primeros 30 cm, a diferencia de cuando se usa entre los 30 y 60 cm donde la correspondencia llega a estar entre el 56,7% y 76,5%. Esto muestra la limitación instrumental que se tiene al medir la humedad volumétrica en la capa de suelo superficial, ya que esta capa está más expuesta a las cambiantes condiciones ambientales.

6.6. Posibles beneficios sociales y económicos

La ciencia de la ecohidrología es esencial para proporcionar información crítica y práctica tanto a los tomadores de decisiones como a la sociedad, facilitando una gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos en el siglo XXI (Vose *et al.*, 2011). Este estudio ecohidrológico ofrece datos profundos y relevantes sobre la microcuenca Piuray Ccorimarca, que serán fundamentales para los responsables locales en la planificación y manejo de esta cuenca. La implementación de los resultados en proyectos de siembra y cosecha de agua no solo tiene el potencial de incrementar el volumen de agua disponible en las quebradas que abastecen la región, sino que también podría mejorar

significativamente la calidad de vida de las 14 comunidades campesinas y 18 centros poblados circundantes (Mendoza *et al.*, 2023).

Este escenario es particularmente relevante en el contexto del grave riesgo de desabastecimiento de agua que enfrenta el distrito de Chinchero, exacerbado por la acelerada disminución del volumen de agua en la laguna Piuray. En 2023, más de 10,000 habitantes de Chinchero, cuya vida cotidiana depende de esta laguna, vieron drásticamente reducido su suministro de agua a tan solo dos horas al día (Valdivia, 2023). Ante esta alarmante situación, la investigación ecohidrológica se presenta como una herramienta crucial para mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad hídrica en la región

Además, la información obtenida en este estudio desempeñará un papel clave en la optimización de los proyectos del Mecanismo de Retribución por Servicios Ecosistémicos (MERESE), establecido bajo el amparo de la Ley N° 30215, entre la EPS SedaCusco y la Municipalidad Provincial de Chinchero. Este mecanismo es fundamental para garantizar el suministro de agua a la ciudad de Cusco, que depende en un 38% de las aguas de la laguna Piuray (ANA, 2023). Mejorar la recarga hídrica a través de técnicas de infiltración en la cabecera de la microcuenca no solo asegurará la sostenibilidad de este recurso vital, sino que también generará un beneficio económico sustancial para la ciudad. Incrementar la recarga hídrica de la laguna Piuray es, por tanto, una acción estratégica indispensable para la seguridad hídrica tanto de la población de Cusco como del distrito de Chinchero, especialmente en la eventualidad de fenómenos climáticos adversos como El Niño.

Por último, esta investigación también ofrece beneficios significativos en el ámbito académico. Al ser financiada por el INAIGEM, una institución estatal, todos los datos recopilados, así como la información generada en el futuro, estarán disponibles para investigadores y académicos. Esto no solo potenciará la capacidad de investigación de las universidades en el Perú, y particularmente en Cusco, sino que también fomentará el desarrollo de nuevas investigaciones que podrían ampliar aún más el conocimiento en el campo de la ecohidrología, beneficiando a la comunidad científica y a la sociedad en general.

7. Conclusiones

Durante el periodo de investigación, todos los tratamientos de revegetación con *Festuca dolichophylla* tuvieron una influencia significativa sobre la percolación ($p < 0.05$) y en el almacenamiento de agua en el suelo ($p < 0.05$) con excepción del tratamiento T03 ($p > 0.05$), que representan dos de los factores más importante de la dinámica hídrica de la capa de suelo superficial. El análisis comparativo del balance hídrico de los tratamientos experimentales y el control reveló que el tratamiento T01, de revegetación con *Festuca dolichophylla* y abono orgánico, mostró los resultados más favorables en términos de almacenamiento de agua en el suelo y generación de agua gravitacional para la percolación, en comparación con los tratamientos T02, T03 y el control. Por consiguiente, se concluye que el tratamiento T01 representa la opción más recomendable para la revegetación a escala de cabecera en la microcuenca Piuray Ccorimarca, con el fin de mejorar la regulación hídrica.

Los tratamientos T01, T02 y el control mostraron una influencia significativa en el contenido de humedad del suelo entre el periodo previo y posterior a la intervención con revegetación ($p < 0.05$), a diferencia del tratamiento T03 que no mostró cambios significativos ($p > 0.05$) debido a su escasa influencia sobre la humedad del suelo. Los valores más altos de humedad volumétrica se registraron con el tratamiento T01, mientras que el tratamiento T03 presentó los valores más bajos durante el periodo de estudio. En conclusión, el tratamiento T01 es el más efectivo para mejorar el almacenamiento de humedad en el suelo, ya que también mostró el mayor incremento de las medias entre el periodo previo y posterior a la intervención, en comparación con todos los tratamientos.

Todos los tratamientos experimentales mostraron una influencia significativa en la generación de agua gravitacional para la percolación ($p < 0.05$) entre el periodo previo y posterior a la intervención con revegetación. El control no presentó un cambio significativo entre ambos periodos ($p > 0.05$), debido a que las condiciones de la dinámica hídrica en este espacio no cambiaron a lo largo del tiempo. El tratamiento T01 transformó 40.88% de la precipitación en agua gravitacional, en contraste con el tratamiento T03 donde esta generación fue mínima (1.52%) y el tratamiento T02 que también mostró valores bajos (10.96%). Estos hallazgos están estrechamente vinculados al contenido de humedad en el suelo y a la presencia de cobertura vegetal. Se puede concluir que la cobertura vegetal ejerce una influencia indirecta pero significativa a través del contenido

de humedad del suelo en la generación de agua gravitacional para la percolación en la capa superficial del suelo.

Los tres tratamientos experimentales y el control no mostraron una influencia significativa en los valores de evapotranspiración real entre el periodo anterior y posterior a la intervención de revegetación ($p > 0.05$). Esta falta de diferencia podría deberse a que el proceso de evaporación está más estrechamente relacionado con factores climáticos, como la precipitación, la velocidad del viento, la radiación y la humedad relativa, los cuales no presentaron variaciones significativas a lo largo del periodo de investigación. En cuanto a la transpiración, es posible que los esquejes translocados, por ser relativamente jóvenes y tener un índice de área foliar reducido debido a su pertenencia a la familia de las poáceas, aún no hayan alcanzado un desarrollo suficiente para generar cambios significativos en la transpiración a nivel de parcela.

Los tres tratamientos experimentales y el control no mostraron una influencia significativa en los valores de escorrentía superficial entre el periodo previo y posterior a la intervención de revegetación ($p > 0.05$). Además, los valores de escorrentía durante el periodo de investigación fueron muy similares entre sí (desviación estándar ± 7.26 mm). Esto se debe a que el método del número de curva utilizado para calcular la escorrentía superficial toma en cuenta el área de las coberturas presentes, las cuales eran muy semejantes. La influencia de los tratamientos sobre la escorrentía podría ser más evidente a medida que las translocaciones ocupen una mayor área de cobertura en los próximos años.

No se encontró evidencia de que los tratamientos experimentales tuvieran una influencia significativa sobre la mortalidad de los esquejes translocados ($p > 0.05$), debido principalmente al prolongado periodo de sequía durante su establecimiento. No obstante, un análisis de los esquejes que sobrevivieron indica que el tratamiento T01 tuvo los valores más bajos de mortalidad, en contraste con el tratamiento T03, que presentó los más altos. Estos resultados permiten concluir que el abono orgánico facilita el establecimiento de los esquejes y reduce considerablemente la mortalidad en condiciones de escasez de agua. Por otro lado, aunque el tratamiento T02 mostró altos índices de mortalidad, el vigor de los esquejes que sobrevivieron fue notablemente superior al de los demás tratamientos. Esto sugiere que, si bien el abono inorgánico no facilita el establecimiento de esquejes recién translocados en condiciones secas, contribuye significativamente a su desarrollo vegetal.

8. Recomendaciones

Tomando en cuenta los resultados de los tratamientos T01 y T02, respecto al vigor y mortalidad, recomendamos poder realizar una investigación donde se aplique ambos tipos de fertilizantes en un mismo experimento, puesto que ambos fertilizantes tienen un aporte diferenciado.

Además, se recomienda llevar a cabo las translocaciones de pajonal cuando se tenga una alta certeza de que ha comenzado la temporada de lluvias, dado que la literatura indica que los meses de octubre o noviembre son los más idóneos para estas prácticas. No obstante, como se evidenció en esta investigación, puede haber años atípicos donde la llegada de las lluvias varíe considerablemente.

Para caracterizar mejor las condiciones hidrológicas en investigaciones semejantes, recomendamos que se pueda trabajar a diferentes profundidades del suelo. Si bien la capa de suelo superficial refleja directamente la influencia de la vegetación, un análisis de las capas más profundas podría dar luces respecto a la dinámica general de la hidrología de una cuenca.

En base a los resultados encontrados en la subparcela de control, recomendamos realizar investigaciones en otras especies vegetales, como aquellas del género *Muehlenbeckia*, buscando entender mejor su influencia sobre la regulación hídrica.

Durante la investigación se observó la presencia de varias especies de plantas desarrollándose entre los esquejes de *Festuca dolichophylla* translocados en los tratamientos T01 y T02. Esto sugiere la hipótesis de que la adición de fertilizantes ha contribuido al establecimiento de ciertas especies propias del ecosistema de pajonal de puna. Por lo tanto, recomendamos que se profundice en investigaciones que estudien la composición ecológica en los espacios donde se realicen intervenciones de revegetación utilizando fertilizantes.

Esta investigación ecohidrológica aporta nueva información sobre la influencia de los tratamientos de revegetación en la dinámica hídrica de la capa superficial del suelo. Estos datos son valiosos para los tomadores de decisiones y las instituciones en la microcuenca Piuray Ccorimarca, como la municipalidad distrital de Chinchero, la EPS Seda Cusco y el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), que pueden utilizarlos en proyectos

de siembra y cosecha de agua. Además, la academia, especialmente la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, puede beneficiarse de estos resultados para profundizar en investigaciones sobre ecohidrología en la región de Cusco.

9. Referencias bibliográficas

Alejo, J., Valer, F., Pérez, J., Canales, L., & Bustinza, V. (2014). *Manejo de pastos naturales altoandinos. Manual Técnico N°2*. Programa de Adaptación al Cambio Climático-PACC Perú, 45 p.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Recuperado de <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>

Autoridad Nacional del Agua. (2021). *Marco metodológico, criterios técnicos para la identificación, delimitación y zonificación de cabeceras de cuenca*. Recuperado de https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/4893/ANA0003400_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Autoridad Nacional del Agua. (2023). *Acelerar el cambio en la gestión de los recursos hídricos*. <https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/5414/ANA0003966.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Brady, N., & Weil, R. R. (2002). *The Nature and properties of soils* (13th ed.). Prentice Hall.

Carbo, A., & Vidal, O. (1978). *Marqueo de plantaciones*. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1978_21.pdf

Centro de Educación y Comunicación Guamán Poma de Ayala. (2013). *Estudio del plan de gestión integral de los recursos hídricos de la microcuenca de la laguna de Piuray*.

Cervantes, R., Sánchez, J., Alegre, J., Rendón, E., Baiker, J., Locatelli, B., & Bonnesoeur, V. (2021). Contribución de los ecosistemas altoandinos en la provisión del servicio ecosistémico de regulación hídrica. *Ecología Aplicada*, 20(2), 137-150. <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v20n2/1993-9507-ecol-20-02-137.pdf>

Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. <https://www.hidrosm.com/2021/01/libro-hidrologia-aplicada-ven-te-chow.html>

De Petre, A., Panigatti, J., & Ferrer, J. (2012). *Diccionario de términos edafológicos y otras voces asociadas*. https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/40372/mod_resource/content/1/DICC

IONARIO%20DE%20TERMINOS%20EDAFOLOGICOS%20Y%20OTRAS%20VOCES%20ASOCIADAS%20Autores%20Antonio%20A.%20De%20Petre%20C%20Jos%C3%A9%20L.%20Panigatti%20y%20Jos%C3%A9%20A.%20Ferrer.pdf

Eduardo, F., Gibson, P., Castro, J., Trillo, F., De la Torre, M., & Walters, S. (2024). International Biological Flora: *Festuca dolichophylla*. *Journal of Ecology*. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14343>

Flores, L., & Alcalá, J. (2010). *Manual de procedimientos analíticos Laboratorio de física de suelos*. <https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>

Forest trends. (2021). *Abriendo el caño: estado del financiamiento en la infraestructura natural para la seguridad hídrica en el Perú, 2021*. https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2021/12/Estado-del-financiamiento-en-infraestructura-natural-para-la-SIPeru_2021.pdf

Forest trends. (2022). *Cubhic 2. 0: Documento metodológico: pastizales*. <https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2022/08/CUBHIC-2.0-Documento-Methodologico-Pastizales.pdf>

García, G. (2015). *Influencia de la revegetación con Festuca humilior y la incorporación de fertilizantes en la recuperación de pastizales degradados* [Tesis de grado]. https://repositorio.concytec.gob.pe/bitstream/20.500.12390/243/3/2015_Garcia_Influencia-revegetacion-festucahumilior.pdf

Guarderas, R. (2016). *Evaluación del efecto producido por cuatro técnicas de recuperación de la cobertura vegetal en la retención de agua del suelo en el páramo oeste del nevado Antisana, Cantón Archidona, provincia de Napo* [Tesis de grado]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16530/1/CD-7195.pdf>

Hernández-Nieto, R. A. (2002). *Contributions to Statistical Analysis*. Mérida: Universidad de Los Andes.

IBM. (2022, setiembre 13). *Análisis de componentes principales categórico*. <https://www.ibm.com/docs/es/spss-statistics/saas?topic=testing-categorical-principal-components-analysis>

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). *Censos Nacionales 2017: XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas*. <https://censos2017.inei.gob.pe/redatam/>

Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2011). *Producción de pasturas en valles interandinos*. https://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/20.500.12955/751/1/Mamani-Producci%C3%B3n_pasturas_valles_interandinos.pdf

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (2018). *Inventario Nacional de Glaciares Las Cordilleras Glaciares del Perú 2018*. <https://repositorio.inaigem.gob.pe/items/69842963-64e0-4de9-9c24-f886a5c5a40d>

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (2022, julio 15). Línea base general e informe de la instalación del diseño experimental (sin tratamientos). Comunicación interna.

Lahuatte, B., & Recalde, M. (2015). *Propiedades físico-químicas del suelo como instrumentos de evaluación a las estrategias de restauración implementadas en áreas degradadas de páramo, caso de estudio: microcuencas Antisana y Pita*. Recuperado el 21 de junio de 2023, de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/11300/1/CD-6432.pdf>

Largaespada, K., & Henríquez, C. (2015). Distribución espacial de la humedad y su relación con la textura en un suelo. *Revista de Biología Tropical*, 63(3), 721-731. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0377-94242015000300137&script=sci_arttext

Ma, J., Li, Z., & Ma, B. (2020). Influences of revegetation mode on soil water dynamic in gully slope of the Chinese Loess hilly–gully region. *Natural Hazards*, 104(1), 51-72. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04157-8>

Mallqui, H. (2022). *Variación estacional del contenido de agua en el suelo en ecosistemas de pajonal natural e intervenido, Huaraz, Áncash*. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Recuperado el 12 de junio de 2023, de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5495>

Mendoza-Ato, A., Postigo, J. C., Choquehuayta-A, G., & Diaz, R. D. (2023). A conceptual model for rehabilitation of Puna grassland social–ecological systems. *Mountain Research and Development*, 43(1). <https://doi.org/10.1659/mrd.2023.00019>

Ministerio del Ambiente. (2016). *El Perú y el Cambio Climático*. Recuperado el 21 de junio de 2023, de <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/05/Tercera-Comunicaci%C3%B3n.pdf>

Ministerio del Ambiente. (2020). *Evaluación del estado de conservación y estrategias de manejo de los ecosistemas de la microcuenca de la laguna Piuray*. Recuperado el 21 de noviembre de 2022, de <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/evaluacion-estado-conservacion-estrategias-manejo-ecosistemas-0>

Ministerio del Ambiente. (s.f.). *Pre registro MRSE*. Recuperado el 12 de junio de 2023, de <https://serviciosecosistemicos.minam.gob.pe/iniciativahidrologico#:~:text=en%20un%20a%C3%B1o.-,Regulaci%C3%B3n%20H%C3%ADdrica,con%20caudales%20de%20%C3%A9poca%20seca>

Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., & Veith, T. (2007). *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. Recuperado el 21 de abril de 2024, de <https://swat.tamu.edu/media/1312/moriasimodeleval.pdf>

Ochoa, B., Buytaert, W., De Bièvre, B., Céleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C., Acosta, L., Villazón, M., Gualpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G., & Arias, S. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30(17), 3076-3090. <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>

Onsetcomp. (2022). *Actualizaciones de software HOBOWare y HOBOWare Pro*. Recuperado el 13 de diciembre de 2022, de <https://www.onsetcomp.com/support/help-center/software/hoboware>

Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura. (2021). *Progresos en el nivel de estrés hídrico*. Recuperado el 10 de febrero de 2023, de <https://www.fao.org/3/cb6241es/cb6241es.pdf>

Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura. (2008). *La Microcuenca como ámbito de planificación de los recursos naturales*. Recuperado el 16

de febrero de 2023, de <https://www.fao.org/climatechange/3032907fbeat2365b50c707fe5ed283868f23d.pdf>

Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura. (1978). *Precipitación efectiva en la agricultura de regadío*. Recuperado el 9 de noviembre de 2023, de <https://www.fao.org/3/X5560E/X5560E00.htm>

Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura. (s.f.). *Portal de suelos de la FAO*. Recuperado el 10 de febrero de 2023, de <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/es/>

Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura. (2023). *Calculadora de ET*. Recuperado el 16 de febrero de 2023, de <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/eto-calculator/es/>

Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura. (s.f.). *Generalidades*. Recuperado el 11 de febrero de 2024, de https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s01.htm#top

Paucar, S. (2019). *Efecto de la revegetación con Festuca dolichophylla en la disminución de Aciachne pulvinata en un área de pastoreo de una comunidad campesina en la región de Huancavelica*. Recuperado de <https://apirepositorio.unh.edu.pe/server/api/core/bitstreams/f5ea68f4-9467-4433-9670-807687cf9d20/content>

Paucar, Y., Forest Trends, E., Mayhua, Y., Yalle, T., Argote, G., & Aguirre, L. (2023). Tasa de sobrevivencia y patrones de crecimiento en poblaciones de Festuca dolichophylla bajo condiciones similares. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 34(6). Recuperado de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1609-91172023000600004&script=sci_arttext

Pearson, K. (1900). "On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling." *Philosophical Magazine Series 5*, 50(302), 157-175.

Pedrosa, I., Suárez, J., & García, E. (2014). Evidencias sobre la validez de contenido: avances teóricos y métodos para su estimación. *Anales de Psicología*, 30(2), 572-581. Recuperado de <https://scielo.isciii.es/pdf/acp/v10n2/02monografico2.pdf>

Renvoize, S. (1998). *Gramíneas de Bolivia*. Kew Publishing.

Saavedra, M., Sánchez, S., & Alcántara, C. (2006). *Cultivo de especies autóctonas para la revegetación*. Junta de Andalucía. https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337163241Cultivo_de_especies_autxctonas_para_revegetacixn.pdf

Ross, A., & Willson, V.L. (2017). Paired Samples T-Test. En Basic and Advanced Statistical Tests. SensePublishers, Rotterdam. https://doi.org/10.1007/978-94-6351-086-8_4.

SEDACUSCO. (2017). *Plan de afianzamiento hídrico en la microcuenca Piuray*. Sedacusco.

SEDACUSCO. (2021). *Memoria anual 2021*. <https://www.sedacusco.com/transparencia/memoria/2021.pdf>

Segura, A. (2003). *Diseños cuasiexperimentales*. https://investigacioneducativasociales7gh01.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/07/disenos_cuasiexperimentales.pdf

Segura, F. (2017). *Análisis comparativo de modelos agregados de balance hídrico en la España peninsular y su sensibilidad a la incertidumbre climática*. Repositorio de la Universidad Católica de Mursia. <https://repositorio.ucam.edu/bitstream/handle/10952/2499/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2021). *Climas del Perú*. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01404SENA-4.pdf>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2021). *Control de calidad automático de datos de estaciones meteorológicas convencionales en el centro de procesamiento de datos del SENAMHI*. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/00711SENA-58.pdf>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2022). *Boletín de monitoreo de condiciones secas y húmedas N°7*. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02243SENA-53.pdf>

Tácuma, R., Aguirre, L., & Flores, E. (2015). Influencia de la revegetación con especies nativas y la incorporación de materia orgánica en la recuperación de pastizales degradados. *Ecología Aplicada*, 14(2). Recuperado de <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v14n2/a11v14n2.pdf>

Tom's Technology Company. (s.f.). Recuperado el 21 de junio de 2024, de <https://tomst.com/web/en/>

Trillo-Zárate, F., & Fritz, C. (2021). Autoecología de *Festuca dolichophylla* - *Festuca humilior*, y respuesta a la adición de NPK en la puna peruana. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/4577/trillo-zarate-fritz-carlos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Trillo, F., Barrantes, C., Nuñez, J., Zirena, N., & Flores, E. (2020). Efecto de la fertilización N, P y K en la producción de biomasa aérea de esquejes de *Festuca dolichophylla* (Presl, 1830) y *Festuca humilior* (Nees & Meyen, 1841). *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 31(2), e17854. <http://dx.doi.org/10.15381/rivep.v31i2.17854>

Trillo, F., Nuñez, J., Aguirre, L., Barrantes, C., & Flores, E. (2020). Comparación de indicadores autoecológicos en dinámica de crecimiento de *Festuca dolichophylla* (Presl, 1830) y *Festuca humilior* (Nees & Meyen, 1841). *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 31(3). <http://dx.doi.org/10.15381/rivep.v31i3.18743>

Valdivia Romero, M. (2023, 26 de noviembre). Cusco en alerta por desabastecimiento de agua. *El Comercio*. <https://elcomercio.pe/peru/cusco/cusco-en-alerta-por-desabastecimiento-de-agua-laguna-piuray-chinchero-noticia/>

Vose, J. M., Sun, G., Ford, C. R., Bredemeier, M., Otsuki, K., Wei, X., Zhang, Z., & Zhang, L. (2011). Forest ecohydrological research in the 21st century: What are the critical needs?. *Ecohydrology*, 4(2), 146-158. <https://doi.org/10.1002/eco.193>

Wen, Z., Wu, J., Yang, Y., Li, R., Ouyang, Z., & Zheng, H. (2022). La implementación de cultivos intercalados mantiene el equilibrio del agua del suelo al tiempo que mejora

múltiples servicios ecosistémicos. *Catena*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S034181622200412X>

Wild, J., Kopecky, M., Macek, M., Sanda, M., Jankovec, J., & Haase, T. (2019). Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268, 40-47.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.12.018>

World Meteorological Organization. (2012). *International Glossary of Hydrology*.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000221862>

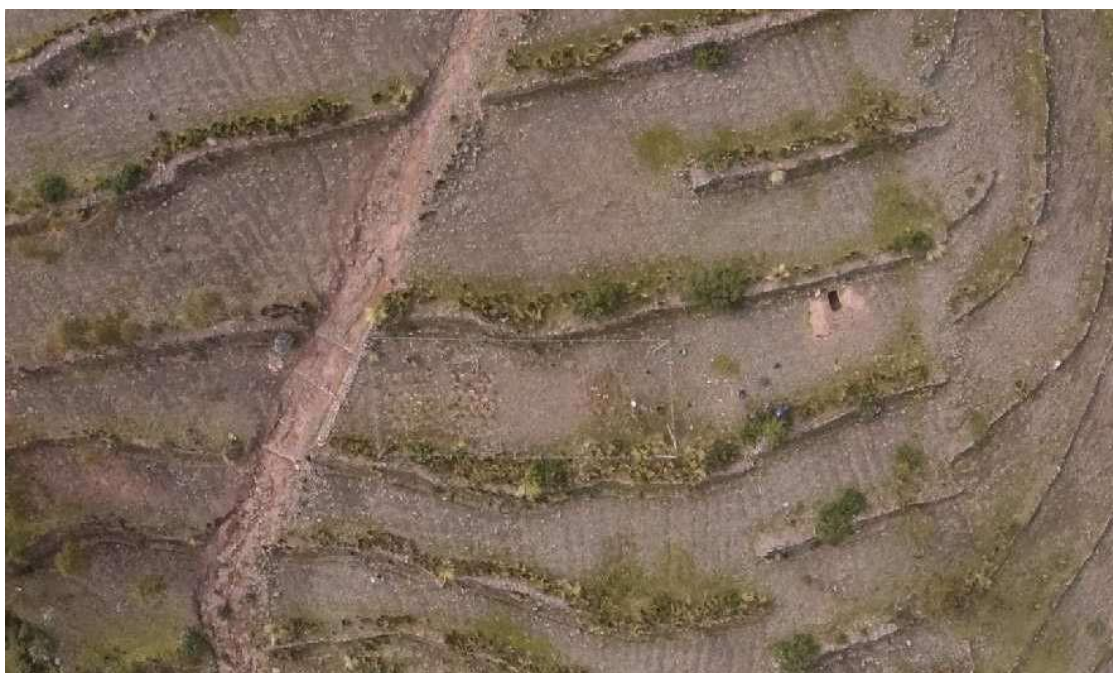
10. Anexos

10.1. Anexo 1. Fotografías

Parcela de investigación P01 al lado de un Qhapaaq Ñan Inca y la laguna Piuray de fondo.



Imagen aérea de la parcela de investigación P01



Tratamientos experimentales de la parcela de investigación P01



Proceso de recolección de datos hidrológicos



Proceso de recolección de datos de vegetación



Proceso de toma de datos fotogramétricos con el dron Phantom 4 multispectral

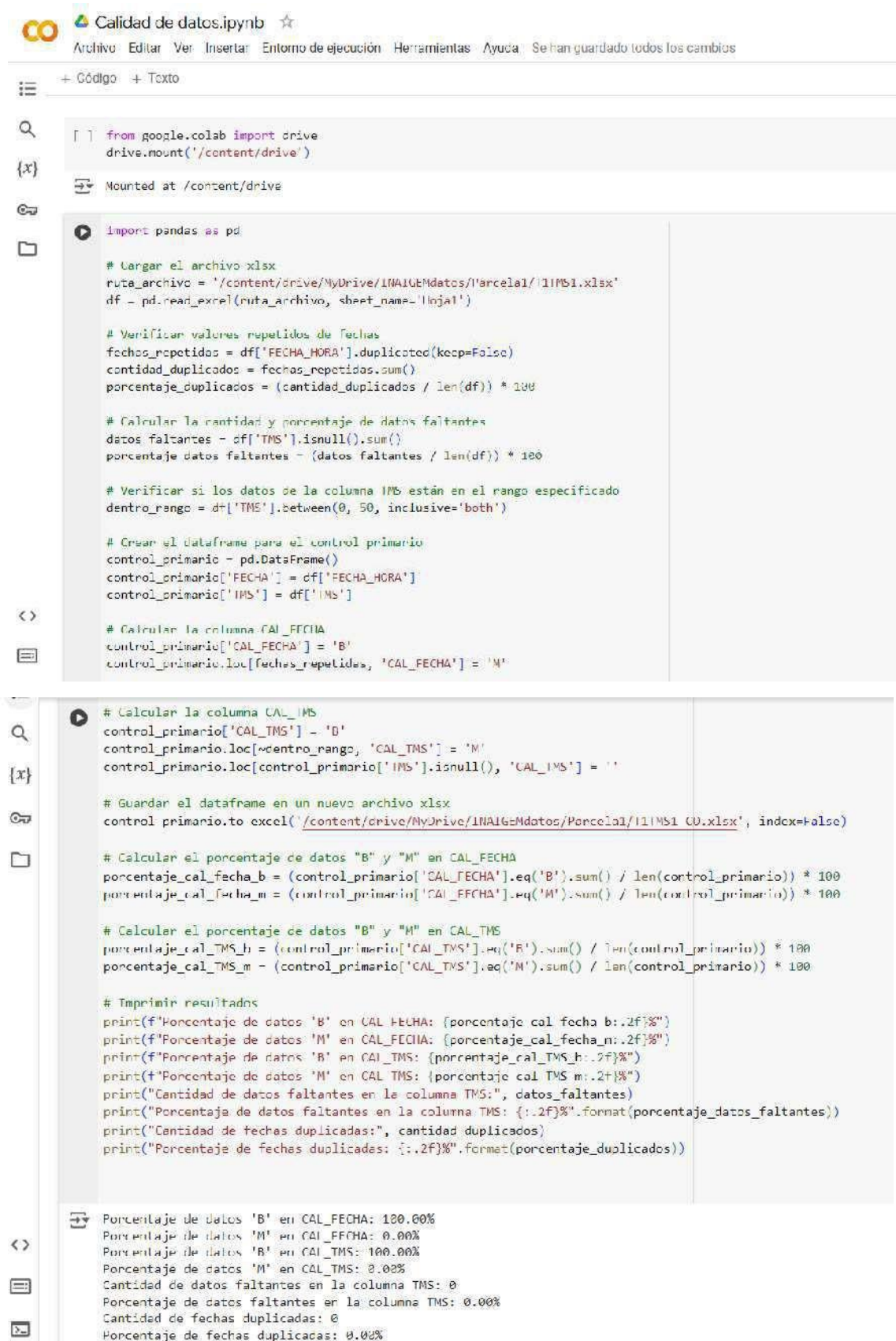


Foto panorámica de la cabecera de la microcuenca Piuray Ccorimarca



10.2. Anexo 2. Códigos para la limpieza y ordenamiento de datos hidrológicos

Código en Python para la limpieza de datos



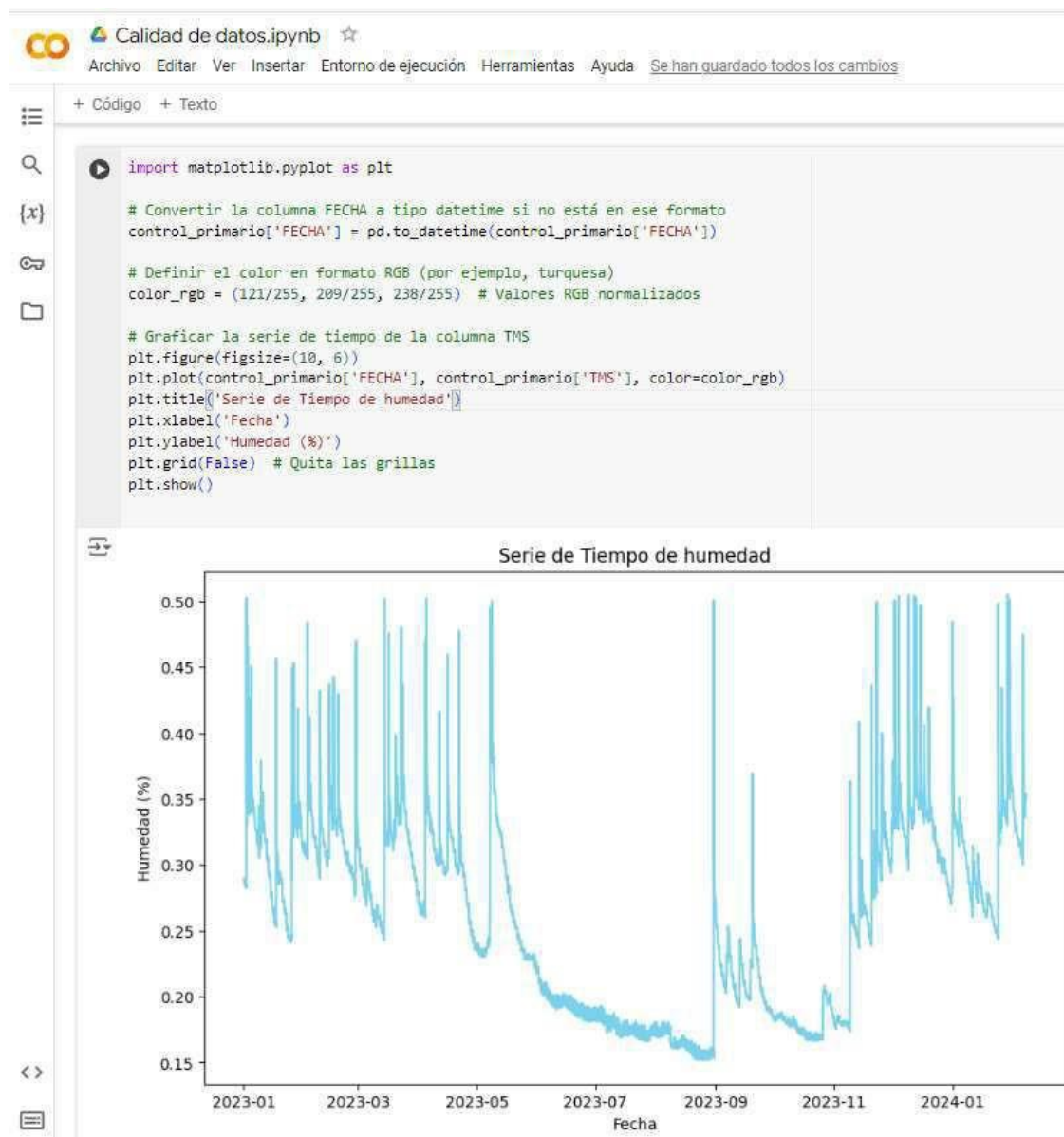
The screenshot displays a Jupyter Notebook titled "Calidad de datos.ipynb". The interface includes a top bar with icons for file operations and a menu bar with options like "Archivo", "Editar", "Ver", "Insertar", "Entorno de ejecución", "Herramientas", "Ayuda", and "Se han guardado todos los cambios". The notebook is in "Código" (Code) mode, showing a series of Python code cells. The code performs the following tasks:

- Imports the `google.colab` and `drive` modules to mount the Google Drive.
- Mounts the Google Drive at `/content/drive`.
- Imports the `pandas` module as `pd`.
- Loads an Excel file from the Google Drive: `ruta_archivo = '/content/drive/MyDrive/INAIQUEMdatos/Poncelal/11IMS1.xlsx'` and `df = pd.read_excel(ruta_archivo, sheet_name='Injail')`.
- Verifies if there are repeated dates: `fechas_repetidos = df['FECHA_HORA'].duplicated(keep=False)`, `cantidad_duplicados = fechas_repetidos.sum()`, and `porcentaje_duplicados = (cantidad_duplicados / len(df)) * 100`.
- Calculates the quantity and percentage of missing data: `datos_faltantes = df['TMS'].isnull().sum()` and `porcentaje_datos_faltantes = (datos_faltantes / len(df)) * 100`.
- Verifies if the data in the `TMS` column is within the specified range: `dentro_rango = df['TMS'].between(0, 50, inclusive='both')`.
- Creates a DataFrame for the primary control: `control_primario = pd.DataFrame()`, `control_primario['FECHA'] = df['FECHA_HORA']`, and `control_primario['IMS'] = df['IMS']`.
- Calculates the `CAL_FECHA` column: `control_primario['CAL_FECHA'] = 'B'` and `control_primario.loc[fechas_repetidos, 'CAL_FECHA'] = 'M'`.
- Calculates the `CAL_TMS` column: `control_primario['CAL_TMS'] = 'B'` and `control_primario.loc[~dentro_rango, 'CAL_TMS'] = 'M'`.
- Saves the DataFrame to a new Excel file: `control_primario.to_excel('/content/drive/MyDrive/INAIQUEMdatos/Poncelal/11IMS1 CU.xlsx', index=False)`.
- Calculates the percentage of data "B" and "M" in `CAL_FECHA`: `porcentaje_cal_fecha_b = (control_primario['CAL_FECHA'].eq('B').sum() / len(control_primario)) * 100` and `porcentaje_cal_fecha_m = (control_primario['CAL_FECHA'].eq('M').sum() / len(control_primario)) * 100`.
- Calculates the percentage of data "B" and "M" in `CAL_TMS`: `porcentaje_cal_tms_b = (control_primario['CAL_TMS'].eq('B').sum() / len(control_primario)) * 100` and `porcentaje_cal_tms_m = (control_primario['CAL_TMS'].eq('M').sum() / len(control_primario)) * 100`.
- Prints the results: `print(f'Porcentaje de datos 'B' en CAL_FECHA: {porcentaje_cal_fecha_b:.2f}%)`, `print(f'Porcentaje de datos 'M' en CAL_FECHA: {porcentaje_cal_fecha_m:.2f}%)`, `print(f'Porcentaje de datos 'B' en CAL_TMS: {porcentaje_cal_tms_b:.2f}%)`, `print(f'Porcentaje de datos 'M' en CAL_TMS: {porcentaje_cal_tms_m:.2f}%)`, `print(f"Cantidad de datos faltantes en la columna TMS: {datos_faltantes}")`, `print(f"Porcentaje de datos faltantes en la columna TMS: {porcentaje_datos_faltantes:.2f}%.format(porcentaje_datos_faltantes))`, `print(f"Cantidad de fechas duplicadas: {cantidad_duplicados}")`, and `print(f"Porcentaje de fechas duplicadas: {porcentaje_duplicados:.2f}%.format(porcentaje_duplicados))`.

The output of the code is displayed in the bottom cell, showing the following results:

```
Porcentaje de datos 'B' en CAL_FECHA: 100.00%
Porcentaje de datos 'M' en CAL_FECHA: 0.00%
Porcentaje de datos 'B' en CAL_TMS: 100.00%
Porcentaje de datos 'M' en CAL_TMS: 0.00%
Cantidad de datos faltantes en la columna TMS: 0
Porcentaje de datos faltantes en la columna TMS: 0.00%
Cantidad de fechas duplicadas: 0
Porcentaje de fechas duplicadas: 0.00%
```

Código en Python para graficar series de tiempo



Código en Python para ordenar los datos a nivel diario, mensual y anual

```
Calidad de datos.ipynb ☆
Archivo Editar Ver Insertar Entorno de ejecución Herramientas Ayuda Se han guardado todos los cambios

+ Código + Texto

import pandas as pd

# Montar Google Drive
from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

# Cargar el archivo xlsx
ruta_archivo = '/content/drive/MyDrive/INAIGEMdatos/Parcela1/T1TMS1.xlsx'
df = pd.read_excel(ruta_archivo, sheet_name='Hoja1')

# Convertir la columna FECHA_HORA a tipo datetime
df['FECHA_HORA'] = pd.to_datetime(df['FECHA_HORA'])

# Filtrar filas con valores no nulos en la columna 'PP'
df = df[df['TMS'].notnull()]

# Agrupar datos diarios
#precipitaciones_diarias = df.groupby(df['FECHA_HORA'].dt.date)['TMS'].sum().reset_index()
humedad_diarias = df.groupby(df['FECHA_HORA'].dt.to_period('D'))['TMS'].sum().reset_index()
humedad_diarias.columns = ['FECHA', 'TMS_d']

# Guardar datos diarios en un archivo xlsx
ruta_salida_diaria = '/content/drive/MyDrive/INAIGEMdatos/Parcela1/humedad_diario_r.xlsx'
humedad_diarias.to_excel(ruta_salida_diaria, index=False)

# Agrupar datos mensuales
humedad_mensuales = df.groupby(df['FECHA_HORA'].dt.to_period('M'))['PP'].sum().reset_index()
humedad_mensuales.columns = ['FECHA', 'PP_m']

# Guardar datos mensuales en un archivo xlsx
ruta_salida_mensual = '/content/drive/MyDrive/INAIGEMdatos/Parcela1/humedad_mensual_r.xlsx'
humedad_mensuales.to_excel(ruta_salida_mensual, index=False)

# Agrupar datos anuales y calcular acumulado
humedad_anual = df.groupby(df['FECHA_HORA'].dt.to_period('Y'))['PP'].sum().reset_index()
humedad_anual.columns = ['FECHA', 'PP_y']

# Guardar datos con acumulado anual en un archivo xlsx
ruta_salida_anual = '/content/drive/MyDrive/INAIGEMdatos/Parcela1/humedad_r.xlsx'
humedad_anual.to_excel(ruta_salida_anual, index=False)
```

10.3. Anexo 3. Calibración de sensores de humedad

Gráfico de dispersión con ecuación polinómica entre los resultados de humedad volumétrica de los sensores TMS4 y WachDog para su calibración en el tratamiento T01

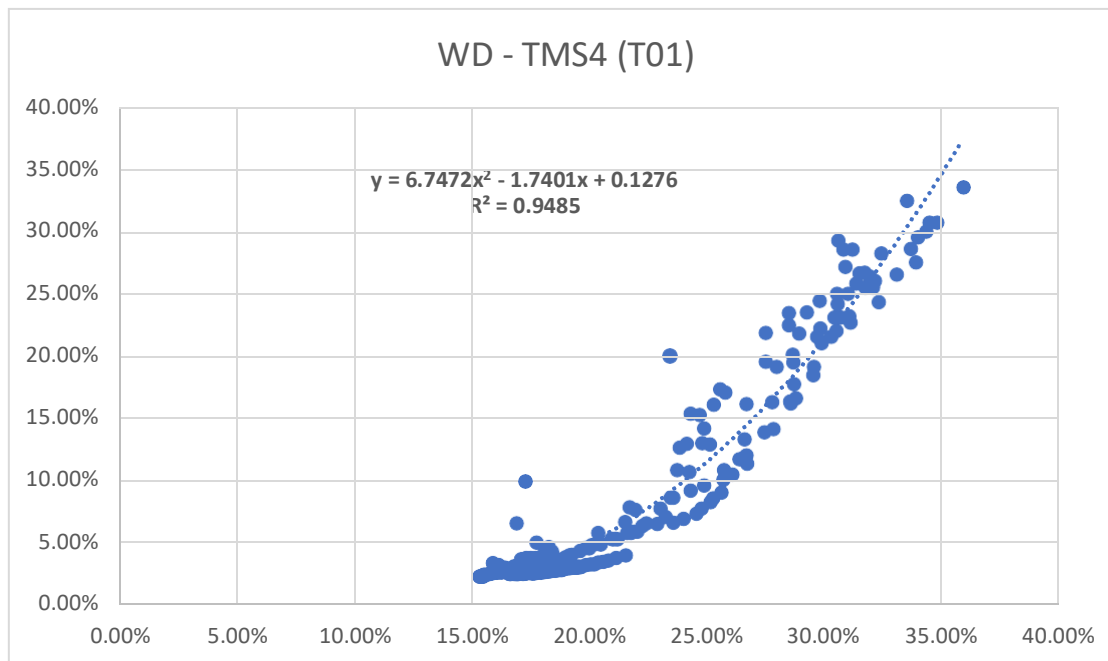
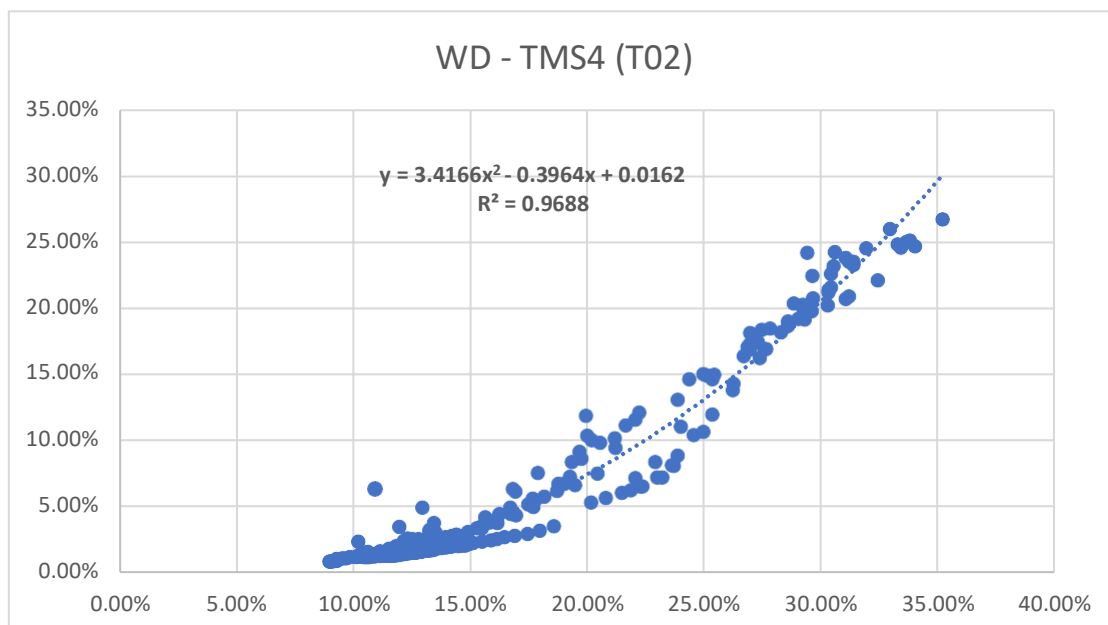


Gráfico de dispersión con ecuación polinómica entre los resultados de humedad volumétrica de los sensores TMS4 y WachDog para su calibración en el tratamiento T02



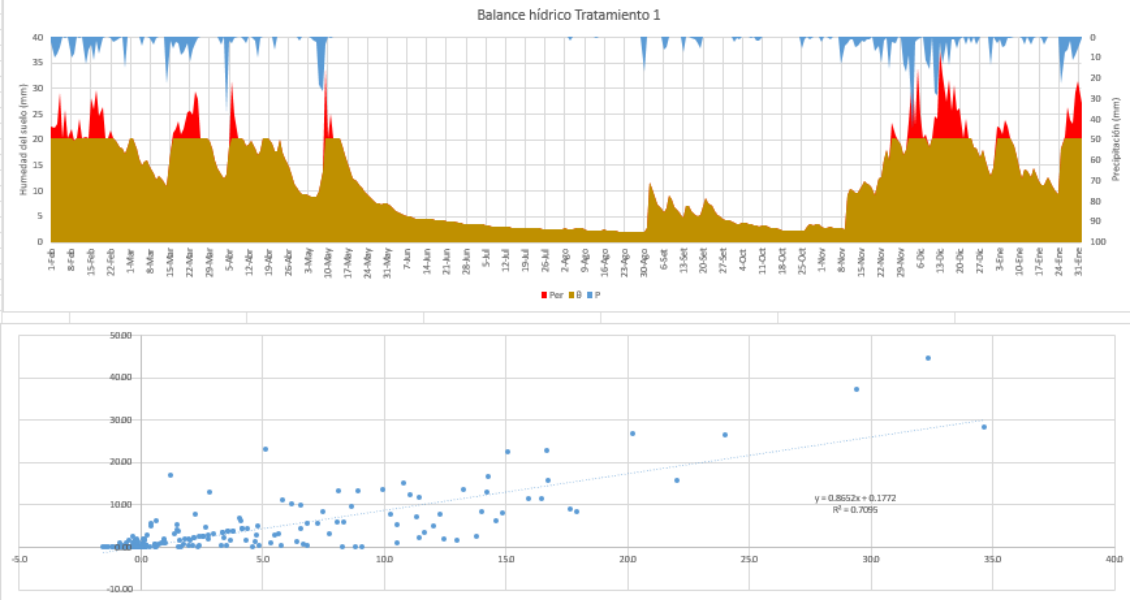
10.4. Anexo 4. Cálculo de variables hidrológicas

Calculadora para los componentes del balance hídrico

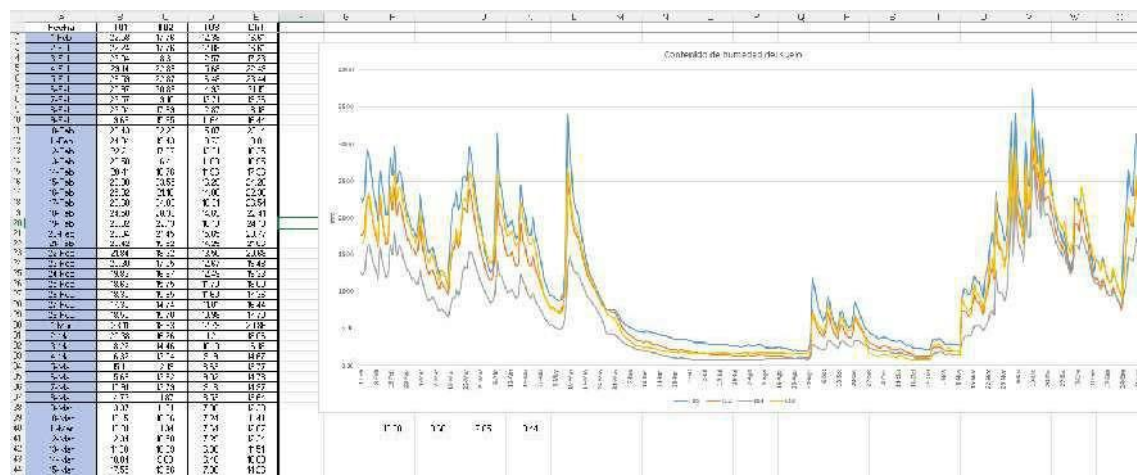
	A	B C D			E F		G	H I		J	K	L M		N	O	P	Q	
		Precipitación			Evapotranspiración		Suelo		Balance		Balance							
	Fecha	P	Pn	Pe	Eto	P - Eto	Humedad	CC	PMP	P	dP	ET	ETcorr	Per	Percorr	Sumatoria	P+Percolación	
1	1 Feb	2.20	0.00	2.19	4.20	2.61	22.6	20.2	11.6	20.2	0.3	0.2	0.2	2.3	2.3	2.2	22.6	
2	2-Feb	9.60	1.00	7.50	1.20	8.70	22.2	20.2	11.0	20.2	0.8	4.2	4.2	2.0	2.0	3.7	22.2	
3	3 Feb	8.70	1.10	6.50	4.30	2.00	23.0	20.2	11.6	20.2	5.1	4.3	4.9	2.8	2.8	14.5	23.0	
4	4-Feb	4.30	0.11	4.40	3.40	1.00	20.1	20.2	11.6	20.2	-0.6	3.4	3.4	8.0	8.0	12.1	20.1	
5	5-Feb	0.00	0.00	0.00	3.30	-3.30	28.9	20.2	11.0	20.2	-2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	28.9	
6	6 Feb	0.40	0.00	0.40	4.50	4.10	26.0	20.2	11.6	20.2	2.4	0.9	0.0	5.7	5.7	3.3	26.0	
7	7-Feb	0.00	0.00	0.00	1.30	-1.30	25.9	20.2	11.0	20.2	-1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	25.9	
8	8 Feb	9.50	1.78	8.07	5.40	2.67	22.0	20.2	11.6	20.2	2.4	5.4	5.4	1.8	1.8	5.6	22.0	
9	9-Feb	8.20	1.17	7.03	6.10	0.93	19.7	20.2	11.6	19.7	8.7	6.1	6.1	0.0	0.0	14.0	19.7	
10	10-Feb	0.00	0.00	0.00	5.00	-5.00	26.1	20.2	11.0	20.2	-2.1	2.1	2.1	0.0	0.0	0.0	26.1	
11	11-Feb	0.20	0.00	0.20	4.90	-4.70	24.0	20.2	11.6	20.2	-1.8	0.0	0.0	3.8	3.8	2.0	24.0	
12	12-Feb	0.00	0.00	0.00	5.20	-5.20	22.2	20.2	11.0	20.2	-3.7	1.7	1.7	0.0	0.0	0.0	22.2	
13	13 Feb	13.20	3.17	10.03	4.80	5.73	20.5	20.2	11.6	20.2	0.1	4.8	4.8	0.3	0.3	8.1	20.5	
14	14-Feb	5.30	0.51	5.20	5.30	-0.01	20.4	20.2	11.6	20.2	2.7	0.0	0.0	0.2	0.2	9.3	20.4	
15	15-Feb	3.70	0.00	3.70	3.40	-0.10	28.1	20.2	11.0	20.2	-0.3	0.0	0.0	2.4	2.4	0.7	28.1	
16	16-Feb	11.40	2.36	9.04	4.70	4.34	25.3	20.2	11.6	20.2	3.0	4.7	4.7	5.6	5.6	15.5	25.3	
17	17-Feb	1.00	0.00	1.00	5.20	-4.20	29.7	20.2	11.0	20.2	-0.2	0.0	0.0	9.1	9.1	7.3	29.7	
18	18 Feb	7.50	1.04	6.75	5.20	1.56	24.5	20.2	11.6	20.2	1.7	5.2	5.2	4.3	4.3	12.3	24.5	
19	19-Feb	0.40	0.00	0.40	2.90	-2.50	26.0	20.2	11.6	20.2	-0.3	0.0	0.0	6.1	6.1	5.6	26.0	
20	20 Feb	0.70	0.00	0.70	5.50	-4.80	26.0	20.2	11.6	20.2	2.6	2.6	2.6	0.0	0.0	0.0	26.0	
21	21-Feb	0.00	0.00	0.00	4.50	-4.50	23.4	20.2	11.6	20.2	-1.6	1.6	1.6	0.0	0.0	0.0	23.4	
22	22-Feb	0.20	0.00	0.20	5.00	-4.80	21.5	20.2	11.0	20.2	-1.0	0.1	0.1	1.0	1.0	0.2	21.5	
23	23 Feb	2.20	0.00	2.19	5.30	3.11	20.3	20.2	11.6	20.2	0.5	2.5	2.6	0.1	0.1	2.7	20.3	
24	24-Feb	1.30	0.00	1.30	5.10	-3.80	19.3	20.2	11.6	19.3	-1.2	2.3	2.8	0.0	0.0	1.6	19.3	
25	25 Feb	0.20	0.00	0.20	5.20	-5.00	18.6	20.2	11.6	18.6	0.3	0.5	0.5	0.0	0.0	0.7	18.6	
26	26-Feb	0.00	0.00	0.00	4.30	-4.30	18.0	20.2	11.6	18.0	-1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	18.0	
27	27-Feb	20.00	1.00	19.00	5.00	14.00	17.1	20.2	11.0	17.1	1.2	5.0	5.0	0.0	0.0	10.8	17.1	
28	28 Feb	0.70	0.00	0.70	5.00	-4.30	18.5	20.2	11.6	18.5	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	4.6	18.5	
29	1-Mar	0.00	0.00	0.00	5.10	-5.10	23.1	20.2	11.0	20.2	-2.7	2.7	2.7	0.0	0.0	0.0	23.1	
30	2-Mar	0.70	0.00	0.70	5.40	-4.70	20.4	20.2	11.6	20.2	2.2	2.2	2.2	0.0	0.0	0.0	20.4	
31	3-Mar	0.00	0.00	0.00	6.00	-6.00	18.2	20.2	11.6	18.2	-1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	18.2	
32	4-Mar	0.00	0.00	0.00	5.00	-5.00	16.3	20.2	11.0	16.3	-1.2	1.2	1.2	0.0	0.0	0.0	16.3	
33	5-Mar	4.50	0.00	4.50	5.30	-0.80	15.1	20.2	11.6	15.1	0.6	3.4	3.4	0.0	0.0	0.6	15.1	

Resumen de resultados de los componentes del balance hídrico

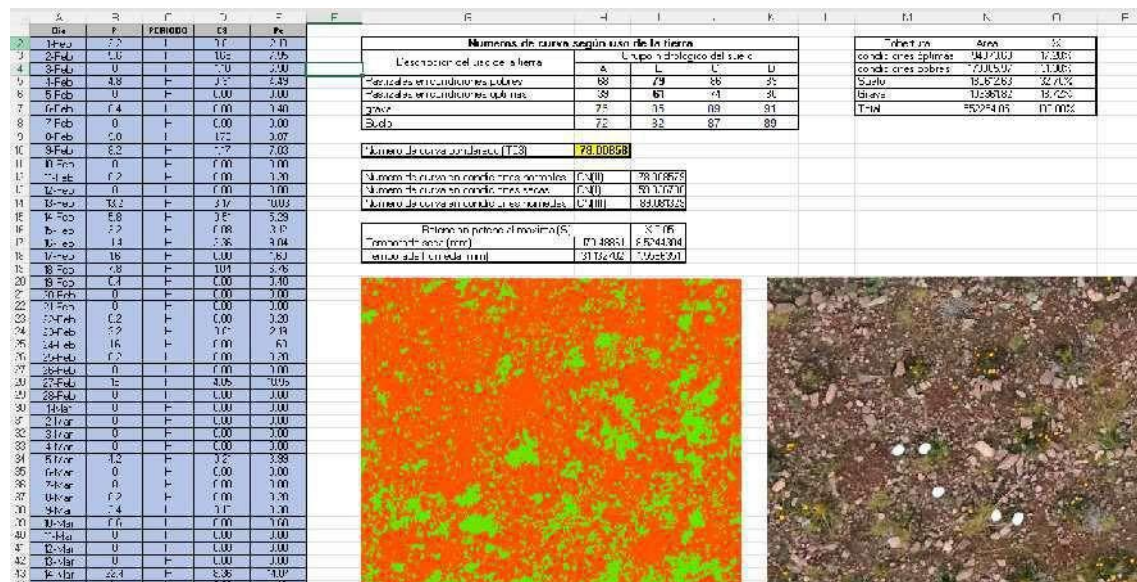
Fecha	Precipitación (P)	Escoorrentia (Pn)	Cambio de almacenamiento (ΔR)	Evapotranspiración real (ET)	Percolación (P)	Sumatoria
Feb-23	105.80	17.20	0.53	63.94	62.74	144.42
Mar-23	82.60	14.60	-8.72	54.96	41.61	102.45
Abr-23	63.20	21.65	-5.04	45.72	15.97	78.31
Maj-23	57.00	2.83	-2.23	19.51	18.61	38.72
Jun-23	0.00	0.00	-3.54	0.00	0.00	-3.54
Jul-23	0.00	0.00	-0.33	0.00	0.00	-0.33
Ago-23	19.20	0.40	9.05	0.00	0.00	9.45
Set-23	27.20	0.00	-8.00	1.32	0.00	-6.68
Oct-23	14.40	0.47	-0.56	0.00	0.00	-0.09
Nov-23	99.00	15.12	14.88	31.36	3.34	65.31
Dic-23	217.80	71.70	-3.60	80.43	125.12	273.65
Ene-24	89.20	15.10	12.67	47.95	51.45	127.06
Suma	781.4	159.1	4.5	345.1	319.5	828.1



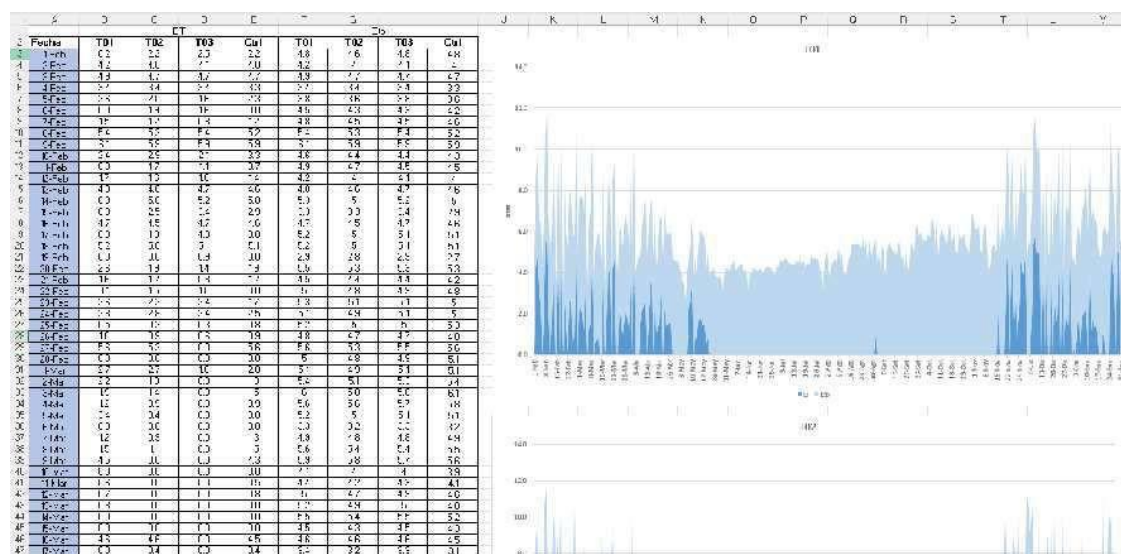
Calculadora para el análisis del contenido de humedad del suelo



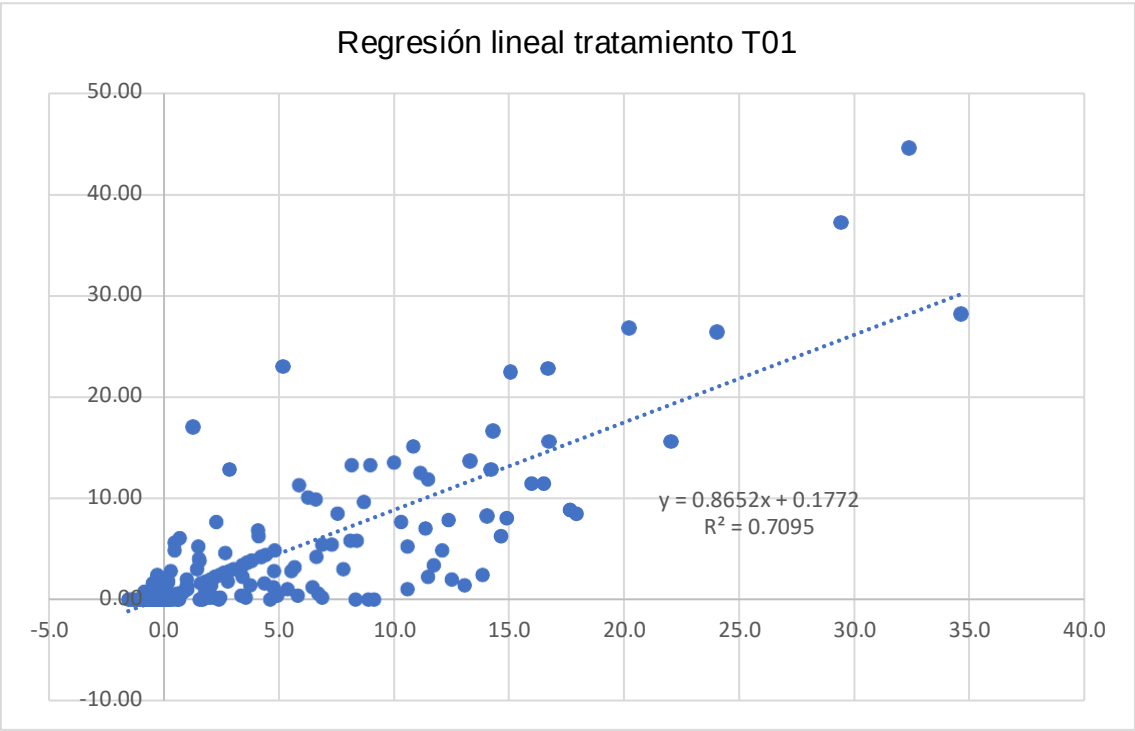
Calculadora para el análisis de la escorrentía superficial y precipitación efectiva



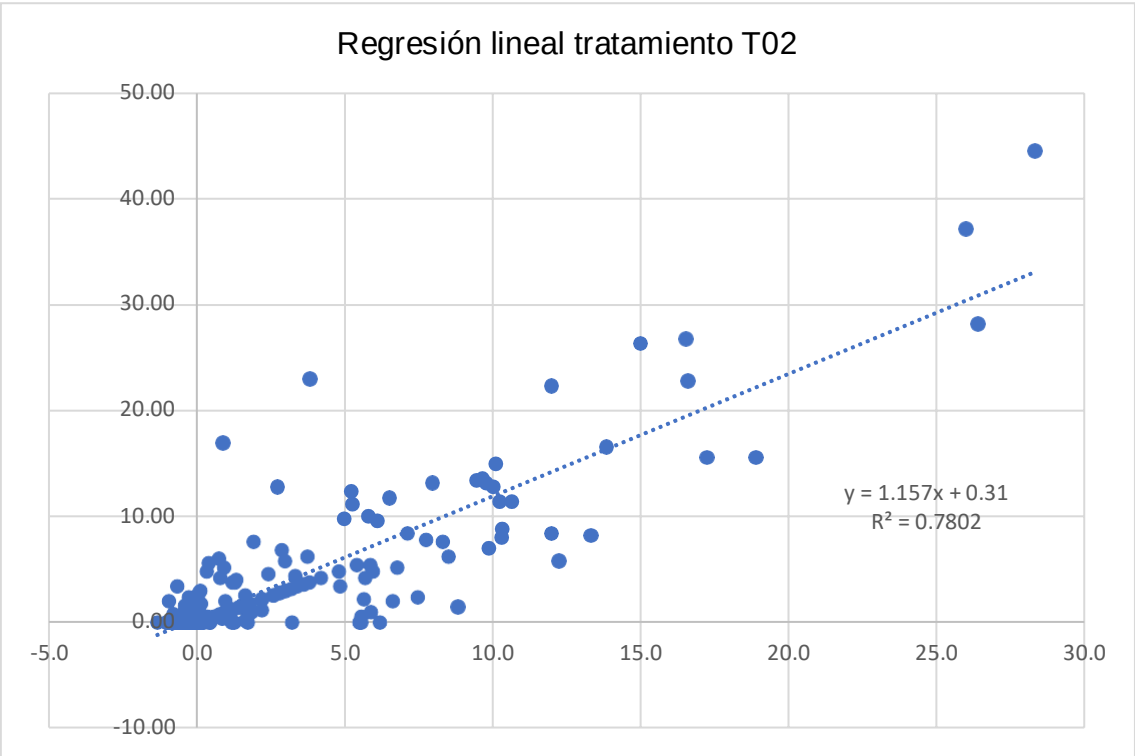
Calculadora para el análisis de la evapotranspiración real y potencial



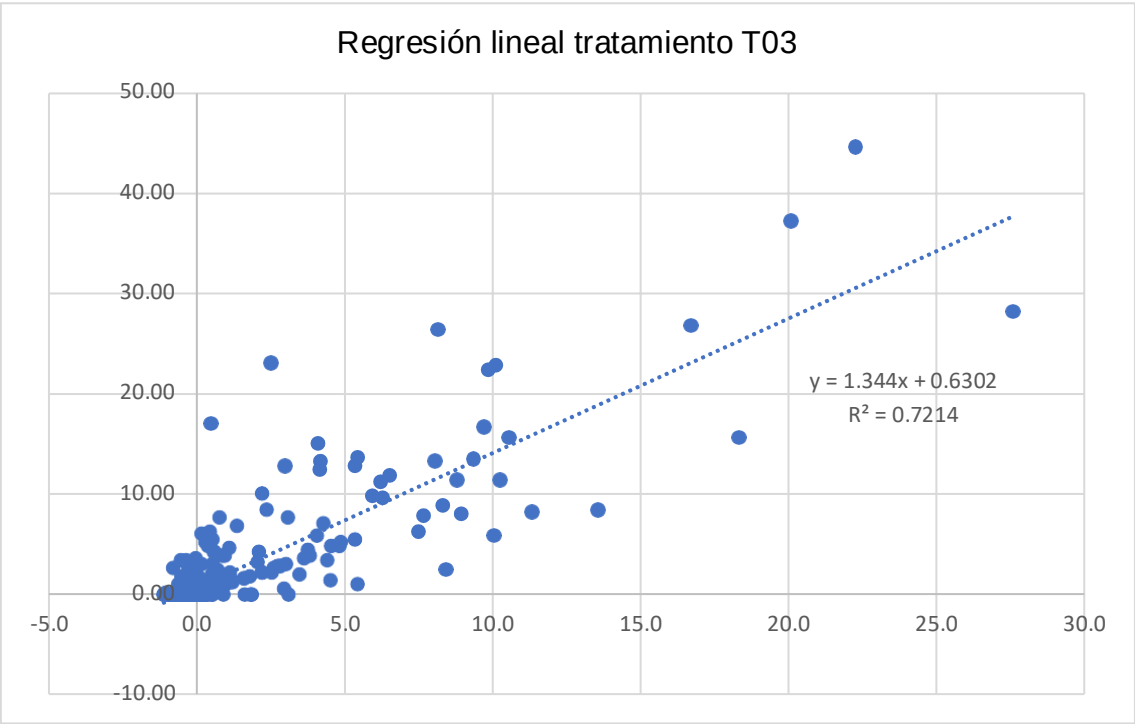
Regresión lineal entre los datos medidos y los datos estimados del balance hídrico del tratamiento T01



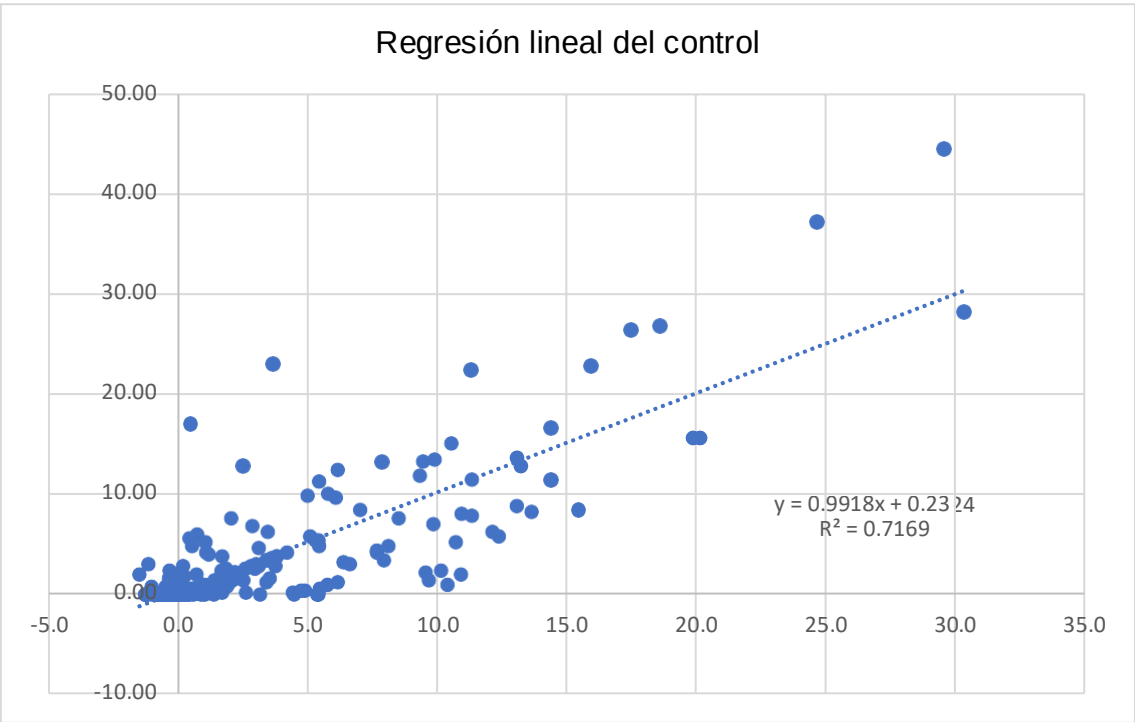
Regresión lineal entre los datos medidos y los datos estimados del balance hídrico del tratamiento T02



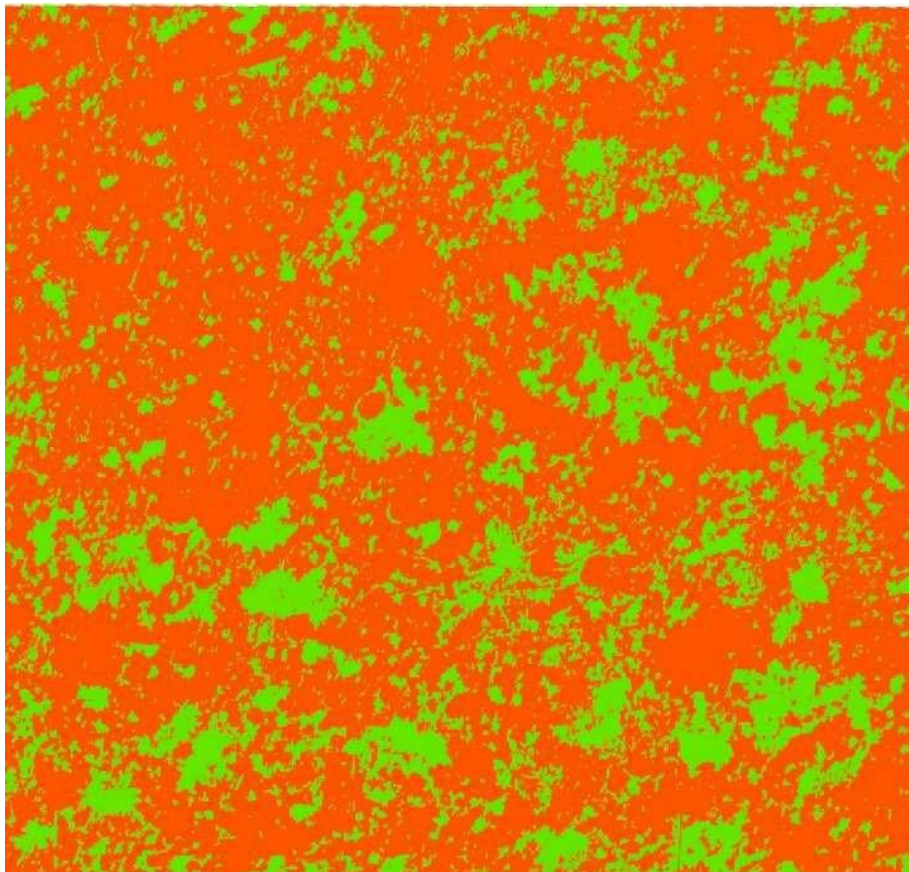
Regresión lineal entre los datos medidos y los datos estimados del balance hídrico del tratamiento T03



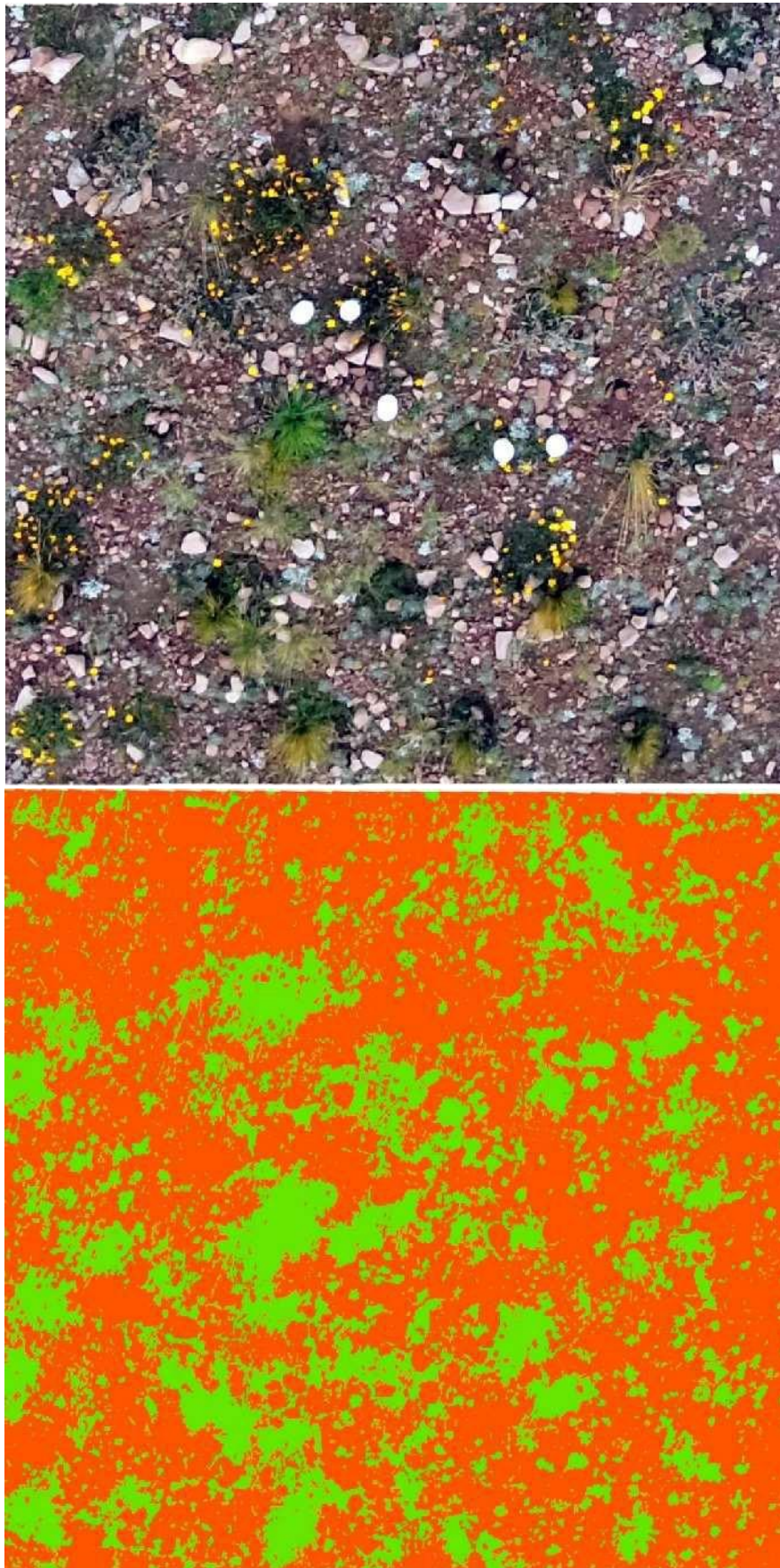
Regresión lineal entre los datos medidos y los datos estimados del balance hídrico del control



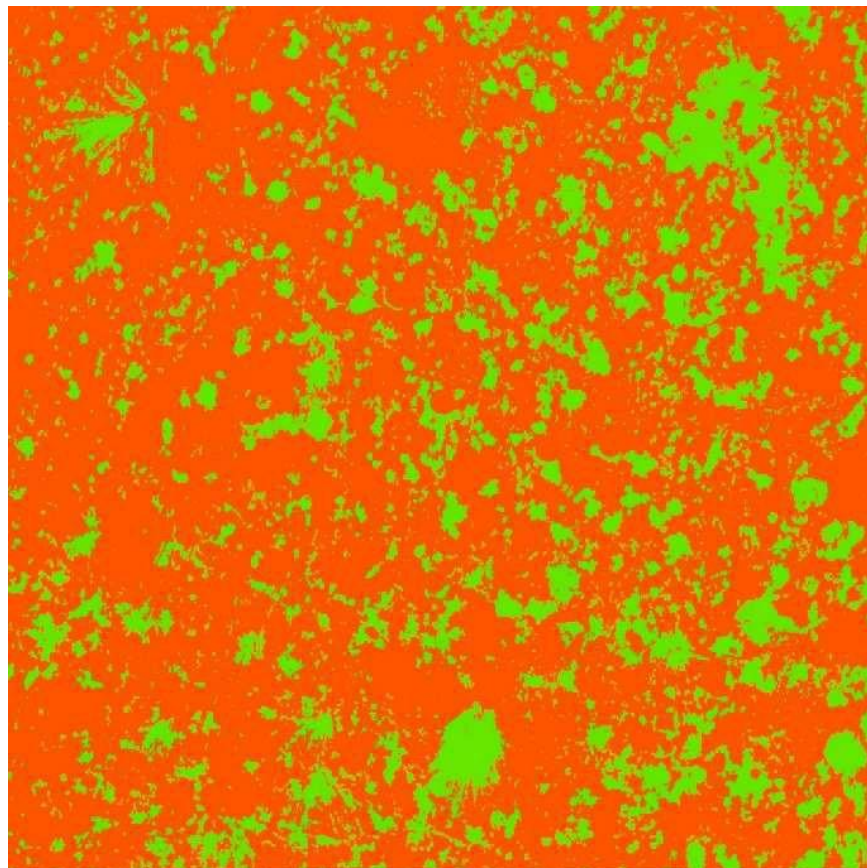
Imágenes en RGB y análisis NDVI del tratamiento T01



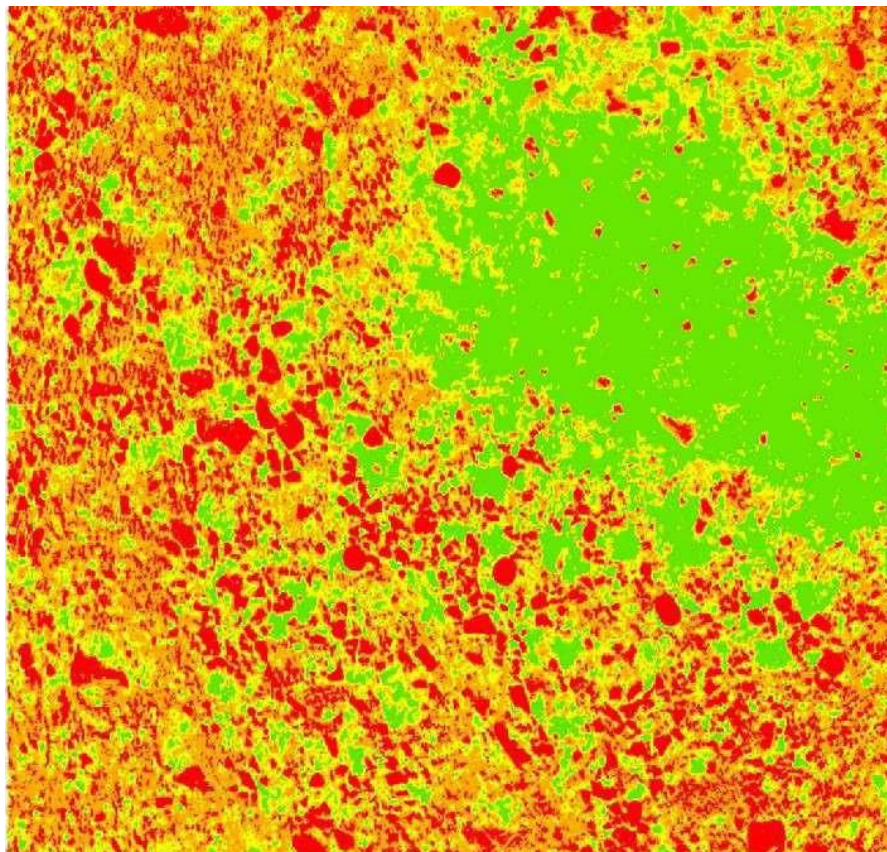
Imágenes en RGB y análisis NDVI del tratamiento T02



Imágenes en RGB y análisis NDVI del tratamiento T03



Imágenes en RGB y análisis NDVI del control



10.5. Anexo 5. Análisis de la vegetación

Calculadora de los de datos de vegetación

Tratamiento	Código	20/01/2023	7/03/2023	5/04/2023	25/05/2023	8/08/2023	25/10/2023	30/11/2023	7/02/2024
P1-T1	P1-T11	Diámetro basal (cm)	6	6.5	5	13	10	11	11
		Altura (cm)	13	18	19	18	20	23	23
		Diámetro aéreo mayor (cm)	12	11	13	10	8	7	7
		Diámetro aéreo menor (cm)	7	8	9	5	7	5	7
		Volumen del esqueje (cm³)	1328.76	1891.53	2365.03	1914.51	1792.36	1630.56	1991.77
	P1-T12	Diámetro basal (cm)	5	5.5					
		Altura (cm)	12	16					
		Diámetro aéreo mayor (cm)	10	10					
		Diámetro aéreo menor (cm)	6	6					
		Volumen del esqueje (cm³)	866.77	1194.38					
	P1-T15	Diámetro basal (cm)	6	6	5	12	12	12	14
		Altura (cm)	15	18	22	27	24.5	24	27
		Diámetro aéreo mayor (cm)	12	15	14	11	14	14	11
		Diámetro aéreo menor (cm)	4	10	6	8	7	10	9
		Volumen del esqueje (cm³)	1158.59	2934.40	2320.79	3761.40	3944.77	4716.12	4430.64
	P1-T16	Diámetro basal (cm)	5	5.5	5	10	10	10	11
		Altura (cm)	15	17	37	25	39	39	34
		Diámetro aéreo mayor (cm)	12	12.5	13	10	15	12	10
		Diámetro aéreo menor (cm)	4	5	5	8	10	8	8
		Volumen del esqueje (cm³)	1083.46	1471.73	3258.79	2913.67	7531.60	5322.01	4172.44
	P1-T18	Diámetro basal (cm)	5						
		Altura (cm)	16						
		Diámetro aéreo mayor (cm)	7						
		Diámetro aéreo menor (cm)	6						
		Volumen del esqueje (cm³)	822.51						
	P1-T19	Diámetro basal (cm)	5	5	6	11	11	13	12
		Altura (cm)	14	16	21	23	27	31	44
		Diámetro aéreo mayor (cm)	10	12	9	10	14	12	12
		Diámetro aéreo menor (cm)	9	8	7	6	6	7	7
		Volumen del esqueje (cm³)	1352.21	1687.85	1619.23	2389.10	3864.51	4527.60	6129.69
	P1-T114	Diámetro basal (cm)	5	5	4	10	10	9	8
		Altura (cm)	13	12	20	26	20	24	25
		Diámetro aéreo mayor (cm)	9	9	9	6	8	8	5
		Diámetro aéreo menor (cm)	7	6.5	5	4	4	5	3
		Volumen del esqueje (cm³)	939.00	822.17	1074.78	1367.26	1324.44	1652.77	941.39
	P1-T120	Diámetro basal (cm)	5	4	5	8	7	7	8
		Altura (cm)	16	16	16	7	21	21	22
		Diámetro aéreo mayor (cm)	11	8	8	6	6	7	6
		Diámetro aéreo menor (cm)	4	5	4	3	2.5	4	3
		Volumen del esqueje (cm³)	1036.35	759.04	724.01	272.94	692.06	984.85	857.82
	P1-T121	Diámetro basal (cm)	5	6	5	12	11	12	11
		Altura (cm)	22	20	24	23	28	32	42
		Diámetro aéreo mayor (cm)	9	11	15	11	13	15	20
		Diámetro aéreo menor (cm)	7	4	4	3	10	6	9
		Volumen del esqueje (cm³)	7	4	4	3	10	6	9
	P1-T122	Diámetro basal (cm)	7	4	4	3	10	6	9
		Volumen del esqueje (cm³)	1589.07	1390.45	2318.08	2114.39	4947.60	5152.36	10686.06
		Diámetro basal (cm)	6	5.5	5	8	9	10	8
		Altura (cm)	15	27	31	31	32	31	36
		Diámetro aéreo mayor (cm)	11	10	10	6	9	8	8
	P1-T123	Diámetro basal (cm)	3	6.5	4	3	4	5	6
		Volumen del esqueje (cm³)	934.97	2120.18	1736.62	1208.75	2203.65	2282.47	2576.18
		Diámetro basal (cm)	5	6	5	10	9	11	10
		Altura (cm)	10	15	23	23	22	24.5	28
		Diámetro aéreo mayor (cm)	8	10	12	10	10	9	9
	P1-T125	Diámetro aéreo menor (cm)	7	7	4	3	4	5	3
		Volumen del esqueje (cm³)	648.97	1276.24	1773.44	1693.44	1681.11	2121.67	1854.21
		Diámetro basal (cm)	5.5	5	6.5	10	8	9	7
		Altura (cm)	13.5	15	18	19	19	20	25
		Diámetro aéreo mayor (cm)	8	8	9	7	7	8	6
	P1-T127	Diámetro aéreo menor (cm)	3	4	3	4	4	7	5
		Volumen del esqueje (cm³)	557.28	678.76	1578.69	1124.95	965.99	1687.11	1172.44
		Diámetro basal (cm)	4	6	5	10	9	9	9
		Altura (cm)	10	15	19	20	26	26	25
		Diámetro aéreo mayor (cm)	9	9	7	6	7	7	6
	P1-T2.4	Diámetro aéreo menor (cm)	3	3	3	2	5	5	5
		Volumen del esqueje (cm³)	415.34	736.89	648.19	810.44	1604.44	1604.44	1373.63
		Biomasa total T01	11043.39	15769.25	19477.66	19570.85	30552.68	31681.94	36086.47
		Promedio volumen T01	1004.00	1433.57	1770.70	1779.17	2777.52	2880.18	3280.59
		Supervivencia T01	0	8	Área del gráfico	16	16	16	16
	P1-T2.11	Diámetro basal (cm)	3	3					
		Altura (cm)	12.5	13					
		Diámetro aéreo mayor (cm)	7	7					
		Diámetro aéreo menor (cm)	3	4					
		Volumen del esqueje (cm³)	348.02	425.27					
	P1-T2.18	Diámetro basal (cm)	2	3	3	5			
		Altura (cm)	14	20	20	20			
		Diámetro aéreo mayor (cm)	4	8	5	4			
		Diámetro aéreo menor (cm)	3	5	2	2			
		Volumen del esqueje (cm³)	188.09	872.66	311.66	331.11			
	P1-T2.19	Diámetro basal (cm)	3	3	3	6	7	7	8
		Altura (cm)	16	22	23	26	36	44	51
		Diámetro aéreo mayor (cm)	5	5	5	5	4	4	6
		Diámetro aéreo menor (cm)	3	3	2	2	2	3	4
		Volumen del esqueje (cm³)	308.42	424.08	358.40	597.54	772.79	1133.77	2280.75
	P1-T2.19	Diámetro basal (cm)	3	3	4	6	8	11	13
		Altura (cm)	20	22	25	27	39	43	61
		Diámetro aéreo mayor (cm)	6	11	10	6	16	17	17
		Diámetro aéreo menor (cm)	3	5	8	4	10	9	13
		Volumen del esqueje (cm³)	467.26	1385.04	2071.47	1012.26	7400.66	9153.35	17542.41
	P1-T2.19	Diámetro basal (cm)	4	3	4	10	13	15	17

137	P1-T3	P1-T3.21	Diámetro aereo mayor (cm)	8	8	7	5.5	5	6	6
138			Diámetro aereo menor (cm)	4	5	5	4	5	5	5
139			Volumen del esqueje (cm ³)	982.52	1110.55	1080.78	1001.78	1104.32	1590.75	538.47
140		P1-T3.24	Diámetro basal (cm)	6	6	6	12	11	13	12
141			Altura (cm)	22	22	22	22	22	22	21
142			Diámetro aereo mayor (cm)	8	8	8	8	8	8	7
143		P1-T3.27	Diámetro aereo menor (cm)	3	3	4	3	5	4	4
144			Volumen del esqueje (cm ³)	948.47	948.47	1080.78	1500.85	1728.10	1775.74	1432.44
145			Diámetro basal (cm)	5	5	5	11	6	8	7
146		P1-T3.30	Altura (cm)	17	20	20	21	21	20	19
147			Diámetro aereo mayor (cm)	9	7	8	7	6	6	5
148			Diámetro aereo menor (cm)	3	4	4	4	4	4	3
149		P1-T3.31	Volumen del esqueje (cm ³)	769.26	789.73	905.01	1336.23	787.32	894.41	578.76
150			Diámetro basal (cm)	8	8	6	15	12	11	8
151			Altura (cm)	21	22	24	14	23	23	30
152		P1-T3.33	Diámetro aereo mayor (cm)	9	13	12	10	8	8	7
153			Diámetro aereo menor (cm)	8	7	10	8	7	7	4
154			Volumen del esqueje (cm ³)	2012.05	2719.10	3140.43	2085.99	2314.29	2185.92	525.25
155		P1-T3.35	Diámetro basal (cm)	4	11	5	10			
156			Altura (cm)	19		17	16			
157			Diámetro aereo mayor (cm)	7		9.5	6			
158		P1-T3.37	Diámetro aereo menor (cm)	5		5	4			
159			Volumen del esqueje (cm ³)	789.14						
160		Biomasa total T03			7367.73	8500.76	8564.24	9362.07	9467.11	10291.92
161		Promedio volumen T03			818.64	944.53	951.58	1040.23	1051.90	1143.55
162		Suervivencia T03			0	19	19	20	20	20

93	P1-T2	P1-T2.22	Altura (cm)	18	23	29	30	39	44	60
94			Diámetro aereo mayor (cm)	7	10	15	13	13	14	14
95			Diámetro aereo menor (cm)	3	5	6	7	7	10	10
96		P1-T2.25	Volumen del esqueje (cm ³)	556.18	1290.82	3155.78	4093.85	6121.26	9721.98	14282.97
97			Diámetro basal (cm)	3	3	4	8	9	12	15
98			Altura (cm)	15	18	28	28	32	36	51
99		P1-T2.26	Diámetro aereo mayor (cm)	5	9	19	7	10	14	21
100			Diámetro aereo menor (cm)	3	4	6	5	5	12	19
101			Volumen del esqueje (cm ³)	289.15	785.39	4170.04	1605.96	3841.45	7996.68	24577.61
102		P1-T2.27	Diámetro basal (cm)	2	3	3	7	8	10	12
103			Altura (cm)	23	26	26	26	31	35	59
104			Diámetro aereo mayor (cm)	4	4	4	4	6	11	14
105		P1-T2.28	Diámetro aereo menor (cm)	3	3	3	2	4	6	10
106			Volumen del esqueje (cm ³)	309.00	405.15	405.15	558.12	1386.34	3751.23	11593.79
107			Diámetro basal (cm)	4	4	5	11	12	15	17
108		P1-T2.29	Altura (cm)	20	25	22	25	28	32	42
109			Diámetro aereo mayor (cm)	8	9	10	9	9	11	15
110			Diámetro aereo menor (cm)	3	5	8	4	9	10	13
111		P1-T2.30	Volumen del esqueje (cm ³)	720.40	1343.47	1937.66	1963.75	3613.40	5862.73	12426.52
112			Biomasa total T02	2650.41	5633.97	12098.52	9831.49	23135.89	37659.73	82704.06
113			Promedio volumen T02	441.74	938.99	2016.42	1638.58	3855.98	6276.62	13784.01
114		Suervivencia T02			0	15	19	20	21	21
115		P1-T3.3	Diámetro basal (cm)	4	5	4.5	10	10	10	10
116			Altura (cm)	26	26	25	26	26	24	25
117			Diámetro aereo mayor (cm)	6	6	6	5	5	5	5
118		P1-T3.5	Diámetro aereo menor (cm)	4	4	4	3	4	4	4
119			Volumen del esqueje (cm ³)	803.37	897.00	812.18	1053.57	1205.31	1112.59	1158.95
120			Diámetro basal (cm)	5	5	5	11	11	12	12
121		P1-T3.7	Altura (cm)	20	21	22	22	21	21	25
122			Diámetro aereo mayor (cm)	8	7	8	6.5	7	7	7
123			Diámetro aereo menor (cm)	3	4	3	3	3	3	4
124		P1-T3.17	Volumen del esqueje (cm ³)	789.73	829.22	868.71	1176.35	1191.93	1282.89	1705.28
125			Diámetro basal (cm)	3	3	5	7	6	7	8
126			Altura (cm)	20	18	16	18	16	16	23
127		P1-T3.20	Diámetro aereo mayor (cm)	3.5	3	4	3	3	3	4
128			Diámetro aereo menor (cm)	3	3	2	2	2	3	3
129			Volumen del esqueje (cm ³)	277.66	221.07	264.89	316.04	244.36	343.46	660.37
130		P1-T3.22	Diámetro basal (cm)	5	5	4	10	10	11	10
131			Altura (cm)	23	22	23	22	22	22	22
132			Diámetro aereo mayor (cm)	6	7	4	4	4	5	4
133		P1-T3.24	Diámetro aereo menor (cm)	4	5	3	4	4	4	4
134			Volumen del esqueje (cm ³)	784.66	595.51	411.47	891.48	891.48	1106.16	891.48
135			Diámetro basal (cm)	6	6	6	9	10	11	9
136		P1-T3.26	Altura (cm)	20	20	22	22	21	25	28

10.6. Anexo 6. Fichas para la validación del instrumento de investigación

Ficha de validación del Ing. Renny Daniel Diaz Aguilar

Matriz de evaluación de validez de instrumento

Evaluador: Renny Daniel Diaz Aguilar

Fecha: 28/05/20224

Indicadores	
Coherencia	El ítem mide alguna variable/ categoría coherente con la investigación
Claridad	El ítem es claro (no genera confusión o contradicciones)
Escala	El ítem puede ser respondido de acuerdo a la escala que presenta el instrumento
Relevancia	El ítem es ítem relevante para cumplir con las preguntas y objetivos de la investigación

Escala de valores				
1 = Inaceptable	2 = Deficiente	3 = Regular	4 = Bueno	5 = Excelente

Ítem	Contenido		Evaluación				
	Indicadores	Observaciones	1	2	3	4	5
1. Balance hídrico del suelo	Coherencia						x
	Claridad						x
	Escala						x
	Relevancia						x
2. Escorrentía superficial (ES)	Coherencia						x
	Claridad					x	
	Escala						x
	Relevancia						x
3. Precipitación efectiva (PE)	Coherencia						x
	Claridad					x	
	Escala						x
	Relevancia					x	
4. Capacidad de campo (CC)	Coherencia						x
	Claridad					x	
	Escala						x
	Relevancia						x
5. Capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo. (STx)	Coherencia						x
	Claridad						x
	Escala						x
	Relevancia					x	
6. Contenido de humedad del suelo (θ) y cambio de humedad del suelo ($\Delta\theta$)	Coherencia						x
	Claridad						x
	Escala						x
	Relevancia						x
7. Percolación (Per)	Coherencia						x
	Claridad					x	
	Escala						x
	Relevancia						x
8. Evapotranspiración	Coherencia						x
	Claridad					x	

de referencia (ETo)	Escala						X
	Relevancia					X	
9. Evapotranspiración real (LTR)	Coherencia						X
	Claridad					X	
	Escala						X
	Relevancia						X
10. Vigor y mortalidad de <i>Festuca dolichophylla</i>	Coherencia						X
	Claridad					X	
	Escala						X
	Relevancia						X

Comentarios generales: La propuesta metodológica empleada es adecuada para los fines ecohidrológicos de la investigación.

Atentamente:


 INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACION EN
 GEOMORFOS Y ECOSISTEMAS DE MONTANA
 Ing. Renny Diaz Aguilar
 Especialista en hidrología CUMES - Cusco
 DNI 40742733

Renny Daniel Diaz Aguilar
 Especialista en hidrología del INAIGEM

Ficha de validación del Ing. Oscar Vilca Gómez

Matriz de evaluación de validez de instrumento

Evaluador: Óscar Vilca Gómez

Fecha: 27/05/2024

Indicadores	
Coherencia	El ítem mide alguna variable/ categoría coherente con la investigación
Claridad	El ítem es claro (no genera confusión o contradicciones)
Escala	El ítem puede ser respondido de acuerdo a la escala que presenta el instrumento
Relevancia	El ítem es ítem relevante para cumplir con las preguntas y objetivos de la investigación

Escala de valores				
1 = Inaceptable	2 = Deficiente	3 = Regular	4 = Bueno	5 = Excelente

Ítem	Contenido		Evaluación				
	Indicadores	Observaciones	1	2	3	4	5
1. Balance hídrico del suelo	Coherencia						x
	Claridad					x	
	Escala						x
	Relevancia						x
2. Escurrimiento superficial (ES)	Coherencia						x
	Claridad					x	
	Escala					x	
	Relevancia						x
3. Precipitación efectiva (PE)	Coherencia						x
	Claridad						x
	Escala						x
	Relevancia						x
4. Capacidad de campo (CC)	Coherencia						x
	Claridad					x	
	Escala						x
	Relevancia						x
5. Capacidad máxima de almacenamiento de agua de suelo (STx)	Coherencia						x
	Claridad					x	
	Escala						x
	Relevancia						x
6. Contenido de humedad del suelo (θ) y cambio de humedad del suelo ($\Delta\theta$)	Coherencia						x
	Claridad						x
	Escala					x	
	Relevancia						x
7. Percolación (Per)	Coherencia						x
	Claridad						x
	Escala						x
	Relevancia						x
8. Evapotranspiración	Coherencia						x
	Claridad					x	

de referencia (ET ₀)	Escala					X
	Relevancia					X
9. Evapotranspiración real (ETR)	Coherencia					X
	Claridad					X
	Escala				X	
	Relevancia					X
10. Vigor y mortalidad de <i>Festuca dolichophylla</i>	Coherencia					X
	Claridad					X
	Escala					X
	Relevancia					X

Comentarios generales:

Atentamente

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN
GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA
Ing. Oscar Vilca Gómez
Especialista en hidrología y glaciología
ODMRS - Cusco
DNI. 40662374

Óscar Vilca Gómez
Especialista en glaciología e hidrología del INAIGEM

Ficha de validación del Ing. Victor Samuel Bustinza Urviola

Matriz de evaluación de validez de instrumento

Evaluador: Victor Samuel Bustinza Urviola

Fecha: 28/04/2024

Indicadores	
Coherencia	El ítem mide alguna variable/ categoría coherente con la investigación
Claridad	El ítem es claro (no genera confusión o contradicciones)
Escala	El ítem puede ser respondido de acuerdo a la escala que presenta el instrumento
Relevancia	El ítem es relevante para cumplir con las preguntas y objetivos de la investigación

Escala de valores				
1 = Inaceptable	2 = Deficiente	3 = Regular	4 = Bueno	5 = Excelente

Ítem	Contenido		Evaluación				
	Indicadores	Observaciones	1	2	3	4	5
1. Balance hídrico del suelo	Coherencia						X
	Claridad					X	
	Escala						X
	Relevancia						X
2. Escorrentía superficial (ES)	Coherencia						X
	Claridad					X	
	Escala						X
	Relevancia						X
3. Precipitación efectiva (PE)	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala						X
	Relevancia						X
4. Capacidad de campo (CC)	Coherencia						X
	Claridad					X	
	Escala						X
	Relevancia						X
5. Capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo (STx)	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala						X
	Relevancia						X
6. Contenido de humedad del suelo (θ) y cambio de humedad del suelo ($\Delta\theta$)	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala					X	
	Relevancia						X
7. Percolación (Per)	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala						X
	Relevancia						X
8. Evapotranspiración	Coherencia						X
	Claridad					X	

de referencia (ETo)	Escala						X
	Relevancia						X
9. Evapotranspiración real (ETR)	Coherencia						X
	Claridad					X	
	Escala						X
	Relevancia						X
10. Vigor y mortalidad de <i>Festuca dolichophylla</i>	Coherencia						X
	Claridad					X	
	Escala					X	
	Relevancia						X

Comentarios generales:

Atentamente:



Victor Samuel Bustinza Urviola

Director de la Oficina Desconcentrada de la Macro Región Sur de INAIGEM

Ficha de validación de la Blga. Angela Mendoza Ato

Matriz de evaluación de validez de instrumento

Evaluador: Angela Mendoza Ato

Fecha: 29/05/24

Indicadores	
Coherencia	El ítem mide alguna variable/ categoría coherente con la investigación
Claridad	El ítem es claro (no genera confusión o contradicciones)
Escala	El ítem puede ser respondido de acuerdo a la escala que presenta el instrumento
Relevancia	El ítem es relevante para cumplir con las preguntas y objetivos de la investigación

Escala de valores				
1 = Inaceptable	2 = Deficiente	3 = Regular	4 = Bueno	5 = Excelente

Ítem	Contenido		Evaluación				
	Indicadores	Observaciones	1	2	3	4	5
1. Balance hídrico del suelo	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala						X
	Relevancia						X
2. Escorrentía superficial (ES)	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala						X
	Relevancia						X
3. Precipitación efectiva (PE)	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala						X
	Relevancia						X
4. Capacidad de campo (CC)	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala						X
	Relevancia						X
5. Capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo (STx)	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala						X
	Relevancia	Es necesario que el estudiante cite el documento que utilizó para establecer esta sección de la metodología.					X
6. Contenido de humedad del suelo (θ) y cambio de humedad del suelo ($\Delta\theta$)	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala						X
	Relevancia	Es necesario que el estudiante cite el documento que utilizó para establecer esta sección de la metodología.					X

7. Percolación (Per)	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala						X
	Relevancia	Es necesario que el estudiante cite el documento que utilizó para establecer esta sección de la metodología.					X
8. Evapotranspiración de referencia (ET _o)	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala						X
	Relevancia						X
9. Evapotranspiración real (ETR)	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala						X
	Relevancia						X
10. Vigor y mortalidad de <i>Festuca dolichophylla</i>	Coherencia	Se sugiere que se utilice volumen de la planta en vez de vigor, ya que este último indicador es cualitativo y lo que efectivamente se está midiendo es el volumen.					X
	Claridad						X
	Escala						X
	Relevancia						X

Comentarios generales:

Atentamente:

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACION EN
GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Angela Mendoza Ato
Bla. Angela Mendoza Ato
Especialista en biología ODMRS - Cusco
DNI. 70438873

Angela Mendoza Ato
Especialista en biología del INAIGEM

10.7. Anexo 7. Proceso de calibración de equipos

Certificado de calibración de los Pluviómetros HOBO



DMEDIDA
"METROLOGÍA A SU ALCANCE"



"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"
"LABORATORIO DE METROLOGÍA"

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
LC-0539-2023

Fecha de Emisión: 04/07/2023

Pág. 01 de 02

1. Datos del Solicitante:

Nombre: INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACION
EN GLACIARES Y ECOSISTEMAS
DE MONTAÑA

Ruc: 20600404262

2. Instrumento a Calibrar:

Equipo: Estación Meteorológica

Marca: Hobo/Onset

Modelo: H21-USB

N° Serie: 21662947

Procedencia: EE. UU

Fecha de Cal.: 01/07/2023

3. Método de Calibración:

Determinación del error de lectura del equipo a calibrar, por el método de comparación directa entre el valor indicado del Termómetro ante un equipo patrón en una cabina de ambiente controlado de temperatura y humedad.

4. Condiciones Ambientales:

Temperatura / Humedad: 22.0 °C / 70.0 %

5. Lugar de Calibración:

Laboratorio de Dmedida.

6. Patrón de Medición:

Trazabilidad	Patrón Utilizado	Certificado de Patrón
General Easten M4-RH Vaisala HMP-233	Sensor de Temperatura y Humedad Davis Instruments	160776N01
Cavro XLP6000 Pump	Sensor de Precipitación Davis Instruments	160776N02
MKS Baratron	Anemómetro Davis Instruments	160776N03
Vaisala PTB220	Sensor de Presión Barométrica Davis Instruments	AZ170803057
Instituto Nacional de Calidad INACAL	Termohigrómetro Digital de Precisión Control Company – Traceable – 4087	LH-015-2023

Los valores de los resultados de este certificado son válidos solo para las condiciones de ensayo y para el momento de su evaluación.

Con el fin de asegurar y mejorar los resultados de sus mediciones, el usuario está en la obligación de recalibrar sus instrumentos en intervalos adecuados.

Este certificado de calibración utiliza patrones Traceables a patrones de valides internacional de la ISO/IEC 17025 e ISO 9001. El certificado de calibración sin firma y sello no tienen valides.



DMEDIDA E.I.R.L.
LABORATORIO DE METROLOGÍA

T. (01) 518-9156 | M. 978 167 537
Calle Carlos Arrieta 880, Urb. Santa Beatriz, Lima, Lima, Perú

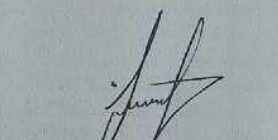
7. Resultados de Calibración:

Sensor	Error	Incertidumbre	Precisión Estipulada
<i>Temperatura</i>	0.0 °C	0.20	± 0.5 °C
<i>Humedad Relativa</i>	-1.1 %HR	0.22	± 3%
<i>Velocidad de Viento</i>	-0.0 m/s	0.29	± 3 m/s
<i>Pluviómetro</i>	- 0.1 mm	0.18	± 0.25 mm

* Los Resultados obtenidos son promedios de 24 lecturas, E.M.P. Error máximo permitido

8. Observaciones:

El siguiente Certificado se emite con las pruebas realizadas en las condiciones de ensayo del laboratorio. La incertidumbre de la calibración considerando el factor de cobertura $k=2$, para un nivel de confianza del 95%. Los resultados obtenidos de los ensayos son válidos solo para los valores de las condiciones de ensayo y para el momento de su evaluación.



Ing. Carlos Manrique L.
Jefe de Laboratorio



Resultados del proceso de calibración de los sensores TMS4 y artículo científico de respaldo



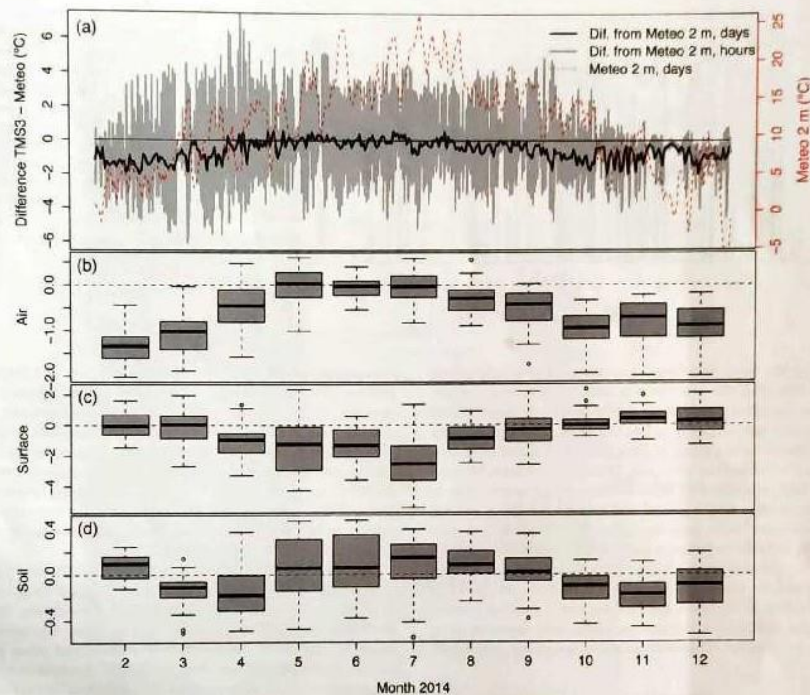


Fig. 4. Differences in temperatures measured with the three temperature sensors of the TMS data logger from temperatures measured by the weather station. (a) – TMS air temperature, daily (black line) and hourly (grey line) differences and daily average temperatures from the weather station (dashed red line, 'Meteo'). (b, c, d) – differences summarized over individual months (note the two different scales of the y-axis). The entire measurement period was without permanent snow cover. (for interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article).

Table 2

Comparison of climate variables measured by the TMS logger and by the weather station (Wstation). Values of the climate variables were calculated from 15 min measurements obtained over 11 months without snow cover. T_{mean} – average temperature; T_{max95} – 95th percentile of daily maxima; T_{min5} – 5th percentile of daily minima; GDD_{10} – growing degree days (sum of daily mean temperatures exceeding 10 °C); GDD_{10} – growing degree hours (sum of daily temperatures exceeding 10 °C, calculated as the daily average of temperatures over the base temperature for each hour, divided by 24). Max daily range – maximum daily range.

Climate variable	Air		Surface		Soil	
	TMS	Wstation	TMS	Wstation	TMS	Wstation
T_{mean}	10.86	11.65	11.43	12.28	11.35	11.45
T_{max95}	32.04	29.6	32.59	44.94	21	20.3
T_{min5}	-5.32	-2.94	-2.13	-7.14	2	2
GDD_{10}	1105.6	1170.1	1295.3	1537.7	1014.8	1009.6
GDD_{10}	1270.6	1258.7	1375.6	1793	1019.4	1019.4
Max daily range	26	20.8	23.13	42.9	5.1	3.4

and long battery life of TMS loggers, we were able to ascertain detailed microclimate characteristics of sites with the highest growing vascular plants on Earth (Angel et al., 2016), where average daily air temperatures remain below zero for more than 300 days of the year, daily minima often fall below -30 °C, and the lowest temperature reached was -43 °C. Moreover, simultaneous soil and air temperature

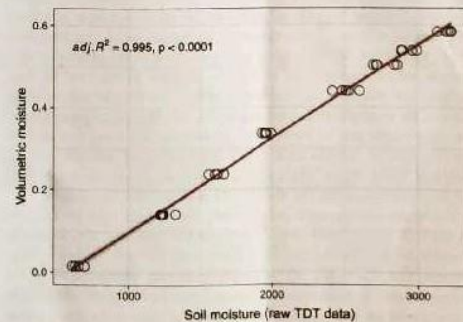


Fig. 5. Relationship between raw signal provided by TMS data loggers and laboratory-determined volumetric moisture content for the sandy loam soil class. Points represent individual measurements by five different TMS devices and the line represents the linear relationship fitted to these data. The grey band surrounding the regression line represents the 95% pointwise confidence interval.

measurements provided evidence that soil, not air, temperatures are crucial for plant survival in these extreme conditions (Dvořský et al., 2016; Doležal et al., 2016).