

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS**



**“OPTIMIZACIÓN DEL USO DEL AGUA CON FINES DE RIEGO EN
LA UNALM, UTILIZANDO EL MODELO ISAREG Y LOS SIG”**

Presentada por:

JOSÉ BERNARDINO ARAPA QUISPE

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE EN INGENIERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS**

Lima – Perú

2023

OPTIMIZACIÓN DEL USO DEL AGUA CON FINES DE RIEGO EN LA UNALM, UTILIZANDO EL MODELO ISAREG Y LOS SIG

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS



Excluir citas Activo

Excluir bibliografía Activo

Excluir coincidencias < 5%

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS**

**“OPTIMIZACIÓN DEL USO DEL AGUA CON FINES DE RIEGO EN
LA UNALM, UTILIZANDO EL MODELO ISAREG Y LOS SIG”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

JOSÉ BERNARDINO ARAPA QUISPE

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

**Dr. Néstor Montalvo Arquñigo
PRESIDENTE**

**Mg.Sc. Miguel Sánchez Delgado
ASESOR**

**Ph.D. David Ascencios Templo
MIEMBRO**

**Dr. Abel Mejía Marcacuzco
MIEMBRO**

DEDICATORIA

A mi esposa Greasse y mis hijos Massiel, Derek y Melek, a quienes amo tanto y son motivo y motor de mi esfuerzo y superación constante.

A mi hermana Katy que, con su apoyo incondicional, siempre permitió cumplir mis metas.

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme salud y vida para culminar esta anhelada meta.

A mi asesor Dr. Miguel A. Sánchez Delgado, por sus permanentes consejos.

*A los Jurados Dr. Néstor Montalvo, Dr. David Ascencios y Dr. Abel Mejía,
por los consejos y correcciones recibidas para mejorar el trabajo.*

*A mi amigo de siempre Dr. Marcelo Portuguez, por sus sugerencias y
consejos, durante la redacción del documento.*

*A mis amigos Ing. Jesús Mauricio, Ing. Duaner Juli, Ing. Kevin Cruz, jóvenes
profesionales que también contribuyeron en este trabajo.*

*A los colegas del Departamento de Recursos Hídricos,
por brindar un ambiente familiar y agradable de trabajo.*

*A los jefes de los diferentes programas, usuarios de riego y a la Unidad de Riego
Tecnificado de la UNALM, por estar siempre dispuesto a brindar información.*

*Finalmente, Agradezco al Vicerrectorado de Investigación de la UNALM, por el apoyo
económico necesario para la culminación de la tesis.*

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1	DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL SUELO	5
2.1.1	Capacidad de campo (CC).....	5
2.1.2	Punto de marchitez permanente (PMP).....	5
2.1.3	Agua total disponible (ATD).....	6
2.1.4	Agua fácilmente aprovechable (AFA).....	7
2.1.5	Fracción de agotamiento del agua del suelo sin estrés (p)	7
2.2	BALANCE HÍDRICO Y NECESIDADES DE RIEGO	8
2.2.1	Balance hídrico en la zona de raíces.....	8
2.2.2	Balance hídrico del suelo.....	10
2.2.3	Necesidades de agua para el riego	10
2.2.4	Balance hídrico para el manejo del riego	12
2.3	MODELO ISAREG	15
2.3.1	Balance de agua en el suelo.....	15
2.3.2	Caracterización del cultivo	19
2.3.3	Características del software WinISAREG.....	22
2.4	MÉTODOS Y SISTEMAS DE RIEGO	26
2.4.1	Elección de los métodos de riego	28
2.4.2	Indicadores de funcionamiento del riego en parcela	28
2.4.3	Funcionamiento de sistemas hídricos, usos y consumos de agua.....	33
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	39
3.1.	MATERIALES Y EQUIPOS.....	39
3.1.1.	Ubicación de la zona de estudio	39
3.1.2.	Materiales y equipos.....	39
3.2	METODOLOGÍA	41
3.2.1.	Etapa preliminar.....	41
3.2.2.	Etapa de campo.....	46
3.2.3	Etapa de gabinete.....	46
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	68
4.1.	ÁREA POR CAMPOS Y USUARIOS DE RIEGO	68

4.2. MÉTODO Y EFICIENCIA DE RIEGO	71
4.3. VARIABLES CLIMÁTICAS	73
4.4. CALICATAS Y PARÁMETROS DE SUELO	75
4.4.1. Parámetro físico de suelo.....	76
4.4.2. Parámetros hídricos de suelo	78
4.5. PARÁMETROS DE CULTIVO Y RIEGO.....	82
4.5.1. Evapotranspiración actual (Eta)	83
4.5.2. Evapotranspiración máxima (Etm).....	86
4.5.3. Caudal diseño continuo (Qdc)	87
4.5.4. Intervalo de Riego (Ir)	89
4.5.5. Lámina total de riego (Ltr)	91
4.6. PROGRAMACIÓN ÓPTIMA DE RIEGO	95
4.6.1. Relación evapotranspiración y rendimiento	95
4.6.2. Relación intervalo de riego y rendimiento	98
4.6.3. Escenario con programación optima de riego	99
4.7. DEMANDA DE AGUA DE RIEGO.....	102
4.8. OFERTA DE AGUA DE RIEGO.....	104
4.9. BALANCE DEL USO DE AGUA DE RIEGO	106
V. CONCLUSIONES.....	110
VI. RECOMENDACIONES	112
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
VIII. ANEXOS.....	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de las propiedades físicas de los suelos	6
Tabla 2: Factores que favorecen la elección del método de riego.....	28
Tabla 3: Valores indicativos de las eficiencias de aplicación para sistemas de riego bien proyectados y mantenidos	32
Tabla 4: Indicadores de uso del agua en regadío.....	36
Tabla 5: Valores indicativos de las eficiencias de transporte y distribución para sistemas de riego bien proyectados y mantenidos	37
Tabla 6: Padrón de usuarios de riego – FDA-UNALM.....	50
Tabla 7: Ficha técnica de campo, programación de siembra y cedula de cultivo	51
Tabla 8: Valores indicativos de las eficiencias de transporte y distribución para sistemas de riego bien proyectados y mantenidos	52
Tabla 9: Valores indicativos de las eficiencias de aplicación para sistemas de riego bien proyectados y mantenidos	52
Tabla 10: Valores estimados de eficiencias de almacenamiento, conducción y distribución, aplicación y riego, para el sistema y campos bajo riego de la UNALM.....	53
Tabla 11: Códigos de unidades y extensión para diferentes archivos con datos climáticos	54
Tabla 12: Presentación de resultados del cálculo de ETo utilizando la metodología de FAO-PM	56
Tabla 13: Programación y turnos internos (horas) de agua de regadío, por los canales parte baja y parte alta para los usuarios de riego de la UNALM.....	66
Tabla 14: Programación del consumo de agua con fines agrarios de la UNALM, periodo 2012 al 2019.....	67
Tabla 15: Área por usuarios de riego de la FDA y UNALM, a octubre del 2018	69
Tabla 16: Áreas, métodos y eficiencias de riego por usuarios a situación actual	71
Tabla 17: Áreas, métodos y eficiencias de riego por usuarios a situación propuesta	72
Tabla 18: Valores de media recortada diarios multianual de variables climáticas, para el año promedio (2013 -2018). Estación Alexander Von Humboldt – UNALM	73
Tabla 19: Valores máximos diarios multianual de variables climáticas, para el año promedio (2013 -2018). Estación Alexander Von Humboldt – UNALM	73
Tabla 20: Valores mínimos diarios multianual de variables climáticas, para el año promedio (2013 -2018). Estación Alexander Von Humboldt – UNALM	73

Tabla 21: Número de clases texturales de los suelos existentes por estratos 1, 2 y 3 del total de 77 calicatas realizadas en la UNALM	78
Tabla 22: Valores de Parámetros hídricos y Densidad Aparente por texturas y estratos 1, 2 y 3 de los campos agrícolas y áreas con cultivo de la UNALM	79
Tabla 23: Evapotranspiración actual E_a (mm/época), por usuarios y escenarios de riego MXR, MAD, FR7 y FR15	84
Tabla 24: Evapotranspiración máxima E_{tm} (mm/época), por usuarios y escenarios de riego MXR, MAD, FR7 y FR15	86
Tabla 25: Caudal máximo continuo Q_{dc} (l/s), por escenarios de simulación y usuarios ..	88
Tabla 26: Distribución del número de usuarios según escenario de simulación y variación de intervalo de riego.....	90
Tabla 27: Valores de intervalos de riego I_r (días), por usuarios y escenarios de riego simulado.....	90
Tabla 28: Valores de lámina de riego total LRT (mm/época), por usuarios y escenarios de riego simulado	93
Tabla 29: Valores de evapotranspiración y rendimientos relativos por usuarios y escenarios de riego simulad	95
Tabla 30: Valores de intervalos de riego y rendimientos relativos por usuarios y escenarios de riego simulado	98
Tabla 31: Distribución del número de usuarios según escenario de simulación, intervalo de riego y rendimiento por usuarios.....	99
Tabla 32: Valores globales de parámetros de riego consolidados por escenarios	100
Tabla 33: Valores de parámetros de riego por usuario para escenario MXR máximo rendimiento (optimo)	101
Tabla 34: Valores de demanda neta y bruta de agua de riego para diferentes escenarios .	102
Tabla 35: Valores de demanda neta y bruta para escenario de máximo rendimiento MXR, a eficiencia de riego actual y nuevo	103
Tabla 36: Valores anuales de oferta de agua de riego, por la Comisión de Riegos de la UNALM y la Junta Usuarios de ATE.....	104
Tabla 37: Valores mensuales de oferta de agua de riego, por la Comisión de Riegos de la UNALM y la Junta Usuarios de ATE.....	105
Tabla 38: Valores de la demanda y oferta de agua de riego en la UNALM.....	106
Tabla 39: Valores de la variación del balance de uso y consumo de agua de riego a situación actual y situación nueva.....	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Factor de agotamiento (p) para diferentes niveles de evapotranspiración del cultivo	8
Figura 2: Esquema de los términos del balance hídrico de la zona de enraizamiento	9
Figura 3: Validación del modelo ISAREG para un cultivo de maíz en suelo de aluvión, limoso, del Valle de Sorraia (Portugal) cultivado con maíz para ensilado	14
Figura 4: Representación de los principales componentes del balance hídrico para un suelo multicapa	15
Figura 5: Curva de coeficiente cultivo y definiciones de etapas	21
Figura 6: Modelo lineal para predecir la profundidad de raíz	22
Figura 7: Diagramas de flujo simplificado de modelo WinISAREG	24
Figura 8: Menú principal software WinISAREG	25
Figura 9: Uso y consumo de agua, usos benéficos, desperdicios y pérdidas	34
Figura 10: Ubicación satelital de la zona de estudio	39
Figura 11: Diagrama de Flujo del proceso metodológico, para la optimización del uso de agua de riego en la UNALM, utilizando el modelo ISAREG y SIG	42
Figura 12: Mapa de Microzonificación Geotécnica – Distrito La Molina Lima	43
Figura 13: Nube de puntos del levantamiento topográfico de campos y delimitación de áreas de campos por usuarios de riego de UNALM	47
Figura 14: Especificaciones de los códigos utilizados para los archivos de datos climáticos	54
Figura 15: Menú principal del ISAREG y el árbol de navegación para gestionar archivos: climáticos, suelo, cultivo, opciones de riego y otros	55
Figura 16: Menú principal del programa Evap56 y opciones de entrada de datos para el cálculo de la Eto	55
Figura 17: Presenta grafica de los datos climáticos utilizando por el modelo ISAREG	57
Figura 18: Ingreso de parámetros de cultivos hortícolas y cultivo de árboles, caso ejemplo unidad de riego - Facultad de Agronomía	58
Figura 19: Ingreso de parámetros de cultivos forrajeros con múltiples cortes, ejemplo Poca Rigoranch Pasto 1	59
Figura 20: Ingreso de datos de cultivos con parámetro contante a lo largo de toda la temporada, ejemplo Jardín Botánico	59
Figura 21: Ingreso de datos de suelo, para definir las características hídricas a diferentes profundidades	60

Figura 22:Ingreso de datos de textura y espesor de suelo (Z_e) de la capa superior o evaporable.....	61
Figura 23:Definición de opción de riego uno, riego para obtener un rendimiento óptimo, $MAD=p$	62
Figura 24:Definición de opción de riego dos, riego fijando el tiempo y la lámina, $MAD>p$	62
Figura 25:Definición de opción de riego tres, riego para obtener un rendimiento óptimo, con restricción ($Fr= 7$ días).....	63
Figura 26:Definición de opción de riego cuatro, riego para obtener un rendimiento óptimo, con restricción ($Fr= 15$ días).....	64
Figura 27: Mapa de identificación de campos por usuarios de riego de la UNALM....	68
Figura 28: Representación de áreas (A_1 (ha)*) y (A_2 (ha) **) por usuarios de riego...	70
Figura 29:Distribución promedio mensual de media aritmética, media recortada, mediana, máximo y mínimo de variables climáticas para el año promedio ..	74
Figura 30:Mapa de ubicación de calicatas e influencia a los campos agrícolas de la UNALM.....	76
Figura 31:Porcentaje de arena, limo y arcilla en los estratos 1, 2 y 3, de los suelos de los campos agrícolas de la UNALM, representado en el diagrama triangular de clases texturales de suelo – USDA.	77
Figura 32:Representación de la Capacidad de Campo, por texturas y estratos 1, 2 y 3 de los campos agrícolas y áreas con cultivo de la UNALM.....	79
Figura 33:Representación del Punto de Marchitez, por texturas y estratos 1, 2 y 3 de los campos agrícolas y áreas con cultivo de la UNALM.....	80
Figura 34:Representación de la Densidad Aparente, por texturas y estratos 1, 2 y 3 de los campos agrícolas y áreas con cultivo de la UNALM.....	80
Figura 35:Representación de los parámetros hídricos: Capacidad de campo (CC), Punto de marchitez (PM) y Agua Total Disponible (ATD) de los suelos por estratos de muestreo	81
Figura 36:Representación de la evapotranspiración actual E_a (mm/época), por usuarios y escenarios de riego	85
Figura 37:Representación de la evapotranspiración máxima E_{tm} (mm/época), por usuarios y escenarios de riego.....	87
Figura 38:Representación de la variación del caudal máximo continuo por usuario y escenarios	89
Figura 39:Representación de intervalos de riego I_r (días), por usuarios y escenarios de riego simulado.....	91

Figura 40:Representación de lámina de riego total LRT (mm/época), por usuarios y escenarios de riego simulado	94
Figura 41:Relación y correlación de evapotranspiración y rendimientos relativos por escenarios de riego simulado	96
Figura 42:Representación de evapotranspiración y rendimientos relativos por usuarios y escenarios de riego simulado	97
Figura 43:Representación de intervalos de riego y rendimientos relativos por usuarios y escenarios de riego simulado	99
Figura 44:Representación anual para diferentes escenarios de demanda neta según ISAREG y demanda bruta para diferentes eficiencias de agua de riego	102
Figura 45:Representación de la demanda neta según ISAREG y las demandas brutas para el escenario MXR, a eficiencia de riego actual y nuevo	104
Figura 46:Representación anual de oferta de agua de riego, por la Comisión de Riegos de la UNALM y la Junta Usuarios de ATE	105
Figura 47:Representación mensual de oferta de agua de riego, por la Comisión de Riegos de la UNALM y la Junta Usuarios de ATE	106
Figura 48: Representación de la demanda y oferta de agua de riego en la UNALM..	107
Figura 49:Representación de la variación del balance de uso y consumo de agua de riego a situación actual.....	108
Figura 50:Representación de la variación del balance de uso y consumo de agua de riego a situación nueva.....	109

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Calicatas por campos y usuarios en la UNALM.....	117
Anexo 2: Panel fotográfico de actividades realizadas	118
Anexo 3: Mapas temáticos.....	126

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue optimizar el uso del agua de riego en los campos de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), mediante la aplicación del modelo ISAREG y los sistemas de información geográfica SIG. Primero, de la topografía se obtuvo un área total de 110.817 has con 129 campos, agrupados en 23 usuarios, con riegos por gravedad, aspersión y localizado con áreas de 75.202, 17.753 y 17.863 has. Por otro lado, se realizó 77 calicatas de suelo con muestreos en tres estratos, 1(0–30 cm), 2(30–60 cm) y 3(60–100 cm), del análisis de texturas resultó: estrato 1 Franco Arcillo Arenoso y estratos 2 y 3 Franco Arenoso. Segundo, mediante el modelo EVAP56, se determinó la ETo diaria, luego utilizando ISAREG se modeló cuatro escenarios de riego: escenario 1 (MXR) rendimiento óptimo sin restricción de agua; escenario 2 (MAD) bajo cierto estrés hídrico del cultivo; escenario 3 (FR7) rendimiento óptimo con restricción de riego cada 7 días y escenario 4 (FR15) rendimiento óptimo con restricción de riego cada 15 días. De los parámetros de riego resultados del modelado, se concluye al escenario 1 (MXR) como óptimo, considerando la relación del rendimiento relativo del cultivo (Y_a/Y_m) con la relación de evapotranspiración (E_a/E_{tm}) con parámetros finales de $E_a=715.06$ mm/año, $E_{tm}=715.06$ mm/año, $I_r= 2$ a 20 días y $L_{tr}=696.16$ mm/año, igualmente la demanda neta (DN) alcanza 771,417.83 m³/año y la demanda bruta (DB) 1'530,834.86 m³/año. Finalmente, los registros de agua de la Comisión de Riego (CR-UNALM) son 1'501,828.84 m³/año, mientras que lo programado por la Junta de Usuarios (JU-ATE), alcanzan a 2'481,750.00 m³/año. Por último, del balance (DB) y registro de la (CR-UNALM), se concluye en un déficit global de 29,006.02 m³/año; mientras que, del balance (DB) versus lo programado por la (JU-ATE) habría un exceso global de 950,915.14 m³/año.

Palabras clave: Optimización del agua; Evap56; Modelo ISAREG; SIG; Rendimiento relativo de cultivos.

ABSTRACT

The objective of the research is to optimize the use of irrigation water in the fields of the National Agrarian University La Molina (UNALM), through the application of the ISAREG model and GIS geographic information systems. First, from the topography, a total area of 110,817 ha was obtained with 129 fields, grouped into 23 users, with gravity, sprinkler and localized irrigation with areas of 75,202, 17,753 and 17,863 ha. On the other hand, 77 soil pits were made with samples in three strata, 1 (0-30 cm), 2 (30-60 cm) and 3 (60-100 cm), the result of the texture analysis was: stratum 1 Sandy Clay loam and strata 2 and 3 Sandy loam. Second, using the EVAP56 model, the daily ETo was determined, then four irrigation scenarios were modeled using ISAREG: scenario 1 (MXR) optimum yield without water restriction; scenario 2 (MAD) under certain crop water stress; scenario 3 (FR7) optimum yield with irrigation restriction every 7 days and scenario 4 (FR15) optimum yield with irrigation restriction every 15 days. From the irrigation parameters modeling results, scenario 1 (MXR) is concluded as optimal, considering the ratio of relative crop yield (Y_a/Y_m) to evapotranspiration ratio (E_t/E_{tm}) with final parameters of $E_t=715.06$ mm/year, $E_{tm}=715.06$ mm/year, $I_r= 2$ to 20 days and $L_{tr}=696.16$ mm/year, likewise the net demand (DN) reaches 771,417.83 m³/year and the gross demand (DB) 1'530,834.86 m³/year. Finally, the water records of the Irrigation Commission (CR-UNALM) are 1'501,828.84 m³/year, while the water programmed by the Board of Users (JU-ATE) reaches 2'481,750.00 m³/year. Finally, from the balance (DB) and the (CR-UNALM) record, there is an overall deficit of 29,006.02 m³/year; while, from the balance (DB) versus the programmed by the (JU-ATE) there would be an overall excess of 950,915.14 m³/year.

Keyword: Water optimization; Evap56; ISAREG model; GIS; Relative crop yields.

I. INTRODUCCIÓN

Según De la Torre (2017), se calcula que entre el 97 y el 97.5 por ciento del agua de la tierra es agua salada que está en los océanos y menos del 3 por ciento del agua en el mundo es agua dulce. De este 3 por ciento, dos tercios se encuentran congelados en los glaciares o como nieve permanente en las regiones montañosas y en las regiones antártica y ártica. Por lo tanto, la humanidad depende de menos del 0.5 por ciento del agua dulce para todas sus necesidades. A escala nacional en el Perú Pérez-Iriarte *et al.* (2021), indican que la costa desértica concentra el 70 por ciento de la población y sólo cuenta con el 2 por ciento de disponibilidad hídrica, donde el 80 por ciento del recurso es utilizado en las actividades agrarias que se desarrollan sobre todo en la costa, lo que genera un grave problema de estrés hídrico. En el mismo sentido Durán *et al.* (2021), manifiestan que la población mundial está creciendo a un ritmo alarmante, por lo que se requiere producir mayor cantidad de alimentos en el mundo, el recurso agua es indispensable para desarrollar una agricultura eficiente. Sin embargo, la diferencia entre la oferta y la demanda de agua es cada vez mayor, generándose actualmente amenazas a la seguridad alimentaria en algunas partes del mundo. Así mismo Coto-Valverde (2023), enfatiza que la agricultura es un sector que utiliza altas cantidades de agua y a su vez existe una mala gestión de este recurso, por lo que se ha generado serios problemas en la producción de alimentos. Por ello es necesario, la gestión adecuada y el uso eficiente del agua de riego, para aumentar la producción de alimentos y al mismo tiempo prevenir la escasez del recurso hídrico (Durán *et al.* 2021).

Definitivamente, la escasez del agua y la energía, son reconocidos como principales problemas en la agricultura. El agua y la energía son los recursos de entrada en los sistemas de producción agraria; el uso eficiente de estos recursos es vital para la productividad y la competitividad en la agricultura, así como para la sustentabilidad ambiental (Ascencios 2021). Este desequilibrio entre la demanda y la oferta de agua en la agricultura ha impulsado al uso de nuevas tecnologías y herramientas de gestión para optimizar el uso del agua de riego, para ello desde los años 80, se han desarrollado y puesto a disposición numerosos modelos de simulación de programación de riego (Pereira *et al.* 2020). Entre ellos, destaca el modelo ISAREG, desarrollado en el Departamento de Ingeniería Rural del Instituto Superior de Agronomía de Portugal, capaz de trabajar con

el ascensión capilar y percolación profunda, así como con la salinidad (Paredes & Pereira 2010).

Sin embargo, Pereira *et al.* (2020), indican que el uso exitoso de estas herramientas informáticas y digitales depende de su adaptación a las condiciones sociales, económicas, institucionales, climáticas, del suelo y otras condiciones ambientales prevaecientes. Así mismo, la gestión sostenible del agua a nivel de parcela es sin duda de enorme relevancia, concretamente en términos de adopción de programas de riego adecuados, que deberían conducir a rendimientos óptimos y prácticas agrícolas de riego que permitan reducir, pero optimizar el uso del agua. En este mismo sentido Ascencios (2021), refiere que existe la necesidad de crear bases científicas para realizar acciones que contribuyan a la mitigación y adaptación al cambio climático, realizando el uso eficiente del agua y utilizando sistemas de riego presurizados, que permitan obtener altas uniformidades y eficiencias de riego.

Ahora bien, Salomón *et al.* (2007), en su investigación “Estimación del balance hídrico mediante aplicación del modelo ISAREG en el canal segundo Vistalba Lujan de Cuyo. Mendoza (argentina)”, concluye que el modelo ISAREG en un método de evaluación superior y eficiente y se constituye como un instrumento necesario para la planificación y gestión hídrica. A tal efecto, es importante seguir avanzando en sus aplicaciones y desarrollos, así también en la vinculación espacial y temporal de los datos a través de los SIG, con fines operativos.

Así mismo, Popova & Pereira (2011), en su trabajo de “Modelado para la programación de riego de maíz utilizando datos experimentales a largo plazo de la región de Plovdiv, Bulgaria”, utilizaron un conjunto de datos históricos independientes, recopilados durante siete años consecutivos, para validad y calibrar el modelo de programación de riego ISAREG, bajo diferentes condiciones y escenarios. Reportó que la eficiencia de modelado fue alta, 0.91 para la calibración y 0.89 para la validación, con errores absolutos mínimos. Concluyendo que los resultados de su investigación respaldan el uso del modelo ISAREG para desarrollar programas de riego de ahorro de agua.

Igualmente, Popova *et al.* (2014), en su investigación “Vulnerabilidad de la agricultura búlgara a la sequía y la variabilidad climática con especial atención a los sistemas de maíz de secano”, estudió utilizando el modelo WinISAREG previamente calibrado, para calcular la disminución del rendimiento relativo (RYD) debido al estrés hídrico.

Según Grasso *et al.* (2018), en otra región en su investigación “Evaluación del modelo de simulación WinIsareg para soja en el Litoral Oeste del Uruguay”, se calibró y validó el modelo, con data histórica de tres años, los resultados obtenidos de la simulación mostraron una elevada similitud entre los valores simulados y observados, donde los indicadores estadísticos permite afirmar con certeza el buen funcionamiento del modelo WinIsareg.

Finalmente Pereira *et al.* (2020) en su investigación “Modelos de balance hídrico del suelo para determinar los requisitos de agua y riego de los cultivos y la programación del riego centrándose en el método FAO56 y el enfoque Kc dual”, analizan los desafíos que enfrenta el modelado de balance de agua en el suelo (SWB) para la programación del riego en tiempo real, en particular los nuevos enfoques de modelado para aplicaciones multiusuarios a gran escala, el uso de la computación en la nube y la adopción del Internet de las cosas (IoT), así como una red inalámbrica mejorada de modelado con sensores de suelo y plantas. Otros desafíos se refieren al uso de sensores remotos de equilibrio energético e índices de vegetación para mapear Kc, ET y requerimientos de agua y riego de los cultivos.

El mismo Pereira *et al.* (2020), refieren que se espera que las tendencias cambien los problemas de investigación relacionados con el modelado de balance de agua en el suelo (SWB), con modelos tradicionales utilizados principalmente para la investigación, mientras que modelos nuevos, de respuesta rápida y multiusuarios basados en tecnologías de nube e IoT se convertirán en aplicaciones para la práctica agrícola. Probablemente, se seguirá utilizando el Kc-ETo, con ETo de redes grilladas, reanálisis y otras Fuentes, y datos de Kc disponibles en tiempo real a partir de grandes bases de datos y sensores remotos.

En este contexto, pese a los esfuerzo desplegados, las parcelas y campos agrícola del campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina - UNALM, no son ajenas a una mala gestión del agua de riego, habiéndose identificado poca disponibilidad de agua de riego en cantidad y tiempo oportuno, afectando los rendimientos, calidad y productividad de los cultivos, por ello es sumamente importante, necesario e impostergable, iniciar y realizar estudios para conocer la demanda, oferta y programación optima de riego en el campus de la UNALM, para mejorar el manejo y uso eficiente de este recurso.

Por lo tanto, se planteó en esta investigación los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Optimizar el uso del agua de riego en los campos agrícolas de la Universidad Nacional Agraria La Molina, mediante la aplicación del modelo ISAREG y los sistemas de información geográfica.

Objetivos específicos:

- Determinar las demandas de agua, parámetros de riego y rendimientos relativos de los cultivos, mediante la simulación con ISAREG de cuatro escenarios de programación de riego en los campos agrícolas de la UNALM.
- Evaluar las demandas de agua, parámetros de riego y rendimiento relativos, mediante la espacialización con herramientas SIG.
- Realizar el balance global de oferta y demanda de agua de riego, en los campos de la UNALM.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL SUELO

La cantidad de agua disponible en el suelo para ser utilizada por las plantas está comprendida entre el rango de humedad a capacidad de campo (CC, 0.33 bares) y el punto de marchitez permanente (PMP, 15 bares). Si se mantuviera el contenido de humedad del suelo a un nivel mayor que la CC, existe el peligro de que la falta de aire en el suelo sea un factor limitante para el normal desarrollo de las plantas. Esto ocurre en un suelo con drenaje restringido o a niveles de humedad cercanos al PMP, y producirá daños irreversibles al cultivo a nivel fisiológico. En efecto, si este nivel de humedad persiste, las plantas morirán (Vasquez *et al.* 2017).

2.1.1 Capacidad de campo (CC)

Se define como capacidad de campo a la máxima capacidad de retención de agua de un suelo sin problemas de drenaje, y que se alcanza según la textura del suelo entre las 6 y 72 horas después de un riego pesado o una lluvia que permitió saturar momentáneamente al suelo. Es decir, cuando la percolación o drenaje del agua gravitacional haya, prácticamente, cesado. También se puede decir que el contenido de humedad a capacidad de campo es aquel que corresponde a un estado energético del agua en el suelo de aproximadamente 0.33 bares para un suelo pesado (arcilloso) y de 0.10 bares para un suelo de textura gruesa (arenoso) (Vasquez *et al.* 2017).

2.1.2 Punto de marchitez permanente (PMP)

Es el contenido de humedad del suelo en el cual la planta manifiesta síntomas de marchitamiento, caída de hojas, escaso desarrollo o fructificación, debido a un flujo muy lento de agua del suelo hacia la planta; y que, en promedio, corresponde a un estado energético de 15 bares cercano a este valor dependiendo del tipo de cultivo. Para que se produzca un flujo de agua, es necesaria la presencia de una gradiente de potencial. La magnitud del flujo está determinada tanto por la propia gradiente, así como por la conductividad hidráulica del suelo. Durante el proceso de transpiración, la gradiente se establece a través de cuatro medios distintos: suelo, raíz, hoja y atmósfera. En la Tabla 1, se presentan diferentes tipos de texturas de suelo y los rangos de espacio poroso, densidad aparente, CC, PMP y la humedad total aprovechable (Vasquez *et al.* 2017).

Tabla 1: Resumen de las propiedades físicas de los suelos

Textura del suelo	Total, de espacio poroso o porosidad total (%)	Densidad aparente Dap (gr/cm3)	Capacidad de campo θ_{cc} (%)	Punto de marchitez permanente θ_{pmp} (%)	Humedad total aprovechable		
					Peso seco ($\theta_{cc} - \theta_{pmp}$) (%)	Volumen ($\theta_{cc} - \theta_{pmp}$) (%) * D _{ap}	cm/m
Arenoso	38 (32-42)	1.65 (1.55-1.80)	9 (6-12)	4 (2-6)	5 (4-6)	8 (6-10)	8 (6-10)
Franco arenoso	43 (40-47)	1.5 (1.40-1.60)	14 (10-18)	6 (4-8)	8 (6-10)	12 (9-15)	12 (9-15)
Franco	47 (43-49)	1.4 (1.40-1.60)	22 (18-26)	10 (8-12)	12 (10-14)	17 (14-20)	17 (14-20)
Franco arcilloso	49 (47-51)	1.35 (1.30-1.40)	27 (23-31)	13 (11-15)	14 (12-16)	19 (16-22)	19 (16-22)
Franco arenoso	51 (49-53)	1.3 (1.25-1.35)	31 (27-35)	15 (13-17)	16 (14-18)	21 (18-23)	21 (18-23)
Arcilloso	53 (51-55)	1.25 (1.20-1.30)	35 (31-39)	17 (15-19)	18 (16-20)	23 (20-25)	23 (20-25)

Otros autores refieren que un suelo arcilloso, franco y arenoso tiene valores de porosidad que varían entre 53 por ciento - 61 por ciento, 47 por ciento - 53 por ciento y 30 por ciento - 47 por ciento respectivamente.

Fuente: Vasquez *et al.* (2017).

2.1.3 Agua total disponible (ATD)

La disponibilidad de agua en el suelo se refiere a la capacidad de un suelo de retener el agua disponible para las plantas. Después de una lluvia importante o riego, el suelo comenzará a drenar agua hasta alcanzar la capacidad de campo. En ausencia de una Fuente de agua, el contenido de humedad en la zona radicular del cultivo se reducirá como resultado del consumo de agua por el cultivo. A medida que aumenta el consumo de agua, el agua remanente será retenida con mayor fuerza por las partículas del suelo, lo que reducirá su energía potencial y hará más difícil su extracción por las plantas. Eventualmente, se alcanzará un punto donde el cultivo no podrá extraer el agua remanente. En este momento la extracción de agua será nula y se habrá alcanzado el punto de marchitez permanente (Allen *et al.* 2006).

El total de agua disponible en la zona radicular será la diferencia entre los contenidos de humedad a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente:

$$ADT = 1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r \quad (2.1)$$

donde

ADT total de agua disponible en la zona radicular del suelo (mm),

- θ_{FC} contenido de humedad a capacidad de campo (m^3*m^{-3}),
- θ_{WP} contenido de humedad en el punto de marchitez permanente (m^3*m^{-3}),
- Z_r profundidad de las raíces (m).

La lámina ADT representa la cantidad de agua que un cultivo puede extraer de su zona radicular y cuya magnitud depende del tipo de suelo y la profundidad radicular.

2.1.4 Agua fácilmente aprovechable (AFA)

A pesar de que en teoría existe agua disponible hasta alcanzar el punto de marchitez permanente, la cantidad de agua extraída por el cultivo se reducirá significativamente antes de alcanzar el punto de marchitez permanente. Cuando el suelo contiene suficiente humedad, el mismo es capaz de suministrar el agua con suficiente velocidad para satisfacer la demanda atmosférica al cultivo, por lo que la extracción del agua será igual a la ET_c . A medida que disminuya la cantidad de humedad en el suelo, el agua será retenida más fuertemente a la matriz del suelo y será más difícil de extraer. Cuando el contenido de humedad del suelo esté por debajo de cierto valor umbral, el agua del suelo no podrá ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda transpiratoria y el cultivo comenzará a sufrir de estrés. La fracción de ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico es denominada agua fácilmente aprovechable en el suelo (Allen *et al.* 2006).

$$AFA = p * ADT \quad (2.2)$$

donde

AFA : agua fácilmente aprovechable (extraíble) de la zona radicular del suelo (mm)

p : fracción promedio del total de agua disponible en el suelo

ADT : que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentarse estrés hídrico (reducción de la ET) (0 - 1).

2.1.5 Fracción de agotamiento del agua del suelo sin estrés (p)

El factor p varía de un cultivo a otro. El factor p varía normalmente entre 0.30 para plantas de raíces poco profundas, a tasas altas de ET_c ($> 8 \text{ mm d}^{-1}$), hasta 0.70 para plantas de raíces profundas y tasas bajas de ET_c ($< 3 \text{ mm d}^{-1}$). Un valor de 0.50 para p es utilizado comúnmente para una gran variedad de cultivos. El valor de p está en función del poder evaporante de la atmósfera. Los valores de p serán mayores a tasas bajas de ET_c que a tasas altas de ET_c . Para condiciones atmosféricas cálidas y secas, donde el valor de ET_c es alto, p será 10-25 por ciento menor que los valores presentados por Allen *et al.* (2006),

y el suelo se encontrará relativamente húmedo aun cuando comiencen a ocurrir situaciones de estrés. Cuando la evapotranspiración del cultivo es baja, el valor de p será hasta 20 por ciento mayor que los valores tabulados. Generalmente se utiliza un valor constante de p para cada período específico de desarrollo, en lugar de variar su valor para cada día. Una aproximación numérica para ajustar el valor de p de acuerdo con la tasa de ET_c es $p = p + 0,04 (5 - ET_c)$ donde el valor ajustado de p es limitado a $0.1 \leq p \leq 0.8$ y el valor de ET_c es en mm día^{-1} , como se aprecia en la Figura 1 según Allen *et al.* (2006).

El valor de p es también función del tipo de suelo. En general, se puede establecer que para suelos de textura fina (arcilla) los valores de p pueden ser reducidos en un 5-10 por ciento, mientras para suelos de textura más pesada (arenosos), estos pueden incrementarse en un 5-10 por ciento según Allen *et al.* (2006).

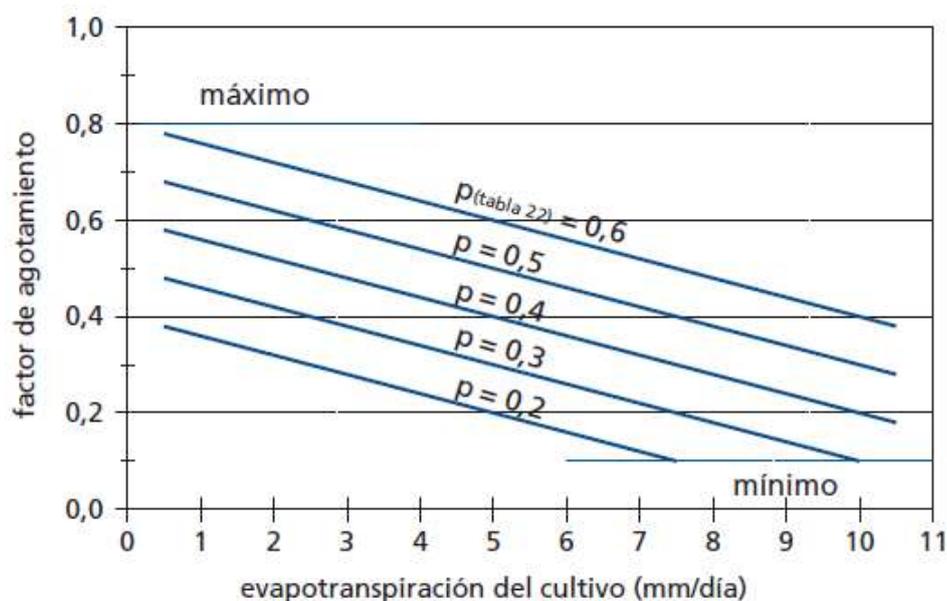


Figura 1: Factor de agotamiento (p) para diferentes niveles de evapotranspiración del cultivo

Fuente: Allen *et al.* (2006).

2.2 BALANCE HÍDRICO Y NECESIDADES DE RIEGO

2.2.1 Balance hídrico en la zona de raíces

Según Pereira *et al.* (2010), la ecuación general del balance hídrico en la zona de enraizamiento Figura 2, para un intervalo de tiempo Δt (días), y para una capa de suelo de espesor Δz (m), está dado por:

$$(\Delta S + \Delta V) = (P + I + GW) - (Q_r + DP + E + T) \quad (2.3)$$

dónde: ΔS , es la variación de la reserva de agua en el suelo; ΔV , es el incremento de agua incorporada en las plantas (el agua de constitución); P , es la precipitación; I , es la dosis de riego; GW , es el flujo acumulado de ascensión capilar en el período Δt ; Q_r , es la escorrentía superficial en ese mismo período; DP , es el flujo acumulado de drenaje por percolación profunda; E , es la evaporación a partir del suelo; y T , es la transpiración de las plantas.

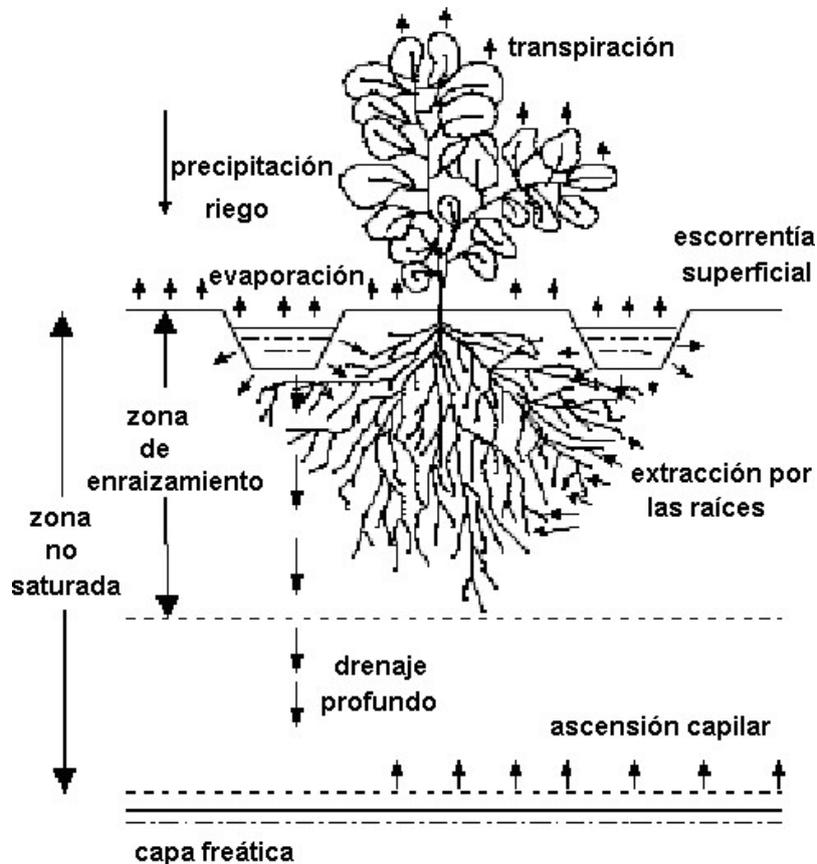


Figura 2: Esquema de los términos del balance hídrico de la zona de enraizamiento

Fuente: Pereira *et al.* (2010).

La Ecuación (2.3), se aplica entre la superficie del suelo y una profundidad z_r Figura 2, para cualquier intervalo de tiempo Δt . Todas las cantidades referidas en la Ecuación (2.3) se expresan en volumen por unidad de área (L^3/L^2), siendo más común en mm (acumulados para el intervalo Δt).

Según Pereira *et al.* (2010), el incremento de agua incorporada en las plantas (ΔV) tiene un valor insignificante en el conjunto del balance hídrico; la variación de la masa vegetativa fresca multiplicada por el factor 0,80 se aproxima a su valor. Por ejemplo, para una producción de 50,000 kg/ha de masa vegetativa fresca, cerca del 80 por ciento es agua de constitución; por tanto, $50,000 \times 0,80 = 40,000$ kg/ha de agua dará un volumen de 40 m³/ha. Los consumos totales de agua (ET_c) para producir esa masa vegetativa son del orden de 4,000 a 6,000 m³/ha; ΔV representa menos del 1 por ciento de la evapotranspiración del cultivo.

2.2.2 Balance hídrico del suelo

El balance hídrico del suelo, tratando de simular su contenido de humedad, se puede escribir como la Ecuación 2.5 según Pereira *et al.* (2010).

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{(P_i - Q_{ri}) + I_{ni} - ET_{ci} - DP_i + GW_i}{1000 z_{ri}} \quad (2.4)$$

dónde: θ_i , es el contenido de agua del suelo en la zona radicular (m³m⁻³ ó mm mm⁻¹) en el día i ; θ_{i-1} , es el contenido de agua del suelo en la zona radicular (m³m⁻³ ó mm mm⁻¹) en el día $i-1$; P_i , es la precipitación en el día i (mm); Q_{ri} , es la escorrentía superficial en el día i (mm); I_{ni} , es la lámina de riego en el día i (mm), o la cantidad de agua de riego que realmente se infiltra para su almacenamiento en la zona radicular; ET_{ci} , es la evapotranspiración del cultivo en el día i (mm), pudiendo ser $ET_{c\text{ cor}}$ cuando se produzca cualquier tipo de estrés); DP_i , es la percolación en el día i (mm); y GW_i , es el flujo acumulado de ascensión capilar en el día i (mm).

2.2.3 Necesidades de agua para el riego

Según Pereira *et al.* (2010), cuando el balance hídrico se realiza para calcular las necesidades de agua para el riego, la Ecuación (2.4) se simplifica, asumiendo $Q_r = 0$ y $DP = 0$. Se tiene, entonces:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{Pe_i + I_{ni} - ET_{ci} + GW_i}{1000 z_{ri}} \quad (2.5)$$

La Ecuación. (2.6) se resuelve hasta el día en que θ_i alcance el umbral:

$$\theta_t = (1-p)(\theta_{FC} - \theta_{WP}) + \theta_{WP} \quad (2.6)$$

dónde: p , es la fracción definida de agotamiento del agua en el suelo para evitar estrés. La cantidad de agua necesaria para restablecer entonces el contenido de agua del suelo a capacidad de campo es:

$$I_{ni} = 1000z_{ii}(\theta_{FC} - \theta_i) \quad (2.7)$$

cuyo sumatorio para todo el ciclo del cultivo, después de ser corregido por las necesidades de lavado de sales, corresponde a las necesidades netas de agua para el riego, IWR.

Es decir, se tiene:

$$IWR = \frac{ET_c - P_e - GW - \Delta S}{1 - LR} \quad (2.8)$$

dónde: IWR, son las necesidades netas de agua para el riego de un determinado cultivo; P_e , es la precipitación efectiva, definida como precipitación que ocurre durante el ciclo vegetativo después de descontar las cantidades correspondientes a escorrentía y a percolación; GW, es el flujo de ascensión capilar acumulado durante el ciclo vegetativo; ΔS es la variación acumulada de la reserva de agua en la zona radicular durante el ciclo vegetativo que resulta de la suma algebraica de las sucesivas variaciones de las reservas de agua calculadas y representa la diferencia de agua en el suelo en el día de inicio del ciclo (por ejemplo, la siembra) y en el día final (por ejemplo, la recolección); y LR, es la fracción de lavado de sales.

LR es la fracción de agua de riego que debe ser añadida a las necesidades netas, debidas al consumo por la evapotranspiración (ET_c), de manera que haya percolación a través de la zona radicular; de esta manera, la sobredosis de riego arrastra las sales en exceso y, así, mantiene la salinidad del suelo a niveles compatibles con los objetivos de producción y ambientales, LR puede estimarse, para suelos sin grietas, por la relación:

$$LR = \frac{EC_{iw}}{5EC_e - EC_{iw}} \quad (2.9)$$

dónde: EC_{iw} , es la conductividad eléctrica del agua de riego; y EC_e , es la conductividad

eléctrica del extracto saturado del suelo.

Así también Pereira *et al.* (2010), Refieren que las necesidades brutas, o globales, de agua de riego (GIWR) para el cultivo en cuestión dependen del proceso de la aplicación de agua a la parcela, es decir, del método y sistema de riego, y del sistema de transporte y distribución de agua a partir de su origen. Por estos motivos, se ha de considerar la eficiencia de aplicación, relativa al sistema de riego utilizado por los agricultores, y las eficiencias de distribución y de transporte, relativas a la red de riego; es decir:

$$GIWR = \frac{IWR}{e_f} \quad (2.10)$$

dónde: e_f , es la eficiencia global de riego, aquí expresada como fracción (cuando se exprese en por ciento, se deberá utilizar $e_f/100$).

Para un campo o parcela de cultivo, e_f corresponde solamente a la eficiencia de la aplicación (e_a), por lo que, GIWR representa las necesidades globales, o brutas, que el agricultor deberá satisfacer, y, para las cuáles, procurará evaluar los sistemas de riego que utiliza. Considerando toda la red de riego, e_f debe, también, incluir las eficiencias de distribución (e_d) y de transporte (e_t); es decir, $e_f = e_a e_d e_t$, lo que significa que GIWR representa las necesidades totales de agua que deben ser satisfechas en origen, las Tablas 3 y 5 proporcionan información sobre la gama de valores esperados para estas eficiencias.

2.2.4 Balance hídrico para el manejo del riego

Según Pereira *et al.* (2010), en esta parte, se aplica la Ecuación (2.4) a un cultivo que se sigue en el campo. Si la programación de riego se hace para evitar que ocurra déficit hídrico, la fecha límite para realizar el riego será cuando θ_i alcance el umbral:

$$\theta_t = (1-p)(\theta_{FC} - \theta_{WP}) + \theta_{WP} \quad (2.6)$$

dónde: p , es la fracción de (TAW) “Total Available Water” Agua total disponible que puede ser extraída sin producir déficit hídrico en la Ecuación (2.11), donde (RAW) “Readily Available Water” Agua fácilmente disponible.

$$RAW = p TAW = p 1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r \quad (2.11)$$

Por tanto, Pereira *et al.* (2010), indican que el riego puede, ser programado para un umbral diferente que refleja la extracción deseada en términos de programación (MAD, utilizando la conocida abreviatura para "Management Allowed Depletion"; La fracción correspondiente a MAD puede ser superior o inferior a p de acuerdo con los objetivos de programación. $MAD < p$ cuando, para cultivos muy rentables, se pretende disminuir el riesgo de aparición de estrés o las incertidumbres ligadas al manejo del riego. Por el contrario, se elige $MAD > p$ cuando se asume intencionadamente la programación del riego con estrés en determinados períodos, o cuando los recursos hídricos disponibles son insuficientes. La fecha del riego, entonces, vendrá determinada por:

$$\theta_i = \theta_{MAD} = (1 - MAD)(\theta_{FC} - \theta_{WP}) + \theta_{WP} \quad (2.12)$$

En ambos casos, la dosis a aplicar para restablecer el agua del suelo a capacidad de campo viene dada por:

$$I_{ni} = 1000 z_{ri} (\theta_{FC} - \theta_i) \quad (2.7)$$

La dosis neta así calculada es la mayor cantidad de agua a aplicar para que no exista percolación. En otras palabras, pueden utilizarse dosis más pequeñas, ya sea definiendo un valor máximo para θ inferior a la capacidad de campo, ya sea adoptando una dosis fija según el método de riego utilizado. La dosis bruta por aplicar a la parcela vendrá dada por: $G = I_{ni} / e_a$, donde, e_a es la eficiencia de aplicación, corregida por la fracción de lavado (FL).

Según Pereira *et al.* (2010), existe un buen número de modelos de simulación de balance hídrico; son unas herramientas magníficas para la determinación de las necesidades de riego y para la programación del riego. De entre ellos, destaca el modelo ISAREG, desarrollado en el Departamento de Ingeniería Rural del Instituto Superior de Agronomía de Portugal, ahora disponible en Windows, capaz de trabajar con la ascensión capilar y percolación, así como con la salinidad.

El mismo Pereira *et al.* (2010), ponen de conocimiento que el ISAREG fue validado para las condiciones de diversos países. Para su validación, se utilizaron medidas de agua del suelo a lo largo del ciclo vegetativo de los cultivos, recurriendo a la sonda de neutrones en todo el perfil del suelo susceptible de ser explorado por las raíces.

Un ejemplo de esa validación, para el cultivo del maíz en el Valle de Sorraia (Portugal), se presenta en la Figura 3, donde se comparan contenidos de humedad simulados con los observados.

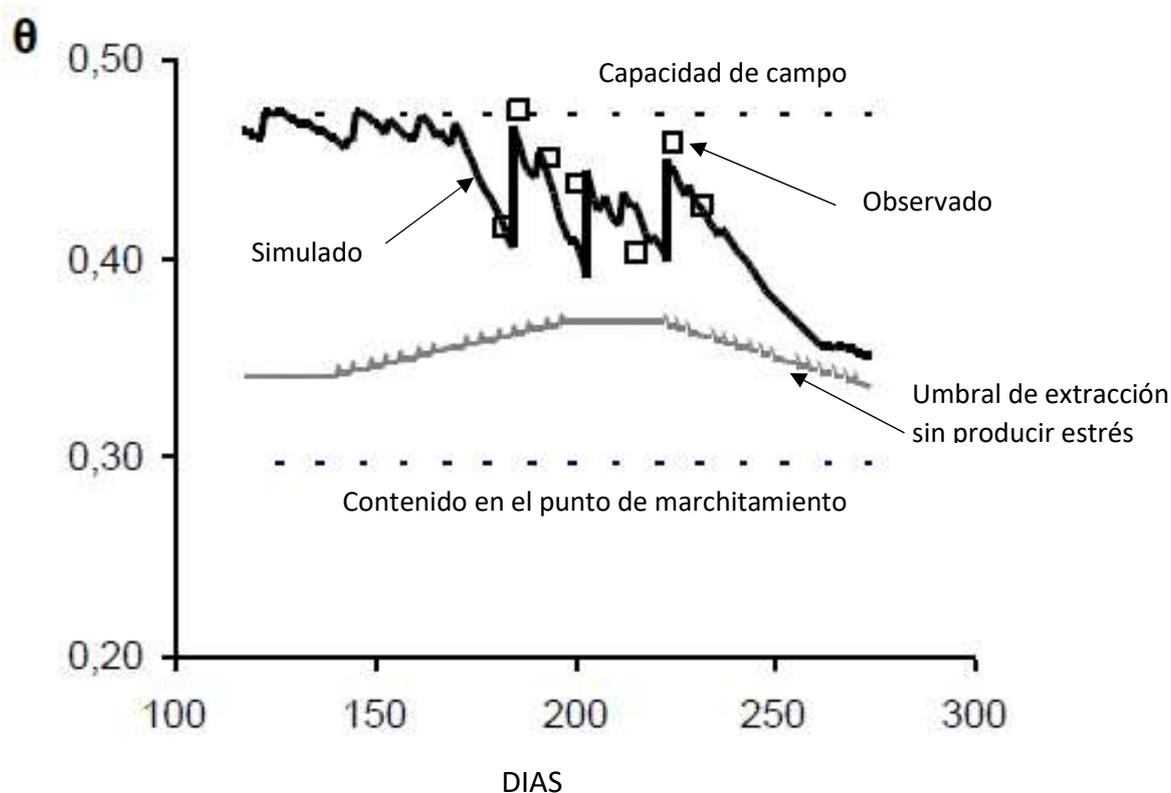


Figura 3: Validación del modelo ISAREG para un cultivo de maíz en suelo de aluvión, limoso, del Valle de Sorraia (Portugal) cultivado con maíz para ensilado
 Fuente: Pereira *et al.* (2010).

Se puede observar que el cultivo fue regado tres veces (líneas verticales en el gráfico de la Figura 3). El modelo considera que la reserva máxima de agua en el suelo (R_{max}) iguala al agua disponible total en la zona radicular (TAW), definida por la Ecuación (2.14), y que la reserva mínima que no supone restricción hídrica corresponde al agua del suelo fácilmente disponible en la zona radicular (RAW); la reserva de agua en el suelo se anula cuando se alcanza el punto de marchitamiento permanente (Pereira *et al.* 2010).

$$TAW = 1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r \quad (2.13)$$

2.3 MODELO ISAREG

2.3.1 Balance de agua en el suelo

Para empezar según Paredes & Pereira (2010), el modelo realiza el balance hídrico para un suelo multicapa Figura 4. Dependiendo de la disponibilidad de datos meteorológicos, se pueden utilizar en los cálculos de diferentes pasos de tiempo (diario, 10 días y mensual). Los datos de entrada incluyen: la precipitación, la evapotranspiración de referencia, el agua total y fácilmente disponible del suelo, el contenido de agua del suelo en la siembra, la contribución potencial de las aguas subterráneas, el coeficiente de cultivo y la fracción de agotamiento del agua del suelo sin estrés, en relación con las etapas de crecimiento del cultivo, profundidades de raíz y el factor de respuesta del rendimiento hídrico.

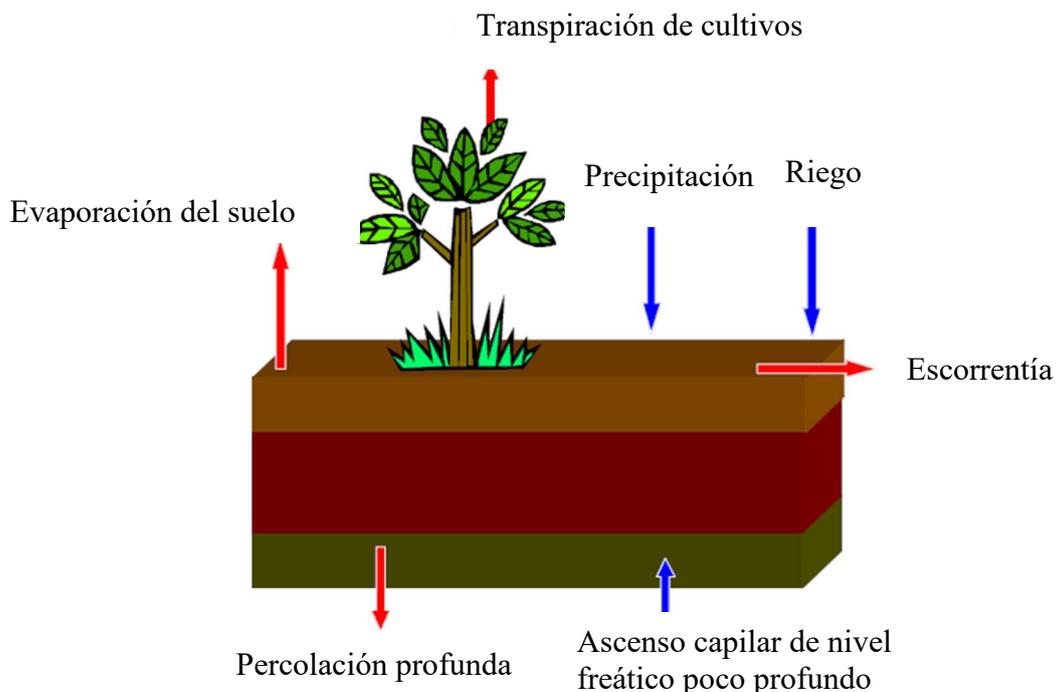


Figura 4: Representación de los principales componentes del balance hídrico para un suelo multicapa

Fuente: Paredes & Pereira (2010).

Para Paredes & Pereira (2010), la evapotranspiración potencial del cultivo se define por:

$$ET_c = K_c ET_o \quad (2.14)$$

Así de la evapotranspiración de referencia (ET_o , mm) y los coeficientes de cultivo (K_c).

La evapotranspiración real (ET_a) se calcula a través del modelo en función del agua disponible del suelo en la zona de la raíz, cuando el agotamiento excede la fracción de agotamiento del agua del suelo sin estrés (p).

Según Paredes & Pereira (2010), el coeficiente de cultivo, K_c, es la relación entre la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y, la evapotranspiración de referencia (ET_o). Representa una integración de los efectos de tres características primarias que distinguen el cultivo real del cultivo de referencia. Estas características son: **a)** *la altura del cultivo* (que afecta a la rugosidad y resistencia aerodinámica); **b)** *la resistencia de la superficie suelo - cultivo* (afectados por el área de la hoja, la fracción de suelo cubierto de vegetación, edad y condición de las hojas, el grado de control estomático, y la humedad de la superficie del suelo); y **c)** *el albedo (reflectancia)* de la superficie del suelo del cultivo, afectado por la fracción de suelo cubierto por vegetación y por la humedad superficial del suelo. La Ecuación (2.16) para calcular la ET_o es FAO-PM.

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (2.15)$$

Dónde, **R_n** es la radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² d⁻¹), **G** es la densidad de flujo de calor del suelo (MJ m⁻² d⁻¹), **T** es la temperatura del aire a 2 m de altura (°C), **u₂** es la velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹), **e_s** es la presión de vapor del aire de saturación (kPa), **e_a** es la presión de vapor real (actual) (kPa), **Δ** es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹), y **γ** es la constante psicométrica (kPa °C⁻¹). **G** puede ignorarse para los cálculos de paso de tiempo diario.

Paredes & Pereira (2010), muestran que el cálculo de los requerimientos de agua de riego durante todo el balance de hídrico del suelo se calcula para la profundidad efectiva de la raíz como:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{(P_i - RO_i) + I_i - ET_{ci} - DP_i + GW_i}{1000 z_{ri}} \quad (2.16)$$

Dónde

θ_i	agua del suelo en la zona de la raíz ($m^3 m^{-3}$), en el día i.
θ_{i-1}	agua del suelo en la zona de la raíz ($m^3 m^{-3}$), en el día i-1.
P_i	precipitación (mm) en el día i.
RO_i	escorrentía (mm) en el día i.
I_i	lámina neta de riego (mm) que se infiltra en el suelo en el día i.
ET_{ci}	(mm) es la evapotranspiración del cultivo (mm) en el día i.
PD_i	representa la percolación profunda (mm) en el día i.
GW_i	contribución ascenso capilar/aguas subterráneas (mm), en el día i y
Z_{ri}	profundidad de las raíces (m) en el día i.

GW y PD se estiman a partir de propiedades hidráulicas del suelo y de la profundidad de la tabla o nivel freático según lo descrito por Paredes & Pereira (2010).

Primero se calcula θ_i y luego se calculan las láminas de riego requeridos I_{ni} , cuando se alcanzan los umbrales apropiados del agua en el suelo como se describe a continuación. Los cálculos de ETA se basan en el producto entre la evapotranspiración de referencia y un coeficiente de cultivo K_c . Se pueden considerar dos alternativas para la estimación de la contribución de las aguas subterráneas GW_i : un procedimiento simplificado o un algoritmo citado por Paredes & Pereira (2010). La percolación profunda se estima ya sea empíricamente o utilizando un algoritmo que describe el agotamiento del agua del suelo desde la saturación hasta la capacidad de campo. La profundidad (lámina) de la escorrentía RO_i puede predecirse utilizando el método de número de curva CN (Portuguez-Maurtua & Verano 2016), pero, para la mayoría de las aplicaciones, la escorrentía puede ser omitido.

El umbral de riego para evitar el estrés hídrico es cuando el contenido real de agua del suelo θ_i es igual al umbral relativo a la fracción de agotamiento sin estrés p , $\theta_i = \theta_p$ dado por:

$$\theta_p = (1 - p)(\theta_{FC} - \theta_{WP}) + \theta_{WP} \quad (2.17)$$

y la lámina neta de riego correspondiente es entonces

$$I_{ni} = 1000 z_{ri} (\theta_{FC} - \theta_p) \quad (2.18)$$

Según Paredes & Pereira (2010), el riego se programa cuando se alcanza el agotamiento permitido por la administración, Management Allowed Depletion (**MAD**). Cuando no se admite el estrés hídrico, $MAD = p$; se adopta un $MAD < p$ cuando existe prevención al riesgo o incertidumbre, y $MAD > p$ cuando se permite el estrés de hídrico del cultivo, es decir, cuando se aplica riego deficitario, lo que significa adoptar un riego que sólo satisface parcialmente los requisitos de riego del cultivo, pero puede prestar una reducción del rendimiento, que podría permitir el retorno económico del riego. Por lo tanto, los riegos están programados por (Ecuación 2.17).

$$\theta_i = \theta_{MAD} = (1 - MAD)(\theta_{FC} - \theta_{WP}) + \theta_{WP} \quad (2.19)$$

y la profundidad aplicada (norma) es o bien una cantidad fija seleccionada por el usuario D (mm), o una variable $D = \theta_{FC} - \theta_i$

La lámina neta máxima de riego entonces es:

$$I_{ni} = 1000 z_{ri} (\theta_{FC} - \theta_{MAD}) \quad (2.20)$$

En la práctica, se adopta una profundidad fija $D \leq I_{ni}$ (mm) seleccionada por el usuario.

Las necesidades netas de riego de cultivos de la temporada están dadas por

$$IWR = \frac{ET_c - P_e - GW - \Delta S}{1 - LR} \quad (2.21)$$

dónde P_e es la precipitación efectiva (mm), GW es el flujo ascenso capilar acumulado durante el período vegetativo del cultivo (mm), ΔS es la variación acumulada del almacenamiento de agua del suelo en la zona de la raíz durante el período vegetativo del cultivo, y LR es la fracción de lixiviación. El requerimiento bruto de agua de riego se calcula como:

$$GIWR = \frac{IWR}{Eff} \quad (2.22)$$

dónde Eff es la eficiencia estacional del sistema de riego.

En otro orden de ideas Steduto *et al.* (2012), indican que, a finales de los setenta, la FAO abordó la relación entre el rendimiento del cultivo y el uso del agua y propuso una

ecuación sencilla que relacionaba la disminución relativa del rendimiento con la disminución relativa correspondiente en la evapotranspiración (ET). Concretamente, la respuesta del rendimiento a la ET se expresa como:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_x}\right) \quad (2.23a)$$

donde Y_x y Y_a son los rendimientos máximo y real, ET_x y ET_a son la evapotranspiración máxima y real, y K_y es el factor de respuesta del rendimiento que representa el efecto de una disminución de la evapotranspiración sobre las pérdidas de rendimiento. La ecuación 2.23a es una función de productividad del agua y puede ser aplicada a todos los cultivos agrícolas; es decir, herbáceos, arbóreos y vides. El factor de respuesta del rendimiento (K_y) capta la esencia de las complejas relaciones que existen entre la producción y el uso del agua en un cultivo, donde ocurren procesos biológicos, físicos y químicos. La relación ha demostrado una notable validez y ha brindado un procedimiento utilizable para cuantificar los efectos de los déficits de agua sobre el rendimiento.

Así mismo Paredes & Pereira (2010), sostienen que el impacto del estrés hídrico en el rendimiento del cultivo se evalúa mediante las pérdidas de rendimiento relativo del cultivo ($RYL=1-Y_a/Y_m$), que depende del déficit de evapotranspiración relativa ($RED=1-ET_a/ET_c$) a través del factor de respuesta de rendimiento de agua K_y (sin dimensiones), estableciéndose la siguiente relación:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_c}\right) \quad (2.23b)$$

Dónde ET_a y ET_c son, respectivamente, la evapotranspiración de temporada del cultivo real y la evapotranspiración potencial (mm) e Y_a e Y_m son los rendimientos correspondientes alcanzados.

2.3.2 Caracterización del cultivo

- **K_c para distintas etapas de desarrollo**

Según Paredes & Pereira (2010), el coeficiente de cultivo puede ser representado por:

$$K_c = K_s K_{cb} + K_e \quad (2.24)$$

dónde K_{cb} es el coeficiente basal de cultivo, K_e es el coeficiente que representa la evaporación del agua del suelo, y K_s es el coeficiente de estrés hídrico. Esta doble forma del coeficiente de cultivo requiere un equilibrio diario de agua de la capa superficial del suelo de evaporación. Un enfoque más común, que incluye los efectos de varios días de evaporación de la superficie del suelo es el enfoque de coeficientes de cultivo promediados en el tiempo:

$$K_c = \overline{K_{cb} + K_e} \quad (2.25)$$

Este enfoque se utiliza con precisión para estudios de planificación, diseño de sistemas de riego y para la gestión típica de riego, y actualmente se utiliza en muchos modelos de simulación de programación del riego, incluyendo el modelo WinISAREG.

Así mismo Paredes & Pereira (2010), indican que en el modelo ISAREG el enfoque de coeficientes de cultivo promedio en el tiempo se representa a través de la curva de coeficiente de cultivo, que describe los cambios en K_c a lo largo de la temporada de crecimiento. Como se muestra en la Figura 2.5, poco después de la siembra de cultivos anuales o poco después del inicio de nuevas hojas para cultivos perennes, el valor de K_c es pequeño. El K_c comienza a aumentar desde un valor inicial de K_c , $K_c \text{ ini}$, al comienzo del cultivo tiene un rápido desarrollo y alcanza un valor máximo, $K_c \text{ mid}$, en el momento de máximo o cercano al máximo desarrollo de los cultivos. El período durante el cual $K_c = K_c \text{ mid}$ se conoce como período de temporada media.

Durante el período de fines de temporada, como las hojas comienzan a envejecer y senescencia debido a prácticas culturales o naturales, el K_c comienza a disminuir hasta alcanzar un valor más bajo al final del período de crecimiento igual a $K_c \text{ end}$.

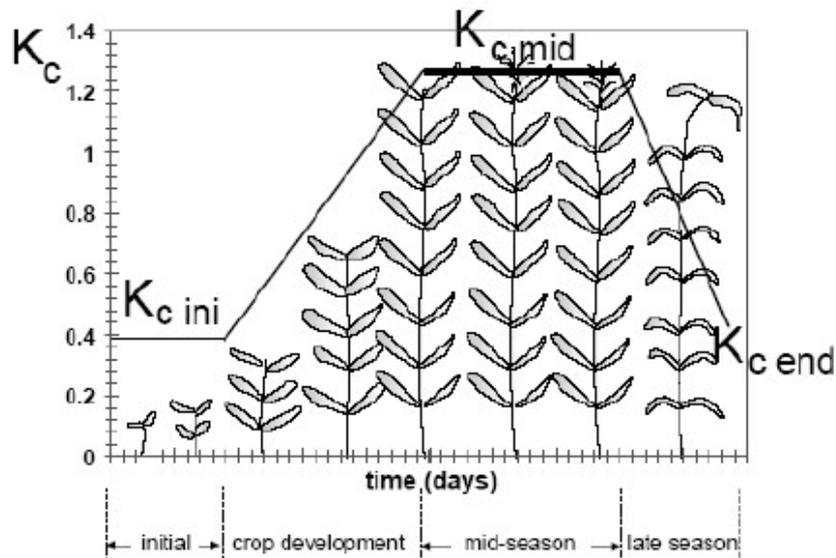


Figura 5: Curva de coeficiente cultivo y definiciones de etapas

Fuente: Paredes & Pereira (2010).

- **Fracción de agotamiento del agua del suelo sin estrés (p)**

Para Paredes & Pereira (2010), el agotamiento del agua en el suelo sin estrés, p , es la fracción promedio del agua del suelo disponible en la zona de la raíz que puede ser extraída antes de que el cultivo sufra estrés hídrico. El contenido de agua en el suelo θ_p es, por lo tanto, un valor umbral para calcular las necesidades de riego para ser utilizadas en la programación de riego, y para definir los coeficientes de estrés hídrico. La fracción p es, por lo tanto, un insumo principal en los modelos de programación de riego, así como en el WinISAREG.

En su publicación Paredes & Pereira (2010), presentan valores de p para la mayoría de los cultivos. Estos valores corresponden a un promedio de $ET_c = 5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ y se corregirá para el actual (real) ET_c , promediado para cada período de cultivo, a través de la siguiente ecuación:

$$p = p_{\text{tab}} + 0.04 (5 - ET_c) \quad (2.26)$$

pero limitado a $0.1 \leq p \leq 0.8$. Sin embargo, durante la etapa inicial del cultivo, $p \leq 0.6$ para garantizar un buen establecimiento de cultivo.

- **Profundidad de enraizamiento**

Así mismo, Paredes & Pereira (2010), dan a conocer que el modelo ISAREG calcula para los cultivos anuales la curva de profundidad de la raíz, como se da en la Figura 6. El

modelo asume un mínimo ($Z_r \text{ min}$) en el período inicial y que el máximo desarrollo de la raíz ($Z_r \text{ max}$) se alcanza cuando el cultivo alcanza su pleno desarrollo, en el período de temporada media. Una variación lineal es adoptada, para predecir la profundidad de la raíz del cultivo.

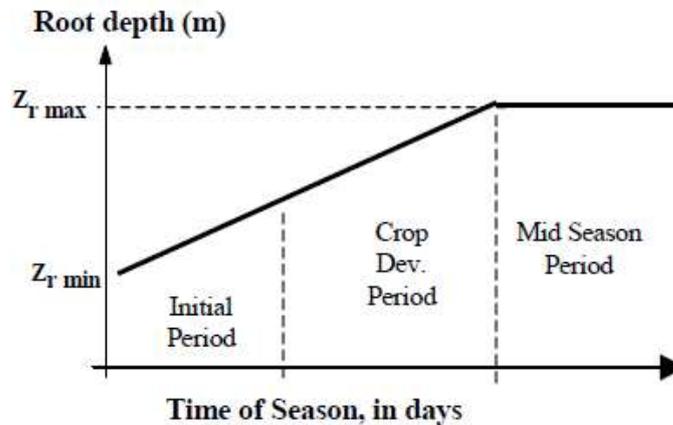


Figura 6: Modelo lineal para predecir la profundidad de raíz

Fuente: Paredes & Pereira (2010).

2.3.3 Características del software WinISAREG

Para Paredes & Pereira (2010), los modelos de simulación de programación de riego son esencialmente de dos tipos: *modelos de simulación de flujos de agua*, cuando el balance de agua se calcula a partir de los flujos de agua que entran y salen de la zona de la raíz, y los *modelos de simulación de balance de agua en el suelo*, cuando los cálculos de balance de agua se realizan mediante la estimación de la cantidad de entrada y salida de agua para el depósito de suelo con un paso de tiempo predeterminado.

El uso de modelos de simulación de balance de agua en el suelo para la programación del riego es sin duda recomendable cuando se emplea en la práctica de riego por los planificadores, los agricultores, los gerentes o los agentes de extensión. Este es el caso del modelo WinISAREG.

Sobre el software WinISAREG Paredes & Pereira (2010), refieren que es la integración de dos modelos diferentes, la EVAP56 (para calcular la evapotranspiración de referencia) y el ISAREG. También incluye un algoritmo que toma en consideración los efectos de la salinidad del suelo en la *Etc* y en los rendimientos, y un algoritmo para el cálculo de la contribución de las aguas subterráneas (*GW*) y la percolación. La percolación resultante

del exceso de agua en la zona de la raíz se estima mediante una ecuación paramétrica como una función de las características del suelo y la cantidad de agua en exceso a la capacidad de campo.

Las láminas y las fechas de riego pueden ser seleccionados de acuerdo con diferentes objetivos y, se calculan de acuerdo con profundidades límites de agua y los umbrales de agua del suelo definidos por el usuario. El impacto del estrés hídrico en el rendimiento del cultivo se evalúa mediante el modelo referido en Paredes & Pereira (2010), donde las pérdidas de rendimientos relativos dependen del déficit de evapotranspiración relativa a través del factor de respuesta de rendimiento de agua K_y .

El modelo ISAREG realiza el cálculo del balance de agua en el suelo de acuerdo con la metodología propuesta en Paredes & Pereira (2010). utilizando diferentes opciones para definir y evaluar los programas de riego. En la Figura 7 se presenta el esquema general de la estructura del WinISAREG. El modelo está disponible para su descarga en <https://www.isa.ulisboa.pt/en/leaf/downloads>.

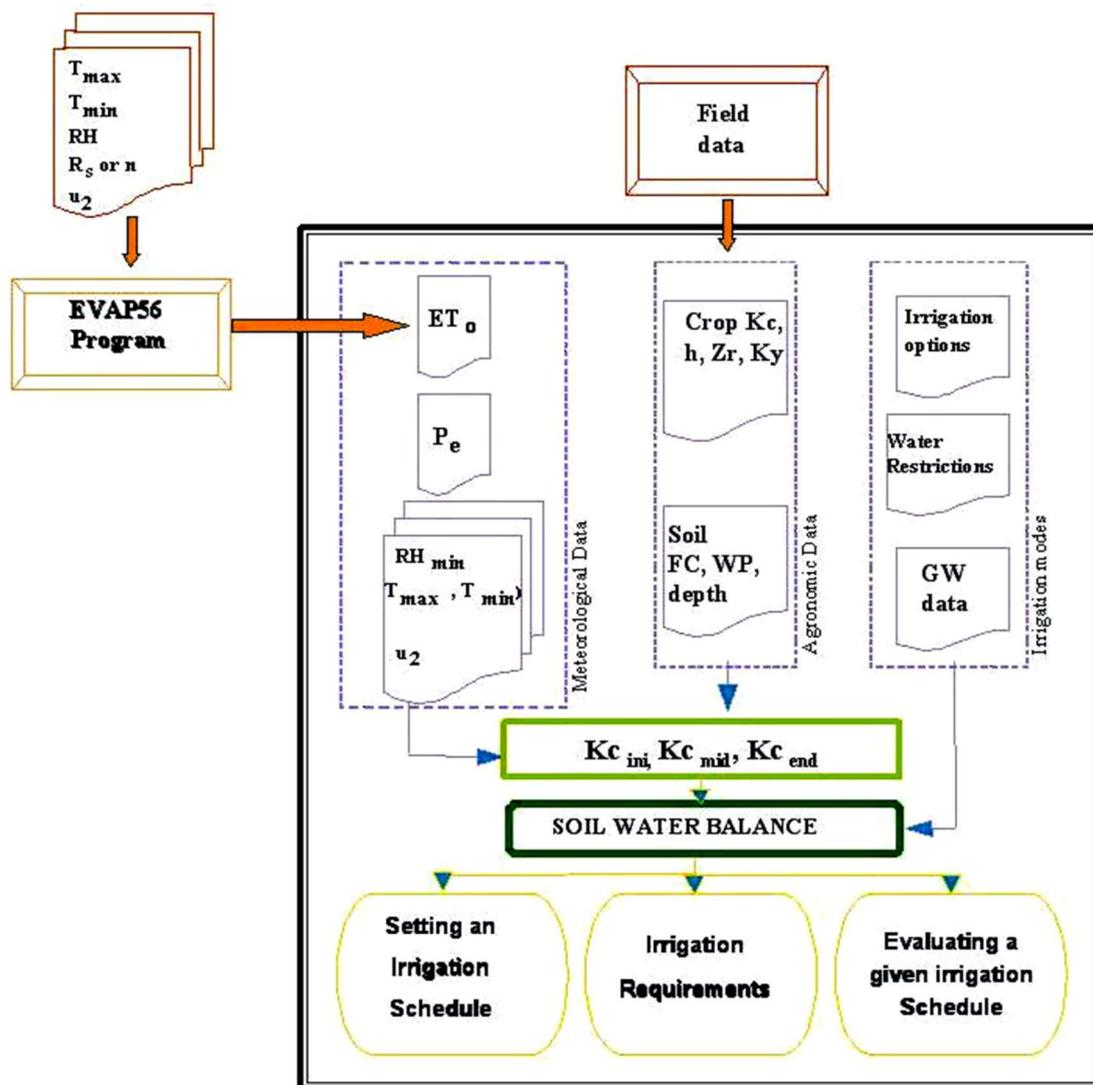


Figura 7: Diagramas de flujo simplificado de modelo WinISAREG

Fuente: Paredes & Pereira (2010).

Según Paredes & Pereira (2010), el modelo lleva a cabo las simulaciones de programación del riego de acuerdo con las siguientes opciones de usuario:

- Para definir una programación de riego para maximizar el rendimiento de los cultivos, es decir, sin el estrés de agua en el cultivo;
- Para generar una programación de riego utilizando umbrales de riego seleccionados, incluidos para el estrés de agua permitido y para responder a las restricciones de agua impuestas en momentos o períodos de tiempo dado;
- Para evaluar el rendimiento y el impacto del uso del agua de un programa de riego dado;

- Para probar el rendimiento del modelo con los datos observados de agua en el suelo y el uso de las fechas de riego y profundidades reales, que es la opción utilizada para la calibración del modelo y la validación;
- Para ejecutar el balance de agua sin riego; y
- Para calcular las necesidades netas de riego de cultivos y realizar las frecuencias, análisis de los requerimientos de riego cuando se considera una serie de datos meteorológicos.

El WinISAREG se desarrolla a través de la presentación de una secuencia de decisiones que definen las diferentes opciones que han de tomarse por parte del usuario. El *menú* principal se presenta en la Figura 8, este contiene la mayor información y cálculos a realizar por el programa.

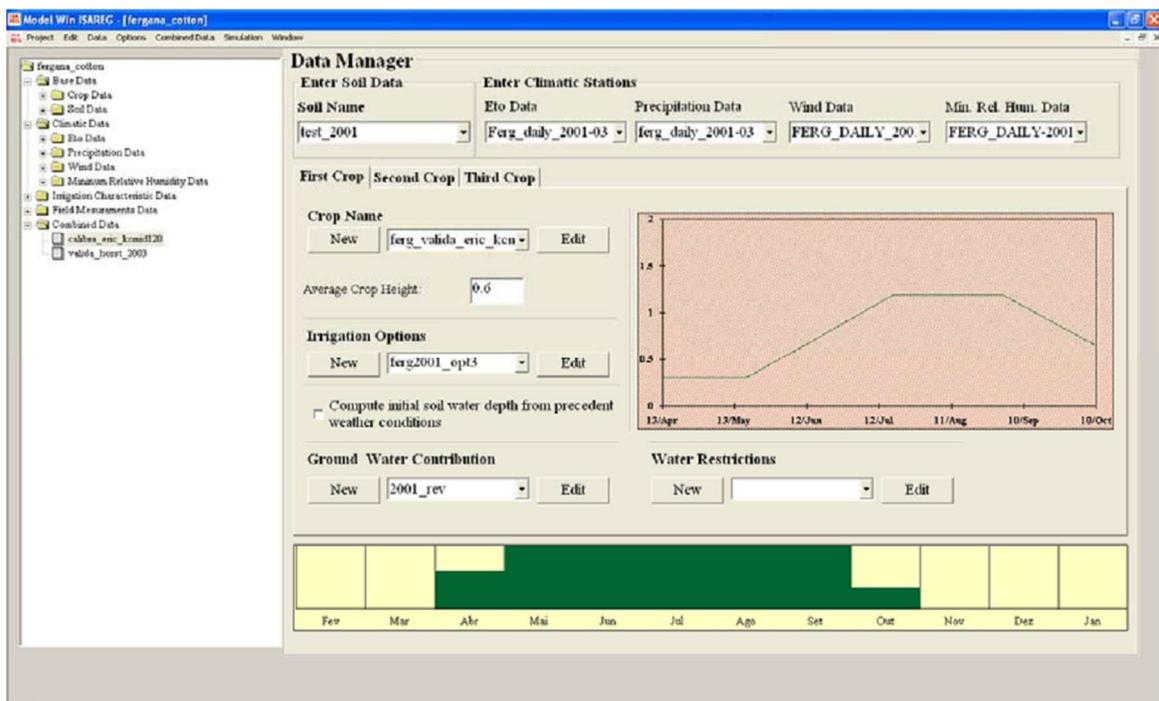


Figura 8: Menú principal software WinISAREG

Fuente: Paredes & Pereira (2010).

Los archivos de base de datos se organizan de la siguiente manera:

- **Datos de suelo para un suelo de capas múltiples-** con respecto a cada capa, la profundidad respectiva d (m); el contenido de agua del suelo a capacidad de campo θ_{FC} ($\text{metro}^3 \text{ metro}^{-3}$) y el punto de marchitez θ_{WP} ($\text{metro}^3 \text{ metro}^{-3}$), o el *agua total disponible* (TAW , mm); un archivo adicional se utiliza para caracterizar la capa

evaporable también llamado capa superficial que usa *agua total evaporable* de (*TEW*, mm) y el *agua fácilmente evaporable* (*REW*, mm). Cuando no se conoce, *TEW* se estima a partir de las características de retención de agua del suelo de la capa superior del suelo, con una profundidad $Z_e = 0.10$ a 0.15 m, y *REW* se estima a partir de las características de la textura del suelo. Las estimaciones para *TEW* y *REW* son proporcionados por Paredes & Pereira (2010). para las principales clases texturales del suelo; el contenido inicial de agua del suelo es proporcionada por el usuario.

- **Datos meteorológicos**- relativa a la precipitación efectiva, P_e (mm) y evapotranspiración de referencia, ET_o (mm), o datos meteorológicos para calcular ET_o utilizando la metodología de la FAO-PM, incluyendo métodos de cálculo alternativos para la falta de datos climáticos. Archivos adicionales se pueden utilizar para ajustar coeficientes de cultivo a las condiciones climáticas, velocidad del viento y la humedad relativa mínima.
- **Datos sobre cultivos**- en referencia a las fechas de las etapas de desarrollo del cultivo, los coeficientes de cultivo (K_c); profundidades de la zona raíz Z_r (m); fracciones agotamiento del agua del suelo para sin estrés (p); y el factor estacional de respuesta de agua al rendimiento (K_y).
- **Opciones de riego**- las simulaciones de programación de riego de acuerdo con las opciones definidas por el usuario.
- **Contribución del agua subterránea**- un archivo adicional se utiliza para parametrizar las ecuaciones relativas a la contribución de las aguas subterráneas y la percolación.
- **Las restricciones de agua**- por ejemplo, la definición de un intervalo mínimo entre irrigaciones, o restricciones de suministro de agua.

2.4 MÉTODOS Y SISTEMAS DE RIEGO

Según Paredes & Pereira (2010), mencionan que es común referirse al riego en la parcela utilizando dos términos, métodos de riego y sistemas de riego; a veces, como sinónimos. Se hace aquí una distinción; se entiende por método de riego al conjunto de aspectos que caracterizan el modo de aplicar el agua a las parcelas regadas, y se entiende por sistema de riego al conjunto de equipamientos y técnicas que proporcionan esa aplicación siguiendo un método dado. En estas condiciones, los sistemas de riego tienen obligatoriamente que ser tratados cuando se habla de los métodos. De forma diferente,

cuando se abordan los sistemas no es necesario detallar los métodos, pero es importante incluir aspectos de dimensionamiento hidráulico. El término sistemas de riego es también utilizado para referir el conjunto de equipamientos y técnicas de gestión que aseguran la captación del agua, su almacenamiento, transporte y distribución a los regantes.

Según Paredes & Pereira (2010), los métodos de riego pueden clasificarse del siguiente modo:

- **Riego de superficie**, o por gravedad, comprendiendo el riego por inundación, en canteros tradicionales y surcos cortos o en canteros con nivelado de precisión, el riego por sumersión en canteros para arroz, el riego por infiltración en surcos o en fajas y el riego por escorrentía libre.
- **Riego por aspersión**, con sistemas estáticos y disposición en cuadrícula, fijos o móviles, con sistemas móviles de cañón o ala sobre carro tirada por enrollador o por cable, y sistemas de lateral móvil, pivotante o de desplazamiento lineal.
- **Riego localizado**, o microrriego, comprendiendo el riego por goteo, por difusores o burbujeadores (“bubblers”), por tubos perforados o porosos, por la micro-aspersión y el riego sub-superficial por tubos perforados y tubos porosos.
- **Riego subterráneo**, realizado por control de la profundidad de la capa freática.

En el riego por gravedad, la tendencia es al abandono de los métodos tradicionales, en los que el agua es conducida “a punta de azada” por el regante. Merecen ser destacados los desarrollos conseguidos a través de la nivelación de precisión con control por láser, en particular el riego por canteros con nivelado de precisión y alimentación semi-automática, así como las innovaciones debidas a la adopción de diversos equipamientos para el suministro de agua a surcos y canteros, principalmente, con automatización.

Los avances en términos de equipamiento son principalmente importantes en los sistemas a presión, aspersión, y riego localizado, y se concretan tanto en aspersores y emisores, como en sistemas de tuberías y rampas, equipamientos para aplicación de fertilizantes y otros agroquímicos (fertirriego y quimirriego), o a equipamientos de control y automatización. Son tantas las innovaciones que la industria afirma, tanto en riego por aspersión como en riego localizado, que es difícil que alguien se mantenga actualizado.

2.4.1 Elección de los métodos de riego

Según Paredes & Pereira (2010). la elección de los métodos de riego está impuesta por un gran número de factores, para una visión en conjunto, se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2: Factores que favorecen la elección del método de riego

Factores	Riego de superficies	Aspersión	Riego localizado
Precio del agua	Bajo	Medio	Alto
Suministro del agua	Irregular	Regular	Continuo
Disponibilidad del agua	Abundante	Media	Limitada
Pureza del agua	No limitante	Sin sólidos	Elevada
Capacidad de infiltración del suelo	Baja a media	Media a alta	Cualquiera
Capacidad de almacenamiento del suelo	Alta	Media a baja	No limitante
Topografía	Plana y uniforme	Relieve suave	Irregular
Sensibilidad al déficit hídrico	Baja	Moderada	Alta
Valor de la producción	Bajo	Medio	Alto
Coste de la mano de obra	Bajo	Medio	Alto
Coste de la energía	Alto	Bajo	Moderado
Disponibilidad de capital	Baja	Media a alta	Alta
Exigencia en tecnología	Limitada	Media a alta	Elevada

Fuente: Paredes & Pereira (2010).

La adopción de sistemas de apoyo para la toma de decisión, de sistemas expertos y de otros sistemas inteligentes constituye una herramienta útil para la elección de los métodos y sistemas de riego, así como para el proyecto. Los modelos de simulación, sin embargo, están todavía insuficientemente divulgados y, sobre todo, no evitan la evaluación del riego en el campo, la cual constituye una Fuente esencial de la información a ser introducida en los modelos, modo privilegiado de aprendizaje de los usuarios de sistemas de información y, sobre todo, medio esencial para apoyar a los agricultores en la búsqueda de mejorar el funcionamiento y los resultados económicos del riego.

2.4.2 Indicadores de funcionamiento del riego en parcela

- **Importancia del análisis del funcionamiento de los sistemas de riego**

Para Paredes & Pereira (2010), el análisis del funcionamiento de los sistemas de riego, relativos ya sea a la parcela, ya sea a las redes de conducción y distribución de agua, han estado recibiendo atención continua.

Los indicadores de funcionamiento se usaron inicialmente como indicadores de calidad de un proyecto o de la gestión de un sistema. Posteriormente, en el caso de sistemas colectivos de riego, fueron considerados también como indicadores de la calidad de servicio o de funcionamiento. Más tarde, fueron tomados, además, como indicadores ambientales, aunque de forma poco precisa. Actualmente, dada la capacidad ofrecida por los modelos computarizados para simular el funcionamiento de los sistemas de riego, los indicadores pueden ser utilizados en los proyectos, para establecer criterios a los que los sistemas deben ser capaces de responder.

Hoy en día, se busca un equilibrio entre el funcionamiento técnico de los sistemas de riego y los resultados económicos que estos producen; es decir, se busca encontrar medios activos para dar un significado económico suficientemente preciso a tales indicadores.

Considerando las limitaciones todavía existentes, se presentan sólo algunos indicadores de funcionamiento bien probados en la práctica, los cuales son útiles para la definición y comparación de los sistemas de riego y, para los cuales, se conocen interpretaciones mínimamente válidas en términos de impactos sobre el uso del agua, el rendimiento, la economía de la producción y la minimización de los impactos ambientales.

El funcionamiento del riego en la parcela puede ser evaluado a través de varios indicadores: la uniformidad de distribución y la eficiencia de aplicación.

- **Uniformidad**

Para Pereira *et al.* (2010), la uniformidad tiene como indicadores la uniformidad de distribución (DU), el coeficiente de uniformidad (CU) y la uniformidad estadística (U_s). La uniformidad de distribución se define como:

$$DU = 100 (Z_{1q}/Z_{avg}) \quad (2.27)$$

donde: DU, es la uniformidad de distribución (por ciento); Z_{1q} , es la cantidad media (mm) infiltrada en el cuarto menor del área regada, correspondiendo a la cuarta parte del área regada que recibe menos agua; y Z_{avg} es la cantidad media (mm) infiltrada en la parcela.

En riego por aspersión, las alturas infiltradas son sustituidas por las pluviometrías medidas, mientras que, en riego localizado, se utilizan los caudales descargados por los emisores. El coeficiente de uniformidad se define como:

$$CU = 100 (1 - \sum X_i / n m) \quad \text{como } X_i = |Z_i - m| \quad (2.28)$$

donde: CU, es el coeficiente de uniformidad (por ciento); Z_i , son las alturas de agua o caudales medidos (mm); n, es el número de puntos de medida; y m, es la media de las mediciones Z_i (mm).

- **Eficiencia**

Para Pereira *et al.* (2010), la eficiencia de aplicación se define frecuentemente por la eficiencia del cuarto menor dada por la relación:

$$e_a = 100 (Z_{r,lq}/D) \quad (2.29)$$

Dónde: $Z_{r,lq}$, es la cantidad media añadida a la reserva de agua del suelo en la zona radicular (mm) en el cuarto menor de la parcela; y D, es la dosis bruta aplicada (mm).

Dada la dependencia entre eficiencia y manejo del riego, puede ser ventajoso determinar no la eficiencia de aplicación real si no su valor potencial en el supuesto de que el sistema pudiera ser mejor manejado. La eficiencia potencial del cuarto menor (PELQ, por ciento), que puede ser usada para proyecto, corresponde al funcionamiento que el sistema puede alcanzar cuando la dosis requerida es aplicada en el momento adecuado está definida como:

$$PELQ = 100 \frac{Z_{lq, MAD}}{D_{MAD}} \quad (2.30)$$

Donde: $Z_{lq, MAD}$, es la cantidad media de agua infiltrada en el cuarto menor de la parcela (mm) cuando es igual a MAD; D_{MAD} , es la dosis bruta aplicada (mm) cuando el déficit de agua en el suelo es igual a MAD; y MAD, es el *déficit permisible de manejo* de agua en el suelo (“Management Allowed Deficit”; mm).

Las bajas eficiencias ponen de manifiesto que parte del agua aplicada no es utilizada para la producción, y se pierde, adicionándose a las capas freáticas o a las aguas superficiales degradadas.

- **Relación entre uniformidad y eficiencia**

Según Pereira *et al.* (2010), comparando las ecuaciones que definen DU (Ec. 2.28) y e_a (Ec. 2.30), se comprueba que los numeradores de ambas se refieren a alturas medias de agua infiltradas en la cuarta parte de la parcela que recibe menos agua: Z_{lq} , en el caso de DU, y $Z_{r,lq}$, en el caso de la eficiencia e_a . En cuanto a los denominadores, se tiene, respectivamente, Z_{avg} y D. Como $Z_{r,lq}$ es la parte de Z_{lq} que permanece en la zona radicular, mientras que Z_{lq} incluye la porción de agua que percola hacia capas más profundas de suelo, se tiene:

$$Z_{r,lq} \leq Z_{lq} \quad (2.31)$$

Por su parte, D es la dosis bruta aplicada a toda la parcela; por tanto, incluye no sólo la parte que se infiltra (Z_{avg}) sino, también, las fracciones de agua evaporada y de escorrentía superficial, resultando entonces:

$$Z_{avg} \leq D \quad (2.32)$$

Consecuentemente, si el numerador de e_a no puede exceder el de DU, y si su denominador no puede ser menor que el de DU, se tendrá:

$$e_a \leq DU \quad (2.33)$$

lo que indica que, DU es el valor límite que puede ser alcanzado por la eficiencia de aplicación. Este hecho es completamente lógico, e_a depende del manejo del riego, es decir, de las cantidades y momentos de las aplicaciones. De este modo, la uniformidad de distribución funciona como el indicador que caracteriza el sistema, mientras la eficiencia de aplicación caracteriza la gestión en la dependencia de las limitaciones impuestas por el sistema

Para Pereira *et al.* (2010), la idea de mejorar los regadíos, o su funcionamiento, se reduce frecuentemente a mejorar la eficiencia, considerándose que bajas eficiencias significaban

grandes cantidades de agua perdida, sin embargo, constatando que esto no era así, y que lo que caracterizaba un sistema y, por eso condicionaba la eficiencia, era su uniformidad. De aquí, resulta que la mejora de los regadíos pasa necesariamente por mejorar el sistema junto con su gestión o, con otras palabras, que es inconsistente buscar mejorar la gestión y la eficiencia sin identificar las características limitantes del sistema y sin encontrar sus respectivas soluciones.

En la Tabla 3, se proporcionan valores de eficiencia de aplicación para los sistemas de riego. Se trata de valores que presuponen sistemas bien proyectados y mantenidos, por tanto, no imponen límites a la buena gestión y funcionamiento del riego.

Tabla 3: Valores indicativos de las eficiencias de aplicación para sistemas de riego bien proyectados y mantenidos

Sistema de riego	Eficiencias (porcentaje)
• Riego por gravedad con nivelado de precisión:	
- Surcos	65-85
- Fajas	70-85
- Canteros	70-90
• Riego por gravedad tradicional:	
- Surcos	40-70
- Fajas	45-70
- Canteros	45-70
• Riego de arroz, canteros en inundación permanente	25-70*
• Riego por aspersión:	
- Sistemas estacionarios de cobertura total	65-85
- Sistema estacionario de desplazable manualmente.	65-80
- Laterales con ruedas.	65-80
- Cañón con enrollador o con cable.	55-70
- Laterales móviles, con pivote central.	65-85
• Micro riego (riego localizado):	
- Goteros, □ 3 emisores por planta (frutales)	85-95
- Goteros, < 3 emisores por planta	80-90
- Micro aspersores y "difusores"(frutales).	85-95
- Línea continua de emisores gota- a- gota.	70-90

* Los valores más bajos se refieren a canteros tradicionales, mal nivelados y sin un adecuado control de la lámina de agua del cantero, mientras que los más altos se refieren a canteros de grandes dimensiones, bien nivelados y con buen control de la lámina de agua.

Fuente: Pereira *et al.* (2010).

2.4.3 Funcionamiento de sistemas hídricos, usos y consumos de agua

Según Pereira *et al.* (2010), el concepto de eficiencia se refiere a relacionar la cantidad de agua consumida en la producción de un cultivo dado con la cantidad de agua movilizada para el riego. La idea de mejorar el riego se quedaba, así, reducida a mejorar la eficiencia por considerarse que bajas eficiencias significaban bastante cantidad de agua perdida. Sin embargo, poco a poco, se fue constatando que no era así. Finalmente, lo que caracteriza un sistema y, por eso, condiciona la eficiencia, es la uniformidad. Al constatarse que los indicadores de uniformidad tienen un significado estadístico, se hizo posible su uso en proyecto, principalmente relacionando dotaciones de riego y niveles de producción con objetivos de uniformidad. Por su parte, la eficiencia se volvió esencialmente un indicador de gestión y del potencial de ahorro de agua.

Durante mucho tiempo, se utilizó el concepto de eficiencia como el principal indicador del uso del agua en sistemas de *transporte y distribución*. Se definieron así las eficiencias de transporte, de distribución y del proyecto, o del sistema, por la relación entre las cantidades de agua suministradas por las redes, en las salidas, y las cantidades suministradas a las redes, en la entrada (Pereira *et al.* 2010).

Sin embargo, este concepto de eficiencia fue utilizado de forma poco apropiada, al considerarse como pérdidas las cantidades representadas por las fracciones no utilizadas. De hecho, en muchos casos, tales fracciones son utilizadas o utilizables aguas abajo de los sistemas considerados, por tanto, no son pérdidas. Este hecho llevó a proponer la adopción del término *fracción de uso consuntivo* para designar la relación entre la cantidad de agua consumida por los cultivos y la cantidad movilizada por un sistema de riego. Más adelante se propuso una nueva terminología, que se basa en la distinción clara entre “uso” y “consumo” (Pereira *et al.* 2010).

Según Pereira *et al.* (2010), para muchos, los términos “*uso del agua*” y “*consumo del agua*” son sinónimos. Sin embargo, de hecho, no es así. Uso del agua corresponde a la movilización de una determinada cantidad de agua con un cierto fin, según Figura 9. Aun así, una parte de esa agua es devuelta al ambiente, en el mismo o, generalmente, en otro

lugar, inmediatamente o pasado algún tiempo, pero, raramente, con la misma calidad, eventualmente degradada tras haber sido usada. La parte no devuelta corresponde al consumo. Del agua de buena calidad que recibimos en nuestras casas a partir de un sistema de abastecimiento (uso doméstico), la mayor parte es devuelta a la red de alcantarillado con calidad degradada tras haber sido usada en lavados, baños, retretes, y solo una pequeña parte es consumida en los alimentos o por evaporación. Si esa agua residual fuese recogida y tratada, podría ser usada otra vez, pero en condiciones menos exigentes en términos cualitativos que en el primer uso. Si no fuese recogida y tratada para otros usos, es desperdiciada y, eventualmente, irá a degradar otras masas de agua, ríos o acuíferos situados aguas abajo. Será una pérdida si es añadida a la masa de agua cuya calidad es tal que no permita su reutilización, incluso cuando fluya a los océanos (Figura 9).



Figura 9: Uso y consumo de agua, usos benéficos, desperdicios y pérdidas

Fuente: Pereira *et al.* (2010).

Refieren Pereira *et al.* (2010) que, de la misma forma en la agricultura, el agua usada es la que es movilizada desde un río, de un depósito creado por una presa, o en un acuífero,

mientras que el agua consumida es la que se evapora a partir del depósito, de los canales, y del suelo, y la que es transpirada por las plantas cultivadas y por otras plantas no útiles, así como la que se incorpora en el producto final como agua de constitución. Otras varias fracciones del agua usada no son consumidas, principalmente las que se infiltran y percolan hasta acuíferos subyacentes a partir de los depósitos, de canales y del propio campo cultivado, o fluyen hacia cursos de agua superficial por descargas de los canales o a partir de los campos regados. Estas aguas podrán ser usadas otra vez o ser añadidas a masas de agua cuya calidad no permita la reutilización.

Se puede, igualmente, distinguir *pérdidas de agua* de *desperdicios de agua* Figura 9. En el caso de la agricultura de regadío, pérdidas serán las aguas evaporadas que no corresponden a la evapotranspiración del cultivo regado y las aguas añadidas a masas de agua que no permiten su reutilización. Las restantes fracciones, o fueron consumidas para el objetivo escogido, o regresaron a la naturaleza de manera que pueden ser usadas otra vez, más tarde y por otros usuarios. Serán desperdicios las cantidades de agua que fueron usadas en exceso, como es el caso de descargas a partir de los canales o de exceso de agua aplicada en el riego. Los desperdicios conducen a pérdidas, o a fracciones reutilizables posteriormente, pero sin que se obtenga beneficio de su utilización (Pereira *et al.* 2010).

Finalmente, Pereira *et al.* (2010), se debe distinguir entre usos benéficos y usos no benéficos. Serán benéficos aquellos que llevan a la obtención del producto deseado (principalmente, la evapotranspiración del cultivo) y, en el caso del riego, al control de la salinidad del suelo, que exige la aplicación de una fracción de agua en exceso (la fracción de lavado) que percole a través de la zona radicular y arrastre las sales a profundidades que no afecten al cultivo. Adoptando estos conceptos podemos decir que los funcionamientos de los sistemas hídricos, agrícolas y no agrícolas, grandes o pequeños, deben ser tales que favorezcan los usos benéficos y limiten al máximo las pérdidas y los desperdicios. Igualmente, serán buenos los funcionamientos que proporcionen el control de las fracciones no reutilizables. Tales conceptos e indicadores, definidos en la Tabla 4, para los usos agrícolas en regadío.

Tabla 4: Indicadores de uso del agua en regadío

		Aguas consumidas	Aguas no consumidas, pero no reutilizables	Aguas no consumidas, pero reutilizables.
Usos beneficiosos	<input type="checkbox"/>	ET de los cultivos regados.	<input type="checkbox"/>	Fracción de lavado añadida a aguas salinas.
	<input type="checkbox"/>	Evaporación.		<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	Agua en el producto.		Fracción de lavado añadida a aguas reutilizables.
Usos no beneficiosos	<input type="checkbox"/>	ET de exceso de agua del suelo y de plantas adventicias.	<input type="checkbox"/>	Percolación a capas freáticas salinas.
	<input type="checkbox"/>	Evaporación a partir de los aspersores.	<input type="checkbox"/>	Percolación a capas freáticas de buena calidad.
	<input type="checkbox"/>	Evaporación a partir de canales y depósitos.	<input type="checkbox"/>	Agua de retorno y de descargas drenando a aguas degradadas.
		Fracción consumida	Fracción no reutilizable.	Fracción reutilizable

Fuente: Pereira *et al.* (2010).

- **La fracción consumida (FC)**, que consiste en la fracción de agua usada o movilizada que es evapotranspirada por los cultivos y vegetación, se evapora, es incorporada en el producto o bien es consumida como bebida o alimento y, por tanto, deja de estar disponible tras su uso. Puede explicarse por la relación entre el agua evaporada y consumida total (Q_{ET+C}) y el agua movilizada para el uso en cuestión (Q_{MOB}):

$$FC = Q_{ET+C}/Q_{MOB} \quad (2.34)$$

- **La fracción reutilizable (FR)**, que consiste en la fracción de agua usada que, no siendo consumida, cuando es usada en una actividad dada (producción, proceso o servicio), es devuelta con calidad aceptable a las aguas dulces superficiales o subterráneas no degradadas, y puede ser usada otra vez. Está expresada por el cociente entre la cantidad de agua no consumida en el sistema, pero no degradada (Q_{RU}) y la cantidad movilizada (Q_{MOB}):

$$FR = Q_{RU}/Q_{MOB} \quad (2.35)$$

- **La fracción no reutilizable (FNR)**, que consiste en la fracción de agua usada que, no siendo consumida, cuando es usada en una actividad dada (producción, proceso o servicio), es devuelta al ambiente con calidad inaceptable o es añadida a aguas superficiales o subterráneas degradadas y no puede ser usada otra vez. Está expresada por el cociente entre la cantidad de agua perdida en el sistema y, por tanto, no reutilizable, Q_{NR}, y la cantidad movilizada (Q_{MOB}):

$$FNR = Q_{NR}/Q_{MOB} \quad (2.36)$$

Para Pereira *et al.* (2010), adoptando estos conceptos e indicadores, se puede llegar a conocer más las perspectivas para usar mejor el agua en un marco de conservación del recurso y de ahorro en su uso, con la ventaja de recurrir a conceptos e indicadores que pueden ser comunes a sistemas agrícolas y no agrícolas.

La adopción, aún poco extendida, de los indicadores anteriores no elimina el uso de la eficiencia como indicador. A semejanza de la definición adoptada para eficiencia de aplicación, puede definirse la eficiencia de un sistema hídrico cualquiera (Ef) como el cociente entre las cantidades salientes y entrantes en ese sistema (expresado en por ciento). En el caso del riego, es común recurrir a la eficiencia de transporte y de distribución, que relacionan las cantidades suministradas a la entrada de las redes con las cantidades que las mismas suministran a las salidas. A título indicativo, se incluye en la Tabla 5 valores relativos a tales sistemas.

Tabla 5: Valores indicativos de las eficiencias de transporte y distribución para sistemas de riego bien proyectados y mantenidos

Sistema de riego	Eficiencias (por ciento)
Sistema de transporte (redes primarias de riego):	
• Tuberías (tubos)	95-100
• Canales revestidos.	60-90*
• Canales en tierra, no revestidos.	55-85*
Sistemas de distribución (redes secundarias y tercerías):	
• Tuberías a (alta) presión.	95-100
• Tuberías de baja presión	90-100
• Canales con capacidad > 50 l/s (grandes distribuidores)	80-95
• Canales con capacidad ≤ 50 l/s (pequeños distribuidores)	60-90

* Los valores más bajos se refieren a canales con control aguas arriba y regulación insuficiente.

Fuente: Pereira *et al.* (2010).

Pereira *et al.* (2010), sin embargo, más importante que conocer la eficiencia es percibir como el agua es usada, cuáles son los beneficios que se obtienen de su uso. Para ello, está siendo adoptado el concepto de productividad del agua (WP), la cual es definida por el cociente entre la cantidad de producto o servicio producido y la cantidad de agua usada (no solo la consumida) para su obtención. En términos de riego, en el numerador se tendrá la producción final, o el rendimiento monetario que proporciona, mientras que, en el denominador, entra el agua usada en el riego, consumida o no, y el agua proporcionada naturalmente, es decir, la lluvia, la reserva de humedad del suelo y la ascensión capilar:

$$WP = \text{Producto (kg ó €)} / (I_r + P_e + \Delta S + GW) \quad (2.37)$$

Dónde: I_r , es el total de riego durante el ciclo vegetativo del cultivo (mm); P_e , es la precipitación efectiva durante el ciclo vegetativo del cultivo (mm); ΔS , es la variación de la reserva de agua del suelo durante el ciclo vegetativo del cultivo (mm); y GW , es la ascensión capilar acumulada durante el ciclo vegetativo del cultivo (mm).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES Y EQUIPOS

3.1.1. Ubicación de la zona de estudio

El presente trabajo de investigación se realizó en el ámbito de la Universidad Nacional Agraria La Molina – UNALM, La Molina, Lima, Perú. Específicamente en los terrenos agrícolas y áreas con cultivos bajo riego de la UNALM, ubicación que se muestra en la Figura 10 imagen satelital de Google Earth Pro.



Figura 10: Ubicación satelital de la zona de estudio

Fuente: Google Earth Pro (12/19/18).

Coordenadas geográficas – WGS 84

Longitud min. = -76.957° Oeste

Latitud min. = -12.103° Sur

Longitud máx. = -76.937° Oeste

Latitud máx. = -12.075° Sur

Coordenadas UTM Proyectadas – WGS 84 / UTM Zona 18S

Este min. = 286965.903 m

Norte min. = 8661344.092 m

Este máx. = 289173.903 m

Norte máx. = 8664337.388 m

3.1.2. Materiales y equipos

- **Equipos, hardware y software**
 - Computador Procesador 2.9GHz – Memoria RAM 16.0GB, Disco Duro 1.0 TB.
 - Receptores GPS Diferenciales HiPer SR Topcon + Accesorios.
 - Receptor GPS Navegador Garmin + Accesorios.
 - Sistema Operativo Windows 10 Pro y Office 2016.
 - Software Topcon Receiver Utility TRU v2.6.
 - Software Topcon Tools v.8.2.
 - Software libre QGIS 3.10 y complementos.
 - Software Matlab - Versión R2015a.
 - Software AutoCAD Civil 2014.
- **Materiales cartográficos**
 - Mapa de Microzonificación Geotécnica – Distrito La Molina Lima, Realizado por Universidad Nacional de Ingeniería – CISMID - UNI – Julio 2010.
 - Imagen – fotomosaico RGB de la UNALM, obtenido con Drene por la empresa AEROCAM - febrero 2014.
 - Imagen – fotomosaico RGB de la UNALM, obtenido con Drene por la Facultad Ciencias Forestales UNALM, febrero 2017.
 - Plano CAD de Usuarios de Riego UNALM – Proporcionado por Unidad de Riego Tecnificado – URT, febrero 2017.
 - Plano CAD perimétrico de la UNALM, entregado por la oficina de Bienes Patrimoniales de la UNALM, plano realizado en setiembre del 2004.
- **Materiales y equipos varios**
 - Herramientas de obra civil: pico, lampa, pala, carretilla, barreta.
 - Pizarra 30 cm x 20 cm y un plumón, para enumerar las calicatas.
 - 3 anillos de 3” + implementos, para extraer muestras de suelo.
 - Recipientes para colección de muestras de suelo.
 - Bolsas plásticas para depositar y llevar muestras al laboratorio.
 - Tablero de madera y libreta para registros de datos de campo
 - Latas rectangulares.
 - Anillo de 3 pulgadas (7.62 cm) de diámetro.
 - Bloque de madera.
 - Palita de jardinero.
 - Cuchillo de hoja ancha.

- Bolsas auto-sellables y marcador.
- Balanza (precisión 0,1 g).
- Vara metálica de 18 pulgadas.

3.2 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del trabajo de investigación, se contempló tres etapas, que se describe a continuación y se presenta en la Figura 11 el diagrama de flujo metodológico.

3.2.1. Etapa preliminar

En esta etapa se realizó la recopilación y búsqueda de información técnica, así también se efectuó la preparación de archivos y bases de datos para los trabajos de campo.

3.2.1.1. Requerimiento de información, permisos y autorizaciones

- **Programas, unidades y/o usuarios de riego**

Se solicitó los permisos para realizar el trabajo de campo (topografía y calicatas de muestro de suelo) a los programas, unidades y/o usuarios, de los campos agrícolas de la UNALM, así como también la programación, cedula de cultivos y la dotación de agua de riego destinado a los campos, por los tres últimos años, 2017 al 2019.

- **Comisión de riego y oficina de servicios generales**

También se recopiló información de la Comisión de Riegos y de la Oficina de Servicios Generales el registro histórico de la dotación y suministro de agua de riego de los campos agrícolas, los jardines y áreas verdes del campus universitario, en ambos casos el registro semanal y/o mensual de los últimos cuatro años (2015 al 2018).

- **Plano base y cartografía temática**

Como primera fuente cartográfica, se usó el plano topográfico y de ubicación de los usuarios de riego UNALM – proporcionado por la Unidad de Riego Tecnificado – URT-UNALM, de febrero del 2017, también se utilizó el plano perimétrico de la UNALM, facilitado por la oficina de bienes patrimoniales de la UNALM, plano realizado en setiembre del 2004, la mayoría de esta información se encontró con georreferenciación local, y no global lo que dificultó su utilización y sistematización conjunta.

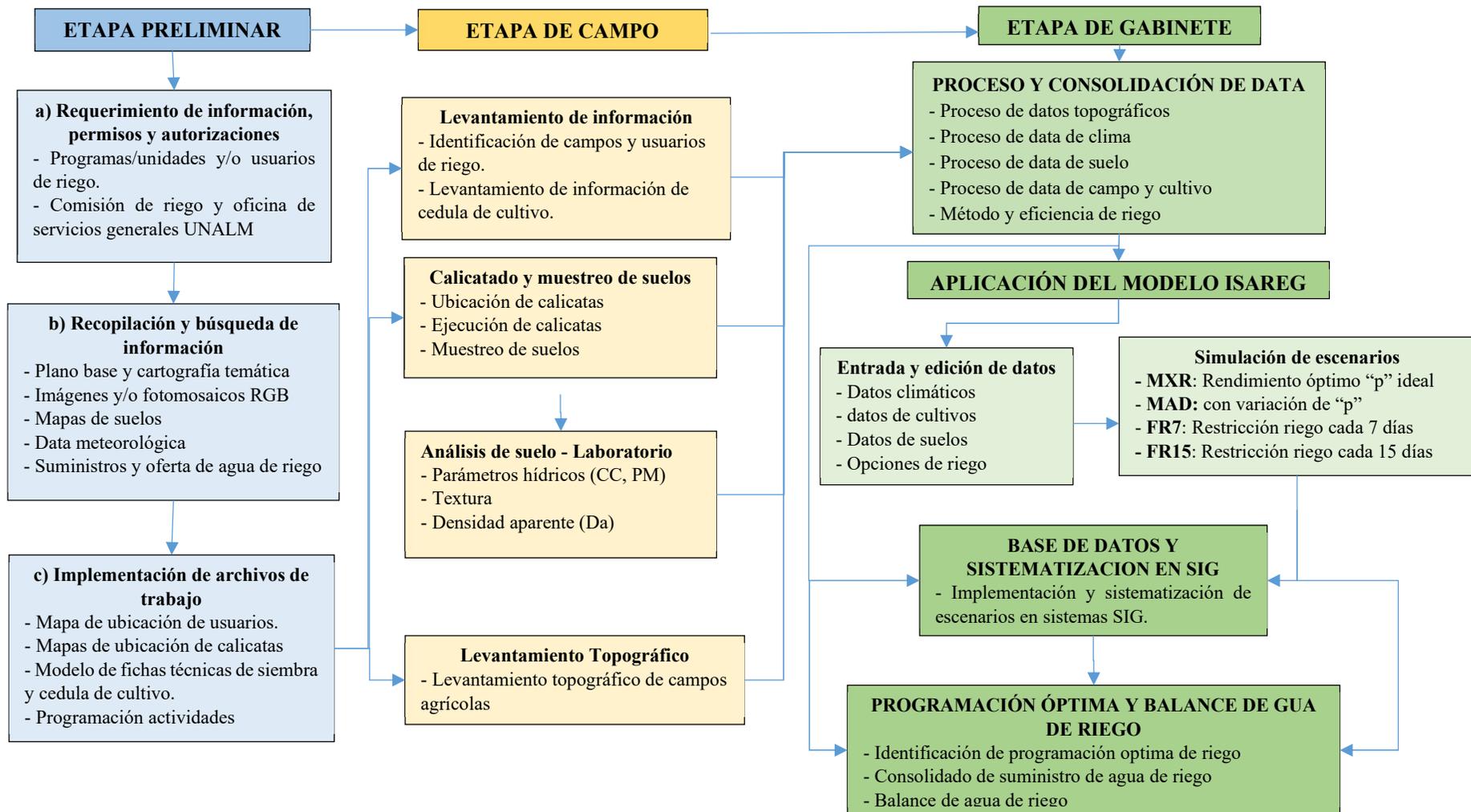


Figura 11: Diagrama de Flujo del proceso metodológico, para la optimización del uso de agua de riego en la UNALM, utilizando el modelo ISAREG y SIG

- **Imágenes y/o foto-mosaicos RGB**

También se contó con una imagen o fotomosaico RGB de la UNALM, obtenido con vehículo aéreo no tripulados - VANT (Drones) que fue realizado por la empresa AEROCAM en febrero 2014, igualmente se obtuvo un segundo fotomosaico RGB de la UNALM, obtenido también con Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT), facilitado por el área de fotogrametría de la Facultad Ciencias Forestales UNALM, fotomosaico procesado en febrero 2017.

- **Mapas de suelos**

No se encontró mapa de suelos en la UNALM, lo más próximo a un mapa de suelos fue el Mapa de Microzonificación Geotécnica – Distrito La Molina Lima, como se muestra en la Figura 12. Realizado por la Universidad Nacional de Ingeniería – CISMID - UNI – en Julio del 2010, encontrándose los campos agrícolas y áreas bajo riego de la UNALM, dentro de las cuatro zonas que se refiere en el mapa de Microzonificación Geotécnica, según los siguientes porcentajes:

Zona I: Estrato de gravas de origen coluvial y/o aluvial (1.25 por ciento)

Zona II: Suelos finos y arenosos con espesor menor a 10 m (25.65 por ciento)

Zona III: Suelos finos y arenosos de 10 m a 20 m de espesor (29.65 por ciento)

Zona IV: Suelos finos y arenosos de gran potencial y taludes inestables (43.45 por ciento)

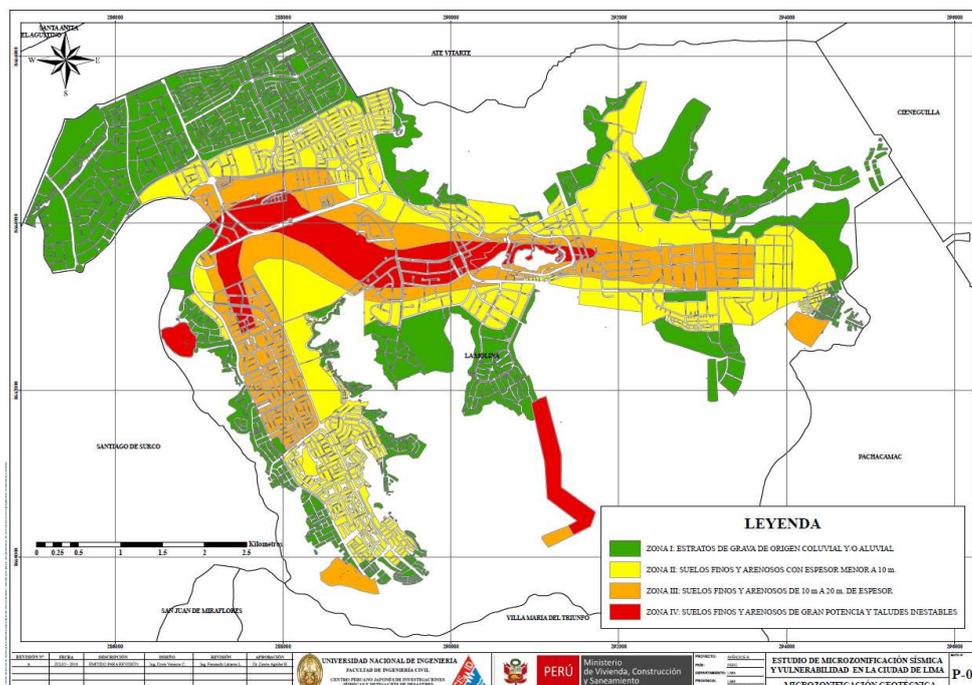


Figura 12: Mapa de Microzonificación Geotécnica – Distrito La Molina Lima

Fuente: SISMIID-UNI (2010)

- **Data meteorológica**

Se utilizó información climática de la Estación Meteorológica Internacional Alexander Von Humboldt de la UNALM, ubicado en las coordenadas geográficas 12°05' Latitud Sur y 76°57' Longitud Oeste en el Datum WGS84, a una altitud de 243.7 msnm, se contó con información climáticas promedio diario disponible para un periodo de seis años (2003 al 2018), esencialmente en las siguiente seis variables:

- Temperatura máxima (°C)
- Temperatura mínima (°C)
- Humedad relativa promedio (por ciento)
- Horas de sol (horas y decimal)
- Velocidad del viento a 6 m altura (m/s)
- Precipitación (mm/día)

- **Suministro y oferta de agua de riego**

Se utilizó información de dos Fuentes:

- Comisión de Usuarios Regantes de ATE, facilitó **la programación del consumo de agua con fines agrarios de la UNALM**, indicando el caudal de ingreso de agua de riego al campus de la UNALM, por los canales: **Parte Baja** (campo ferial) y **Parte Alta** (frutales) por días y horas de las semanas, refiriendo que la programación se mantuvo sin variación por ocho años del año 2012 al 2019.
- Comisión de Riegos de la UNALM, a través de la coordinación de esta facilitó el uso de la data de la libreta de registro de caudales de ingreso de agua de riego al campus de la UNALM, por los canales: **Parte Baja** (campo ferial) y **Parte Alta** (frutales) por días y horas de las semanas, habiéndose registrado desde noviembre del 2014 a mayo del 2018, poco más de tres años y medio, información parcialmente completa pero muy importante para estimar el ingreso real del agua de riego a la UNALM.

3.2.1.3. Implementación de archivos de trabajo

- **Mapa de ubicación de usuarios**

Tomando como base el plano CAD de Usuarios de Riego UNALM-2017, el fotomosaico de la empresa AEROCAM-2014 y fotomosaico de la Facultad Ciencias Forestales-2017 y con el software QGIS se georreferenció y preparó la primera versión del mapa de campos agrícolas y áreas con cultivos bajo riego de los usuarios de la UNALM.

- **Mapas de ubicación de calicatas**

Con la información cartográfica y de suelos disponible, se elaboró el mapa de ubicación de calicatas, habiéndose definido un total de 60 unidades, ubicado en los campos de las unidades de producción, investigación, campos agrícolas y áreas con plantas de usuarios y sub-usuarios de riego.

- **Fichas técnicas de siembra y cedula de cultivo**

Se elaboró una ficha técnica para el registro y recopilación de información de campo por unidad de producción, investigación, usuarios y sub-usuarios de riego, el cual contempló principalmente la siguiente información:

- Nombre del campo
- Tipo planta y/o cultivo
- Nombre planta, variedad y/o cultivo
- Periodo vegetativo
- Meses y fechas de siembra
- Duración de etapas de crecimiento
- Profundidad radicular
- Altura de crecimiento

- **Programación de actividades**

La programación de actividades estuvo sujeta a las diferentes acciones a realizarse durante la investigación, se planificó en tres etapas y el tiempo fue de 20 meses, el cual se detalla a continuación:

Etapas preliminar (6 meses)

- Recopilación de información, gestión de permisos autorizaciones
- Elaboración de una base de datos y archivos de trabajo

Etapas de campo (6 meses)

- Levantamiento de información de campo
- Caracterización de suelos
- Análisis de suelo – Laboratorio
- Levantamiento topográfico

Etapa de gabinete (8 meses)

- Procesamiento de los datos del muestreo de suelo e información de la oferta y demanda de agua; así como de la elaboración del plano.
- Aplicación del modelo ISAREG
- Entrada y edición de datos
- Simulación de escenarios
- Sistematización y mapeo en SIG
- Planteamiento de programación óptima de riego

3.2.2. Etapa de campo

En esta etapa se realizó en levantamiento de información de campo, levantamiento topográfico, inventario y mapeo de campos agrícolas y las respectivas cédulas de cultivo, ejecución de calicatas, muestro de suelo, entre otros. Para iniciar esta etapa se tuvo disponible documentación e información preliminar, como:

- Permisos y autorizaciones
- Mapa de ubicación de usuarios
- Mapas de ubicación de calicatas
- Modelo fichas técnicas de siembra y cédula de cultivo
- Programación actividades

3.2.3 Etapa de gabinete

Contempla la última etapa, en ella se procesó, consolidó y sistematizó la información del clima, suelo, cultivo y topografía. Asimismo, se aplicó el modelo ISAREG y los sistemas de información geográfica – SIG, para la determinación de las demandas, establecimiento de la programación óptima de riego para los usuarios de la UNALM.

3.2.3.1. Análisis de suelos en laboratorio

Las pruebas y ensayos de laboratorio para determinar los parámetros físicos como Textura (en porcentajes de arena, limo y arcilla), Densidad aparente (Da) y parámetros hídricos como Capacidad de campo (CC) y Punto de marchitez (PM) de las 231 muestras de suelos, fueron realizados en el Laboratorio de Análisis de Agua, Suelo, Planta y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

3.2.3.2. Consolidación de data

En esta etapa, se efectuó el procesamiento y consolidación de la data e información, recopilada de los trabajos de campo y otras fuentes, información correspondiente a: clima, suelo, cultivo, levantamiento topográfico y dotación y suministro de agua de riego, para luego proceder a efectuar el análisis, evaluación y su sistematización.

- **Proceso de datos topográficos**

Luego del trabajo topográfico en campo, con la data cruda de la taquimetría de puntos consolidado en un total de 2,092 puntos y utilizando el Software AutoCAD Civil 3D, se procedió a identificar, localizar y delimitar los linderos de los campos agrícolas y áreas de cultivo, de los programas, unidades y usuarios de riego. La topografía consolidada en el AutoCAD Civil 3D, se transfirió al Software QGIS, donde se efectuó diferentes correcciones geométricas y principalmente topológicas, en el software QGIS los campos se clasificaron por usuarios, para obtener sus dimensiones de superficie, tal como se puede apreciar en la Figura 13, nube de puntos del levantamiento topográfico.

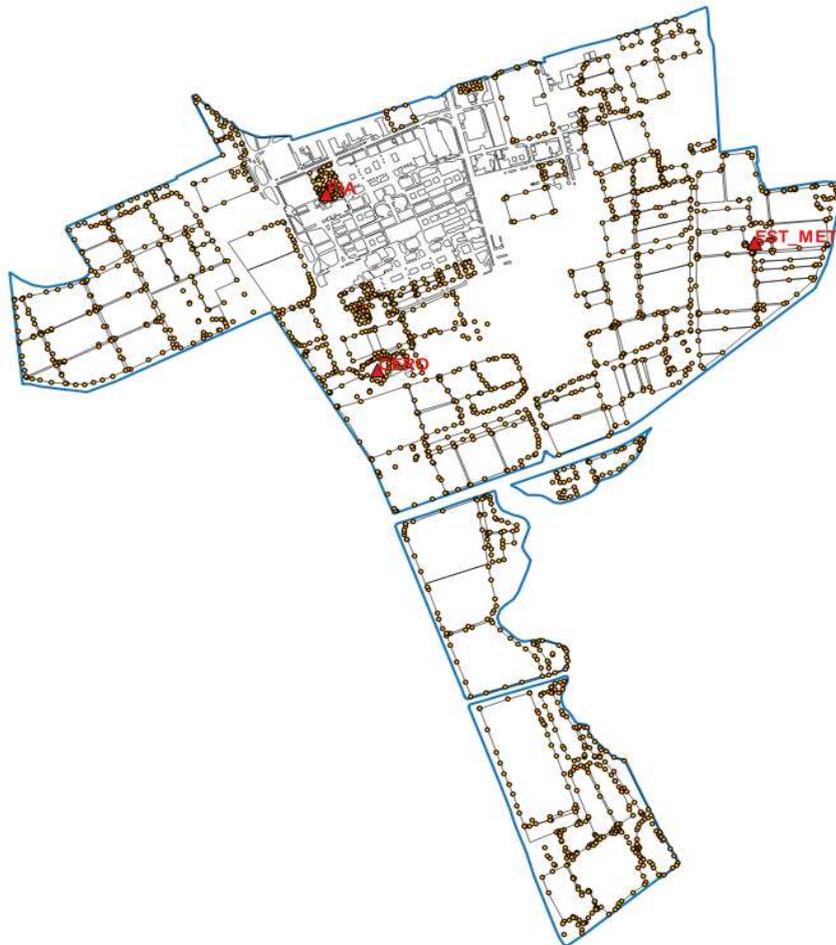


Figura 13: Nube de puntos del levantamiento topográfico de campos y delimitación de áreas de campos por usuarios de riego de UNALM

- **Proceso de data climática**

Se procesó la data climática disponible de la Estación Meteorológica Alexander Von Humboldt de la UNALM, para el periodo de (2013 al 2018), a escala promedio diario de las siguientes variables: horas de sol (horas y decimal), temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), humedad relativa promedio (en porcentaje), velocidad del viento a 6 m altura y precipitación (mm/día).

Los datos climáticos, fueron examinados a través de gráficos y diagramas exploratorios como: gráficos de líneas comparativas, diagrama de cajas (box-plot), e histogramas, con el propósito de ubicar y corregir los datos anormales y faltantes, siendo mínimo las correcciones realizadas.

Seguidamente, para el caso del viento, se procedió a ajustar la velocidad del viento a una altura de 2.0 m, sido la data original registrada a una altura de 6.0 m, requerido para el cálculo de la ETo en el modelo Evap56, para esto se utilizó la ecuación de relación del viento con la altura:

$$v_2 = v_z \frac{4.87}{\ln(67.8 * z - 5.42)}$$

Donde:

v_2 : velocidad del viento a 2 m sobre la superficie (m/s)

v_z : velocidad del viento a z m sobre la superficie (m/s)

z : altura de medición sobre la superficie (m)

Posteriormente, se realizó el cálculo de la humedad relativa mínima HRmin (por ciento), también requerido por el modelo **Evap56**, para lo cual se utilizó las siguientes relaciones de presión de saturación de vapor a la temperatura máxima y mínima del aire, Tmax y Tmin.

$$HR_{min} = \frac{e^0(T_{min})}{e^0(T_{max})} * 100$$

$$e^0(T_{min}) = 0.6108 * \exp\left[\frac{17.27 * T_{min}}{T_{min} + 237.3}\right]$$

$$e^0(T_{max}) = 0.6108 * \exp\left[\frac{17.27 * T_{max}}{T_{max} + 237.3}\right]$$

$e^0(T_{min})$ presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, Tmin.

$e^0(T_{max})$ presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, Tmax.

HRmin humedad relativa mínima.

Como etapa final del tratamiento y consolidación de la data climática, para el año promedio, se aplicó estadística descriptiva, a) medidas de posición: media aritmética, media recortada, mediana, máximo, mínimo y b) medidas de dispersión: desviación estándar o típica, varianza, rango, rango inter-cuartil, oblicuidad, curtosis y coeficiente de variación, igualmente se realizaron gráficos y diagramas exploratorios: gráficos de líneas comparativas, diagrama de cajas (box-plot), e histogramas, la estadística descriptiva y los gráficos permitieron efectuar el análisis y evaluación de la data del año promedio, finalmente se aceptó como como representativa.

- **Proceso de data de suelo**

A fin de asignar a los campo agrícola o área de cultivo, las características y parámetros del tipo de suelo correspondiente, se utilizó el algoritmo de interpolación del vecino más próximo, basado en la generación de polígonos de Thiessen o Voronoi, para determinar el área de influencia de las calicatas y de este modo asignar a los campos las calicatas correspondientes en función a su centro de gravedad.

Con los resultados de laboratorio de los análisis de suelo, se procedió a consolidar por estratos muestreados y por usuarios de riego, que permitieron su utilización en el modelo ISAREG, así como su incorporación en el QGIS, así mismo los parámetros de suelo, se clasificó y evaluó por estratos muestreados, la textura se representó en el diagrama triangular de clases texturales de USDA, los parámetros hídricos y densidad aparente se representaron en gráficos de líneas comparativas e histogramas de frecuencia y complementariamente se realizaron mapas de calicatas, textura y parámetros hídricos de suelos por campos y áreas de cultivo.

- **Proceso de data de campos y cultivos**

Se procedió a ordenar y consolidar la información de los campos, para lo cual se identificaron dos grandes tipos de usuarios, denominados:

- FDA (Usuarios Fundación para el Desarrollo Agrario)
- UNALM (Usuarios Universidad Nacional Agraria la Molina)

Registrándose 15 usuarios FDA y 8 usuarios UNALM, siendo un global de 23 usuarios de riego y un total de 129 campos agrícolas y parcelas con cultivos, distribuidos entre programas de producción, programas de investigación y otras unidades, todo ello conforme al presentado en el Tabla 6 de padrón de usuarios de riego – FDA-UNALM.

La información de cultivos de los diferentes campos y parcelas con plantas de los usuarios de riego se procedió a ordenar y sistematizar, en tablas con estructuras que permitirían su utilización en el modelo ISAREG, así como su exportación al software QGIS. Considerando un código por campo y/o parcela que permita identificar al campo y al cultivo de manera única, pudiendo identificar parámetros de cultivo como: nombre del campo, tipo de cultivo, nombre de cultivo, variedad, periodo vegetativo, mes y fechas de siembra, duración de etapas de crecimiento, coeficientes de cultivo (K_c), profundidad radicular (P_r), fracción de agotamiento (p), coeficiente de respuesta al rendimiento (K_y), altura de planta (h_p) de cultivos y plantas de los campos agrícolas y parcelas de cultivo. En total se encontraron 129 campos o parcelas, distribuidos en 23 usuarios, se muestra para un usuario (programa de hortalizas - Huerto) en la Tabla 7 de ficha técnica de campo, programación de siembra y cedula de cultivo.

Tabla 6: Padrón de usuarios de riego – FDA-UNALM

Tipo	Id.	Programa o unidad	Campos
FDA	1	Programa Frutales	22
	2	Programa de Hortalizas	13
	3	Programa de Algodón (*)	4
	4	Vivero Forestal	13
	5	Programa de Maíz	9
	6	Programa de Cereales	3
	7	Programa Poca/Rigoranch	3
	8	Jardín Botánico (*)	1
	9	Vivero Plantas Ornamental	5
	10	Centro de Ventas (*)	5
	11	Programa de Raíces y Tuberosas	2
	12	Facultad de Ciencias - Biología (*)	1
	13	Programa de Pastos y Forrajes (*)	3
	14	Facultad de Agronomía - Unidad de Riego	2
	15	Facultad de Zootecnia (*)	3
UNALM	1	Parques y Jardines	1
	2	Fundo	16
	3	Laboratorio de Suelos, Agua, Plantas y Fertilizantes (*)	5
	4	Educación Física - Estadio	1
	5	Banco de Semen	3
	6	Programa de Leguminosas	1
	7	Facultad de Ing. Agrícola (*)	5
	8	Campo Ferial	8

(*) Son denominados e identificados como sub-usuarios de riego.

Tabla 7: Ficha técnica de campo, programación de siembra y cedula de cultivo

Campos		Cultivos		Meses de manejo anual												Duración de etapas				Prof. y altura	
Id	Nombre	Riego	Nombre/ Variedad	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Init.	Des.	Med.	Final	Pr med (m)	Alt. max (m)
				1	Alegre 1	Localizado	Ají nativo	AJ	AJ	AJ	AJ	AJ	AJ								
			Lechuga							LE	LE	LE	LE	LE		35	50	45	20	0.2	0.3
2	Alegre 2	Localizado	Lechuga	LE	LE	LE	LE	LE								35	50	45	20	0.2	0.3
			Lechuga							LE	LE	LE	LE	LE		35	50	45	20	0.2	0.3
3	Alegre 3	Localizado	Tomate	TO	TO	TO	TO							TO	TO	35	45	70	30	0.2	0.6
			Apio							AP	AP	AP	AP			25	40	45	15	0.2	0.3
4	Alegre 4	Localizado	Sandia	SA	SA	SA									SA	15	25	50	30	0.2	0.5
			Papa						PA	PA	PA	PA	PA			30	35	50	35	0.3	0.5
5	Canchita	Localizado	Lechuga	LE	LE	LE	LE	LE								35	50	45	20	0.2	0.3
			Lechuga							LE	LE	LE	LE	LE		35	50	45	20	0.2	0.3
6	San Juan 1	Localizado	Esparrago	CO	CO	CR	CR	CR	CR	CR	CR	CO	CO	CR	CR	50	30	212	72	1	1.2
7	San Juan 2	Localizado	Tomate	TO	TO	TO	TO							TO	TO	35	45	70	30	0.2	0.6
			Brócoli					BR	BR	BR	BR	BR				40	45	40	25	0.2	0.4
8	San Juan 3	Localizado	Tomate	TO	TO	TO	TO							TO	TO	35	45	70	30	0.2	0.6
			Brócoli					BR	BR	BR	BR	BR				40	45	40	25	0.2	0.4
9	San Francisco 1	Localizado	Oleo cultura				OL	OL	OL	OL						30	45	35	10	0.2	0.3
			Oleo cultura									OL	OL	OL	OL	30	45	35	10	0.2	0.3
10	San Francisco 2	Localizado	Camote	CA	CA	CA								CA	CA	20	30	60	40	0.2	0.5
			Zapallo					ZA	ZA	ZA	ZA	ZA				35	40	40	35	0.2	0.5
11	San Francisco 3	Localizado	Ají amarillo	AJ	AJ	AJ	AJ	AJ						AJ	AJ	30	40	110	30	0.2	0.6
			Camote						CA	CA	CA	CA	CA			20	30	60	40	0.3	0.5
12	San Francisco 4	Localizado	Zapallito zuchini		ZA	ZA	ZA									20	35	25	10	0.2	0.5
			Yuca						YU	20	40	90	60	0.3	1.2						
13	San Francisco 5 Y 6	Localizado	Tomate	TO	TO	TO	TO							TO	TO	35	45	70	30	0.2	0.6
			Zapallo macre						ZA	ZA	ZA	ZA				25	35	35	25	0.2	0.5

3.2.3.3. Asignación de métodos y eficiencias de riego.

Identificado y reconocido los métodos de riego aplicados en los campos agrícolas y parcelas con cultivos de los usuarios de riego, así como la inspección de las condiciones del sistema de riego de la UNALM, se estimó la eficiencia de conducción (Efc), distribución (Efd) y la eficiencia de aplicación (Efa) para luego determinar la eficiencias de riego (Efr) para el sistema de riego de los campos y parcelas de los usuarios y la UNALM, valores referenciales se presentan en las Tablas 8 y 9, y los valores estimados para el presente trabajo en la Tabla 10.

Tabla 8: Valores indicativos de las eficiencias de transporte y distribución para sistemas de riego bien proyectados y mantenidos

Sistema de riego	Eficiencia (porcentaje)
Sistema de transporte (redes primarias de riego):	
- Tuberías (tubos).	95-100
- Canales revestidos.	60-90
- Canales en tierra, no revestidos.	55-85
Sistema de distribución (redes secundarias y terciarias):	
- Tuberías a (alta) presión □□ 50 l/s (grandes distribuidores)	80-95
- Tuberías a (alta) presión □□ 50 l/s pequeños distribuidores)	80-96

Fuente: Pereira *et al.* (2010).

Tabla 9: Valores indicativos de las eficiencias de aplicación para sistemas de riego bien proyectados y mantenidos

Método de riego	Eficiencia (porcentaje)
Riego por gravedad tradicional:	
- Surcos	40-70
Riego por aspersión:	
- Sistema estacionario con cobertura total	64-85
Micro riego (riego localizado):	
- Línea continua de emisores gota-gota	70-90

Fuente: Pereira *et al.* (2010).

Tabla 10: Valores estimados de eficiencias de almacenamiento, conducción y distribución, aplicación y riego, para el sistema y campos bajo riego de la UNALM

Tipos de riego	Eficiencia de almacenamiento Efs(porcentaje)	Eficiencia de Cond. y dist. Efed (porcentaje)	Eficiencia de aplicación Efa(porcentaje)	Eficiencia de riego Efr(porcentaje)
Gravedad	1.00	0.75	0.55	0.4125
Aspersión	0.98	1.00	0.80	0.7840
Localizado	0.98	1.00	0.90	0.8820

Utilizando el SIG se clasifico y consolido las áreas de los campos y parcela con sus respectivos métodos y eficiencias de riego por usuarios, para dos situaciones o escenarios, eficiencia de riego a situación actual (2018) y situación nueva (deseado y esperado).

3.2.3.4. Aplicación del Modelo ISAREG

La aplicación del Modelo ISAREG, se llevó a cabo en dos fases: Entrada de datos y Simulación de escenarios.

A. Entrada y edición de datos

• Datos climáticos

La data climática que se utilizó en el modelo ISAREG, fue la precipitación efectiva (Pe) Velocidad de viento, humedad relativa mínima (HRmin) y la evapotranspiración de referencia (Eto) en valores diarios. Para el cálculo de la ETo se utilizó adicionalmente el programa Evap56 incluido en el mismo modelo ISAREG, para lo cual se hizo uso de las siguientes variables climáticos también a escala diaria:

- Temperatura máxima (°C)
- Temperatura mínima(°C)
- Humedad relativa media (porcentaje)
- Velocidad de viento (m/s)
- Horas de sol (hr)

Los datos climáticos de entrada para el modelo tuvieron en un formato con una estructura definida, para ser leídos por el programa Evap56 y el ISAREG.

- La primera línea para indicar el paso de tiempo de datos a través del código de 31 para diario, y el código de las unidades para las diversas variables.
- La segunda línea para indicar el número de años y el primer y último mes con los datos.
- La tercera línea para indicar el primer año de la serie;

- Todas las demás líneas corresponden a los datos para el período de tiempo considerado.

Se detalla en la Figura 14 de especificaciones de los códigos utilizados y Tabla 11 con códigos de unidades y extensión para diferentes archivos con datos climáticos.

Código para el tipo de datos: 1 para mensual; 3 por 10 días; 31 para diario

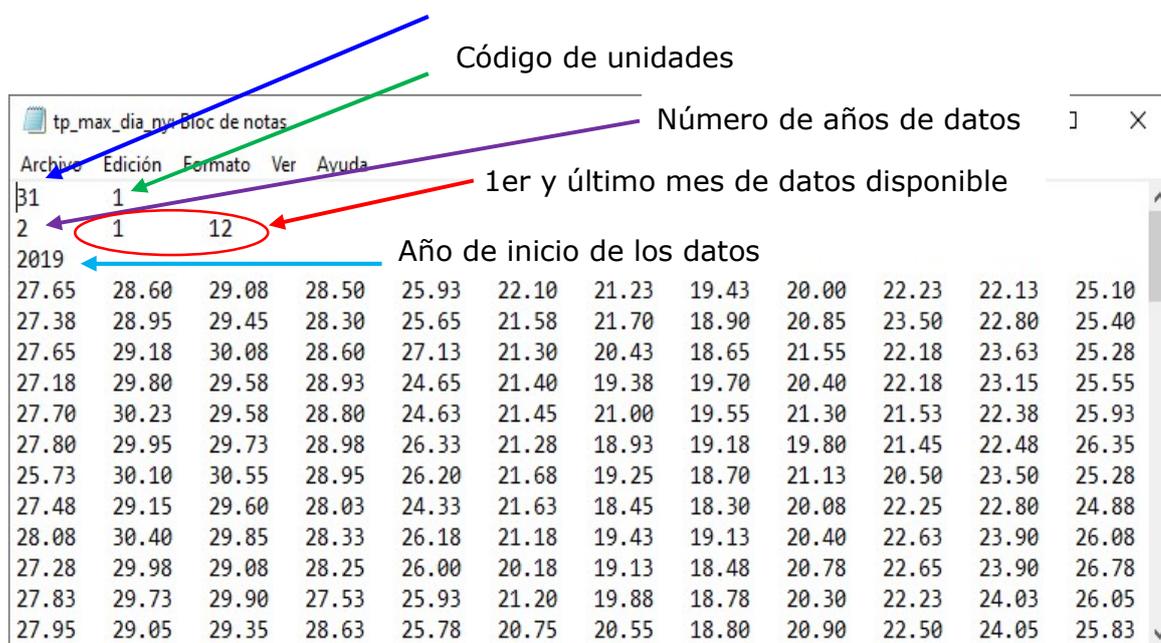


Figura 14: Especificaciones de los códigos utilizados para los archivos de datos climáticos

Tabla 11: Códigos de unidades y extensión para diferentes archivos con datos climáticos

Tipo de archivo climático	Unidades	Extensión de archivo
Velocidad de viento	1.- m/s	*.ven
Horas de sol	1.- Valor de brillo solar diario	*.ins
Temperatura máxima	1.- °C	*.tpa
Temperatura mínima	1.- °C	*.tpi
Humedad relativa mínima	1.- por ciento	*.rhi
Humedad relativa media	1.- por ciento	*.hum
Evapotranspiración	1.- mm/día	*.eto
Precipitación efectiva	1.- mm/día	*.pre

La Figura 15, muestra el menú principal y árbol de navegación del modelo ISAREG y las respectivas opciones del sub-modelo Evap56 se muestra en la Figura 16 de menú del programa Evap56.

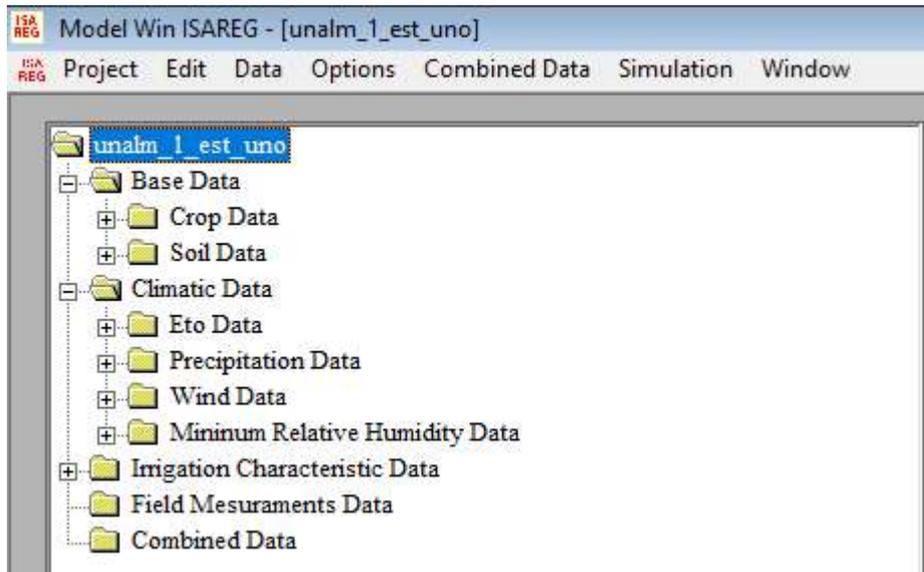


Figura 15: Menú principal del ISAREG y el árbol de navegación para gestionar archivos: climáticos, suelo, cultivo, opciones de riego y otros

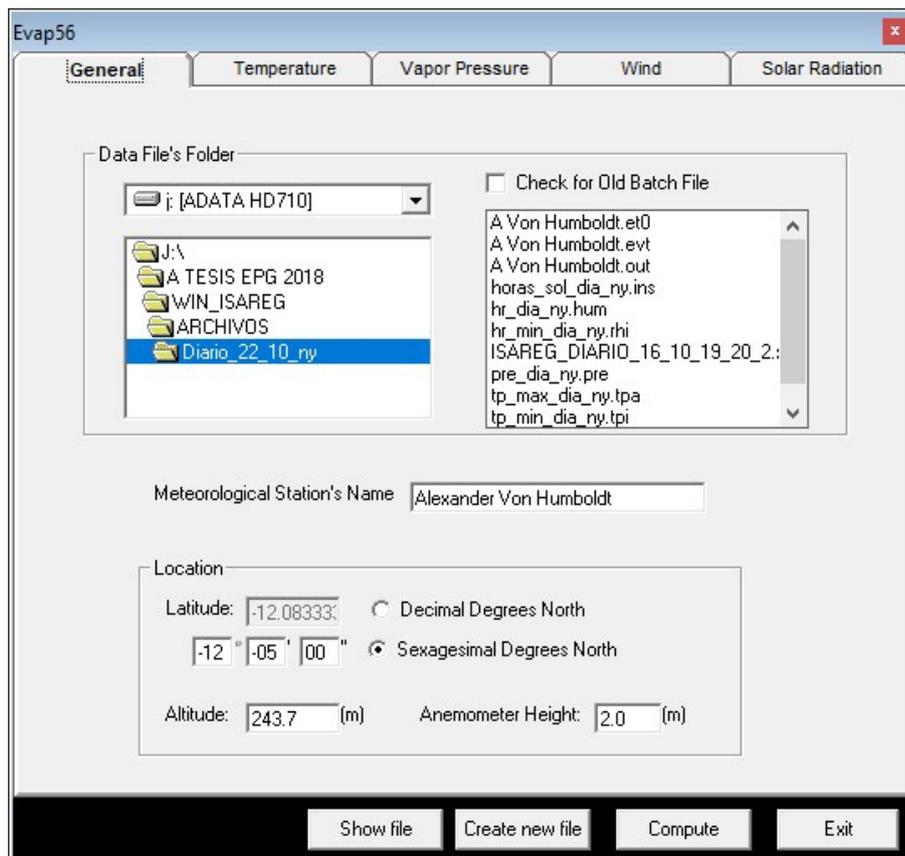


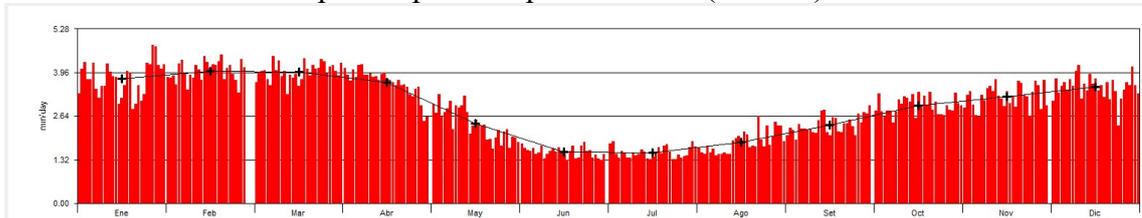
Figura 16: Menú principal del programa Evap56 y opciones de entrada de datos para el cálculo de la Eto

En la Tabla 12 y Figura 17, presentan los resultados del procesamiento de los datos climáticos con el programa Evap56 del modelo ISAREG.

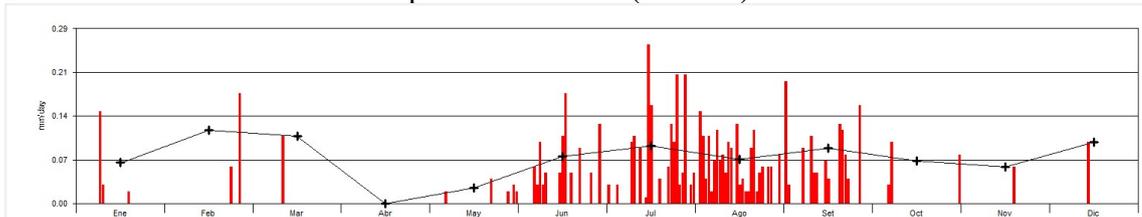
Tabla 12: Presentación de resultados del cálculo de ETo utilizando la metodología de FAO-PM

	Jan	Fev	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Set	Out	Nov	Dec
Day 1	3.32	3.82	3.66	4.09	3.00	1.80	1.80	1.67	2.06	2.81	2.90	3.10
Day 2	4.06	3.79	3.96	3.89	2.73	1.68	1.88	1.53	2.29	3.32	3.27	3.78
Day 3	4.28	3.86	3.99	3.70	3.29	1.61	1.49	1.49	2.22	2.79	3.39	3.35
Day 4	3.74	3.60	4.03	4.05	2.62	1.58	1.38	1.71	1.93	2.63	2.99	3.54
Day 5	3.76	4.23	3.74	3.82	2.76	1.67	1.57	1.53	2.39	2.80	2.67	3.67
Day 6	4.24	4.33	3.56	4.19	2.88	1.49	1.52	1.66	2.26	2.80	2.61	3.42
Day 7	3.45	3.94	4.44	4.21	3.10	1.54	1.38	1.45	2.27	2.44	3.27	3.76
Day 8	3.19	3.43	4.02	3.89	2.23	1.73	1.38	1.49	2.23	2.78	3.11	3.54
Day 9	3.55	3.88	4.31	3.89	2.95	1.36	1.53	1.49	2.25	3.15	3.47	4.00
Day 10	3.54	3.79	3.84	3.93	2.89	1.48	1.44	1.53	2.14	3.01	3.55	4.19
Day 11	4.22	4.19	4.00	3.81	2.95	1.58	1.50	1.48	2.13	3.23	3.39	3.16
Day 12	3.97	4.04	3.30	3.85	3.25	1.66	1.63	1.49	2.50	3.19	3.75	3.62
Day 13	3.83	3.72	3.88	3.72	2.76	1.56	1.55	1.89	2.80	3.08	3.26	3.42
Day 14	3.81	4.44	3.80	3.91	2.10	1.69	1.35	1.97	2.82	3.31	3.16	3.91
Day 15	3.01	4.27	3.91	3.95	2.35	1.52	1.34	2.03	2.14	2.58	2.94	3.61

Evapotranspiración potencial Eto (mm/día)



Precipitación efectiva (mm/día)



Velocidad de viento (m/s)

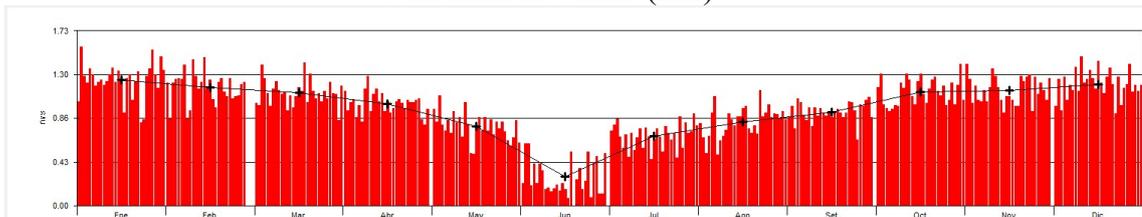




Figura 17: Presenta grafica de los datos climáticos utilizando por el modelo ISAREG

- **Datos de cultivos**

Para definir las características del cultivo o plantas, de los campos agrícolas o parcelas con plantas, fueron necesarios ingresar los siguientes parámetros de cultivo:

- Fechas de las etapas de desarrollo del cultivo.
- Los coeficientes de cultivo (kc ini, kc med y kc fin).
- Fracción de agotamiento de agua en el suelo sin estrés (p).
- Altura máxima del cultivo (h)
- Profundidad de raíz (Zr)
- Factor de respuesta al rendimiento del cultivo (Ky)

Se consideran en el modelo ISAREG un máximo de cinco etapas de desarrollo, que se limitan como:

- A -> Plantación, iniciación o primer riego;
- B -> Inicio del crecimiento vegetativo;
- C -> Cubierta completa o florecimiento pleno;
- D -> Formación de rendimiento o fruto;
- E -> Maduración o inicio de senescencia;
- F -> Cosecha o fin de temporada.

Las etapas de desarrollo del cultivo, por tanto, fueron consideradas las siguientes:

- Inicial, a partir de fechas de A - B
- Desarrollo, de B - C
- Principios de temporada media, de C - D;
- Finales de temporada media, de D - E, y
- Temporada final, de E - F.

Los parámetros de cultivo se ingresaron al modelo ISAREG, según el tipo de cultivo para lo cual se utilizaron las siguientes opciones:

- **Cultivos hortícolas y cultivo de árboles**

Para este tipo de cultivos como se muestra la Figura 18, la profundidad de raíz (Z_r), la fracción de agotamiento de agua en el suelo sin estrés (p), fueron ingresados por fechas según las etapas de desarrollo; en cambio el factor de respuesta al rendimiento del cultivo (K_y) y la altura máxima del cultivo (h) fueron ingresados como valores constantes, sin embargo, los coeficientes de cultivo (k_c) se ingresaron según manejo y tipo del cultivo, siendo como:

- Los coeficientes de cultivo (k_c) relacionados directamente con las etapas de desarrollo.
- Los coeficientes de cultivo (k_c) promediados por periodos de tiempo (mensual)
- Los coeficientes de cultivos (k_c) en fechas específicas definidas.

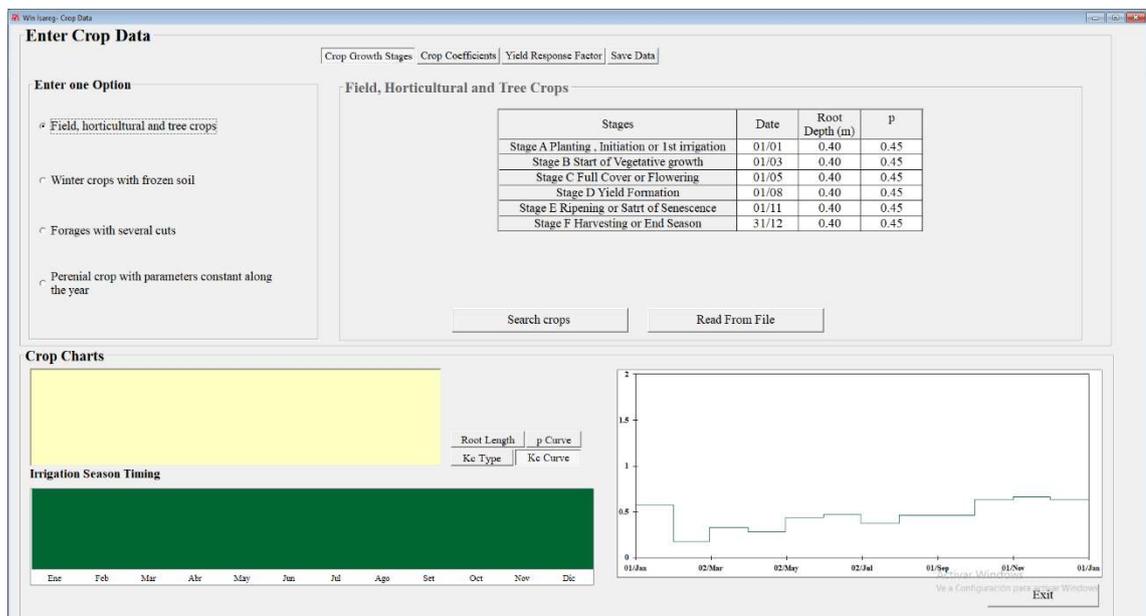


Figura 18: Ingreso de parámetros de cultivos hortícolas y cultivo de árboles, caso ejemplo unidad de riego - Facultad de Agronomía

- **Cultivos forrajeros con múltiples cortes**

Para este tipo de cultivos, la profundidad de raíz (Z_r), la fracción de agotamiento de agua en el suelo sin estrés (p), el factor de respuesta al rendimiento del cultivo (K_y), y la altura máxima del cultivo (h), fueron ingresados como valor constante como se muestra en la Figura 19 sin embargo, los coeficientes de cultivo (k_c) se ingresaron en función de las fechas específicas antes y después del corte, así como también al inicio y al final de todo el periodo de evaluación o balance de agua, ingresándose cuatro valores de k_c .

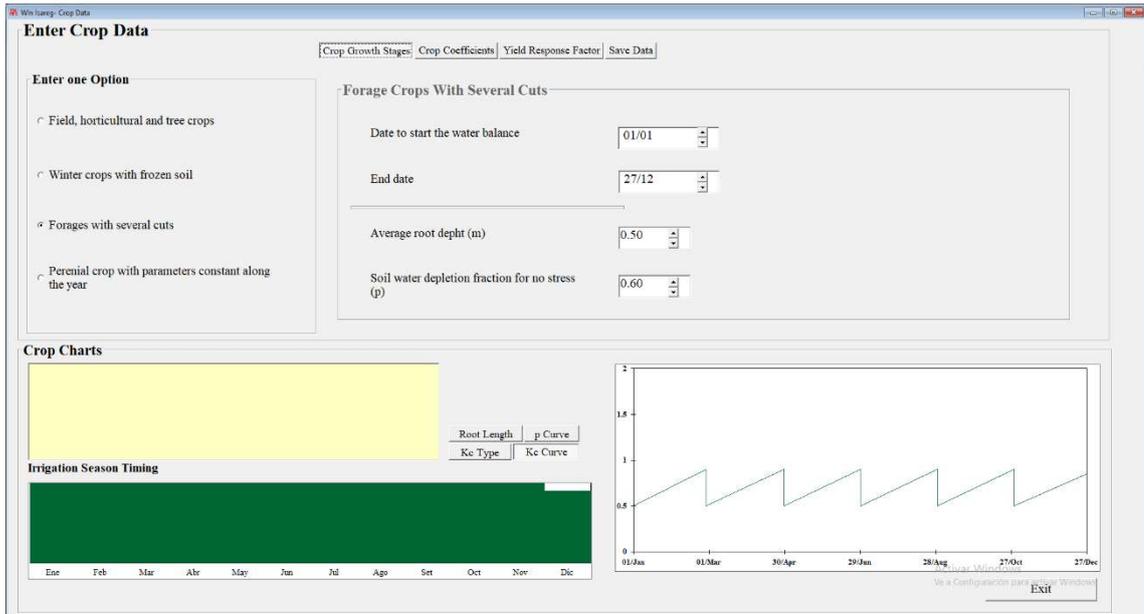


Figura 19: Ingreso de parámetros de cultivos forrajeros con múltiples cortes, ejemplo Poca Rigoranch Pasto 1

- **Cultivos con parámetro contante a lo largo de toda la temporada**

Para este tipo de cultivos, la profundidad de raíz (Z_r), la fracción de agotamiento de agua en el suelo sin estrés (p), el factor de respuesta al rendimiento del cultivo (K_y), la altura máxima del cultivo (h) y el coeficiente de cultivo (kc), se ingresaron como valores constantes a lo largo de todo el año, tal como se muestra en la Figura 20 ingreso de datos de cultivos.

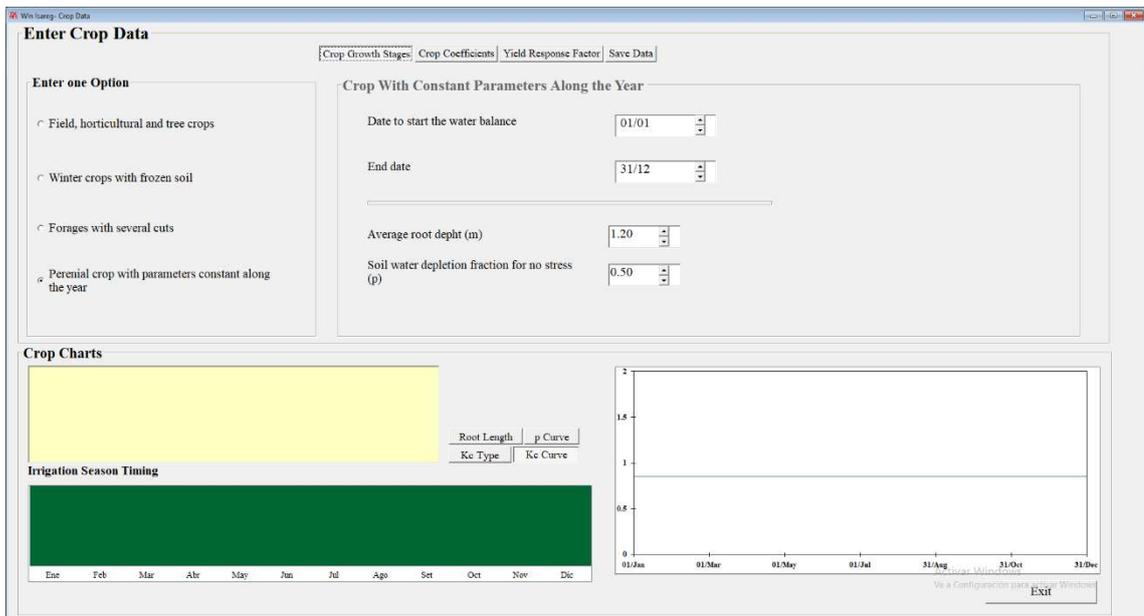


Figura 20: Ingreso de datos de cultivos con parámetro contante a lo largo de toda la temporada, ejemplo Jardín Botánico

- **Datos de suelos**

Para definir las características hídricas del suelo, se ingresó los siguientes parámetros:

- Profundidad y espesor de las capas de suelo (m).
- Contenido de agua del suelo a capacidad de campo, fracción en peso W_{FC} (kg/kg).
- Contenido de agua del suelo a punto de marchitez, fracción en peso W_{WP} (kg/kg).
- Densidad aparente del suelo (kg/dm^3).

El ingreso de datos se realizó, como se muestra en la Figura 21 de ingreso de datos de suelo.

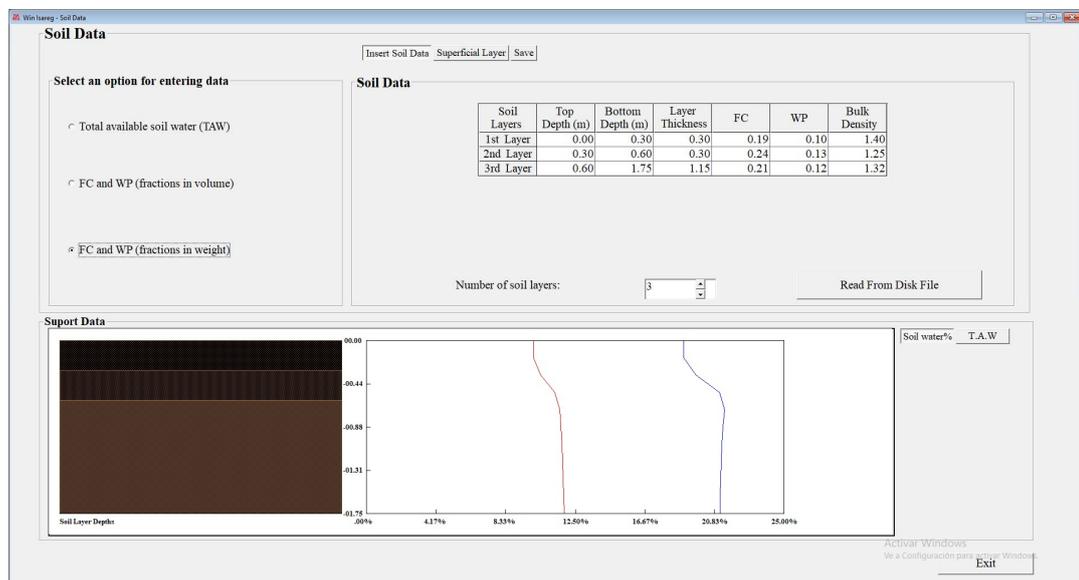


Figura 21: Ingreso de datos de suelo, para definir las características hídricas a diferentes profundidades

Adicionalmente se consideró características del suelo de la capa evaporable o capa superficial, considerando una profundidad o espesor (Z_e), para calcular el agua evaporable total de (TEW, mm) y el agua fácilmente evaporable. (REW, mm), el TEW el programa calcula de las características de retención de agua del suelo de la primera capa o superior y el REW se estima a partir de las características de la textura del suelo de la capa superior, por lo cual se ingresa lo siguiente:

- Profundidad o espesor de la capa evaporable o capa superficial $Z_e=0.10$ m.
- Textura de la capa evaporable o capa superficial (porcentajes de arena, arcilla y limo)

En la Figura 22, se presenta el ingreso de esta información de textura y espesor de suelo (Z_e) de la capa superior o evaporable.

Figura 22: Ingreso de datos de textura y espesor de suelo (Z_e) de la capa superior o evaporable

- **Opciones de programación de riego**

Se definieron cuatro opciones de programación de riego, considerando su oportunidad y volumen de agua de riego aplicado en los campos agrícolas y parcelas de cultivos de los diferentes usuarios de riego de la UNALM, estas opciones de programación de riego fueron:

- **Opción uno;** *Considera el riego para obtener un rendimiento óptimo ($MAD=p$, frecuencia y lamina de riego óptimos definido por el modelo ISAREG); es la programación de riego para evitar el estrés hídrico y obtener un rendimiento óptimo del cultivo, el objetivo es proporcionar agua al cultivo cada vez que el contenido de humedad del suelo desciende y alcanza la humedad de la fracción de agotamiento de agua en el suelo sin estrés (p), el modelo define el intervalo de riego cuando se alcanza este límite, la lámina de riego se conoce, una vez que se calcula el volumen de agua a aplicar para llenar totalmente el suelo de agua disponible hasta alcanzar la capacidad de campo. En la Figura 23, se presenta el ingreso de datos para esta opción de riego.*

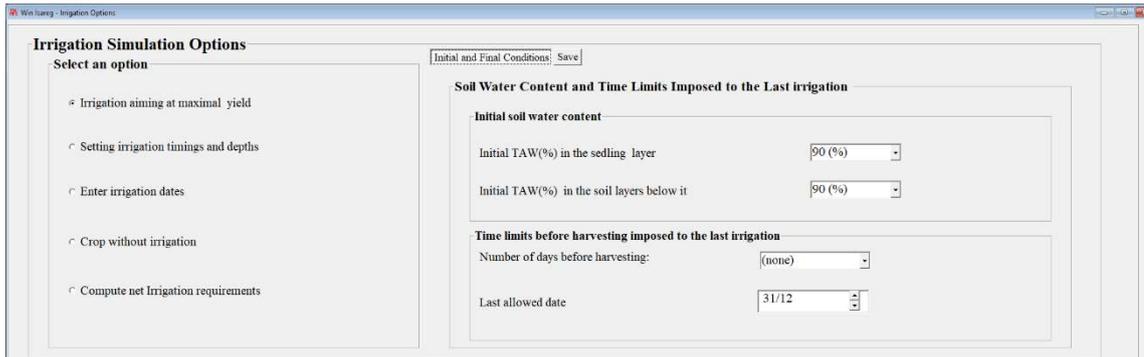


Figura 23: Definición de opción de riego uno, riego para obtener un rendimiento óptimo, MAD=p

- **Opción dos;** fijando el tiempo y la lámina de riego, que permite administrar la fracción de agotamiento ($MAD > p$); es la programación de riego que considera el estrés hídrico del cultivo, es decir cuando se aplica riego deficitario, lo que significa adoptar un riego que solo satisface parcialmente los requerimientos de riego del cultivo, el objetivo es proporcionar agua al cultivo cada vez que el contenido de humedad del suelo desciende, en un porcentaje por debajo de la humedad de la fracción de agotamiento de agua en el suelo sin estrés ($MAD > p$), el modelo define el intervalo de riego cuando se alcanza este límite. La cantidad o lámina de riego se conoce, una vez que se calcula el volumen de agua a aplicar para llenar totalmente el suelo de agua disponible, hasta la capacidad de campo, como se presenta en la Figura 24 de definición de opción de riego dos, riego fijando el tiempo y la lámina, $MAD > p$.

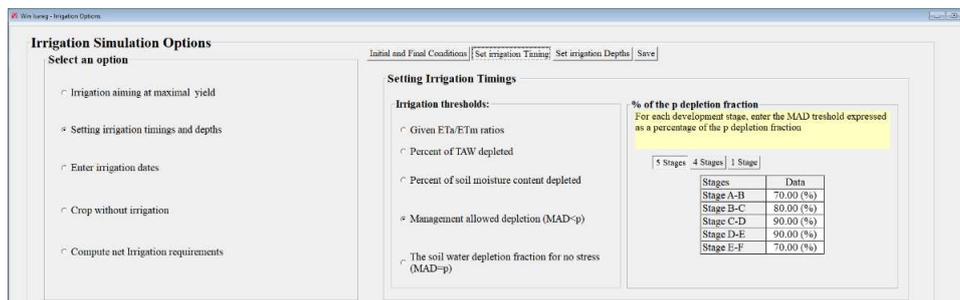


Figura 24: Definición de opción de riego dos, riego fijando el tiempo y la lámina, MAD>p

- **Opción tres:** esta opción permite obtener un rendimiento óptimo, con restricción de la frecuencia de riego ($Fr = 7$ días); es la programación de riego de la *OPCION UNO*, para evitar el estrés hídrico y obtener un rendimiento

óptimo del cultivo, con la restricción de proporcionar agua al cultivo con un intervalo de riego definido de siete (7) días, donde se dan los siguientes casos:

- i) **Cultivos con $Fr < 7$ días;** El contenido de humedad del suelo desciende por debajo de la humedad de la fracción de agotamiento de agua en el suelo sin estrés ($MAD > p$), La lamina de riego se conoce, una vez que se calcula el volumen de agua a aplicar para llenar totalmente el suelo de agua disponible hasta alcanzar la capacidad de campo.

- ii) **Cultivos con $Fr > 7$ días;** el contenido de humedad del suelo desciende y alcanza a la humedad de la fracción de agotamiento de agua en el suelo sin estrés (p), el modelo ISAREG define el intervalo de riego cuando se alcanza este límite, la lámina de riego se conoce, una vez que se calcula el volumen de agua a aplicar para llenar totalmente el suelo de agua disponible hasta alcanzar la capacidad de campo.

La restricción de la opción de riego tres, se muestra en la Figura 25 de definición de opción de riego tres.

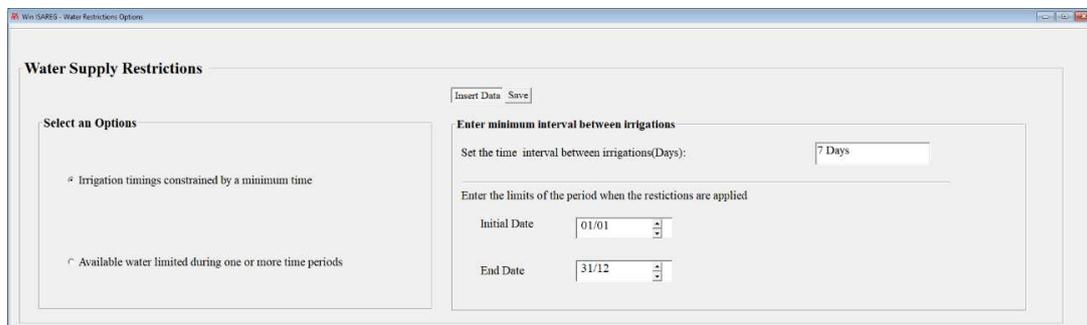


Figura 25: Definición de opción de riego tres, riego para obtener un rendimiento óptimo, con restricción ($Fr= 7$ días)

- **Opción cuatro:** para obtener un rendimiento óptimo, con restricción de la frecuencia de riego ($Fr= 15$ días); es la programación de riego de la OPCION UNO, para evitar el estrés hídrico y obtener un rendimiento óptimo del cultivo, con la restricción de proporcionar agua al cultivo con un intervalo de riego definido de siete (15) días, donde se dan los siguientes casos:
 - i) **Cultivos con $Fr < 15$ días;** El contenido de humedad del suelo desciende por debajo de la humedad de la fracción de agotamiento de agua en el suelo sin estrés ($MAD > p$), La lamina de riego se conoce, una vez que se calcula el

volumen de agua a aplicar para llenar totalmente el suelo de agua disponible hasta alcanzar la capacidad de campo.

ii) Cultivos con $Fr > 15$ días; el contenido de humedad del suelo desciende y alcanza a la humedad de la fracción de agotamiento de agua en el suelo sin estrés (p), el modelo ISAREG define el intervalo de riego cuando se alcanza este límite, la lámina de riego se conoce, una vez que se calcula el volumen de agua a aplicar para llenar totalmente el suelo de agua disponible hasta alcanzar la capacidad de campo. La restricción de la opción de riego cuatro, se muestra en la Figura 26.

Figura 26: Definición de opción de riego cuatro, riego para obtener un rendimiento óptimo, con restricción ($Fr = 15$ días)

B. Simulación de escenarios y parámetros de riego

Finalizado con la gestión de datos (meteorológicos, de cultivo, de suelo y opciones de riego), se realizó la simulación para cuatro escenarios de riego:

- *Escenario 1:* Para un rendimiento óptimo, sin restricción ($MAD = p$).
- *Escenario 2:* Considerando un estrés hídrico del cultivo ($MAD > p$).
- *Escenario 3:* Para un rendimiento óptimo, con restricción 1 ($Fr = 7$ días).
- *Escenario 4:* Para un rendimiento óptimo, con restricción 2 ($Fr = 15$ días).

Los principales parámetros de riego obtenidos, del total de campos y parcelas con cultivos y plantas de los usuarios de riego, simulada a escala diaria y consolidada a nivel mensual y por campaña fueron: Las demandas netas de agua de riego (D_n) Evapotranspiración actual (E_{ta}), Evapotranspiración máxima (E_{tm}), Caudal de diseño continuo (Q_{dc}), Intervalos de riego (I_r), Lamina total de riego (L_{tr}), Rendimiento relativo (Y_a/Y_x) y Evapotranspiración relativa (E_{ta}/E_{tm}).

3.2.3.5. Implementación de base de datos y sistematización en SIG

La data e información obtenida de los diferentes trabajos de campo y gabinete, así como los parámetros de riego, obtenida de la simulación de los diferentes escenarios con el modelo ISAREG, para el respectivo análisis y evaluación de los mismos, fue necesario implementar una base de datos en plataforma SIG, para consolidar y sistematizar, a efectos de realizar análisis espacial y consultas para obtener de manera consolidada información alfa – numérica tabular y mapas temáticos de diferentes parámetros: geométricos, de cultivos, de riego y otros.

- Área por campos y usuarios de riego.
- Métodos y eficiencias de riego
- Evapotranspiración actual (Eta)
- Evapotranspiración máxima (Etm)
- Caudal de diseño continuo (Qdc)
- Intervalos de riego (Ir)
- Lamina total de riego (Ltr)
- Rendimiento relativo (Ya/Yx)
- Evapotranspiración relativa (Eta/Etm)
- Las demandas netas de agua de riego (Dn)
- Las demandas brutas de agua de riego (Db)

3.2.3.6. Identificación de programación óptima de riego

Para identificar la programación óptima de riego, se realizó el análisis y evaluación de los diferentes escenarios simulados, principalmente entre los siguientes parámetros:

- Relación de la evapotranspiración relativa (Eta/Etm) con el rendimiento relativo (Ya/Ym).
- Relación del intervalo de riego (IR) con el rendimiento relativo (Ya/Ym).

Para el análisis y evaluación se elaboraron gráficos de barras comparativas ambos parámetros (Eta/Etm) y (Ya/Ym), así como gráficos de dispersión que permitieron determinar el grado de correlación de estos. Así también, se procedió a evaluar el efecto del intervalo de aplicación de riego (IR) a los campos de cultivo, para observar su efecto sobre el rendimiento (Ya/Ym), de igual forma se realizó un gráfico de dispersión que permitió visualizar y cuantificar comparativamente los diferentes escenarios del intervalo de riego sobre el rendimiento.

Puntualmente, para identificar y elegir programación óptima de riego, se consideró el escenario de riego, que permite obtener rendimientos máximos con aplicaciones de agua óptimas e intervalos de riegos adecuados según cultivos y campos de los usuarios.

3.2.3.7. Consolidado de suministro y oferta de agua de riego

Con la data del registro de caudales de ingreso de agua de riego, al campus de la UNALM por los canales: Parte Baja (campo ferial) y Parte Alta (frutales), registrado por la coordinación de la Comisión de Riegos de la UNALM desde noviembre del 2014 a mayo del 2018, y complementariamente con la programación y turnos internos de agua de regadío, asignado a los usuarios de riego de la UNALM, mostrado en la Tabla 13, se determinó y ajustó el suministro máximo, mínimo y promedio mensual multianual para el periodo registrado.

Tabla 13: Programación y turnos internos (horas) de agua de regadío, por los canales parte baja y parte alta para los usuarios de riego de la UNALM

Tipo	Id	Programa o Unidad	Canal parte baja (Campo Ferial)			Canal parte alta (Frutales)		
			MAR	JU E	SA B	MI E	JU E	SA B
FDA	1	Programa Frutales					5	5
	2	Programa de Hortalizas	9		9			
	3	Programa de Algodón (*)						
	4	Vivero Forestal					5	5
	5	Programa de Maíz		9				
	6	Programa de Cereales (**)		9	1			
	7	Programa Poca/Rigoranch		5				
	8	Jardín Botánico (*)						
	9	Vivero Plantas Ornamental	9					
	10	Centro de Ventas (*)						
	11	Programa de Raíces y Tuberosas			1			
	12	Facultad de Ciencias - Biología (*)						
	13	Programa de Pastos y Forrajes (*)						
	14	Facultad de Agronomía - Unidad de Riego						
	15	Facultad de Zootecnia (*)						
UNALM	1	Parques y Jardines		9				
	2	Fundo	9		9		4	
	3	Laboratorio de Suelos - Agronomía (*)						
	4	Educación Física - Estadio	5					
	5	Banco de Semen				4		
	6	Programa de Leguminosas			1			1
	7	Facultad de Ing. Agrícola (*)						
	8	Campo Ferial	4					

<<Continuación>>

LOS SUB USUARIOS QUE NO SE ENCUENTREN PROGRAMADO EN EL CUADRO, DEBERAN COORDINAR DIRECTAMENTE CON EL RECORREDOR INTERNO, A FIN DE ASIGNAR EL USO DEL AGUA, CASO CONTRARIO PROGRAMARSE LLAMANDO AL ANEXO # 120 DE LA OFICINA ADMINISTRATIVA DE SERVICIOS GENERALES. LOS USUARIOS QUE NECESITEN AGUA EN DIAS QUE NO LE CORRESPONDE, DEBERAN COORDINA Y SOLICITAR AGUA DE RIEGO EN TURNO DE LA NOCHE.

(*) Son denominados sub-usuarios de riego, (**) La asignación mayor es al campo Guayabo II-A y II-B del tomatillo y la menor asignación al campo Oficina.

FUENTE: Coordinación de riegos UNALM (2018)

Por otro lado, con la programación del consumo de agua con fines agrarios de la UNALM, de la Comisión de Usuarios Regantes de ATE, para los años del 2012 al 2019, según mostrado a en la Tabla 14, se procedió a calcular la dotación promedio mensual multianual, de agua de riego asignado a la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Tabla 14: Programación del consumo de agua con fines agrarios de la UNALM, periodo 2012 al 2019

Tomas	Días de riego	Horarios	Ingreso
Parte Baja - Campo Ferial	Martes	8 am - 5 pm	300 l/seg.
	Jueves	8 am - 5 pm	300 l/seg.
	Sábado	8 am - 5 pm	300 l/seg.
Parte Alta - Frutales	Miércoles	1 pm - 5 pm	300 l/seg.
	jueves	8 am - 5 pm	300 l/seg.
	Sábado	8 am 12 am	300 l/seg.

Fuente: Comisión de Usuarios – ATE (2019).

3.2.3.8. Balance de agua de riego

El balance de agua de riego en la UNALM fue realizado en forma mensual y anual, para lo cual se utilizó los resultados de la demanda neta del escenario de riego de máximo rendimiento MXR según modelo ISAREG, ajustadas previamente, a efectos de disponer las demandas brutas para las situaciones de eficiencias de riego actual y nueva. Por otro lado, se utilizó las ofertas de agua de riego estimadas del registro de la Comisión de Riego (CR) de la UNALM y también las ofertas de agua con fines agrarios según la programación de la Junta de Usuarios (JU) de ATE, conocido las demandas brutas actual y nuevas, así como ofertas según CR-UNALM y JU-ATE, se estructuró los siguientes cuatro balances:

- Demanda bruta con eficiencia actual – Oferta según CR-UNALM.
- Demanda bruta con eficiencia actual – Oferta según JU – ATE.
- Demanda bruta con eficiencia nueva – Oferta según CR-UNALM.
- Demanda bruta con eficiencia nueva – Oferta según JU – ATE.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ÁREA POR CAMPOS Y USUARIOS DE RIEGO

De los trabajos topográficos de campo y gabinete, (octubre 2018), se han identificado dos principales *Tipos* de usuarios de riego, denominados: FDA y UNALM; 15 sub-usuarios del tipo FDA y 8 sub-usuarios del tipo UNALM haciendo un total de 23 usuarios y sub-usuarios de riego, se muestra en la Figura 27 y Tabla 15, en detalle en el Anexo 3.

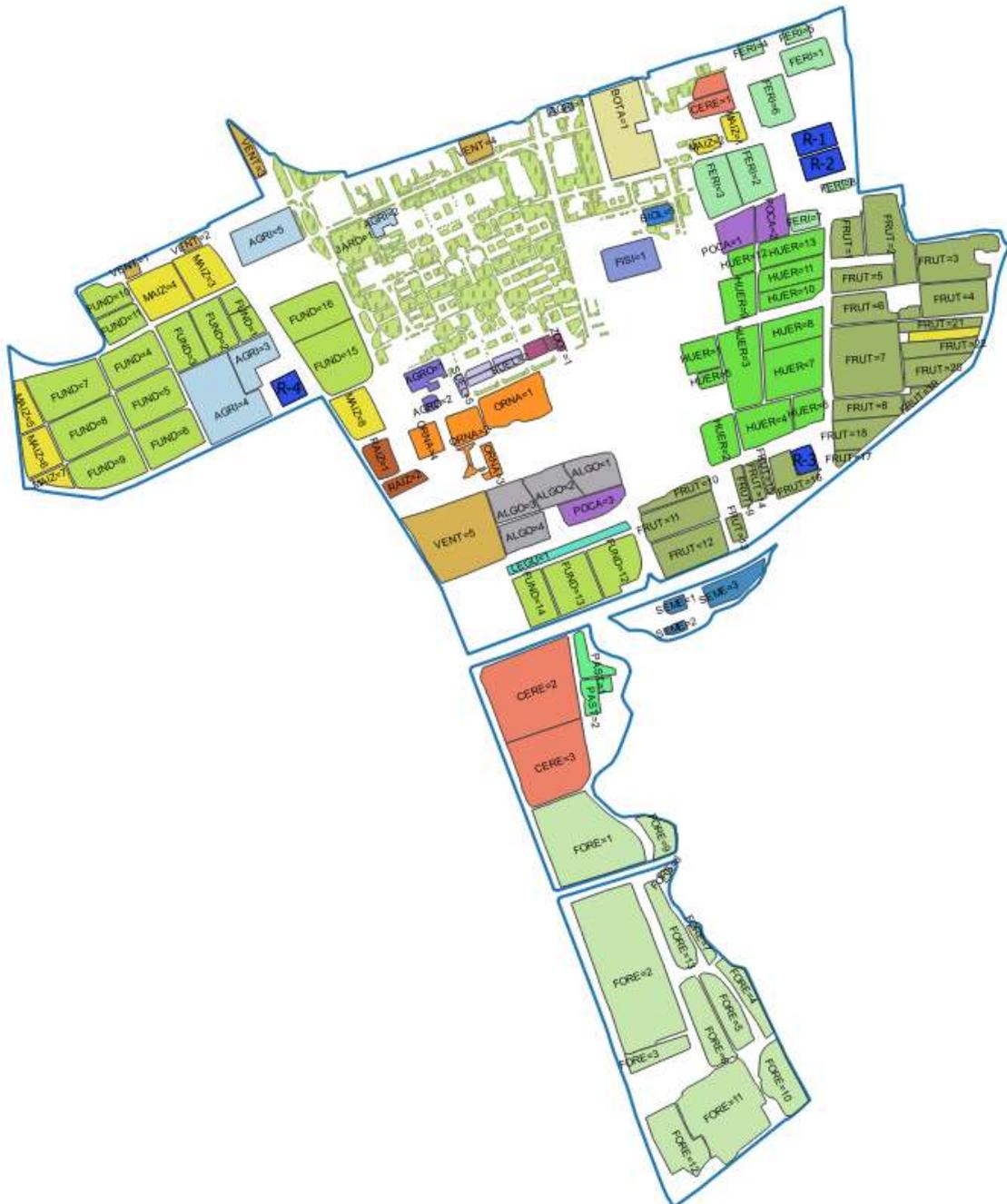


Figura 27: Mapa de identificación de campos por usuarios de riego de la UNALM

La información reportada por la URT y CR de la UNALM, indican un área de 55.80 ha y 33.27 ha para usuarios FDA y UNALM respectivamente, los que hacen un área total de 89.07 ha. Por otro lado, como resultado del levantamiento topográfico en (octubre del 2018), de las áreas de los campos de cultivo por usuarios, se reportan 70.164 ha y 40.653 ha para usuarios FDA y UNALM respectivamente, los que hacen un área total de 110.817 ha.

Tabla 15: Área por usuarios de riego de la FDA y UNALM, a octubre del 2018

Tipo	Id.	Usuarios	Área A1 (ha)*	Área A2 (ha)**	Área A2 (%)**	(A2-A1)/(A1) (%)	Total, A1 (ha)	Total, A2 (ha)
FDA	1	PROG_FRUTALES	15.00	15.949	14.39	6.32	55.800	70.164
	2	HUERTO	9.00	9.589	8.65	6.54		
	3	PROG_ALGODON	3.00	2.909	2.62	-3.04		
	4	VIVERO_FORESTAL	8.70	17.786	16.05	104.44		
	5	PROG_MAIZ	4.50	5.004	4.52	11.19		
	6	PROG_CEREALES	6.00	6.426	5.80	7.10		
	7	PROG_POCA_RIGORANCH	1.90	1.878	1.69	-1.16		
	8	JARDIN_BOTANICO	1.00	2.124	1.92	112.37		
	9	VIVERO_ORNAMENTALES	1.00	2.465	2.22	146.51		
	10	CENTRO_DE_VENTAS	2.50	3.583	3.23	43.30		
	11	PROG_RAICES_Y_TUBEROSAS	0.50	0.748	0.67	49.56		
	12	FAC_CIENCIAS_BIOLOGIA	0.15	0.221	0.20	47.53		
	13	PASTOS_Y_FORRAJES	1.75	0.739	0.67%	-57.75%		
	14	FAC_AGRONOMIA	0.61	0.476	0.43	-21.93		
	15	FAC_ZOOTECNIA	0.19	0.269	0.24	41.37		
UNALM	1	PARQUES_JARDINES	7.55	12.180	10.99	61.33	33.270	40.653
	2	FUNDO	15.07	17.332	15.64	15.01		
	3	LAB_DE_SUELOS	0.50	0.493	0.44	-1.48		
	4	EDUCACION_FISICA	1.00	0.846	0.76	-15.40		
	5	BANCO_DE_SEMEN	1.00	0.834	0.75	-16.62		
	6	PROG_LEGUMINOSAS	1.00	0.531	0.48	-46.93		
	7	FAC_ING_AGRICOLA	0.65	4.357	3.93	570.23		
	8	CAMPO FERIAL	6.50	4.081	3.68	-37.22		
TOTAL			89.07	110.817	100.00		89.070	110.817

(A1) * Área según la Comisión de Riegos UNALM del 2016 al 2019, referencial

(A2) ** Área según levantamiento topográfico del proyecto en octubre del 2018, considerado.

Las áreas de los campos de los usuarios de riego FDA y UNALM han variado, con un aumento de 25.74 por ciento y 22.19 por ciento para la FDA y UNALM respectivamente, y un aumento globalmente para ambos tipos de usuarios de 24.42 por ciento. Por otro lado, según las áreas obtenidas del levantamiento, se han identificado 4 de 23 usuarios

con áreas menores a 0.5 ha y 4 de 23 usuarios con áreas mayores a 10 ha, como se muestra en la Figura 28 de representación de áreas por usuarios de riego.

Los 5 usuarios con mayor área son: Vivero forestal, Fundo, Programa de frutales, Parques y jardines y Huerto con áreas de: 17.786 ha (16.05 por ciento), 17.332 ha (15.64 por ciento), 15.949 ha (14.39 por ciento), 12.180 ha (10.99 por ciento) y 9.589 ha (8.65 por ciento) respectivamente, que hacen un total de 72.836 ha (65.73 por ciento) del total.

Los 5 usuarios con menor área son: Facultad de Ciencias Biología, Facultad de Zootecnia, Facultad de Agronomía, Laboratorio de Suelos y Programa de Leguminosas con áreas de: 0.221 ha (0.20 por ciento), 0.269 ha (0.24 por ciento), 0.476 ha (0.43 por ciento), 0.493 ha (0.44 por ciento) y 0.531 ha (0.48 por ciento), respectivamente, que hacen un total de 1.99 ha (1.8 por ciento) del total.

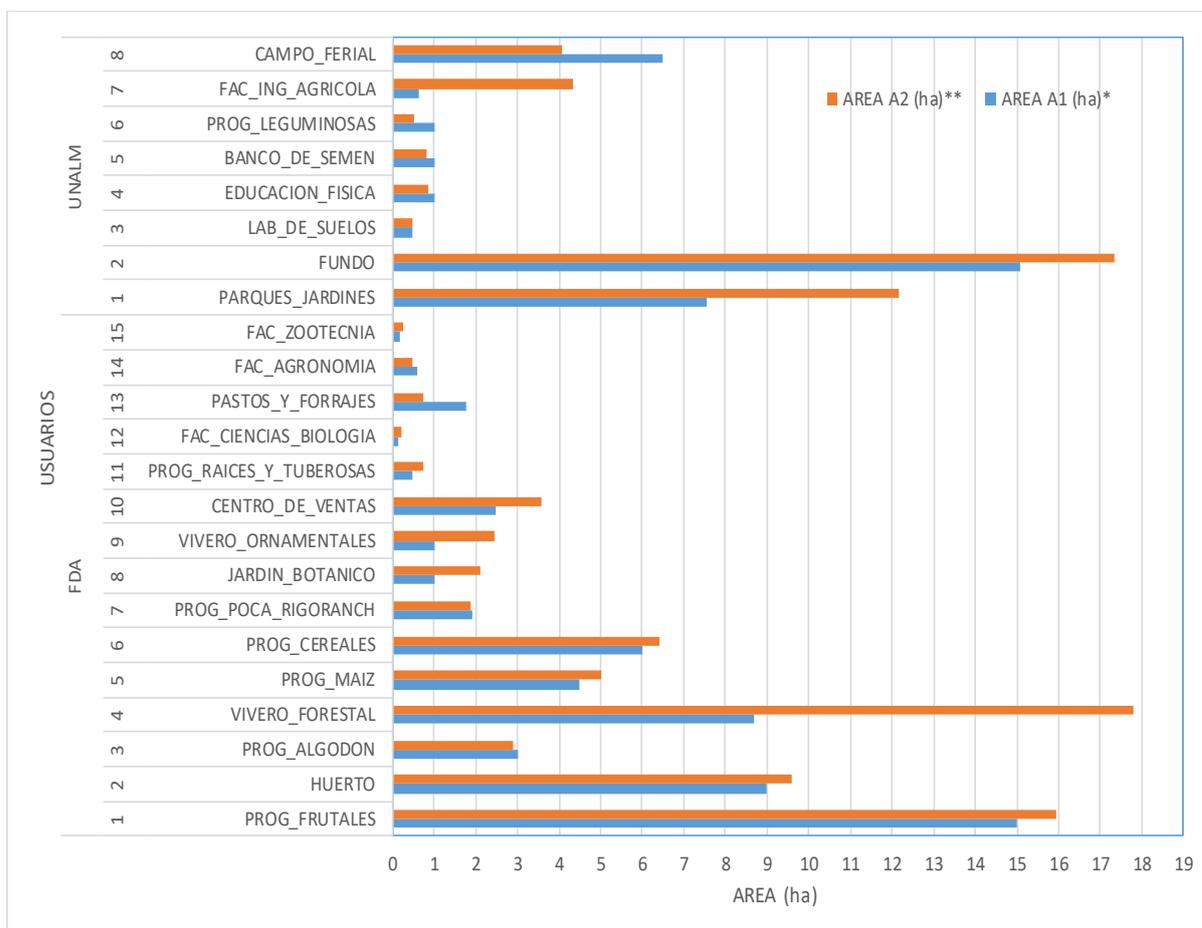


Figura 28: Representación de áreas (A1 (ha)*) y (A2 (ha) **) por usuarios de riego

4.2. MÉTODO Y EFICIENCIA DE RIEGO

Siendo las áreas (A2) consideradas del levantamiento topográfico y los métodos y eficiencias de riego por usuarios, estimados de los trabajos de campo, se identificó que la mayoría de los campos con cultivos, utilizan riego por gravedad y en menor porcentaje el riego localizado y por aspersión, el análisis se realizó en dos situaciones “*situación actual*” Ef. ACT, como se muestra en la Tabla 16 y “*situación propuesta*” Ef. NUE, como lo presentado en la Tabla 17.

- **Situación actual:** 2019, del trabajo topográfico, se identificó 75.202 ha, 17.753 ha y 17.863 ha de campos con riego por gravedad, aspersión y localizado, en porcentaje es 67.86 por ciento, 16.02 por ciento y 16.12 por ciento respectivamente (Tabla 16).

Tabla 16: Áreas, métodos y eficiencias de riego por usuarios a situación actual

Tipo	Id.	Usuarios	Área (A2) (ha)	Área ASP (ha)	Área GRA (ha)	Área LOC (ha)	Ef. ACT (%)
FDA	1	PROG_FRUTALES	15.949		15.949		0.413
	2	HUERTO	9.589			9.589	0.882
	3	PROG_ALGODON	2.909		2.909		0.413
	4	VIVERO_FORESTAL	17.786		15.444	2.342	0.475
	5	PROG_MAIZ	5.004		5.004		0.413
	6	PROG_CEREALES	6.426		5.731	0.695	0.464
	7	PROG_POCA_RIGORANCH	1.878		1.878		0.413
	8	JARDIN_BOTANICO	2.124		2.124		0.413
	9	VIVERO_ORNAMENTALES	2.465	0.646	1.636	0.183	0.545
	10	CENTRO_DE_VENTAS	3.583		3.583		0.413
	11	PROG_RAICES_Y_TUBEROSAS	0.748		0.748		0.413
	12	FAC_CIENCIAS_BIOLOGIA	0.221			0.221	0.882
	13	PASTOS_Y_FORRAJES	0.739		0.739		0.413
	14	FAC_AGRONOMIA	0.476			0.476	0.882
	15	FAC_ZOOTECNIA	0.269		0.269		0.413
UNALM	1	PARQUES_Y_JARDINES	12.180	12.180			0.784
	2	FUNDO	17.332		17.332		0.413
	3	LAB_DE_SUELOS	0.493		0.493		0.413
	4	EDUCACION_FISICA	0.846	0.846			0.784
	5	BANCO_DE_SEMEN	0.834		0.834		0.413
	6	PROG_LEGUMINOSAS	0.531		0.531		0.413
	7	FAC_ING_AGRICOLA	4.357			4.357	0.882
	8	CAMPO_FERIAL	4.081	4.081			0.784
			110.817	17.753	75.202	17.863	54.80%

- **Situación propuesta:** es la situación deseada a un futuro próximo, se estima 37.161 ha, 18.703 ha y 54.594 ha de campos con riego por gravedad, aspersión y localizado, los que hacen un porcentaje 33.53 por ciento, 16.88 por ciento y 49.59 por ciento respectivamente (Tabla 17).

Tabla 17: Áreas, métodos y eficiencias de riego por usuarios a situación propuesta

Tipo	Id.	Usuarios	Área (A2)	Área ASP	Área GRA	Área LOC	Ef. NUE
FDA	1	PROG_FRUTALES	15.949		15.398	0.551	0.429
	2	HUERTO	9.589			9.589	0.882
	3	PROG_ALGODON	2.909			2.909	0.882
	4	VIVERO_FORESTAL	17.786		14.603	3.184	0.497
	5	PROG_MAIZ	5.004			5.004	0.882
	6	PROG_CEREALES	6.426			6.426	0.882
	7	PROG_POCA_RIGORANCH	1.878			1.878	0.882
	8	JARDIN_BOTANICO	2.124		2.124		0.413
	9	VIVERO_ORNAMENTALES	2.465	0.646	1.636	0.183	0.545
	10	CENTRO_DE_VENTAS	3.583	0.100	3.400	0.083	0.434
	11	PROG_RAICES_Y_TUBEROSAS	0.748			0.748	0.882
	12	FAC_CIENCIAS_BIOLOGIA	0.221			0.221	0.882
	13	PASTOS_Y_FORRAJES	0.739	0.739			0.784
	14	FAC_AGRONOMIA	0.476			0.476	0.882
	15	FAC_ZOOTECNIA	0.269	0.111		0.158	0.841
UNALM	1	PARQUES_Y_JARDINES	12.180	12.180			0.784
	2	FUNDO	17.332			17.332	0.882
	3	LAB_DE_SUELOS	0.493			0.493	0.882
	4	EDUCACION_FISICA	0.846	0.846			0.784
	5	BANCO_DE_SEMEN	0.834			0.834	0.882
	6	PROG_LEGUMINOSAS	0.531			0.531	0.882
	7	FAC_ING_AGRICOLA	4.357			4.357	0.882
	8	CAMPO_FERIAL	4.081	4.081			0.784
			110.817	18.703	37.161	54.954	70.82%

Las eficiencias del sistema de riego se estimaron en 0.413, 0.784 y 0.882 para gravedad, aspersión y localizado respectivamente. Por otro lado, la eficiencia global del sistema de riego de la UNALM para la *situación actual* se ha estimado en 54.80 por ciento y *situación propuesta* 70.82 por ciento, detalles se muestran en las Tablas 16 y 17.

4.3. VARIABLES CLIMÁTICAS

Del proceso de data diaria multianual (2013 al 2018), de las variables climáticas de la Estación Meteorológica Alexander Von Humboldt de la UNALM, se obtuvo resultados consolidados de datos diarios de año promedio en las mismas variables, los valores promedios, máximos y mínimos, obtenidos del consolidado se muestran en las Tablas 18, 19 y 20, y su respectiva representación gráfica en la Figura 29.

Tabla 18: Valores de media recortada diarios multianual de variables climáticas, para el año promedio (2013 -2018). Estación Alexander Von Humboldt – UNALM

Variables climáticas	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Horas de Sol (hr)	5.14	5.41	6.29	7.89	4.46	1.20	0.89	1.62	3.14	4.53	4.96	5.24
Temp. Máxima (°C)	28.19	29.84	29.66	27.71	24.44	21.03	19.49	19.60	20.81	22.41	23.70	25.96
Temp. Mínima (°C)	19.52	20.48	20.24	17.85	16.58	15.47	14.68	13.90	14.26	14.89	15.65	17.44
Hum. Relativa Med. (%)	77.87	73.82	73.96	77.04	82.73	87.34	88.88	88.12	87.16	83.72	81.59	79.78
Vel. Viento (m/s)	1.25	1.18	1.11	1.01	0.78	0.27	0.69	0.83	0.93	1.12	1.14	1.20
Prec. Efectiva (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00
Hum. Relativa Min. (%)	59.47	57.44	56.97	55.27	61.21	71.63	74.19	70.41	67.20	62.76	61.05	59.42

Tabla 19: Valores máximos diarios multianual de variables climáticas, para el año promedio (2013 -2018). Estación Alexander Von Humboldt – UNALM

Variables climáticas	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Horas de Sol (hr)	8.68	7.28	8.58	9.35	8.40	3.40	3.13	5.88	5.48	6.58	7.15	7.85
Temp. Máxima (°C)	29.78	30.90	30.55	28.98	27.13	22.10	21.70	21.45	22.18	23.50	24.75	27.43
Temp. Mínima (°C)	21.43	22.10	21.43	19.08	17.23	16.28	15.48	14.43	14.68	15.68	16.75	18.73
Hum. Relativa Med. (%)	81.65	77.00	77.20	83.05	89.45	94.20	93.00	90.60	90.50	87.30	85.15	85.65
Vel. Viento (m/s)	1.57	2.23	1.41	1.28	1.09	0.61	0.91	1.14	1.07	1.40	1.40	1.47
Prec. Efectiva (mm)	0.15	0.18	0.11	0.00	0.04	0.18	0.26	0.15	0.20	0.10	0.06	0.10
Hum. Relativa Min. (%)	69.92	63.78	60.64	63.70	71.52	82.07	84.43	77.85	74.83	70.09	66.62	71.20

Tabla 20: Valores mínimos diarios multianual de variables climáticas, para el año promedio (2013 -2018). Estación Alexander Von Humboldt – UNALM

Variables climáticas	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Horas de Sol (hr)	1.80	2.98	3.48	3.83	1.08	0.00	0.00	0.00	1.20	2.85	2.25	0.75
Temp. Máxima (°C)	25.73	28.60	27.73	24.58	21.80	18.53	17.33	18.30	19.38	20.50	22.13	23.63
Temp. Mínima (°C)	17.68	19.68	18.35	16.80	15.23	14.48	13.48	12.98	13.80	13.68	14.75	15.65
Hum. Relativa Med. (%)	72.20	69.50	70.35	73.95	77.70	84.90	85.55	84.45	83.00	81.25	78.55	75.95
Vel. Viento (m/s)	0.82	0.86	0.84	0.80	0.51	0.00	0.45	0.50	0.65	0.93	0.92	0.91
Prec. Efectiva (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hum. Relativa Min. (%)	53.60	52.73	53.52	52.36	54.03	65.41	63.22	62.48	59.54	56.10	56.34	54.45

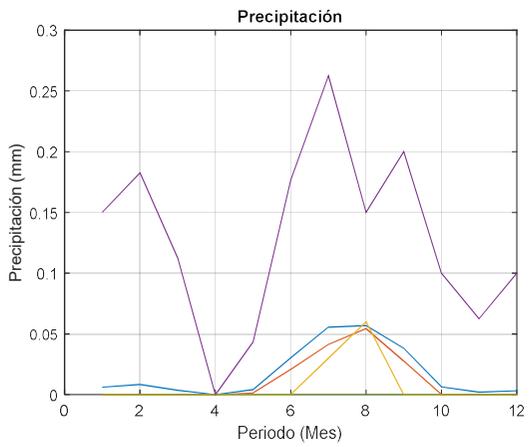
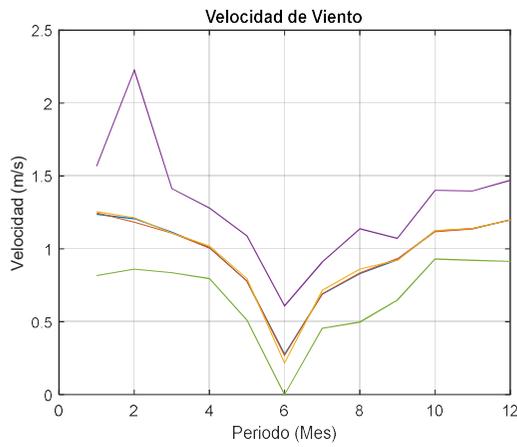
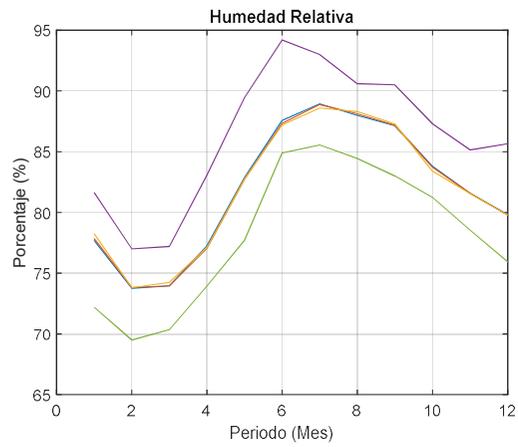
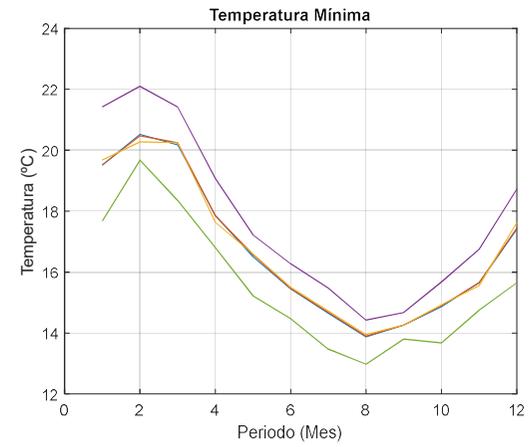
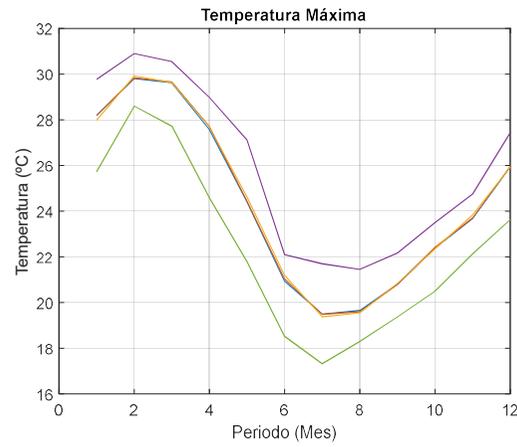
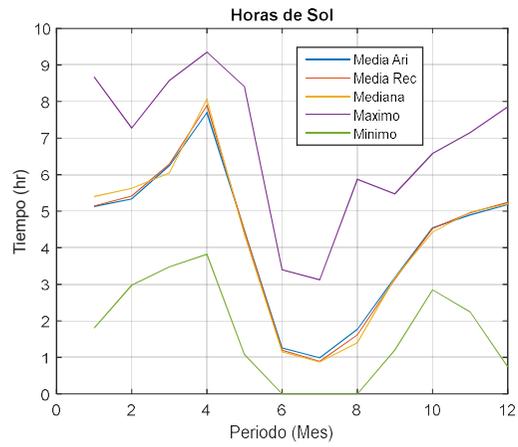


Figura 29: Distribución promedio mensual de media aritmética, media recortada, mediana, máximo y mínimo de variables climáticas para el año promedio

De los resultados, respecto a las horas de sol promedio diario, los valores mayores se dan en los meses (diciembre – abril), y los valores menores ocurren en los meses de (junio - setiembre). El mayor valor mensual se da en abril con 7.89 horas y el menor mensual en julio con 0.89 horas.

La humedad relativa promedio diario, tiene una tendencia inversa a las horas de sol y a las temperaturas, el mayor y menor valor está representado por 88.88 y 73.82 por ciento y se dan en los meses de julio y febrero respectivamente. En cambio, el máximo y mínimo valor de la humedad relativa ocurren en junio y febrero con 94.20 y 69.50 por ciento según corresponde.

Siguiendo los mismos resultados, la velocidad de viento promedio diario, tiene ligera tendencia y relación con las temperaturas y horas de sol, dándose el mayor y menor valor promedio en enero y junio con 1.25 y 0.27 m/s respectivamente. Y el máximo y mínimo valor de la velocidad de viento diario en los meses febrero y junio con 2.23 y 0.0 m/s.

Finalmente, la precipitación efectiva promedio diario es muy reducida en los meses junio – setiembre y cero en los otros meses, solo los máximos tienen cierto valor y los mínimos son cero.

4.4. CALICATAS Y PARÁMETROS DE SUELO

En la Figura 30, se presenta la ubicación de las calicatas con su respectiva área de influencia. La incorporación de los resultados de los análisis de muestras de suelo al SIG permitió obtener, mapas de calicatas y parámetros de suelos por campos y áreas de cultivo, con mayor detalle en el Anexo 1 y Anexo 3.

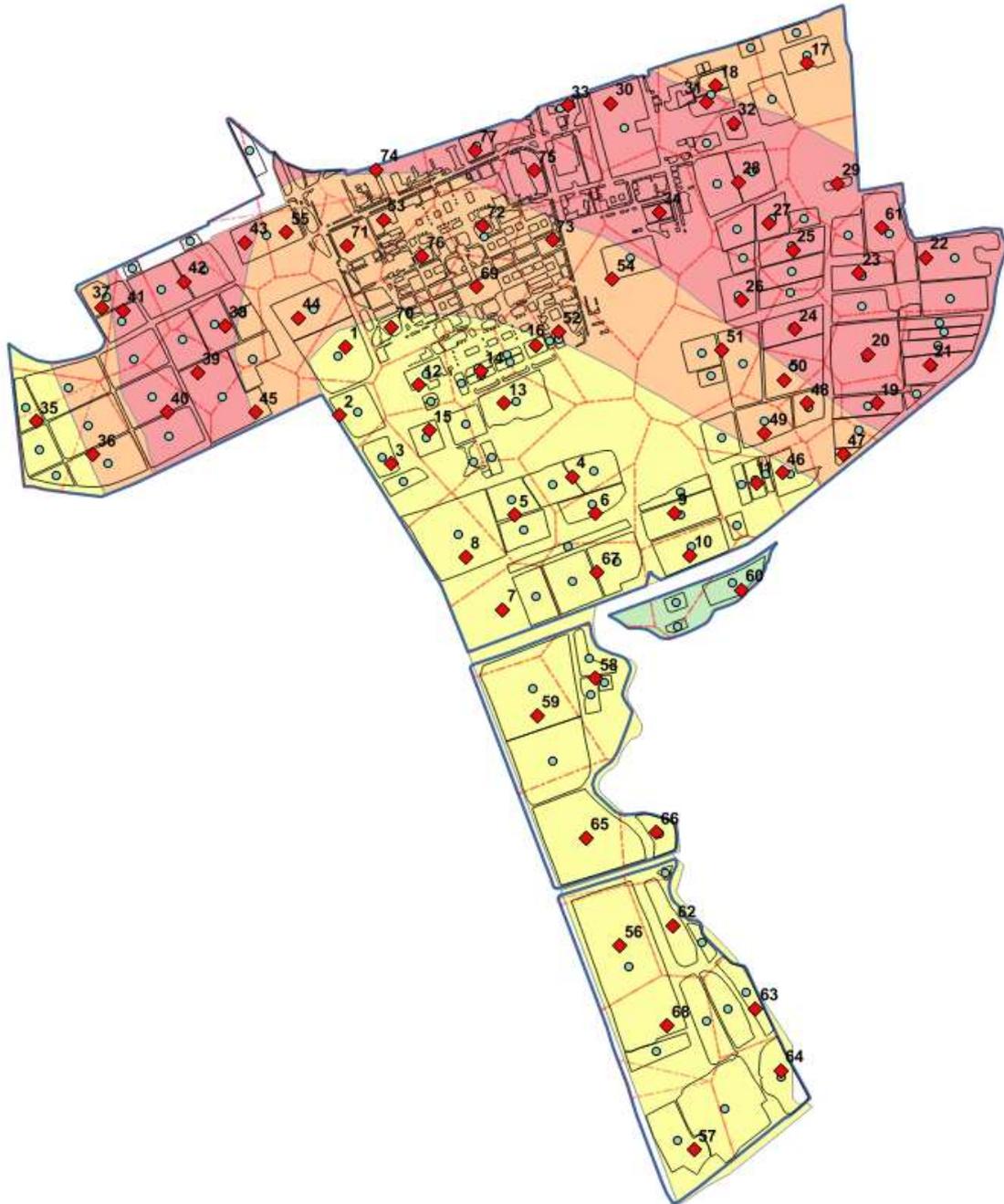


Figura 30: Mapa de ubicación de calicatas e influencia a los campos agrícolas de la UNALM

4.4.1. Parámetro físico de suelo

Según los resultados del análisis de los suelos por estratos 1, 2 y 3, se representa la clasificación de acuerdo con el diagrama triangular de clases texturales de suelos USDA, en el que se identifica por estratos la existencia de 5, 7 y 8 clases texturales, en los estratos 1, 2 y 3 respectivamente, como se puede apreciar en la Figura 31 de porcentajes de arena, limo y arcilla de texturas de suelo USDA.

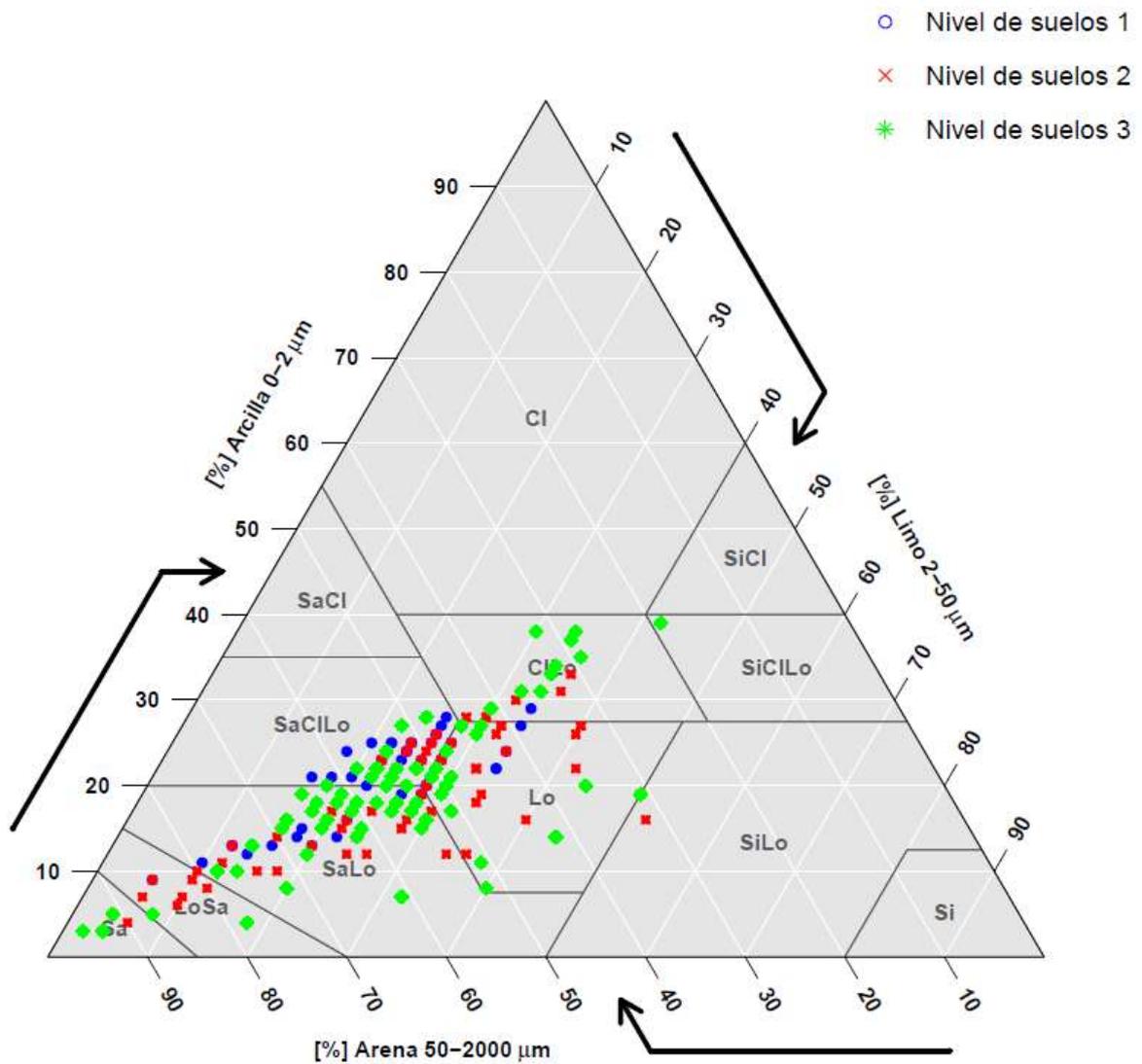


Figura 31: Porcentaje de arena, limo y arcilla en los estratos 1, 2 y 3, de los suelos de los campos agrícolas de la UNALM, representado en el diagrama triangular de clases texturales de suelo – USDA

Predominando en el estrato 1, dos clases texturales: *Franco Arcillo Arenoso* (Fr.Ar.A.) con 38 muestras y con el 49.35 por ciento y *Franco Arenoso* (Fr.A.) con 25 muestras y con el 32.47 por ciento, para el estrato 2, la clase textural predominante es: *Franco Arenoso* (Fr.A.) con 27 muestras y con el 35.06 por ciento, por último, en el estrato 3, la clase textural: *Franco Arenoso* (Fr.A.) con 30 muestras y con el 38.96 por ciento. Figura 31 y Tabla 21 de número de clases texturales de los suelos existentes.

Se puede concluir que, en las tres capas o estratos, predomina el *Franco Arenoso*, con el 32.47, 35.06 y 38.96 por ciento por estratos 1, 2 y 3 respectivamente.

Tabla 21: Número de clases texturales de los suelos existentes por estratos 1, 2 y 3 del total de 77 calicatas realizadas en la UNALM

Id.	Tipo Textura	Número de muestras			Porcentaje de muestras (%)		
		Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3
1	A.		3	4		3.90	5.19
2	A.Fr.	1	6	2	1.30	7.79	2.60
3	Fr.A.	25	27	30	32.47	35.06	38.96
4	Fr.	9	16	12	11.69	20.78	15.58
5	Fr.L.		3	1		3.90	1.30
6	L.						
7	Fr.Ar.A.	38	11	15	49.35	14.29	19.48
8	Fr.Ar.	4	11	12	5.19	14.29	15.58
9	Fr.Ar.L.			1			1.30
10	Ar.A.						
11	Ar.L.						
12	Ar.						

4.4.2. Parámetros hídricos de suelo

Los resultados de los parámetros hídricos se presentan de modo similar a la distribución de los parámetros físicos o textura de los suelos, ya que guardan una relación directa entre estos dos parámetros. Las Capacidades de Campo (CC) promedios por nivel 1, 2 y 3 respectivamente son: 18.96, 18.40 y 18.66 por ciento en porcentaje en peso (porcentaje en peso), de igual forma, los Puntos de Marchitez (PM) promedios por nivel 1, 2 y 3 respectivamente son: 10.17, 9.75 y 9.91 por ciento en porcentaje en peso (porcentaje en peso), y finalmente la Densidad Aparente (DA) promedio por estratos 1, 2 y 3 respectivamente son: 1.41, 1.41, 1.42 gr/cm³, como se muestra en el Tabla 22 de valores de parámetros hídricos y densidad aparente y Figuras 32, 33 y 34 de representación de capacidad de campo, punto de marchitez y densidad aparente.

Tabla 22: Valores de Parámetros hídricos y Densidad Aparente por texturas y estratos 1, 2 y 3 de los campos agrícolas y áreas con cultivo de la UNALM

Id.	Tipo Textura	Capacidad de campo (% W)			Punto de marchitez (%W)			Densidad aparente (gr/cc)		
		Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3
1	A.		7.59	6.95		2.24	1.78		1.63	1.65
2	A.Fr.	9.00	9.96	9.74	3.23	3.89	3.74	1.81	1.63	1.59
3	Fr.A.	16.09	16.74	16.24	8.20	8.66	8.31	1.48	1.46	1.49
4	Fr.	21.03	20.97	20.00	11.57	11.53	10.92	1.38	1.32	1.39
5	Fr.L.		23.69	22.77		13.24	12.66		1.24	1.41
6	L.									
7	Fr.Ar.A.	20.03	19.81	20.72	10.94	10.80	11.37	1.38	1.38	1.37
8	Fr.Ar.	24.54	23.43	25.15	13.77	13.07	14.16	1.31	1.29	1.25
9	Fr.Ar.L.			27.09			15.37			1.16
10	Ar.A.									
11	Ar.L.									
12	Ar.									
		18.96	18.40	18.66	10.17	9.75	9.91	1.41	1.41	1.42

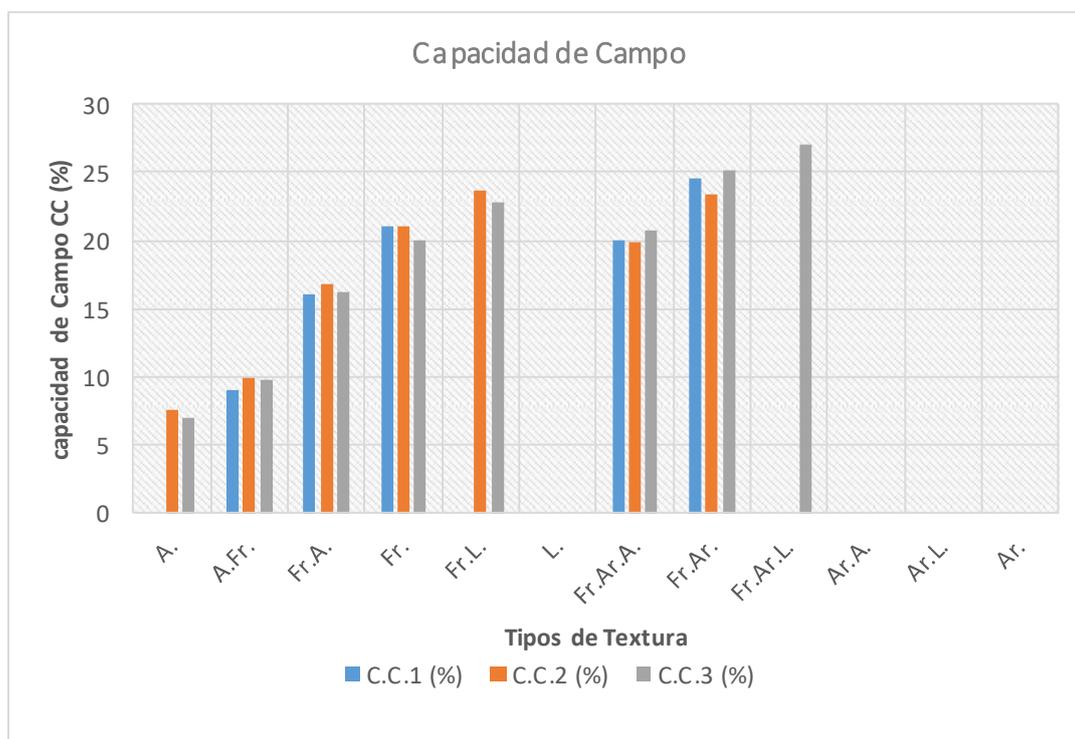


Figura 32: Representación de la Capacidad de Campo, por texturas y estratos 1, 2 y 3 de los campos agrícolas y áreas con cultivo de la UNALM

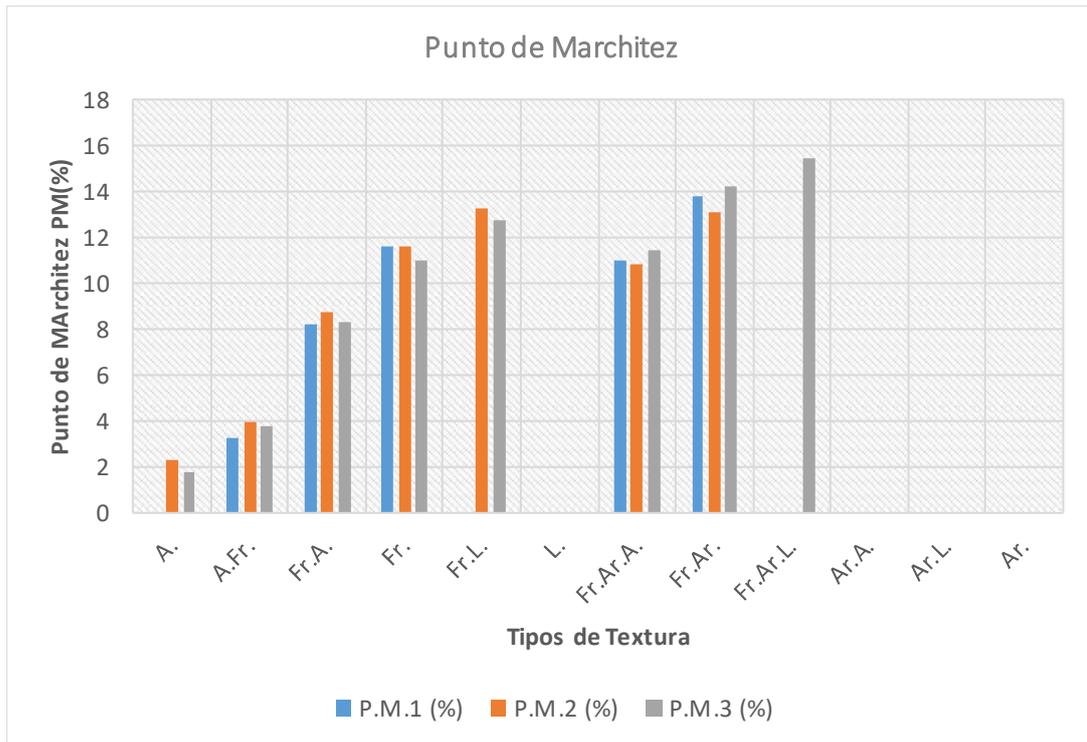


Figura 33: Representación del Punto de Marchitez, por texturas y estratos 1, 2 y 3 de los campos agrícolas y áreas con cultivo de la UNALM

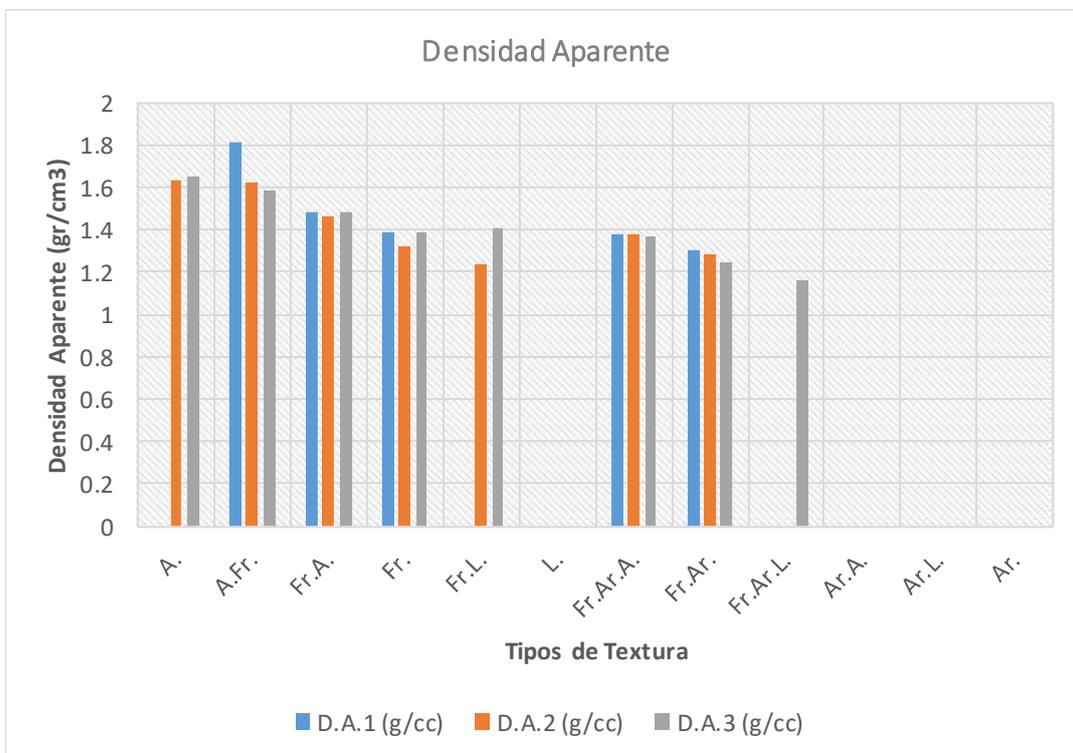


Figura 34: Representación de la Densidad Aparente, por texturas y estratos 1, 2 y 3 de los campos agrícolas y áreas con cultivo de la UNALM

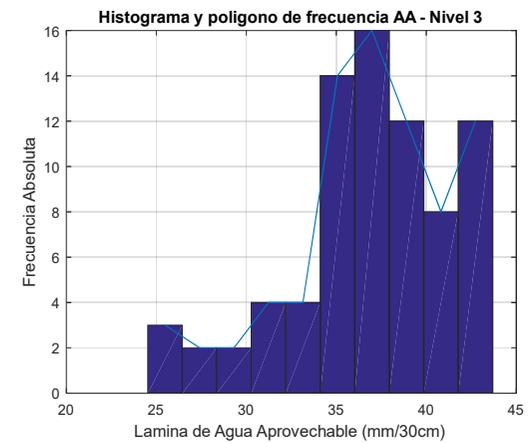
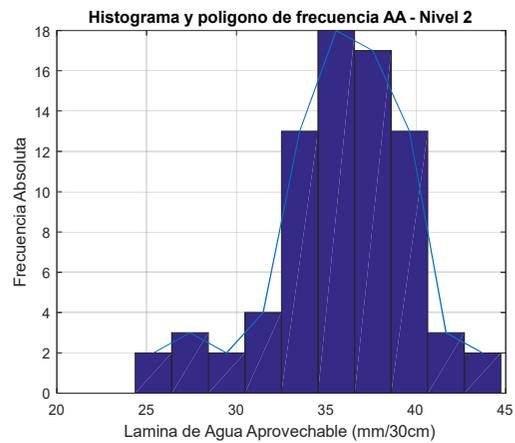
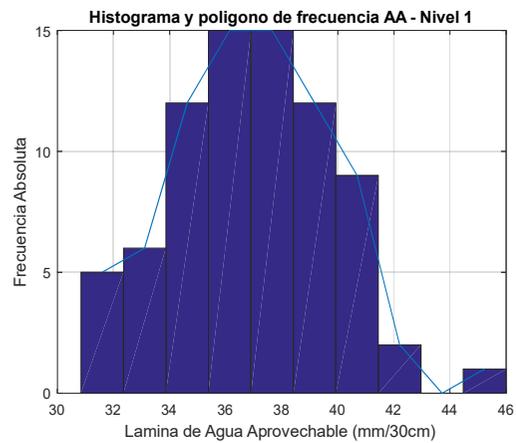
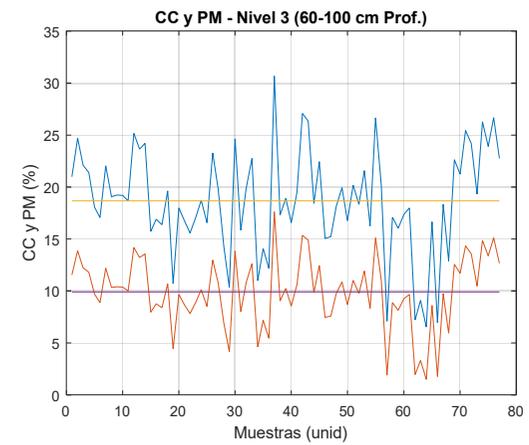
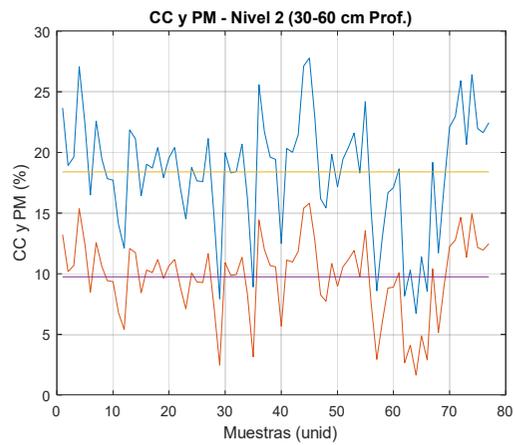
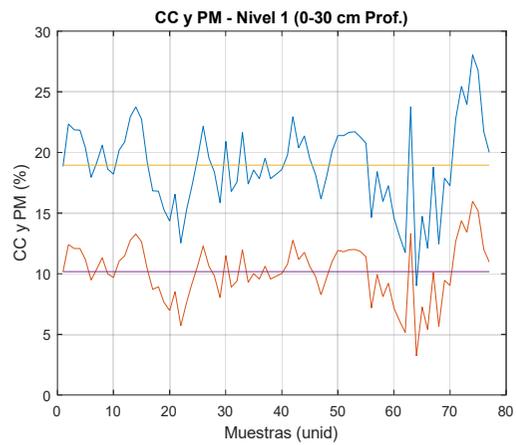


Figura 35: Representación de los parámetros hídricos: Capacidad de campo (CC), Punto de marchitez (PM) y Agua Total Disponible (ATD) de los suelos por estratos de muestreo

Por otro lado, en la Figura 35 de representación de capacidad de campo, punto de marchitez, densidad aparente y agua disponible total; la capacidad de campo (CC) en los tres estratos 1, 2 y 3, tienen una relación directa con el punto de marchitez (PM), siendo aproximadamente la CC el doble del PM, así los valores medios de CC son: 18.96, 18.40 y 18.66 por ciento para los estratos 1, 2 y 3 consecutivamente y para el PM son: 10.17, 9.75 y 9.91 por ciento respectivamente.

Así mismo, en la Figura 35 se presentan los histogramas y polígonos de frecuencia de la lámina de agua total disponible (ATD) para una profundidad de suelo de 30 cm por estratos, 1, 2 y 3, por lo que se puede estimar que **para el estrato 1**; en las 5 barras de mayor frecuencia (12, 15, 15, 12 y 9) se hallan 63 muestras que representan el **81.82 por ciento** con una lámina de ATD de 34.6 a 40.7 mm/30 cm; similarmente **para el estrato 2** en las 4 barras de mayor frecuencia (13, 18, 17 y 13) se localiza 61 muestras que representan el **79.22 por ciento** con una lámina de ATD de 33.5 a 39.6 mm/ 30 cm, por último, **para el estrato 3** en las 5 barras de mayor frecuencia (14, 16, 12, 8 y 12) se encuentran 62 muestras que representan el **80.52 por ciento** con una lámina de ATD de 35.1 a 42.7 mm/ 30cm.

Po lo que se puede concluir, que alrededor del 80 por ciento de muestras de suelo disponen de una capacidad de almacenamiento de agua aprovechable cercano a 38 mm/ 30 cm de profundidad de suelo, siendo el suelo de la UNALM un suelo con buena capacidad de almacenamiento.

4.5. PARÁMETROS DE CULTIVO Y RIEGO

De la simulación con el modelo ISAREG, se ha obtenido los siguientes resultados de los parámetros de cultivo y riego como: Evapotranspiración actual (Eta), Evapotranspiración máxima (Etm), Caudal maximo continuo (Qdc), Intervalo de riego (Ir), Lamina total de riego (Ltr), Relación evapotranspiración (Eta/Etm), Relación de rendimiento del cultivo (Ya/Ym), los mismos conforme a los siguientes escenarios de riego:

- *Escenario 1 (MXR)*: Para un máximo rendimiento, sin restricción (MAD = p).
- *Escenario 2 (MAD)*: Considerando un estrés hídrico del cultivo (MAD > p).
- *Escenario 3 (FR7)*: Para un rendimiento óptimo, con restricción (Fr = 7).
- *Escenario 4 (FR15)*: Para un rendimiento óptimo, con restricción (Fr = 15).

4.5.1. Evapotranspiración actual (Eta)

De los resultados de la evapotranspiración actual, determinada por el modelo ISAREG a nivel de campo y etapas de crecimiento del cultivo, según los consolidados de la Eta específica por usuario y por escenarios simulados, se tiene: para el escenario de máximo rendimiento (MXR), los cinco usuarios identificados con unidades y campo con mayor evapotranspiración actual son: *Parques y jardines*, *Campo ferial*, *Educación física*, *Jardín botánico* y *Programa de maíz*, con valores mayores a 800 y menores a 900 mm/época. y en el mismo escenario MXR los cinco usuarios con menor evapotranspiración actual son: *Programa de frutales*, *Programa de algodón*, *Centro de ventas*, *Facultad de agronomía* y *Programa de leguminosas*, con valores mayores a 475 y menores a 620 mm/época, existe respectivamente una reducción global de la Eta en los escenarios MAD, FR7 y FR15 de 4 por ciento, 7.3 por ciento y 24.2 por ciento con relación al escenario MXR, valores que se muestran en la Tabla 23 y Figura 36.

En el valle de Chicama - Perú Huatay *et al.* (2019), en su trabajo de Evapotranspiración y requerimientos de agua para la programación de riego de los cultivos caña de azúcar, maíz y espárrago, utilizando el modelo CROPWAT-V8 determinaron los requerimientos de agua para el maíz alcanzando valores de 1.37 en la etapa inicial a 6.49 mm/día en la etapa media, además acumuló un total de 546.3 mm/época, con época de riego cada 10 días en un total de 130 días durante su periodo vegetativo, equivalente a 5.463 m³/ha. Comparado con el valor encontrado en la Molina, la Eta obtenido con ISAREG según escenarios FR7 y FR15 son 805.97 y 588.91 mm/época, cultivos de mayor periodo vegetativo y de 5 a 6 meses, diferente al estudio realizado por Huatay *et al.* (2019).

En la Molina - Perú Ascencios *et al.* (2019), en su investigación coeficientes de riego del césped americano en condiciones de estrés hídrico utilizando riego por goteo subterráneo, reportaron una ETo acumulada anual de 827.56 mm, comparado con los valores de Eta obtenidos en los usuarios Parques y jardines, Campo ferial y Educación física en el escenario de máximo rendimiento se tiene un valor promedio de 896.00 mm/época, ligeramente elevado por ser una evapotranspiración actual que se ajusta a las condiciones ambientales del entorno próximo, a diferencia de la ETo presentada por Ascencios *et al.* (2019), que es más global, a pesar de ser climáticamente en mismo lugar de investigación.

Por otro lado, al noreste de Mongolia, China. Wu *et al.* (2015) en su trabajo de investigación de balance hídrico del suelo en maíz, reportaron una ETc actual de 360 y 434 mm en una estación de 5 meses de mayo a setiembre en dos diferentes años. En contraste para el Programa de Maíz de la Molina, los valores de Evapotranspiración actual Eta oscilan en los valores de 846.08, 814.92, 805.97 y 588.91 mm, para los cuatro escenarios simulados, según la Tabla 23, que corresponden a valores acumulados de dos épocas diferentes de siembra (todo el año campaña de verano e invierno), los valores de Eta reportados por Wu *et al.* (2015), son prácticamente duplicados con los obtenidos en la presente investigación en la Molina, por tratarse justamente de dos campañas.

Tabla 23: Evapotranspiración actual Eta (mm/época), por usuarios y escenarios de riego MXR, MAD, FR7 y FR15

Tipo	Id.	Usuarios	Área (A2) (ha)	Evapotranspiración actual Eta (mm/época/ha)			
				MXR	MAD	FR7	FR15
FDA	1	PROG_FRUTALES	15.949	580.84	563.75	578.72	570.80
	2	HUERTO	9.589	751.89	714.30	653.86	473.09
	3	PROG_ALGODON	2.909	615.11	605.59	615.11	615.11
	4	VIVERO_FORESTAL	17.786	632.44	603.84	629.23	619.96
	5	PROG_MAIZ	5.004	846.08	814.92	805.97	588.91
	6	PROG_CEREALES	6.426	762.81	736.20	719.59	538.50
	7	PROG_POCA_RIGORANCH	1.878	743.98	719.89	732.62	672.37
	8	JARDIN_BOTANICO	2.124	896.00	858.50	896.00	896.00
	9	VIVERO_ORNAMENTALES	2.465	704.62	676.32	694.84	676.47
	10	CENTRO_DE_VENTAS	3.583	601.50	578.66	597.17	585.55
	11	PROG_RAICES_Y_TUBEROSAS	0.748	733.60	705.37	715.88	574.80
	12	FAC_CIENCIAS_BIOLOGIA	0.221	776.00	749.60	700.70	492.20
	13	PASTOS_Y_FORRAJES	0.739	775.26	749.69	751.08	646.54
	14	FAC_AGRONOMIA	0.476	522.78	500.29	514.02	482.24
	15	FAC_ZOOTECNIA	0.269	753.52	720.38	721.81	612.83
UNALM	1	PARQUES_Y_JARDINES	12.180	896.00	855.90	718.70	431.00
	2	FUNDO	17.332	704.93	677.76	655.03	488.47
	3	LAB_DE_SUELOS	0.493	654.61	624.64	615.51	456.26
	4	EDUCACION_FISICA	0.846	896.00	855.40	705.00	416.10
	5	BANCO_DE_SEMEN	0.834	799.06	769.68	743.31	527.26
	6	PROG_LEGUMINOSAS	0.531	475.20	451.10	439.30	321.80
	7	FAC_ING_AGRICOLA	4.357	658.92	631.80	625.36	495.91
	8	CAMPO_FERIAL	4.081	896.00	856.11	724.26	436.90
FDA - UNALM			110.817	715.06	686.49	663.18	541.89

Para las condiciones de Asia Central Cholpankulov *et al.* (2008), en su investigación de calibración y validación del modelo de simulación de programación de riego ISAREG, en la localidad de la Estepa del Hambre, con observaciones de campos de algodón durante 4 años, para el coeficiente del cultivo (K_c) y factor de agotamiento hídricos del cultivo sin estrés (p), los indicadores de ajuste y bondad mostraron buenos resultados y los (K_c) y (p) fueron similares a los recomendados por Allen *et al.* (2006).

Según Cholpankulov *et al.* (2008), para la localidad de la Estepa del Hambre, la evapotranspiración de cultivo E_{Tc} observada media multianual para las 4 estaciones fue de 696.50 mm y simulada con ISAREG de 678.25 mm, con variación de 2.6 por ciento. A diferencia del trabajo de Cholpankulov *et al.* (2008), en el Programa de algodón de la Molina para los valores de E_{ta} obtenidos para los cuatro escenarios simulados MXR, MAD, FR7 y FR15 está al redor de 615.11 mm, menor en 11.7 por ciento al observados y 9.3 por ciento al simulados, comparado con la localidad de la Estepa del Hambre, considero por encontrarse la Molina a una ligera y menor altitud así como presentar precipitaciones casi cero en comparación con la localidad de la Estepa del Hambre.

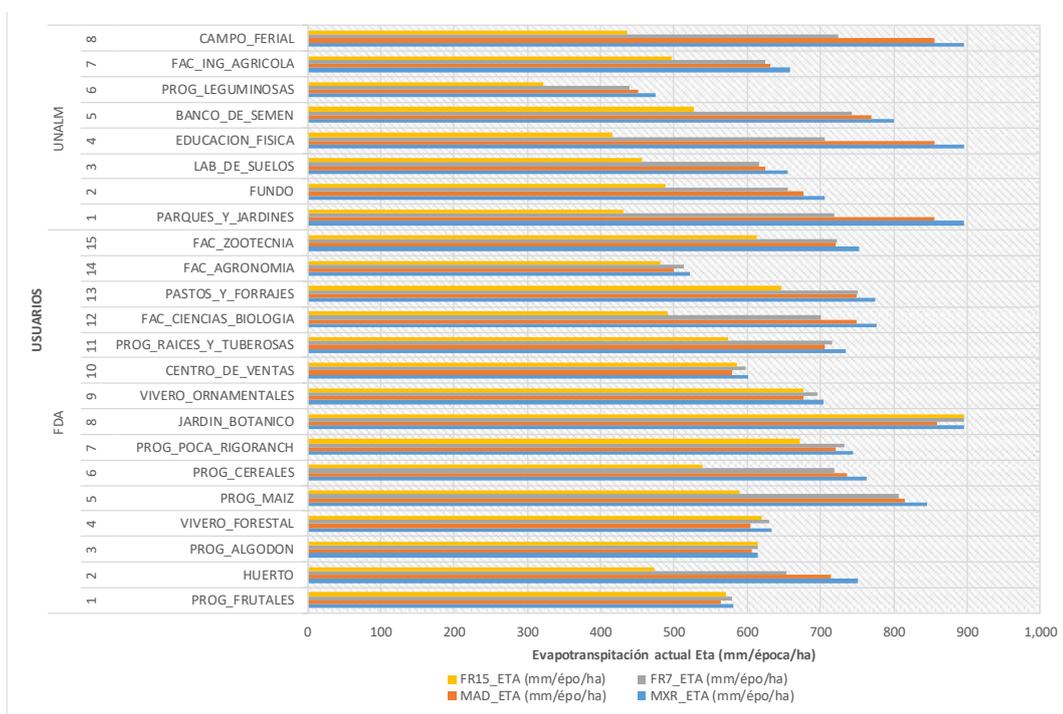


Figura 36: Representación de la evapotranspiración actual E_{ta} (mm/época), por usuarios y escenarios de riego

En Lima - Perú Pérez-Iriarte *et al.* (2021), en su investigación dosis de riego y coeficiente del cultivo (K_c) en la producción del frijol, evaluado en un periodo de cuatro meses bajo diseño experimental completamente al azar (DCA) con cuatro repeticiones y tres

tratamientos T1 (100 por ciento de ETc), T2 (80 por ciento de ETc) y T3 (60 por ciento de ETc), obtuvieron un valor promedio total de ETo en 268.2 mm/época, valor equivalente al obtenido en nuestro trabajo de investigación con valores de Eta en 475.2, 451.1, 439.3 y 321.80 mm/época, debido los valores simulados fueron para dos campañas de similar periodo.

4.5.2. Evapotranspiración máxima (Etm)

Los resultados de la evapotranspiración máxima determinada, por el modelo ISAREG fue a nivel de unidad de campo y etapas de crecimiento del cultivo, los consolidados de la Etm específica por usuario y por escenarios simulados, se muestran en la Tabla 24 y Figura 37.

Tabla 24: Evapotranspiración máxima Etm (mm/época), por usuarios y escenarios de riego MXR, MAD, FR7 y FR15

Tipo	Id.	Usuarios	Área (A2) (ha)	Evapotranspiración máxima Etm (mm/época/ha)			
				MXR	MAD	FR7	FR15
FDA	1	PROG_FRUTALES	15.949	580.84	580.84	580.84	580.84
	2	HUERTO	9.589	751.89	751.89	751.89	751.89
	3	PROG_ALGODON	2.909	615.11	615.11	615.11	615.11
	4	VIVERO_FORESTAL	17.786	632.44	632.44	632.44	632.44
	5	PROG_MAIZ	5.004	846.08	846.08	846.08	846.08
	6	PROG_CEREALES	6.426	762.81	762.81	762.81	762.81
	7	PROG_POCA_RIGORANCH	1.878	743.98	743.98	743.98	743.98
	8	JARDIN_BOTANICO	2.124	896.00	896.00	896.00	896.00
	9	VIVERO_ORNAMENTALES	2.465	704.62	704.62	704.62	704.62
	10	CENTRO_DE_VENTAS	3.583	601.50	601.50	601.50	601.50
	11	PROG_RAICES_Y_TUBEROSAS	0.748	733.60	733.60	733.60	733.60
	12	FAC_CIENCIAS_BIOLOGIA	0.221	776.00	776.00	776.00	776.00
	13	PASTOS_Y_FORRAJES	0.739	775.26	775.26	775.26	775.26
	14	FAC_AGRONOMIA	0.476	522.78	522.78	522.78	522.78
	15	FAC_ZOOTECNIA	0.269	753.52	753.52	753.52	753.52
UNALM	1	PARQUES_Y_JARDINES	12.180	896.00	896.00	896.00	896.00
	2	FUNDO	17.332	704.93	704.93	704.93	704.93
	3	LAB_DE_SUELOS	0.493	654.61	654.61	654.61	654.61
	4	EDUCACION_FISICA	0.846	896.00	896.00	896.00	896.00
	5	BANCO_DE_SEMEN	0.834	799.06	799.06	799.06	799.06
	6	PROG_LEGUMINOSAS	0.531	475.20	475.20	475.20	475.20
	7	FAC ING AGRICOLA	4.357	658.92	658.92	658.92	658.92
	8	CAMPO FERIAL	4.081	896.00	896.00	896.00	896.00
FDA - UNALM			110.817	715.06	715.06	715.06	715.06

Cabe indicar que los valores por usuarios de la evapotranspiración máxima para los 4 escenarios, MXR, MAD, FR7 y FR15 son similares, los cinco usuarios con unidades y campo con mayor evapotranspiración máxima identificados son: *Parques y jardines, Campo ferial, Educación física, Jardín botánico y Programa de maíz*, con valores mayores a 800 y menores a 900 mm/época. y por otro lado los cinco usuarios con menor evapotranspiración máxima son: *Programa de frutales, Programa de algodón, Centro de ventas, Facultad de agronomía y Programa de leguminosas*, con valores mayores a 475 y menores a 620 mm/época.

Así mismo, por usuarios y globalmente no existe variación de la ETM en los escenarios MAD, FR7 y FR15 en relación al escenario MXR.

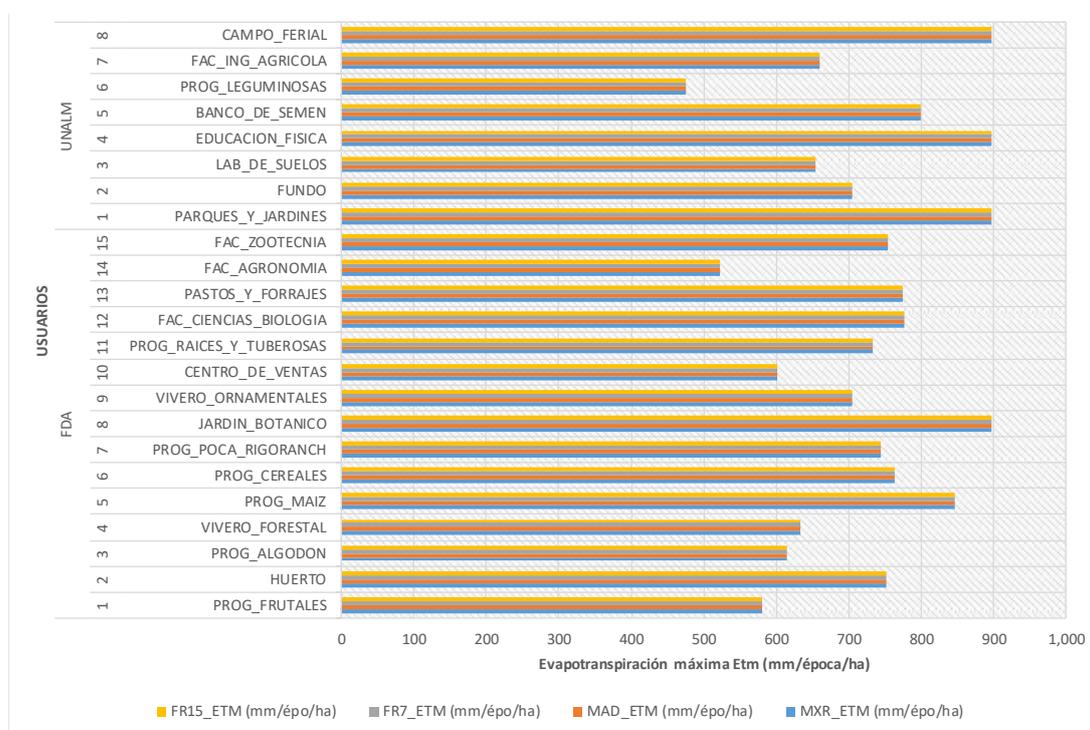


Figura 37: Representación de la evapotranspiración máxima Etm (mm/época), por usuarios y escenarios de riego

4.5.3. Caudal diseño continuo (Qdc)

Los resultados del caudal diseño continuo (Qdc) reportados, por el modelo ISAREG fue a nivel de unidad de campo y etapas de crecimiento del cultivo, los consolidados del Qdc por usuario y por escenarios simulados, se presentan en la Tabla 25 y Figura 38.

Se puede observar que los valores por usuarios del Qdc para los 4 escenarios, MXR, MAD, FR7 y FR15 son diferentes y consecutivamente con tendencia a reducción, a excepción de los usuarios: *Programa de algodón* y *Jardín botánico*, que son similares en tres escenarios MXR, FR7 y FR15, los cinco usuarios con mayor QDC en el escenario MXR son: *Programa de algodón*, *Parques y jardines*, *Educación física*, *Banco de semen* y *Campo ferial*, con valores de 0.494, 0.45, 0.444, 0.436 y 0.454 l/s. respectivamente, y por otro lado los cinco usuarios con menor QDC en el mismo escenario MXR son: *Programa de frutales*, *Vivero forestal*, *Vivero ornamentales*, *Centro de ventas* y *Facultad de agronomía*, con valores de 0.290, 0.289, 0.314, 0.270 y 0.289 l/s., así mismo existe una variación global del QDC en los escenarios MAD, FR7 y FR15 en relación al escenario MXR de 2.7 por ciento, -11.5 por ciento y -30.7 por ciento correspondientemente.

Tabla 25: Caudal máximo continuo Qdc (l/s), por escenarios de simulación y usuarios

Tipo	Id.	Usuarios	Área (A2) (ha)	Caudal máximo continuo Qmc (l/s/ha)			
				MXR	MAD	FR7	FR15
FDA	1	PROG_FRUTALES (-)	15.949	0.290	0.310	0.289	0.282
	2	HUERTO	9.589	0.402	0.417	0.336	0.231
	3	PROG_ALGODON (+)	2.909	0.494	0.482	0.494	0.494
	4	VIVERO_FORESTAL (-)	17.786	0.289	0.314	0.287	0.279
	5	PROG_MAIZ	5.004	0.433	0.464	0.415	0.283
	6	PROG_CEREALES	6.426	0.377	0.386	0.361	0.267
	7	PROG_POCA_RIGORANCH	1.878	0.398	0.367	0.386	0.318
	8	JARDIN_BOTANICO	2.124	0.399	0.385	0.399	0.399
	9	VIVERO_ORNAMENTALES (-)	2.465	0.314	0.326	0.304	0.292
	10	CENTRO_DE_VENTAS (-)	3.583	0.270	0.276	0.265	0.258
	11	PROG_RAICES_Y_TUBEROSAS	0.748	0.369	0.371	0.357	0.280
	12	FAC_CIENCIAS_BIOLOGIA	0.221	0.397	0.369	0.347	0.230
	13	PASTOS_Y_FORRAJES	0.739	0.407	0.378	0.372	0.270
	14	FAC_AGRONOMIA (-)	0.476	0.289	0.272	0.283	0.250
	15	FAC_ZOOTECNIA	0.269	0.423	0.466	0.403	0.295
UNALM	1	PARQUES_Y_JARDINES (+)	12.180	0.450	0.419	0.275	0.140
	2	FUNDO	17.332	0.406	0.439	0.376	0.258
	3	LAB_DE_SUELOS	0.493	0.388	0.416	0.366	0.248
	4	EDUCACION_FISICA (+)	0.846	0.444	0.411	0.267	0.134
	5	BANCO_DE_SEMEN (+)	0.834	0.436	0.461	0.397	0.250
	6	PROG_LEGUMINOSAS	0.531	0.330	0.372	0.320	0.219
	7	FAC_ING_AGRICOLA	4.357	0.371	0.376	0.341	0.250
	8	CAMPO_FERIAL (+)	4.081	0.454	0.414	0.278	0.142
FDA - UNALM			110.817	0.370	0.380	0.327	0.256

<<Continuación>>

(+) 5 Usuarios con el mayor valor de QDC
 (-) 5 Usuarios con el menor valor de QDC

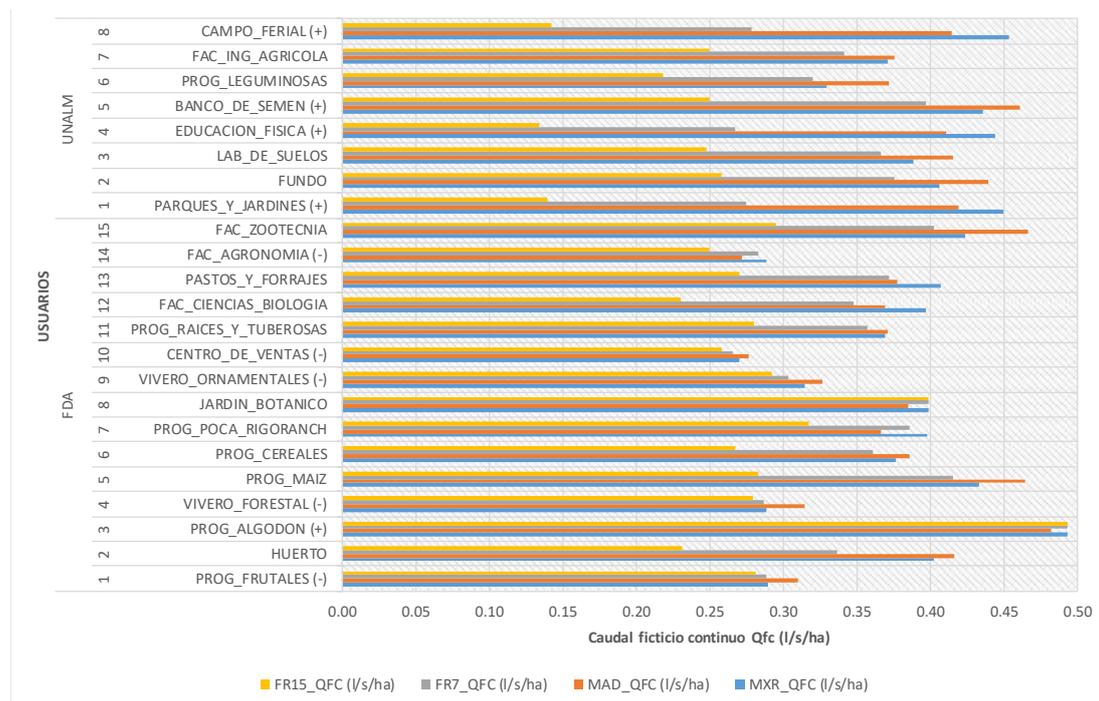


Figura 38: Representación de la variación del caudal máximo continuo por usuario y escenarios

4.5.4. Intervalo de Riego (Ir)

Los intervalos de riego (Ir), obtenidos del modelo ISAREG a nivel unidad de campo y etapas de crecimiento del cultivo, los consolidados del Ir por usuarios y por escenario simulado, los detalles se indican en las Tablas 26 y 27 y Figura 39.

Se puede apreciar que los valores por usuarios del IR para los escenarios, MXR, MAD, FR7 y FR15 en su mayoría son diferentes y con tendencia al incremento. Tomando como base el escenario MXR, los intervalos de riego en el escenario MAD se ha incrementado en valores de: 1, 2 y 7 días valores mínimo, promedio y máximo respectivamente; por otro lado, en los escenarios FR7 y FR15 se han identificado 6 usuarios: *Programa de frutales, Programa de algodón, Vivero forestal, Jardín botánico, Vivero ornamentales y Centro de ventas*, que disponen el IR similar al escenario base MXR, así mismo en el escenario MXR se observan 13 usuarios, que tienen intervalo de riego menor a 7 días y consecuentemente menor a 15 días, en los que sus IR en los escenarios FR7 y FR15 son 7 y 15 días respectivamente, finalmente se identifican 4 usuarios en el escenario base MXR: *Programa poca/rigoranch, Programa raíces y tuberosas, Pastos y forrajes y*

Facultad de agronomía, que disponen un IR menor a 15 días, en los que su IR en el escenario FR15 es de 15 días.

Tabla 26: Distribución del número de usuarios según escenario de simulación y variación de intervalo de riego

Descripción	COD	USU	MXR	MAD	FR7	FR15
Usuarios con IR mayor a 15 días, en el escenario MXR	(+)15	6	(IR>15)	SI (≠)	NO (=)	NO (=)
Usuarios con IR menor a 7 días en el escenario MXR	(-) 7	13	(IR<7)	SI (≠)	SI (7)	SI (15)
Usuarios con IR menor a 15 días en el escenario MXR	(-) 15	4	(IR<15)	SI (≠)	NO (=)	SI (15)

SI: El IR “**SI**” es diferentes en el escenario indicado, respecto al MXR

NO: El IR “**NO**” es diferentes en el escenario indicado, respecto al MXR

Tabla 27: Valores de intervalos de riego Ir (días), por usuarios y escenarios de riego simulado

Tipo	Id.	Usuarios	Área (A2) (ha)	Intervalos de riego Ir (días)			
				MXR	MAD	FR7	FR15
FDA	1	PROG_FRUTALES (+)	15.949	19	24	19	19
	2	HUERTO (-) 7	9.589	4	6	7	15
	3	PROG_ALGODON (+)	2.909	16	17	16	16
	4	VIVERO_FORESTAL (+)	17.786	19	20	19	19
	5	PROG_MAIZ (-) 7	5.004	5	6	7	15
	6	PROG_CEREALES (-) 7	6.426	5	6	7	15
	7	PROG_POCA_RIGORANCH (-) 15	1.878	9	12	10	15
	8	JARDIN_BOTANICO (+)	2.124	18	25	18	18
	9	VIVERO_ORNAMENTALES (+)	2.465	15	19	16	17
	10	CENTRO_DE_VENTAS (+)	3.583	20	22	20	21
	11	PROG_RAICES_Y_TUBEROSAS (-) 15	0.748	7	8	8	15
	12	FAC_CIENCIAS_BIOLOGIA (-) 7	0.221	5	6	7	15
	13	PASTOS_Y_FORRAJES (-) 15	0.739	7	9	8	15
	14	FAC_AGRONOMIA (-) 15	0.476	9	13	9	15
	15	FAC_ZOOTECNIA (-) 7	0.269	5	7	7	15
UNALM	1	PARQUES_Y_JARDINES (-) 7	12.180	2	3	7	15
	2	FUNDO (-) 7	17.332	5	6	7	15
	3	LAB_DE_SUELOS (-) 7	0.493	5	6	7	15
	4	EDUCACION_FISICA (-) 7	0.846	2	3	7	15
	5	BANCO_DE_SEMEN (-) 7	0.834	4	6	7	15
	6	PROG_LEGUMINOSAS (-) 7	0.531	4	5	7	15
	7	FAC_ING_AGRICOLA (-) 7	4.357	6	8	7	15
	8	CAMPO_FERIAL (-) 7	4.081	2	3	7	15
FDA - UNALM			110.817	10	12	12	16

<<Continuación>>

(+) Usuarios con intervalo de riego (IR) mayor a 15 días, en el escenario MXR

(-) 7. Usuarios con intervalo de riego (IR) menor a 7 días en el escenario MXR

(-) 15. Usuarios con intervalo de riego (IR) menor a 15 días en el escenario MXR

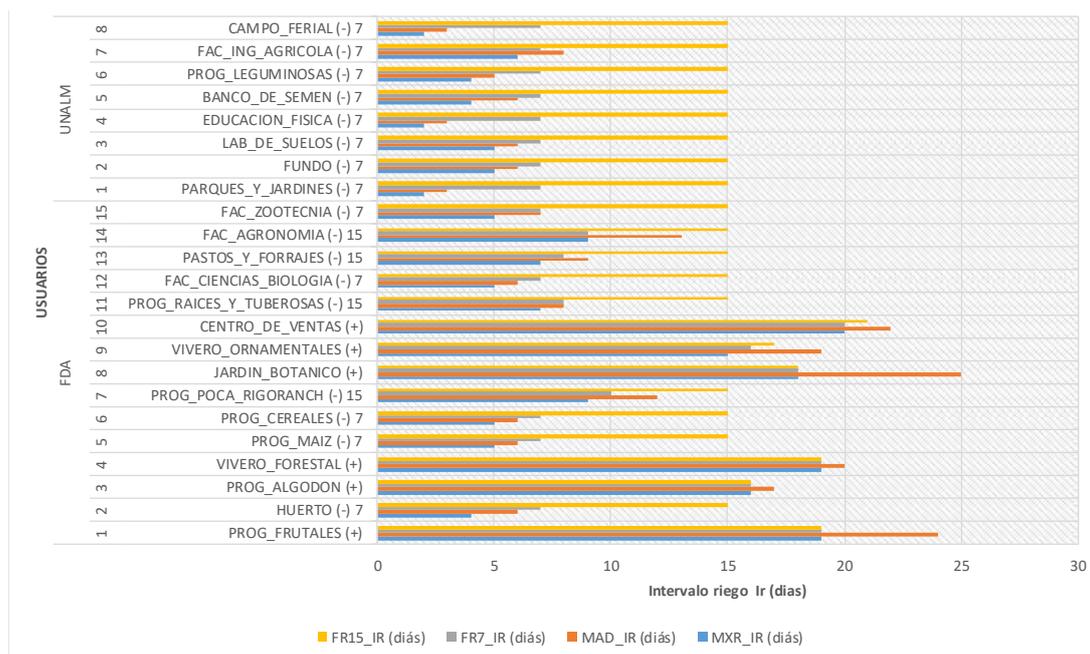


Figura 39: Representación de intervalos de riego Ir (días), por usuarios y escenarios de riego simulado

4.5.5. Lámina total de riego (Ltr)

La lámina de riego total (Lrt) determinada por el modelo ISAREG, fue a nivel de unidad de campo y etapas de crecimiento del cultivo, los consolidados de la Ltr por usuario y por escenarios simulados, se muestran en la Tabla 28 y la Figura 40.

Para el escenario de máximo rendimiento (MXR), los cinco usuarios identificados con mayor LRT son: *Programa de Maíz, Jardín botánico, Parque y jardines, Educación física y Campo ferial*, con valores de 821.10, 844.20, 886.10, 888.20 y 886.50 mm/época. respectivamente, en el mismo escenario MXR los cinco usuarios con menor LRT son: *Programa de Frutales, Programa de Algodón, Centro de ventas, Facultad de Agronomía y Programa de Leguminosas*, con valores de 561.83, 598.93, 576.97, 510.97 y 463.70 mm/época. Respectivamente, existe una reducción global de la LRT en los escenarios MAD, FR7 y FR15 de 4.9 por ciento, 7.6 por ciento y 26.0 por ciento con relación al escenario base MXR, los detalles se muestran los valores indicados en la Tabla 28 y Figura 40.

En la Molina, Perú Ascencios *et al.* (2019), en su investigación coeficientes de riego del césped americano en condiciones de estrés hídrico utilizando riego por goteo subterráneo, obtuvieron como resultado en cuatro diferentes tratamientos de coeficientes de riego, T1=

$1*E_{to}$, $T_2= 0.8*E_{to}$, $T_3= 0.6*E_{to}$ y $T_4= 0.4*E_{to}$, valores de láminas de riego acumulado de 827, 662, 496 y 331 mm/año, Comparando con la presente investigación, el mayor valor obtenido por Ascencios *et al.* (2019), es similar a las láminas de riego (LTR) obtenidos en el escenario de máximo rendimiento (MXR), para el caso de *Parque y jardines, Educación física y Campo ferial*, con valores de LRT que oscilan entre 886.10, 888.20 y 886.50 mm/época según la Tabla 28, considero por ser realizadas las investigaciones en condiciones similares.

En el norte de Chaingging Popova & Ivanova (2016), han reportado en tres escenarios de riego con ISAREG para el cultivo de maíz, lamina de riego (ID) de 270, 240 y 240 mm respectivamente, con fracción de agotamiento por la administración (MAD) de 0.50, 0.33 y 0.50, conservando el agua disponible del suelo (ASW), al umbral de rendimiento óptimo del cultivo a la cosecha OYT, todo ello con climas con precipitación neta 35 a 86 mm. En caso de la Molina, los valores alcanzados de lámina total de riego LTR para el maíz, en los escenarios MXR, MAD, FR7 y FR15 son de 821.10, 790.42, 796.09 y 571.26 mm/época, estos valores son considerablemente mayores a los obtenidos por Popova & Ivanova (2016), posiblemente por haber realizado su investigación en clima con precipitación neta existente, lo que genera un aporte de agua y genera condiciones de microclima húmedo, caso diferente en la molina.

En Asia Central Cholpankulov *et al.* (2008), en su investigación de calibración y validación del modelo de simulación de programación de riego ISAREG, en la localidad de la estepa Hunger, con observaciones de campos de algodón durante 4 años, reportaron que la lámina total de riego promedio multianual aplicada durante 4 estaciones es de 603.25 mm, En comparación con el valor simulado obtenido con ISAREG para el *Programa de algodón* de la Molina, los valores de Lámina de riego total (Lrt) para los escenarios simulados están al redor de 598.93 mm, menor en 0.7 por ciento a la localidad de la estepa Hunger, Los resultados obtenidos muestran una buena concordancia entre las observaciones de campo y las predicciones del modelo, lo que permite el uso del modelo ISAREG para generar y evaluar programas de riego alternativos destinados a mejorar el uso del agua en Asia Central Cholpankulov *et al.* (2008), así como en la Molina, Perú.

En Lima Perú, Sánchez *et al.* (2020), en su trabajo, respuesta del inicio del secado parcial de raíces (SPR) en el rendimiento del cultivo de camote (*Ipomoea batatas*), aplicando riego por goteo deficitario realizado en un lapso de 6 meses, registraron resultados de consumo total de agua en valores de 536.89, 318.55, 342.95 y 371.33 mm/época en cuatro tratamientos Testigo, SPR₂₃, SPR₃₃ y SPR₄₅ respectivamente. Así mismo en Lima Perú, Sánchez (2023) en su investigación, aplicación del riego de desecación parcial (PRD) en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) mediante el sistema de riego por goteo, resultado aplicando láminas de riego de 165.1 a 193.23 mm/época en los tratamientos testigo y 82.8 a 129.1 mm/época en los tratamientos con PRD con reducción al 50 y 70 por ciento la dosis de riego, ambos evaluado en épocas menores de 4 meses. En contraste con los resultados obtenidos para la presente investigación de lo simulado con el modelo ISAREG para el programa de Raíces y Tuberosas, en los escenarios MXR, MAD, FR7 y FR15 se han obtenido valores mayores de lámina total de riego LTR en 712.09, 686.64, 680.23 y 537.87 mm/época, y se considera que es proporcional a época de 10 meses, comparado con los obtenidos por Sánchez (2023) y Sánchez *et al.* (2020).

Tabla 28: Valores de lámina de riego total LRT (mm/época), por usuarios y escenarios de riego simulado

Tipo	Id.	Usuarios	Área (A2) (ha)	Lámina de riego total LRT (mm/época/ha)			
				MXR	MAD	FR7	FR15
FDA	1	PROG_FRUTALES	15.949	561.829	534.271	560.452	552.116
	2	HUERTO	9.589	735.355	694.948	634.908	431.453
	3	PROG_ALGODON	2.909	598.926	586.046	598.926	598.926
	4	VIVERO_FORESTAL	17.786	614.726	571.854	611.323	593.598
	5	PROG_MAIZ	5.004	821.098	790.418	796.088	571.257
	6	PROG_CEREALES	6.426	746.343	699.360	701.467	520.326
	7	PROG_POCA_RIGORANCH	1.878	722.805	685.557	717.029	633.957
	8	JARDIN_BOTANICO	2.124	844.200	845.100	844.200	844.200
	9	VIVERO_ORNAMENTALES	2.465	668.520	651.009	658.465	641.134
	10	CENTRO_DE_VENTAS	3.583	576.974	547.219	572.622	560.374
	11	PROG_RAICES_Y_TUBEROSAS	0.748	712.091	686.642	680.228	537.825
	12	FAC_CIENCIAS_BIOLOGIA	0.221	756.400	713.300	698.000	434.500
	13	PASTOS_Y_FORRAJES	0.739	750.869	725.840	729.864	635.039
	14	FAC_AGRONOMIA	0.476	510.974	487.722	500.737	473.814
	15	FAC_ZOOTECNIA	0.269	738.203	701.368	709.748	588.469

<<Continuación>>

UNALM	1	PARQUES_Y_JARDINES	12.180	886.100	845.600	702.400	421.100
	2	FUNDO	17.332	684.073	652.484	629.593	448.480
	3	LAB_DE_SUELOS	0.493	637.021	596.846	593.007	413.522
	4	EDUCACION_FISICA	0.846	888.200	845.300	688.600	405.700
	5	BANCO_DE_SEMEN	0.834	774.063	762.357	734.141	487.966
	6	PROG_LEGUMINOSAS	0.531	463.700	437.700	430.100	296.500
	7	FAC_ING_AGRICOLA	4.357	635.534	599.666	602.944	459.078
	8	CAMPO_FERIAL	4.081	886.501	844.285	708.686	427.169
FDA - UNALM			110.817	696.155	661.709	643.219	515.479

En el norte de Siria, Darouich *et al.* (2017) reportaron en su investigación en trigo valores de uso total de agua (TWU) de 548 - 584 mm y de 489-516 mm en riego por superficie con déficit leve y moderado respectivamente, y similarmente valores de 530 – 539 mm y 460 -464 mm en riego por aspersión con déficit leve y moderado respectivamente. En la presente investigación en la Molina en el escenario FR15 la lámina de riego total LRT para el programa de cereales fue de 520.33 mm/época, valor muy similar al obtenido por Darouich *et al.* (2017).

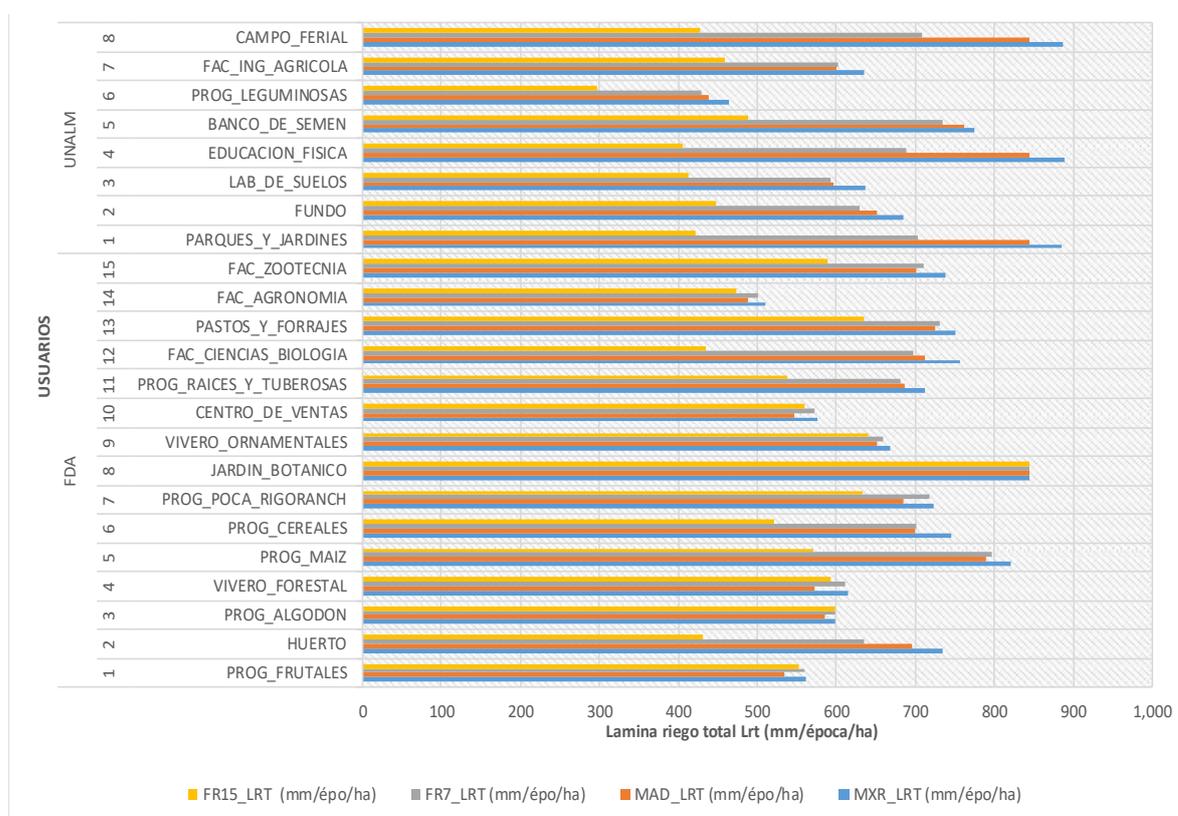


Figura 40: Representación de lámina de riego total LRT (mm/época), por usuarios y escenarios de riego simulado

4.6. PROGRAMACIÓN ÓPTIMA DE RIEGO

4.6.1. Relación evapotranspiración y rendimiento

La relación de la evapotranspiración relativa (E_{ta}/E_{tm}) con el rendimiento relativo (Y_a/Y_m) de los cultivos, muestra que la cantidad de agua consumida a los cultivos y el rendimiento de los mismos, es directa, donde los rendimientos máximos se dan en el *escenarios* MXR con valor de 100 por ciento, para el *escenario* MAD el rendimiento se encuentra entre valores de 93 y 99 por ciento, para el caso del *escenario* FR7 la producción en promedio se encuentra en entre 80 por ciento y 100 por ciento, por otro lado, en el *escenario* FR15 la producción promedio esta entre los valores de 49 por ciento al 100 por ciento, como se muestra en la Tabla 29 y la Figura 41.

La relación matemática establecida que se ajusta entre la (E_{ta}/E_{tm}) y (Y_a/Y_m) para los distintos escenarios MAD, FR7 y FR15 son de tipo polinómica y de segundo grado, con valores de R^2 de 0.8328, 0.9983 y 0.9935 respectivamente, lo que muestra su buena correlación entre la cantidad de agua entregada a los cultivos y el rendimiento de estos, conforme a lo mostrado en las Figuras 41 y 42 de relación y correlación de evapotranspiración y rendimientos por usuarios y escenarios simulados.

Tabla 29: Valores de evapotranspiración y rendimientos relativos por usuarios y escenarios de riego simulad

Tipo	Id.	Usuarios	MAD		FR7		FR15	
			Eta/Etm	Ya/Ym	Eta/Etm	Ya/Ym	Eta/Etm	Ya/Ym
FDA	1	PROG_FRUTALES	0.97	0.97	1.00	1.00	0.98	0.98
	2	HUERTO	0.95	0.94	0.90	0.87	0.69	0.61
	3	PROG_ALGODON	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
	4	VIVERO_FORESTAL	0.95	0.95	1.00	0.99	0.98	0.98
	5	PROG_MAIZ	0.96	0.95	0.95	0.94	0.70	0.63
	6	PROG_CEREALES	0.97	0.96	0.95	0.94	0.74	0.67
	7	PROG_POCA_RIGORANCH	0.97	0.96	0.99	0.99	0.92	0.91
	8	JARDIN_BOTANICO	0.96	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00
	9	VIVERO_ORNAMENTALES	0.96	0.96	0.99	0.99	0.97	0.97
	10	CENTRO_DE_VENTAS	0.96	0.96	0.99	0.99	0.98	0.98
	11	PROG_RAICES_Y_TUBEROSAS	0.96	0.94	0.98	0.98	0.83	0.79
	12	FAC_CIENCIAS_BIOLOGIA	0.97	0.96	0.92	0.91	0.69	0.61
	13	PASTOS_Y_FORRAJES	0.97	0.97	0.97	0.97	0.84	0.84
	14	FAC_AGRONOMIA	0.96	0.95	0.99	0.99	0.94	0.93
	15	FAC_ZOOTECNIA	0.96	0.95	0.97	0.96	0.82	0.78

<<Continuación>>

UNALM	1	PARQUES_JARDINES	0.96	0.96	0.80	0.80	0.48	0.48
	2	FUNDO	0.96	0.95	0.94	0.92	0.72	0.65
	3	LAB_DE_SUELOS	0.95	0.94	0.95	0.94	0.73	0.67
	4	EDUCACION_FISICA	0.95	0.95	0.79	0.79	0.46	0.46
	5	BANCO_DE_SEMEN	0.96	0.95	0.93	0.92	0.67	0.58
	6	PROG_LEGUMINOSAS	0.95	0.93	0.93	0.92	0.70	0.63
	7	FAC_ING_AGRICOLA	0.96	0.94	0.96	0.95	0.79	0.74
	8	CAMPO_FERIAL	0.96	0.96	0.81	0.81	0.49	0.49

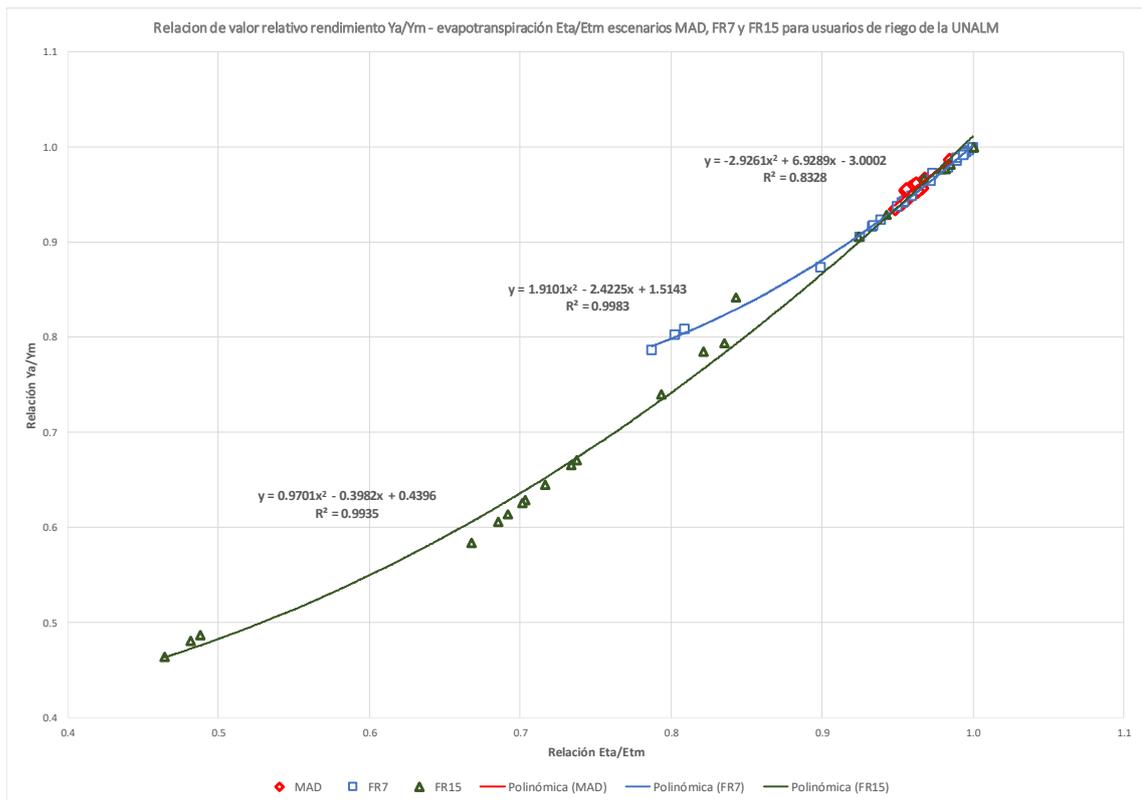


Figura 41: Relación y correlación de evapotranspiración y rendimientos relativos por escenarios de riego simulado

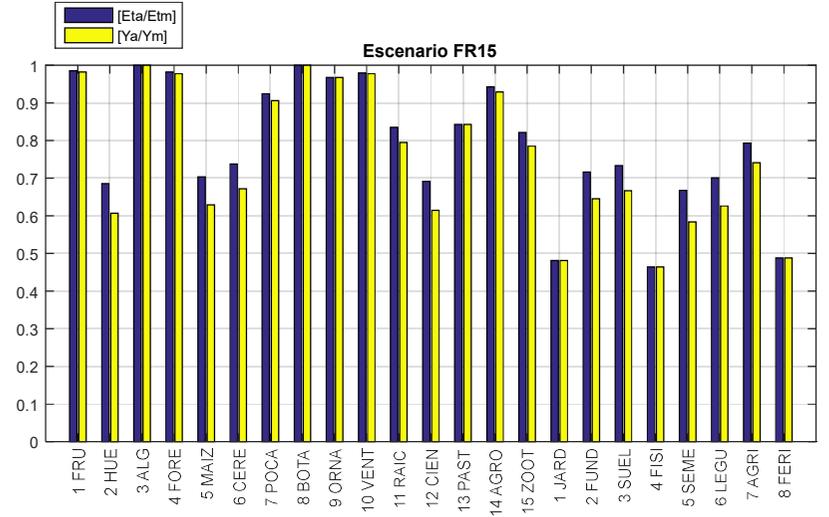
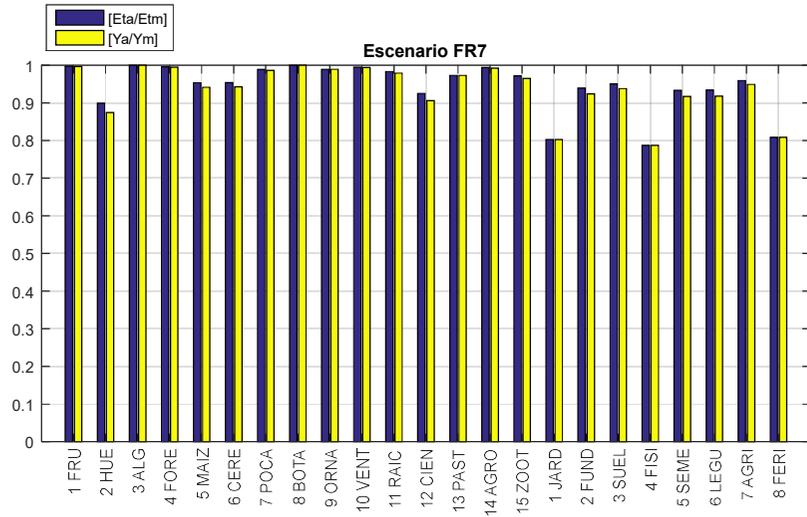
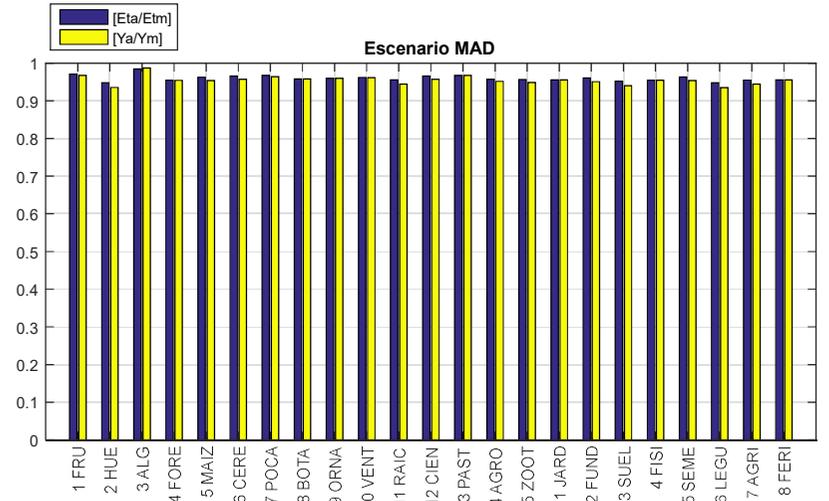
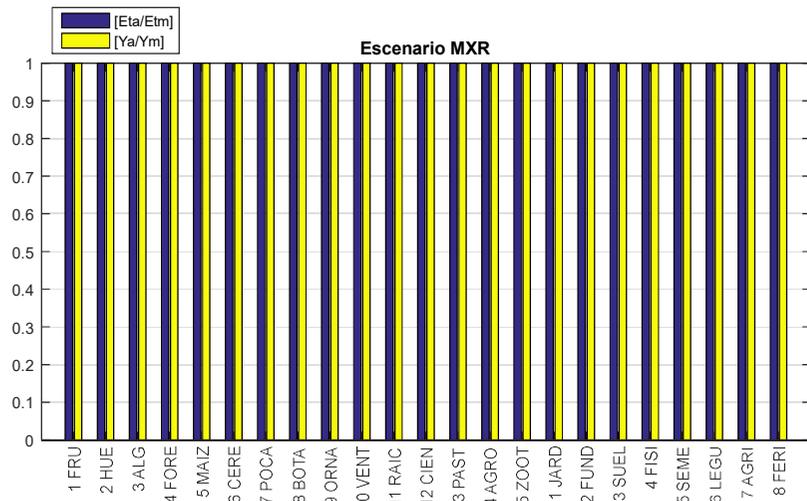


Figura 42: Representación de evapotranspiración y rendimientos relativos por usuarios y escenarios de riego simulado

4.6.2. Relación intervalo de riego y rendimiento

De los resultados del intervalo de riego por usuario y escenarios de riego, en relación con el rendimiento, se puede observar que no existe una relación directa, ya que existen usuarios de riego con diversos valores de intervalo de riego, pero que tienen indistintamente rendimientos altos y/o bajos, como se muestra en la Tabla 30 de intervalos de riego y rendimientos relativos por usuarios y escenarios de riego simulado.

Tabla 30: Valores de intervalos de riego y rendimientos relativos por usuarios y escenarios de riego simulado

Tipo	Id.	Usuarios	Área (A2) (ha)	MAX		MAD		FR7		FR15	
				IR (días)	(Ya/Ym)	IR (días)	(Ya/Ym)	IR (días)	(Ya/Ym)	IR (días)	(Ya/Ym)
FDA	1	PROG_FRUTALES	15.949	19	1.00	24	0.97	19	1.00	19	0.98
	2	HUERTO	9.589	4	1.00	6	0.94	7	0.87	15	0.61
	3	PROG_ALGODON	2.909	16	1.00	17	0.99	16	1.00	16	1.00
	4	VIVERO_FORESTAL	17.786	19	1.00	20	0.95	19	0.99	19	0.98
	5	PROG_MAIZ	5.004	5	1.00	6	0.95	7	0.94	15	0.63
	6	PROG_CEREALES	6.426	5	1.00	6	0.96	7	0.94	15	0.67
	7	PROG_POCA_RIGORANCH	1.878	9	1.00	12	0.96	10	0.99	15	0.91
	8	JARDIN_BOTANICO	2.124	18	1.00	25	0.96	18	1.00	18	1.00
	9	VIVERO_ORNAMENTALES	2.465	15	1.00	19	0.96	16	0.99	17	0.97
	10	CENTRO_DE_VENTAS	3.583	20	1.00	22	0.96	20	0.99	21	0.98
	11	PROG_RAICES_Y_TUBEROSAS	0.748	7	1.00	8	0.94	8	0.98	15	0.79
	12	FAC_CIENCIAS_BIOLOGIA	0.221	5	1.00	6	0.96	7	0.91	15	0.61
	13	PASTOS_Y_FORRAJES	0.739	7	1.00	9	0.97	8	0.97	15	0.84
	14	FAC_AGRONOMIA	0.476	9	1.00	13	0.95	9	0.99	15	0.93
	15	FAC_ZOOTECNIA	0.269	5	1.00	7	0.95	7	0.96	15	0.78
UNALM	1	PARQUES_Y_JARDINES	12.180	2	1.00	3	0.96	7	0.80	15	0.48
	2	FUNDO	17.332	5	1.00	6	0.95	7	0.92	15	0.65
	3	LAB_DE_SUELOS	0.493	5	1.00	6	0.94	7	0.94	15	0.67
	4	EDUCACION_FISICA	0.846	2	1.00	3	0.95	7	0.79	15	0.46
	5	BANCO_DE_SEMEN	0.834	4	1.00	6	0.95	7	0.92	15	0.58
	6	PROG_LEGUMINOSAS	0.531	4	1.00	5	0.93	7	0.92	15	0.63
	7	FAC_ING_AGRICOLA	4.357	6	1.00	8	0.94	7	0.95	15	0.74
	8	CAMPO_FERIAL	4.081	2	1.00	3	0.96	7	0.81	15	0.49

Por decir, en el escenario MXR, los valores de IR varían de 2 a 20 días, con rendimientos del 100 por ciento, similarmente en el escenario MAD los valores del IR varían de 3 a 25 días, con rendimientos entre 93 por ciento a 100 por ciento, en ambos casos para el total de 23 usuarios. Por otro lado, para el escenario FR7 del total de 23 usuarios, 10 usuarios con IR mayor a 7 días, tienen un rendimiento entre 97 por ciento a 100 por ciento, y 13 usuarios

de IR de 7 días, tienen su rendimiento entre 79 por ciento a 96 por ciento, paralelamente para el escenario FR15, 6 usuarios tienen un intervalo de riego mayor a 15 días, con rendimientos entre 97 por ciento a 100 por ciento, y 17 usuarios con intervalo de riego de 15 días tienen un rendimiento entre 46 por ciento a 93 por ciento, lo indicado se puede corroborar en la Tabla 31, así como en la Figura 43.

Tabla 31: Distribución del número de usuarios según escenario de simulación, intervalo de riego y rendimiento por usuarios

Variables	MXR	MAD	FR7		FR15	
IR (días)	2 - 20	3-25	7	>7	15	>15
Ya/Ym (%)	100	93-100	79-96	97-100	46-93	97-100
Usuarios (Und.)	23	23	13	10	17	6
Usuarios (%)	100	100	56.52	43.48	79.91	26.09

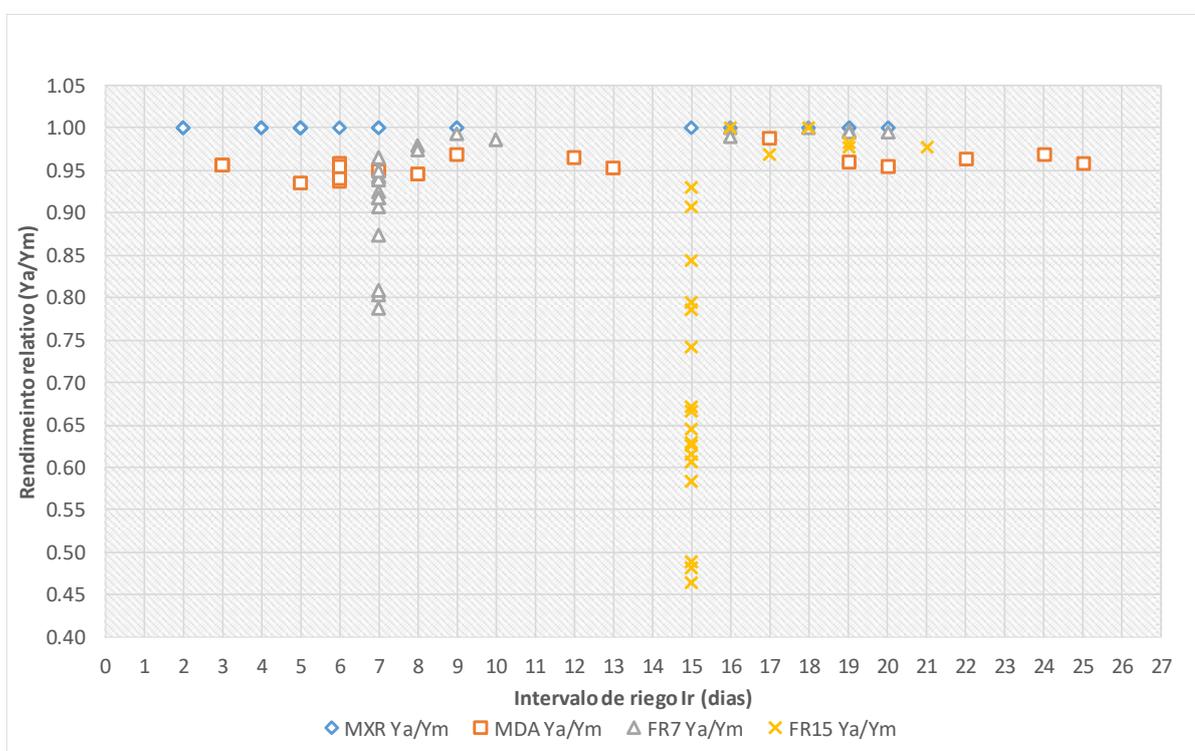


Figura 43: Representación de intervalos de riego y rendimientos relativos por usuarios y escenarios de riego simulado

4.6.3. Escenario con programación óptima de riego

De acuerdo con el análisis y evaluación de los resultados de los parámetros de riego y cultivo, de los diferentes escenarios simulados con el modelo ISAREG y sistematizados con el SIG, presentados en las Tablas 29 al 31 y Figuras 41 al 43.

Se ha identificado al escenario de riego MXR como el más óptimo, en vista que los parámetros de riego y cultivos del mismo, permiten obtener rendimiento de cultivo máximos al 100 por ciento, en la totalidad de los campos de los usuarios simulados, por otro lado, en la simulación de los escenarios MAD, FR7 y FR15 se obtuvieron en algunos campos de los usuarios, rendimientos de 93, 79 y 46 por ciento, y particularmente para el caso de los escenarios FR7 y FR15 solo se obtienen rendimientos mayores al 97 por ciento en el (10) 43.48 por ciento y (6) 26.09 por ciento de usuarios de riego, como lo indicado en la Tabla 31. Adicionalmente se muestra resultados generales y por usuario en los Tablas 32 y 33.

Tabla 32: Valores globales de parámetros de riego consolidados por escenarios

Parámetros	MXR	MAD	FR7	FR15
ETA (mm/épo.)	715.06	686.49	633.18	541.89
ETM (mm/épo.)	715.06	715.06	715.06	715.06
QDC (l/s.)	0.370	0.380	0.327	0.256
IR (días)	2 - 20	3 - 25	7 - 20	15 - 21
LRT (mm/épo.)	696.16	661.71	643.22	515.48
Ya/Ym (%)	100	93 - 100	79-100	46-100
DN (m ³ /épo)	771,417.84	733,285.86	712,735.82	571,213.65

Tabla 33: Valores de parámetros de riego por usuario para escenario MXR máximo rendimiento (optimo)

Tipo	Id.	Usuarios	Área (ha)	Eta (mm/épo/ha)	Etm (mm/épo/ha)	Qmc (l/s/ha)	Ir (días)	Lrt (mm/épo/ha)	(Ya/Ym)	DN (m ³ /épo)
FDA	1	PROG_FRUTALES	15.949	580.84	580.84	0.290	19	561.83	1.0	89,601.50
	2	HUERTO	9.589	751.89	751.89	0.402	4	735.36	1.0	70,509.96
	3	PROG_ALGODON	2.909	615.11	615.11	0.494	16	598.93	1.0	17,420.55
	4	VIVERO_FORESTAL	17.786	632.44	632.44	0.289	19	614.73	1.0	109,316.84
	5	PROG_MAIZ	5.004	846.08	846.08	0.433	5	821.10	1.0	41,083.14
	6	PROG_CEREALES	6.426	762.81	762.81	0.377	5	746.34	1.0	47,960.44
	7	PROG_POCA_RIGORANCH	1.878	743.98	743.98	0.398	9	722.81	1.0	13,571.60
	8	JARDIN_BOTANICO	2.124	896.00	896.00	0.399	18	844.20	1.0	17,921.90
	9	VIVERO_ORNAMENTALES	2.465	704.62	704.62	0.314	15	668.52	1.0	16,480.90
	10	CENTRO_DE_VENTAS	3.583	601.50	601.50	0.270	20	576.97	1.0	20,669.83
	11	PROG_RAICES_Y_TUBEROSAS	0.748	733.60	733.60	0.369	7	712.09	1.0	5,325.32
	12	FAC CIENCIAS BIOLOGIA	0.221	776.00	776.00	0.397	5	756.40	1.0	1,673.69
	13	PASTOS_Y_FORRAJES	0.739	775.26	775.26	0.407	7	750.87	1.0	5,550.91
	14	FAC_AGRONOMIA	0.476	522.78	522.78	0.289	9	510.97	1.0	2,433.45
	15	FAC_ZOOTECNIA	0.269	753.52	753.52	0.423	5	738.20	1.0	1,982.70
UNALM	1	PARQUES_JARDINES	12.180	896.00	896.00	0.450	2	886.10	1.0	107,927.23
	2	FUNDO	17.332	704.93	704.93	0.406	5	684.07	1.0	118,565.16
	3	LAB_DE_SUELOS	0.493	654.61	654.61	0.388	5	637.02	1.0	3,137.49
	4	EDUCACION_FISICA	0.846	896.00	896.00	0.444	2	888.20	1.0	7,515.02
	5	BANCO_DE_SEMEN	0.834	799.06	799.06	0.436	4	774.06	1.0	6,453.39
	6	PROG_LEGUMINOSAS	0.531	475.20	475.20	0.330	4	463.70	1.0	2,460.86
	7	FAC_ING_AGRICOLA	4.357	658.92	658.92	0.371	6	635.53	1.0	27,683.51
	8	CAMPO_FERIAL	4.081	896.00	896.00	0.454	2	886.50	1.0	36,172.44
-	PARAMETROS GLOBAL	110.817	715.06	715.06	0.370	10	696.16	1.0	771,417.84	

4.7. DEMANDA DE AGUA DE RIEGO

Conocido los métodos y eficiencias de riego de cada uno de los campos de cultivo de los usuarios de riego y, por otro lado, conocido las láminas de riego, de la simulación con el modelo ISAREG de los escenarios de riego MXR, MAD, FR7 y RF15, se obtuvo resultados las demandas netas y brutas para los cuatro escenarios, como se muestran en el Tabla 34 y Figura 44 de demanda neta y bruta de agua de riego.

Tabla 34: Valores de demanda neta y bruta de agua de riego para diferentes escenarios

Demandas	MXR	MAD	RF7	RF15
Neta ISAREG - DNI (m ³)	771,417.83	733,285.86	712,735.82	571,213.64
Variación DNI (%)	100.0%	95.1%	92.4%	74.0%
Bruta Actual - DBA (m ³)	1,530,834.86	1,454,926.22	1,439,657.10	1,188,146.70
Variación DBA (%)	100.0%	95.0%	94.0%	77.6%
Bruta Nueva - DBN (m ³)	1,185,044.23	1,124,856.79	1,113,997.93	944,853.92
Variación DBN (%)	100.0%	94.9%	94.0%	79.7%

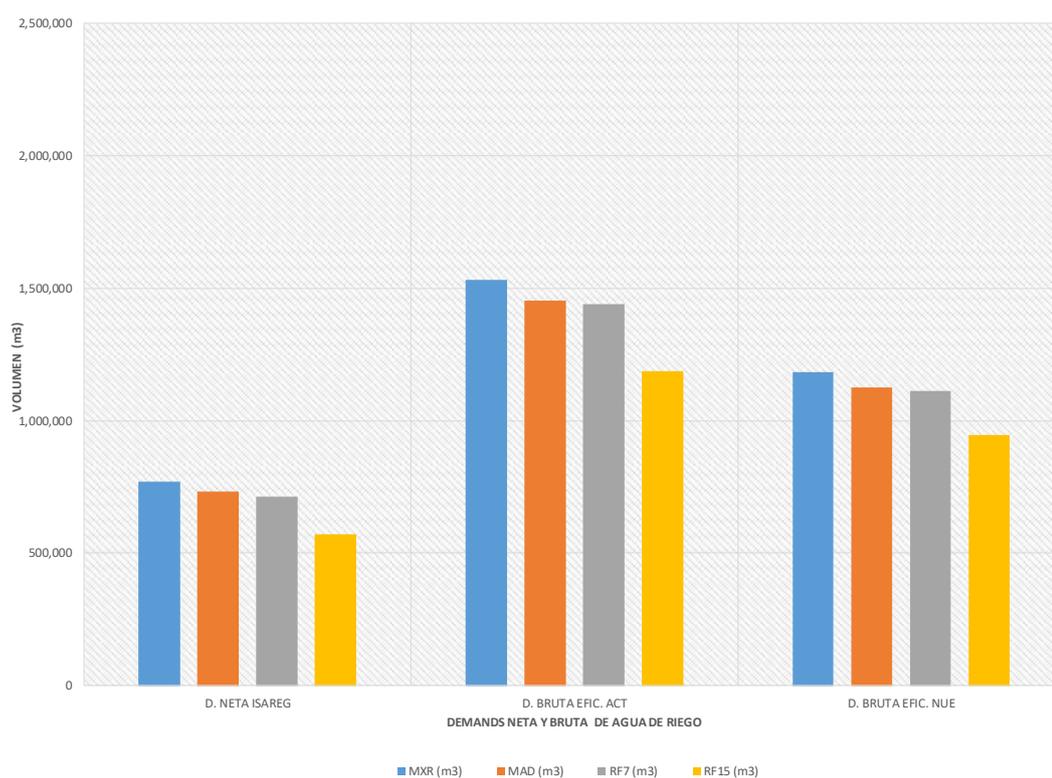


Figura 44: Representación anual para diferentes escenarios de demanda neta según ISAREG y demanda bruta para diferentes eficiencias de agua de riego

De los resultados, se aprecia que las mayores demandas ocurren en el escenario MXR y las demandas en los otros escenarios son menores, por decir la demanda neta varían según 95.1,

92.4 y 74.0 por ciento, para los escenarios MAD, FR7 y FR15 respectivamente, todo ello respecto al escenario MXR, similarmente en las demandas brutas también según los escenarios MAD, FR7 y FR15 y respecto al MXR, para el caso de demanda bruta actual DBA (2019), la variación es 95.0, 94.0 y 77.6 por ciento y para la demanda bruta nueva DBN (deseable), la variación es 94.9, 94.0 y 79.7 por ciento, respectivamente.

Adicionalmente, para el escenario de máximo rendimiento MXR, se tienen resultados de las demandas neta y bruta, consolidada a modo mensual, según los resultados, las mayores demandas, se dan entre los meses de enero - abril, las demandas menores en los meses mayo - agosto y las demandas medias en los meses de setiembre – diciembre, el detalle se muestra en el Tabla 35 y la Figura 45 de demanda neta y bruta para escenario de máximo rendimiento.

Tabla 35: Valores de demanda neta y bruta para escenario de máximo rendimiento MXR, a eficiencia de riego actual y nuevo

Mes	Neta ISAREG (m3)	Bruta Ef. Actual (m3)	Bruta Ef. Nueva (m3)
ENE	86108.94	167898.25	134677.56
FEB	99311.23	199555.58	152234.04
MAR	98455.70	196577.79	143961.87
ABR	80240.11	162425.87	126381.26
MAY	44624.79	86921.52	67714.48
JUN	26176.23	49049.05	39195.78
JUL	28209.07	52773.24	40732.35
AGO	40515.36	78829.13	58454.96
SET	53435.65	107138.36	81244.13
OCT	69865.53	143499.23	110999.51
NOV	66528.84	131917.10	103772.76
DIC	77946.39	154249.72	125675.51
TOTAL	771,417.83	1,530,834.86	1,185,044.23

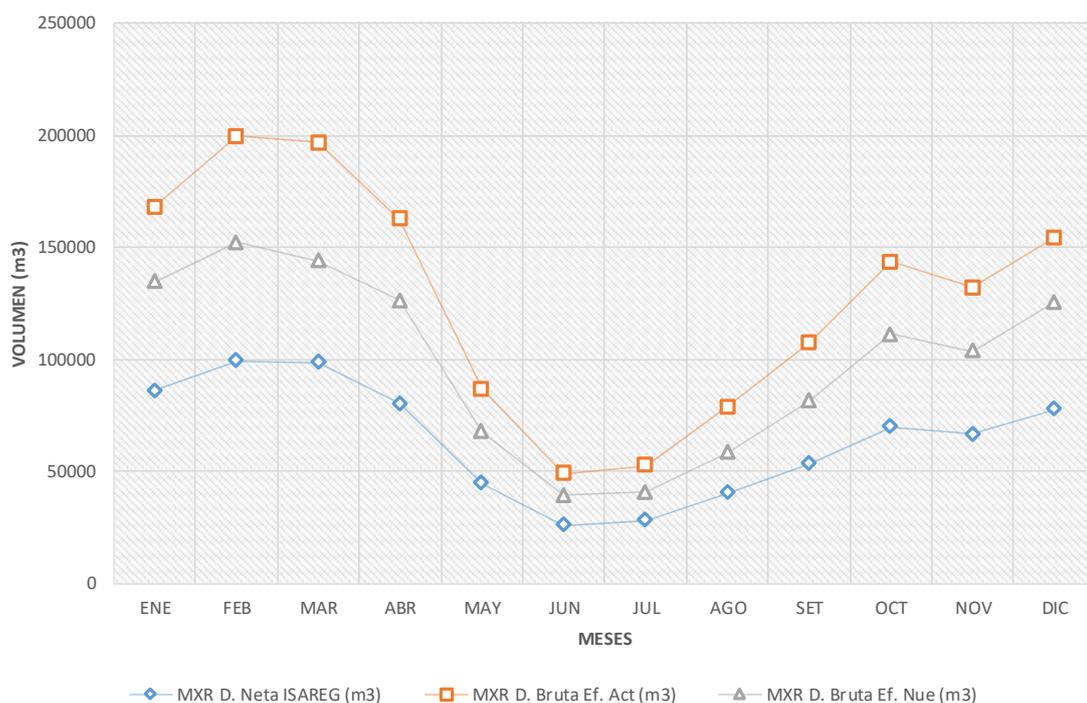


Figura 45: Representación de la demanda neta según ISAREG y las demandas brutas para el escenario MXR, a eficiencia de riego actual y nuevo

4.8. OFERTA DE AGUA DE RIEGO

De la Comisión de Riego (CR) de la UNALM, conocidos los registros de caudales de ingreso a la UNALM, por las tomas de la parte baja (campo ferial) y parte alta (frutales), por otro lado, conocido la programación del suministro de agua con fines agrarios de la UNALM, por la Comisión de Usuarios (CU) de ATE, se tienen los resultados de la oferta anual de agua de riego, por CR - UNALM y la JU - ATE, para las dos tomas parte baja y alta, como se muestran en el Tabla 36 y Figura 46.

Tabla 36: Valores anuales de oferta de agua de riego, por la Comisión de Riegos de la UNALM y la Junta Usuarios de ATE

Tomas	C.R. UNALM	J.U. ATE.
Parte Baja (Campo Ferial) (m ³)	1,071,779.41	1,522,800.0
Parte Alta (Frutales) (m ³)	430,049.43	958,950.0
Parte Alta y Baja (Total) (m ³)	1,501,828.84	2,481,750.0
Variación (%)	100.00%	165.25%

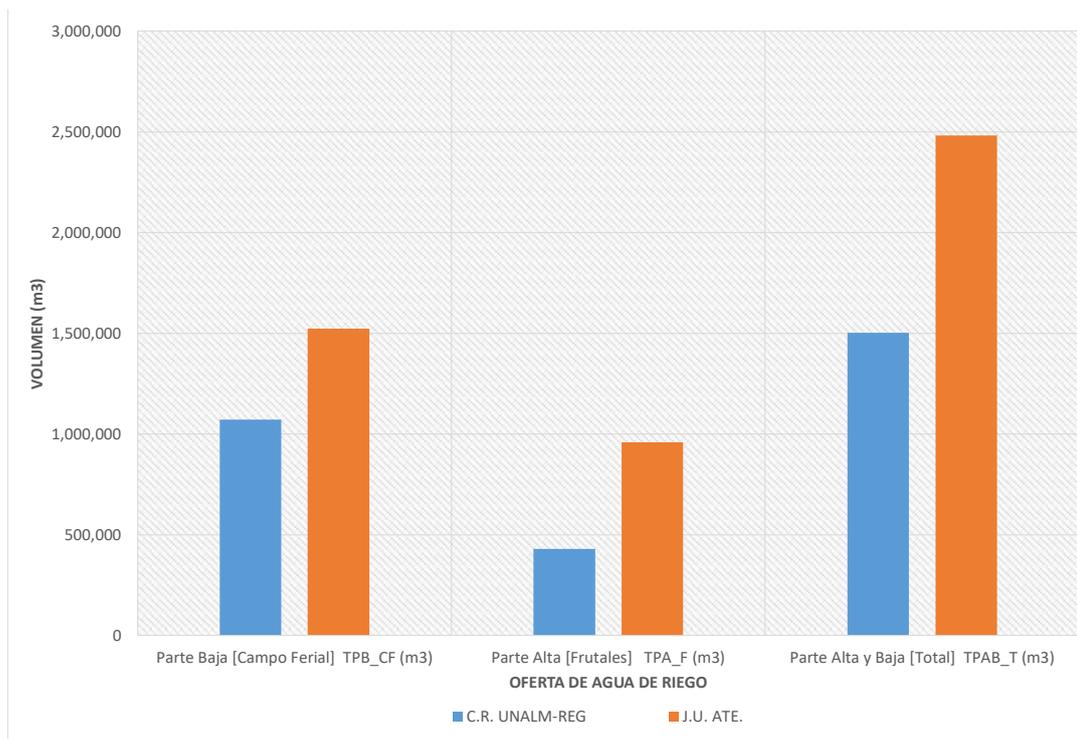


Figura 46: Representación anual de oferta de agua de riego, por la Comisión de Riegos de la UNALM y la Junta Usuarios de ATE

Adicionalmente, se dispone de los resultados de las ofertas de agua de riego consolidada de manera mensual, estimados de los registros de la CR – UNALM y, de la programación del suministro de la JU - ATE, Según resultados de la CR-UNALM el mes con menor oferta es marzo con 82,932.68 m³ y con mayor oferta es setiembre con 172,806.58 m³, por otro lado, según la JU-ATE, la oferta es constante en todos los meses con una valor próximo a 200,000 m³, a excepción de febrero con 190,000 m³, el detalle en la Tabla 37 y la Figura 47.

Tabla 37: Valores mensuales de oferta de agua de riego, por la Comisión de Riegos de la UNALM y la Junta Usuarios de ATE

Mes	UNALM-REG.	J.U. ATE
ENE	91,196.71	207,900
FEB	90,147.38	190,080
MAR	82,932.68	215,190
ABR	100,831.88	203,040
MAY	129,234.30	207,900
JUN	112,201.80	207,720
JUL	138,477.22	207,360
AGO	172,057.20	210,600
SET	172,806.58	205,920
OCT	149,303.85	209,160
NOV	131,052.98	203,040
DIC	131,586.28	213,840
TOTAL	1,501,828.84	2,481,750

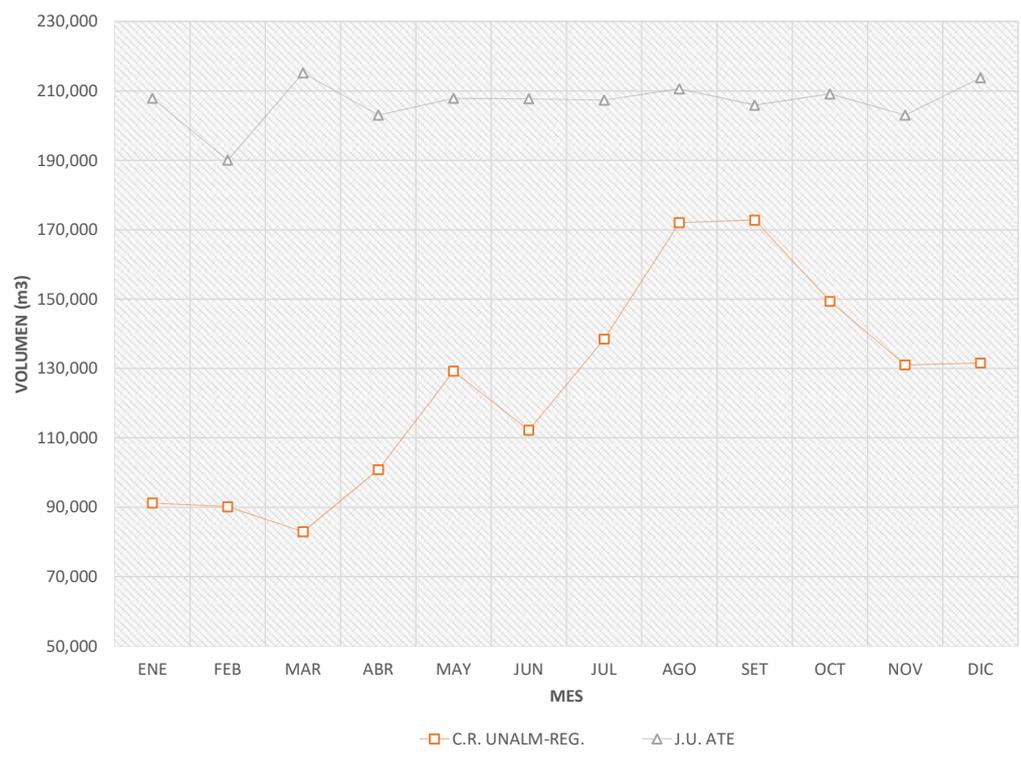


Figura 47: Representación mensual de oferta de agua de riego, por la Comisión de Riegos de la UNALM y la Junta Usuarios de ATE

4.9. BALANCE DEL USO DE AGUA DE RIEGO

Conocido las demandas brutas del escenario de máximo rendimiento, así como las ofertas registradas por la CR-UNALM y las programadas por la JU-ATE, de agua de riego de uso de los usuarios del campus de la UNALM, se tienen los resultados del balance mensual y anual del uso y consumo del agua de riego, los valores de los mismos de muestra en el Tabla 38 y Figura 48.

Tabla 38: Valores de la demanda y oferta de agua de riego en la UNALM

Mes	Demanda Bruta Ef. Actual (m ³)	Demanda Bruta Ef. Nueva (m ³)	Oferta C.R.-UNALM Registrado (m ³)	Oferta J.U. - ATE Programado (m ³)
ENE	167,898.25	134,677.56	91,196.71	207,900.00
FEB	199,555.58	152,234.04	90,147.38	190,080.00
MAR	196,577.79	143,961.87	82,932.68	215,190.00
ABR	162,425.87	126,381.26	100,831.88	203,040.00
MAY	86,921.52	67,714.48	129,234.30	207,900.00
JUN	49,049.05	39,195.78	112,201.80	207,720.00
JUL	52,773.24	40,732.35	138,477.22	207,360.00
AGO	78,829.13	58,454.96	172,057.20	210,600.00
SET	107,138.36	81,244.13	172,806.58	205,920.00
OCT	143,499.23	110,999.51	149,303.85	209,160.00
NOV	131,917.10	103,772.76	131,052.98	203,040.00
DIC	154,249.72	125,675.51	131,586.28	213,840.00
TOTAL	1,530,834.86	1,185,044.23	1,501,828.84	2,481,750.00

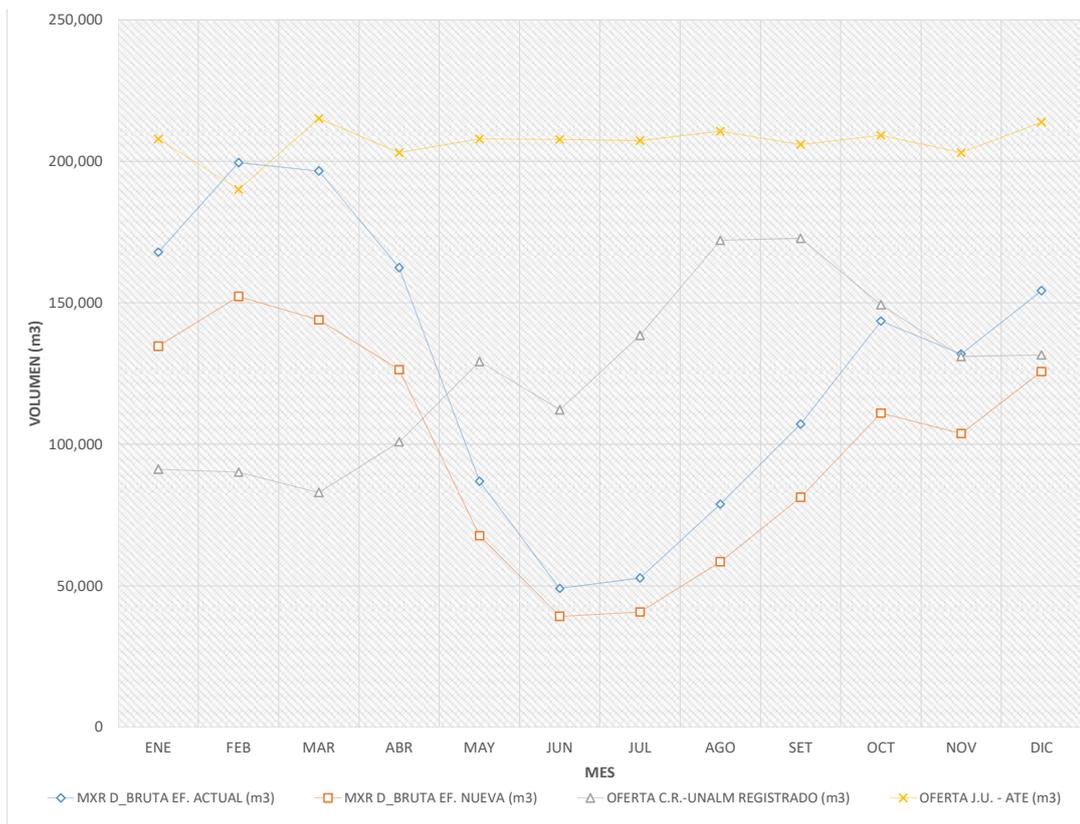


Figura 48: Representación de la demanda y oferta de agua de riego en la UNALM

Según los resultados del balance de agua de riego Oferta – Demanda, se puede apreciar que:

- **Un primer balance**, de la demanda bruta actual con la oferta del registro de la CR-UNALM, reporta un déficit de 384,876.44 m³ en 6 meses (enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre) y un superávit de 355,870.42 m³ en 6 meses (mayo, junio, julio, agosto, setiembre y octubre), con un balance global anual deficitario de 29,006.02 m³.
- **Un segundo balance**, de la demanda bruta actual con la oferta de la programación de la JU-ATE, reporta un déficit de 9,475.58 m³ en 1 meses (febrero) y un superávit de 960,390.72 m³ en los otros 11 meses, con un balance global anual en exceso de 950,915.14 m³
- **Un tercer balance**, de la demanda bruta nueva con la oferta del registro de la CR-UNALM, reporta un déficit de 192,146.10 m³ en 4 meses (enero, febrero, marzo, abril) y un superávit de 508,930.71 m³ en 8 meses (mayo - diciembre), con un balance global anual con exceso de 316,784.61 m³.
- **Un balance final**, corresponde a la demanda bruta nueva con la oferta de la programación de la JU-ATE, reporta un superávit de 1,296,705.77 m³ en los 12

meses, siendo el balance global anual en exceso de 1,296,705.77 m³, lo indicado de los balances, se muestran en la Tabla 39 y las Figuras 49 y 50.

Tabla 39: Valores de la variación del balance de uso y consumo de agua de riego a situación actual y situación nueva

Mes	Variación demanda bruta eficiencia actual		Variación demanda bruta eficiencia nueva	
	CR-UNALM (m3)	JU-ATE (m3)	CR-UNALM (m3)	JU-ATE (m3)
ENE	-76,701.54	40,001.75	-43,480.85	73,222.44
FEB	-109,408.21	-9,475.58	-62,086.67	37,845.96
MAR	-113,645.12	18,612.21	-61,029.19	71,228.13
ABR	-61,594.00	40,614.13	-25,549.39	76,658.74
MAY	42,312.78	120,978.48	61,519.82	140,185.52
JUN	63,152.75	158,670.95	73,006.02	168,524.22
JUL	85,703.98	154,586.76	97,744.87	166,627.65
AGO	93,228.07	131,770.87	113,602.24	152,145.04
SET	65,668.22	98,781.64	91,562.45	124,675.87
OCT	5,804.62	65,660.77	38,304.34	98,160.49
NOV	-864.13	71,122.90	27,280.21	99,267.24
DIC	-22,663.45	59,590.28	5,910.76	88,164.49
Suma (+)	355,870.42	960,390.72	508,930.71	1,296,705.77
Suma (-)	-384,876.44	-9,475.58	-192,146.10	0.00
Balance	-29,006.02	950,915.14	316,784.61	1,296,705.77

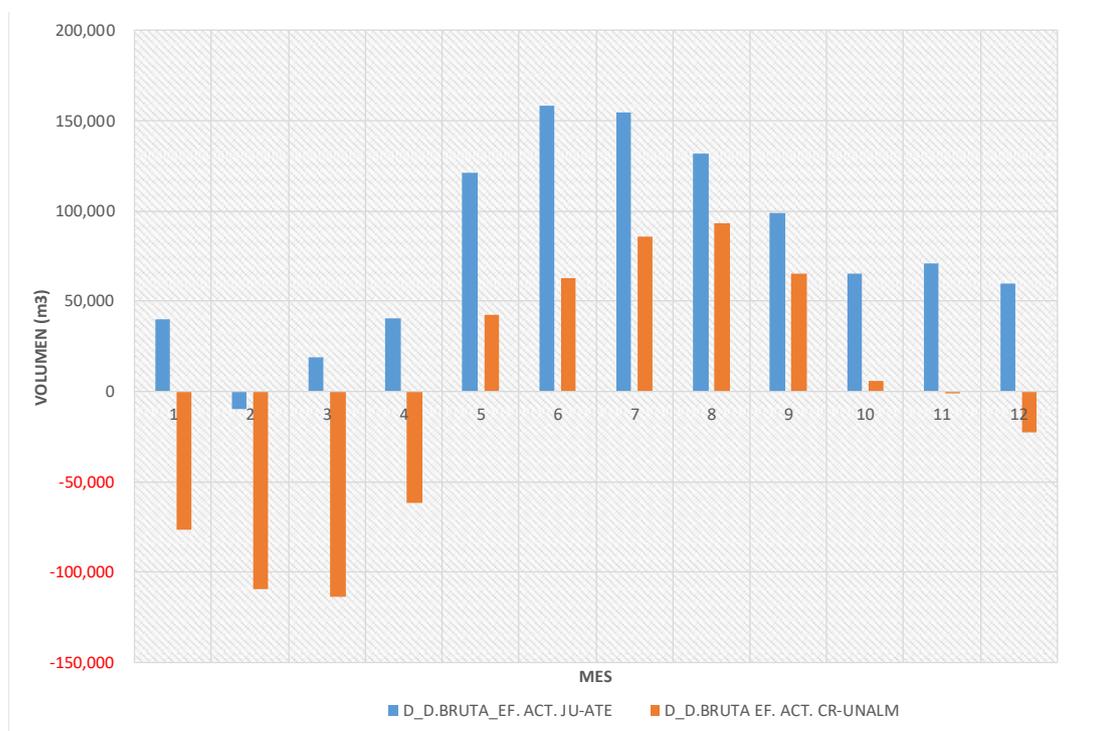


Figura 49: Representación de la variación del balance de uso y consumo de agua de riego a situación actual

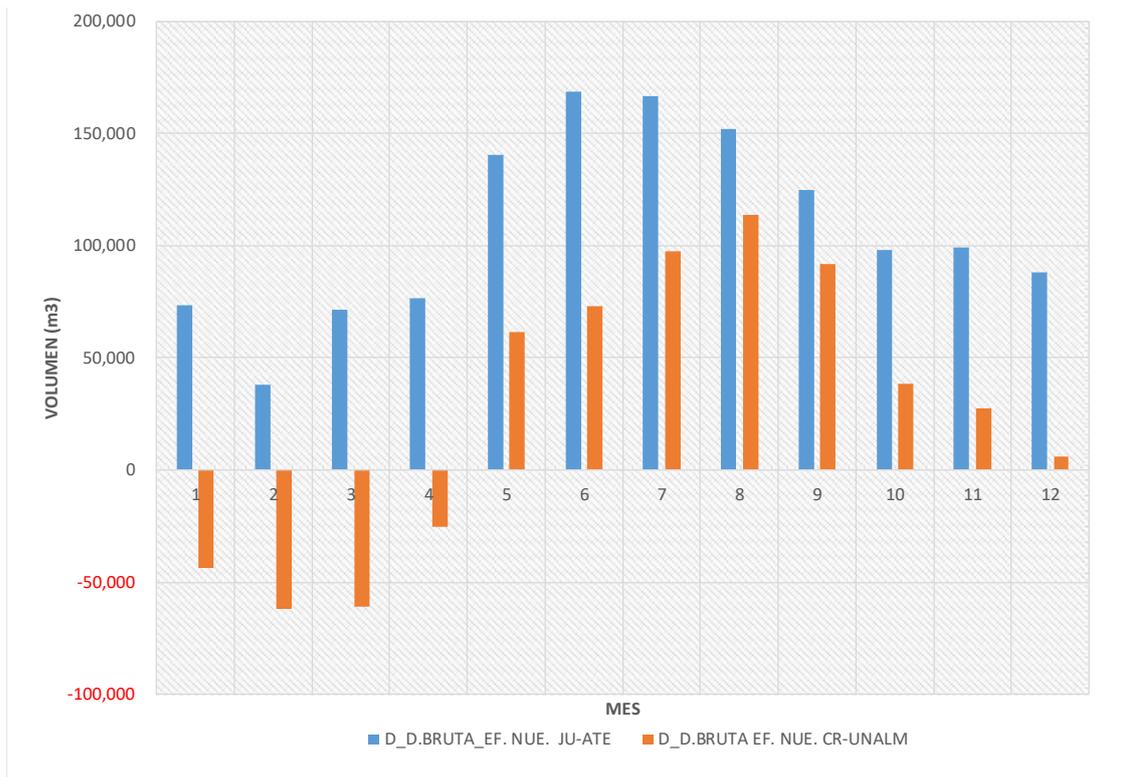


Figura 50: Representación de la variación del balance de uso y consumo de agua de riego a situación nueva

V. CONCLUSIONES

Después de haber realizado el trabajo de investigación se concluye:

- De la simulación con el modelo ISAREG de los cuatro escenarios de riego, en los campos agrícolas de la UNALM, el escenario 1 (MXR) es el óptimo y permite obtener en el cultivo el rendimiento relativo máximo ($Y_a/Y_m = 100$ por ciento), con intervalos de riego (IR) que varían de (2 a 20 días) y demanda neta anual (DN) de **771,417.83 m³**, en los otros tres escenarios los rendimientos Y_a/Y_m disminuyen y los IR aumentan: para escenario 2 MAD (93-100 por ciento, con IR de 3-25 días y DN de 733,285.86 m³), para el escenario 3 FR7 (79-100 por ciento, con IR de 7-20 días y DN de 712,735.82 m³) y para el escenario 4 FR15 (46-100 por ciento con IR de 15 a 21 días y DN de 571,213.64 m³).
- Las demandas brutas anuales de agua de riego, obtenidas de la simulación con el modelo ISAREG, para los escenarios de riego MXR, MAD, FR7 y FR15, son: situación actual (2019) **DBA** de **1'530,834.86 m³** (100 por ciento), 1'454,926.22 m³ (95 por ciento) 1'439,657.10 m³ (94 por ciento) y 1'188,146.70 m³ (77.6 por ciento), y situación nueva (deseada) **DBN** es **1'185,044.23 m³** (100 por ciento), 1'124,856.79 m³ (94.9 por ciento), 1'113,997.93 m³ (94 por ciento) y 944,853.92 m³ (79.7 por ciento).
- Las ofertas anuales de agua de riego de ingreso a la UNALM, por la parte baja (Campo Ferial) y parte alta (Frutales), según registro histórico de caudales (2014-2018) por la Comisión de Riego (CR) de la UNALM, alcanzan valores de 1'071,779.41 m³ parte baja y 430,049.43 m³ parte alta, con un total anual de **1'501,828.84 m³**; por otro lado la oferta anual de agua de riego programado por la Junta de Usuarios (JU) de ATE (2012-2019), para la parte baja es 1'522,800.00 m³ y para la parte alta 958,950.00 m³ con un total anual de **2'481,750.00 m³**.
- Del balance de agua de riego, la demanda bruta situación actual (2019) con la oferta del registro de la Comisión de Riego de la UNALM, existe un déficit de 384,876.44 m³ en 6 meses (enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre) y un superávit de 355,870.42 m³ en 6 meses (mayo, junio, julio, agosto, setiembre y octubre), con un balance anual **deficitario de 29,006.02 m³**, la misma demanda situación actual (2019) comparada con la oferta de agua de la programación de la Junta de Usuarios de ATE, se reporta un déficit de 9,475.58 m³ en el mes (febrero) y un superávit de

960,390.72 m³ en los otros 11 meses, con un balance anual en **exceso de 950,915.14 m³**.

- Finalmente del balance de agua de riego, de la demanda bruta situación nueva (deseable) con la oferta del registro de la Comisión de Riego de la UNALM, se tiene un déficit de 192,146.10 m³ en 4 meses (enero, febrero, marzo, abril) y un superávit de 508,930.71 m³ en 8 meses (mayo - diciembre), con **un balance anual en exceso de 316,784.61 m³**, la misma demanda bruta situación nueva (deseable) comparada con la oferta de la programación de la Junta de Usuarios de ATE, reporta un **superávit de 1,296,705.77 m³** en los 12 meses, siendo el balance global anual en exceso de 1,296,705.77 m³.

VI. RECOMENDACIONES

Proseguir las investigaciones con las siguientes recomendaciones:

- Instalar o mejorar los dispositivos de aforo como aforador PARSHALL y RBC, así como sistemas remotos para el registro diario de caudales y cómputo de volúmenes, principalmente en los de ingreso de agua de riego al campus de la UNALM, parte baja (campo ferial), parte alta (frutales), derivaciones y puntos importantes en la red de canales de conducción y distribución de agua.
- Optimizar la operación de la red de distribución del agua de riego, hasta nivel de parcela, a fin de que cada campo, pueda recibir dentro de lo posible la dotación exacta de agua con la frecuencia requerida por el cultivo, de acuerdo con los resultados obtenidos de la simulación con el ISAREG para el escenario 1 MXR.
- Habilitar e implementar progresivamente el sistema de riego localizado y por aspersion en la mayoría de los campos agrícolas, a excepción de algunos del programa de: Frutales, Vivero Forestal, Jardín Botánico, Vivero Ornamentales y Centro de Ventas que se recomienda sigan siendo regados por gravedad.
- En los campos de la UNALM, evaluar la programación y parámetros de riego, para el escenario 1 MXR, a fin de evaluar el desempeño del modelo ISAREG y así mismo determinar los parámetros de cultivo y eficiencias de aplicación de riego a nivel de parcela.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G., Pruitt, W. O., Wright, J. L., Howell, T. A., Ventura, F., Snyder, R., others. 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural water management*, 81, 1–22. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.007>
- Ascencios Templo, D. R. 2021. Eficiencia hídrica, energética y emisiones CO2 utilizando sistemas de riego presurizado en las Áreas verdes de la UNALM. *Tesis para obtener el grado PhD. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 190 p.* Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4612>
- Ascencios, D., Montalvo, N., Meza, K., & Cifuentes, A. 2019. Coeficientes de riego del césped americano (*Stenotaphrum secundatum*) en condiciones de estrés hídrico utilizando riego por goteo subterráneo. *Scientia Agropecuaria*, 10, 207–216. doi:<http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.02.06>
- Cholpankulov, E. D., Inchenkova, O. P., Paredes, P., & Pereira, L. S. 2008. Cotton irrigation scheduling in Central Asia: Model calibration and validation with consideration of groundwater contribution. *Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*, 57, 516–532. doi:<https://doi.org/10.1002/ird.390>
- Coto-Valverde, B. L. 2023. Diseño de un sistema de riego eficiente para el uso adecuado y racional del recurso hídrico en el sector agrícola de Agua Caliente de Cartago.
- Darouich, H., Cameira, M. R., Gonçalves, J. M., Paredes, P., & Pereira, L. S. 2017. Comparing sprinkler and surface irrigation for wheat using multi-criteria analysis: water saving vs. economic returns. *Water*, 9, 50. doi:<https://doi.org/10.3390/w9010050>
- De la Torre, F. B. 2017. Los recursos hídricos en el mundo: cuantificación y distribución. *Cuadernos de estrategia*, 21–70. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6115629>
- Durán Gómez, M. R., Ramos Fernández, L., Altamirano Gutiérrez, L., & Arapa Quispe, J. 2021. Imagen térmica y sensores de termopares para estimar el índice de estrés hídrico del cultivo de arroz bajo riego por goteo. *Idesia (Arica)*, 39, 109–118. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292021000100109>
- Grasso, J., Cadenazzi, M., & Giménez, L. 2018. Evaluación del modelo de simulación WinSareg para soja en el litoral oeste del Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 22, 98–106. doi:<https://doi.org/10.31285/agro.22.1.10>
- Huatay, M. K., Padilla, A. M., Carranza, C. F., & others. 2019. Evapotranspiration and water requirements for crop irrigation scheduling of *Saccharum officinarum* L.(Poaceae) "sugar cane", *Zea mays* L.(Poaceae)"corn" and *Asparagus officinalis* L.(Asparagaceae) "asparagus" in Chicama valley, Perú. *Arnaldoa*, 26, 793–814. doi:<http://doi.org/10.22497/arnaldoa.262.26218>
- Paredes, P., & Pereira, L. S. 2010. Water balance and irrigation scheduling simulation model-the WinISAREG model. *Draft manual*, 1, 69.

- Pereira, L. S., De Juan, J. A., Picornell, M. R., & Tarjuelo, J. M. 2010. El riego y sus tecnologías. *Albacete: CREA-UCLM*, 296. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/55493635/El_Riego_y_sus_Tecnologias-libre.pdf
- Pereira, L. S., Paredes, P., & Jovanovic, N. 2020. Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. *Agricultural water management*, 241, 106357. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106357>
- Pérez-Iriarte, C., Sánchez-Delgado, M., Razuri-Ramírez, L., & Enciso-Gutiérrez, A. 2021. Dosis de riego y coeficiente del cultivo (Kc) en la producción del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en Lima, Perú. *Revista Ingeniería UC*, 28, 349–359. doi:<https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i3.44>
- Popova, Z., & Ivanova, M. 2016. Irrigation Scheduling For Maize Under Changing Northern Black Sea Climate. *Mechanization in agriculture & Conserving of the resources*, 62, 26–1959. Obtenido de <https://stumejournals.com/journals/am/2016/4/26>
- Popova, Z., & Pereira, L. S. 2011. Modelling for maize irrigation scheduling using long term experimental data from Plovdiv region, Bulgaria. *Agricultural Water Management*, 98, 675–683. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.11.009>
- Popova, Z., Ivanova, M., Martins, D., Pereira, L. S., Doneva, K., Alexandrov, V., & Kercheva, M. 2014. Vulnerability of Bulgarian agriculture to drought and climate variability with focus on rainfed maize systems. *Natural hazards*, 74, 865–886. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-014-1215-3>
- Portuguez-Maurtua, M., & Verano, Z. C. 2016. Generación de mapa de número de curva con sistema de información geográfica. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 6. Obtenido de <https://journals.continental.edu.pe/index.php/apuntes/article/view/544>
- Salomón, M. A., Sánchez, C. M., & Pereira, L. S. 2007. Estimación del balance hídrico mediante aplicación del modelo ISAREG en el Canal Segundo Vistalba, Lujan de Cuyo, Mendoza (Argentina). *Modernización de Riegos y Uso de Tecnologías de Información; Ruz, E., Pereira, LS, Eds*, 115–117.
- Sánchez Delgado, M. A. 2023. Aplicación del riego de desecación parcial (PRD) en el cultivo de papa mediante el sistema de riego por goteo. *Tesis para obtener el grado PhD. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 143 p.* Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5974>
- Sánchez, M. A., Mejía, J. A., Juli, D. A., Rodríguez, G., & Arapa, J. B. 2020. Respuesta del inicio del secado parcial de raíces en el rendimiento del cultivo de camote (*Ipomoea batatas*). *81*, 385–394. doi:<https://doi.org/10.21704/ac.v81i2.1679>
- SISMID-UNI. 2010. Microzonificación Sísmica en el distrito de LA MOLINA. *CISMID-Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento-PERÚ*. Obtenido de https://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA_PUBLICAR/CISMID/Informe_microzonificacion_sismica_La_Molina.pdf
- Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., & Raes, D. 2012. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO Riego y Drenaje 66. *Rome. 510pp.*

Vasquez, A., Vasquez, I., Vasquez, C., & Cañamero, M. 2017. Fundamentos de la ingeniería de riegos: diseño de un sistema de riego por gravedad. *Lima. Perú. P*, 293–316.

Wu, Y., Liu, T., Paredes, P., Duan, L., & Pereira, L. S. 2015. Water use by a groundwater dependent maize in a semi-arid region of Inner Mongolia: Evapotranspiration partitioning and capillary rise. *Agricultural Water Management*, 152, 222–232. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.016>

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Calicatas por campos y usuarios en la UNALM

N.-Cal	Este (m)	Norte (m)	Prof. (m)	Tipo	Usuario	Campo	Humedad	Cultivo
1	287714.0	8663507.0	1.75	UNALM	FUNDO	SANTA TERESA	SEMI-SECO	Sin Cultivo
2	287702.0	8663356.0	1.10	FDA	PROG_MAIZ	VIVERO	SEMI-HUMEDO	Sembrado Maiz
3	287814.0	8663249.0	1.60	FDA	PROG_RAICES_Y_TUBEROSAS	CAMPO RyT 1	SECO	Sin Cultivo
4	288209.0	8663222.0	1.20	FDA	PROG_ALGODON	EL CARMEN 1-2	SEMI-HUMEDO	Algodón
5	288084.0	8663137.0	1.12	FDA	PROG_ALGODON	EL CARMEN 3-4	SEMI-HUMEDO	Algodón
6	288261.0	8663140.0	1.04	FDA	PROG_POCA_RIGORANCH	POCA PASTO 2	SECO	Pasto Elefante
7	288058.0	8662929.0	1.06	FDA	FAC_CIENCIAS_BIOLOGIA	YOCO BIOCHAR 1	SEMI-SECO	Chala Cortado
8	287978.0	8663045.0	1.05	FDA	CENTRO_DE_VENTAS	BOSQUE SIMULADO	SEMI-HUMEDO	Bosque
9	288431.0	8663141.0	1.15	FDA	PROG_FRUTALES	PALTO JOVEN - PTA 5	SEMI-SECO	Palto
10	288466.0	8663048.0	1.25	FDA	PROG_FRUTALES	PALTO ADULTO - PTA 5	SEMI-SECO	Palto
11	288613.0	8663207.0	1.25	FDA	PROG_FRUTALES	GRANADILLA	SEMI-SECO	Maracuya
12	287875.0	8663423.0	1.04	FDA	FAC_AGRONOMIA	UNIDAD DE RIEGO	SEMI-HUMEDO	Parra Uva
13	288061.0	8663382.0	1.45	FDA	VIVERO_ORNAMENTALES	ARBORETUM	SECO	Arboles
14	288010.0	8663452.0	1.05	UNALM	LAB_DE_SUELOS	CAMPO 3-4	SEMI-HUMEDO	Sin Cultivo
15	287897.0	8663323.0	1.17	FDA	VIVERO_ORNAMENTALES	PROPAGACION	SEMI-HUMEDO	Viveros
16	288129.0	8663509.0	1.14	FDA	FAC_ZOOTECNIA	CAMPO EXPERIMENTAL	HUMEDO	Arado
17	288721.0	8664131.0	1.12	UNALM	CAMPO_FERIAL	RING PRINCIPAL	HUMEDO	Grass
18	288523.0	8664081.0	0.95	FDA	PROG_CEREALES	CAMPO OFICINA 1	SECO	Quiwicha
19	288873.0	8663382.0	1.14	FDA	PROG_FRUTALES	PALTO TIERNO	SEMI-HUMEDO	Paltas Chicas
20	288853.0	8663491.0	1.16	FDA	PROG_FRUTALES	LUCUMO - LT 3	SEMI-HUMEDO	Lucumo
21	288990.0	8663467.0	1.10	FDA	PROG_FRUTALES	GRADADO - LT 1	SEMI-HUMEDO	Granado
22	288981.0	8663704.0	1.10	FDA	PROG_FRUTALES	MANDARINA - LT 3	HUMEDO	Mandarina
23	288833.0	8663668.0	1.08	FDA	PROG_FRUTALES	LUCUMO - LT 1	SEMI-SECO	Lucumo
24	288695.0	8663545.0	1.70	FDA	HUERTO	SAN JUAN 3	SEMI-HUMEDO	Tomate
25	288690.0	8663720.0	1.85	FDA	HUERTO	SAN FRANCISCO 5-6	SEMI-HUMEDO	Sin Cultivo
26	288578.0	8663610.0	1.18	FDA	HUERTO	SAN FRANCISCO 1	SEMI-HUMEDO	Hortalizas
27	288638.0	8663778.0	1.70	FDA	PROG_POCA_RIGORANCH	POCA MAIZ	HUMEDO	Pasto Elefante
28	288571.0	8663870.0	1.07	UNALM	CAMPO_FERIAL	ESPECTACULOS 1-2	HUMEDO	Grass
29	288789.0	8663866.0	1.08	UNALM	CAMPO_FERIAL	PAINTBALL 2	HUMEDO	Grass
30	288294.0	8664043.0	1.00	FDA	JARDIN_BOTANICO	JARDIN BOTANICO	SEMI-HUMEDO	Grass Arboles
31	288502.0	8664046.0	1.02	FDA	PROG_CEREALES	CAMPO OFICINA 2	SECO	Quiwicha
32	288561.0	8663999.0	1.10	FDA	PROG_MAIZ	JARDIN GENETICO	SEMI-HUMEDO	Arado
33	288198.0	8664037.0	1.05	UNALM	FAC_ING_AGRICOLA	AREA DRyD 1-2	HUMEDO	Arroz
34	288399.0	8663803.0	1.05	FDA	FAC_CIENCIAS_BIOLOGIA	EXPERIMENTAL CIRGEBB	SECO	Sin Cultivo
35	287038.0	8663342.0	1.50	FDA	PROG_MAIZ	LIBRE 1-G MAIZ	SEMI-SECO	Sin Cultivo
36	287164.0	8663270.0	1.52	UNALM	FUNDO	LIBRE 1F	SEMI-HUMEDO	Sin Cultivo
37	287181.0	8663593.0	1.17	UNALM	FUNDO	CHIQUERO 2A	HUMEDO	Aguaymanto
38	287451.0	8663553.0	1.57	UNALM	FUNDO	LIBRE 2C	SEMI-SECO	Sin Cultivo
39	287392.0	8663450.0	1.55	UNALM	FAC_ING_AGRICOLA	CIER FIA - DRH 2	SEMI-SECO	Sin Cultivo
40	287324.0	8663363.0	1.10	UNALM	FUNDO	LIBRE 1B-1C	HUMEDO	Maiz Chala
41	287229.0	8663587.0	1.10	UNALM	FUNDO	CHIQUERO 2B	HUMEDO	Aguaymanto
42	287362.0	8663651.0	1.80	FDA	PROG_MAIZ	CHIQUERO 1A-1B	HUMEDO	Sin Cultivo
43	287496.0	8663737.0	1.36	UNALM	FAC_ING_AGRICOLA	AREA EXPERIMENTAL DRH	SECO	Sin Cultivo
44	287611.0	8663571.0	1.93	UNALM	FUNDO	PANCAL	SEMI-SECO	Sin Cultivo
45	287517.0	8663363.0	1.68	UNALM	FAC_ING_AGRICOLA	CIER FIA - DRH 2	HUMEDO	Sin Cultivo
46	288668.0	8663229.0	1.10	FDA	PROG_FRUTALES	COLECCIÓN CITRICOS	SEMI-SECO	Colección Citricos
47	288801.0	8663271.0	1.15	FDA	PROG_FRUTALES	TANGELO - LT 1	SEMI-HUMEDO	Naranja
48	288721.0	8663382.0	1.70	FDA	HUERTO	SAN JUAN 1	SECO	Sin Cultivo
49	288630.0	8663317.0	1.66	FDA	HUERTO	ALEGRE 4	SEMI-SECO	Sin Cultivo
50	288673.0	8663435.0	1.15	FDA	HUERTO	SAN JUAN 2	HUMEDO	Aji
51	288536.0	8663499.0	1.15	FDA	HUERTO	ALEGRE 3	SEMI-HUMEDO	Pepinillo
52	288179.0	8663540.0	1.19	FDA	FAC_ZOOTECNIA	AGROSTOLOGICO	HUMEDO	Pastos
53	287796.0	8663787.0	1.12	UNALM	FAC_ING_AGRICOLA	AREA EXPERIMENTAL FIA	SECO	Durazno y Tara
54	288297.0	8663655.0	1.08	UNALM	EDUCACION_FISICA	ESTADIO	HUMEDO	Grass
55	287586.0	8663758.0	1.50	UNALM	FAC_ING_AGRICOLA	AREA EXPERIMENTAL DRH	SECO	Sin Cultivo
56	288314.0	8662190.0	1.05	FDA	VIVERO_FORESTAL	ICHAL - II A	SEMI-SECO	Arboles Libres
57	288475.0	8661741.0	1.05	FDA	VIVERO_FORESTAL	COSTA - I	SEMI-HUMEDO	Chala Cortada
58	288260.0	8662777.0	1.00	FDA	PASTOS_Y_FORRAJES	CAMPO EXPERIMENTAL 2	HUMEDO	Sin Cultivo
59	288133.0	8662696.0	1.00	FDA	PROG_CEREALES	GUAYABO II	SEMI-SECO	Sin Cultivo
60	288578.0	8662973.0	1.07	UNALM	BANCO_DE_SEMEN	CAMPO BS - 3	SEMI-HUMEDO	Maiz Chala
61	288883.0	8663769.0	1.15	FDA	PROG_FRUTALES	MANDARINA - LT 2	SEMI-SECO	Mandarina
62	288430.0	8662234.0	1.08	FDA	VIVERO_FORESTAL	SELVA I	SEMI-HUMEDO	Maiz Verde
63	288610.0	8662052.0	1.03	FDA	VIVERO_FORESTAL	SIERRA I	SEMI-SECO	Arboles por Goteo
64	288665.0	8661916.0	1.02	FDA	VIVERO_FORESTAL	BOSQUE MIXTO	SEMI-SECO	Tara
65	288240.0	8662427.0	1.00	FDA	VIVERO_FORESTAL	ICHAL I	HUMEDO	Arboles
66	288393.0	8662439.0	1.13	FDA	VIVERO_FORESTAL	VIÑA ALTA	SECO	Arboles por Goteo
67	288264.0	8663011.0	1.10	UNALM	FUNDO	GUAYABO 1A- 1B	SECO	Maiz Chala
68	288417.0	8662014.0	1.00	FDA	VIVERO_FORESTAL	ICHAL II-A	SEMI-SECO	Sin Cultivo
69	288000.0	8663638.0	0.98	UNALM	PARQUES_Y_JARDINES	TELETUBIS	SECO	Grass y Arbustos
70	287815.0	8663551.0	1.05	UNALM	PARQUES_Y_JARDINES	PARADERO BUSES	SECO	Grass y Arbustos
71	287717.0	8663729.0	1.00	UNALM	PARQUES_Y_JARDINES	JARDIN BAN	SEMI-SECO	Grass
72	288014.0	8663773.0	1.01	UNALM	PARQUES_Y_JARDINES	FAC_CIENCIAS	SECO	Grass y Arbustos
73	288165.0	8663741.0	0.99	UNALM	PARQUES_Y_JARDINES	SUB_ESTACION ELECTRICA	SECO	Grass y Arbustos
74	287781.0	8663897.0	1.08	UNALM	PARQUES_Y_JARDINES	CASETA RIEGO FIA	SEMI-SECO	Grass
75	288125.0	8663894.0	1.04	UNALM	PARQUES_Y_JARDINES	MONUMENTO CABALLO	HUMEDO	Grass
76	287882.0	8663706.0	1.07	UNALM	PARQUES_Y_JARDINES	NUEVA BAN - OFICINAS DRH	HUMEDO	Grass y Arbustos
77	287997.0	8663939.0	1.05	FDA	VIVERO_FORESTAL	DANTITAS	HUMEDO	Arbustos

Anexo 2: Panel fotográfico de actividades realizadas



a) Fundo



b) Huerto



c) Frutales



d) Vivero forestal

Vista y situación de campos agrícolas



a) Calicata a máquina



b) Calicata a mano



c) definición de estratos



d) Toma de muestra

Proceso de calicátado y toma de muestra



a) Jardín Aula



b) Fundo



c) Algodón



d) Centro de Investigación CIER

Calicatas en diferentes campos agrícolas



a) Aforador Parshall



b) Regle de Parshall



c) Ingreso Reservoir RI-B



d) Repartición y desvío fondo

Aforo Caudal de Ingreso Parte Baja – Campo Ferial y Línea de Conducción



a) Ingreso Parte Alta



b) Rejilla de Limpieza



c) Pase Ingreso Raúl Ferrero



d) Ingreso Vivero Forestal

Aforo Caudal de Ingreso Parte Alta – Frutales y Línea de Conducción



a) Frutales palto SSGG



b) Fundo Puerta



c) Fundo Maíz



d) Programa de Algodón

Aforos ingreso de agua a nivel de parcelas



a) Ingreso de agua



b) Riego a nivel de parcela

Aplicación y método de riego en campos agrícolas Banco de Semen



Aplicación y método de riego en campos agrícolas el Huerto



Aplicación y método de riego en campos el Fundo



Aplicación y método de riego en campos agrícolas Fundo

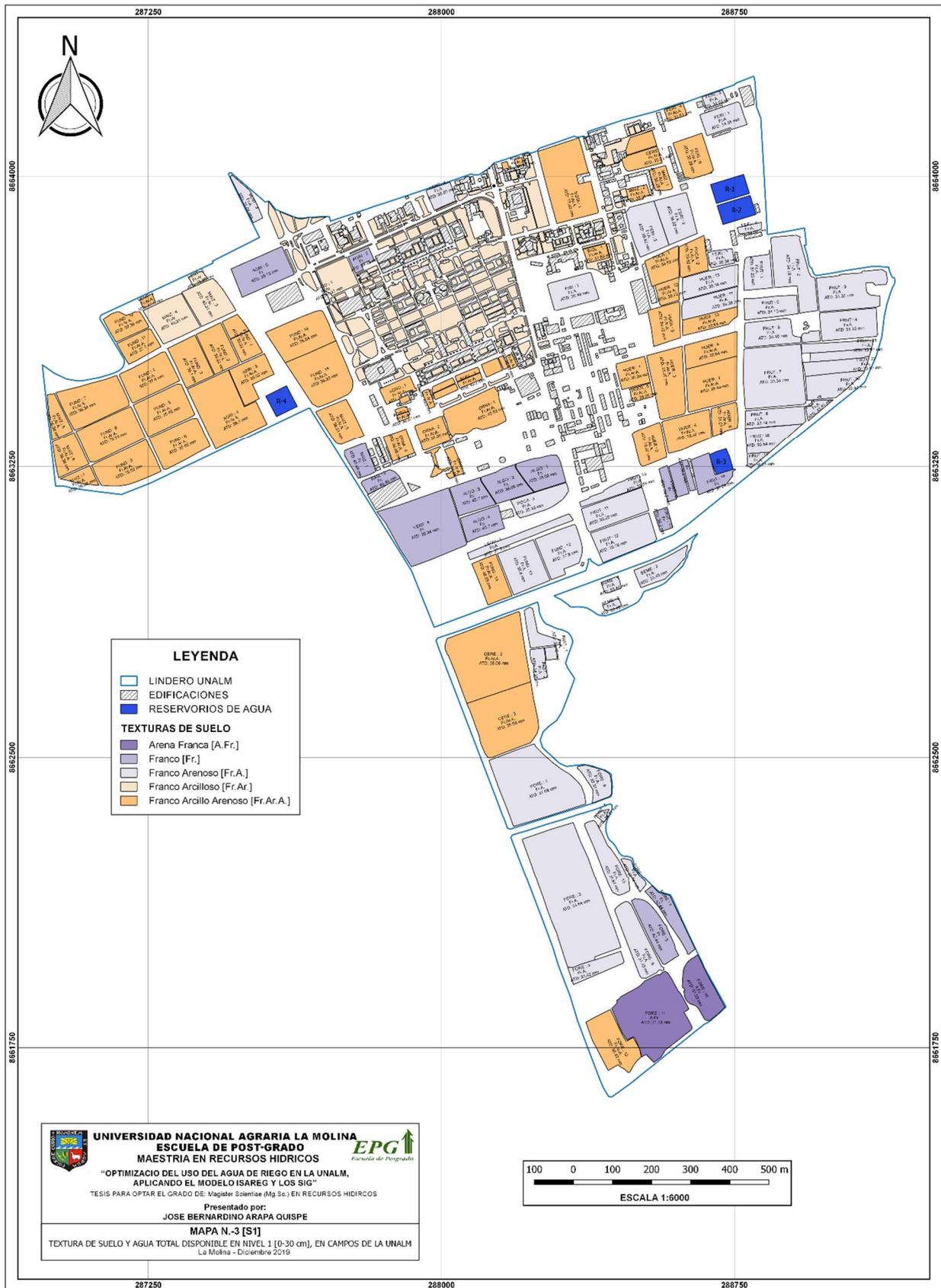
Anexo 3: Mapas temáticos



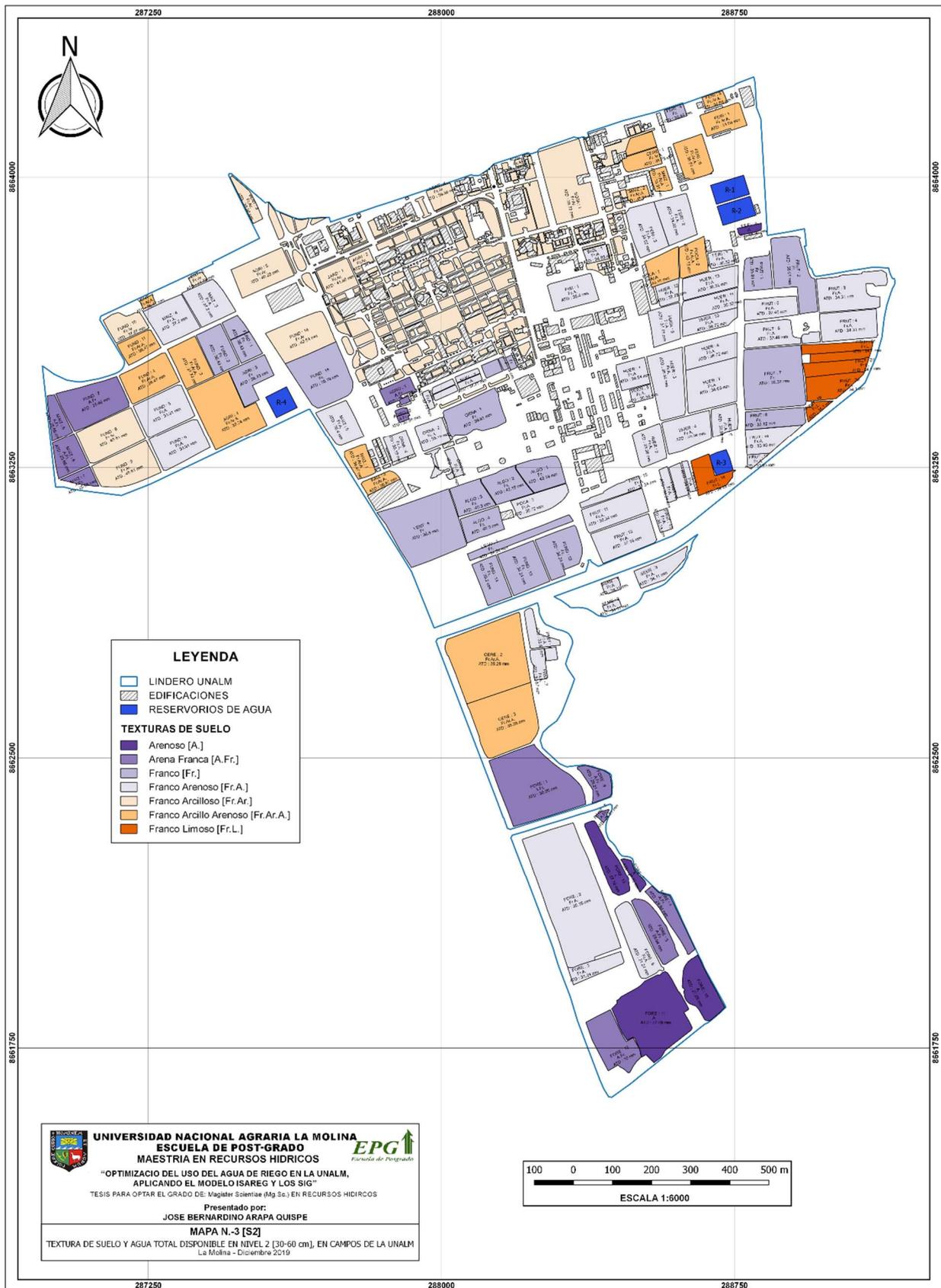
Ubicación de usuarios de riego de la UNALM



Ubicación e influencia de calicatas de suelo en los campos agrícolas de la UNALM



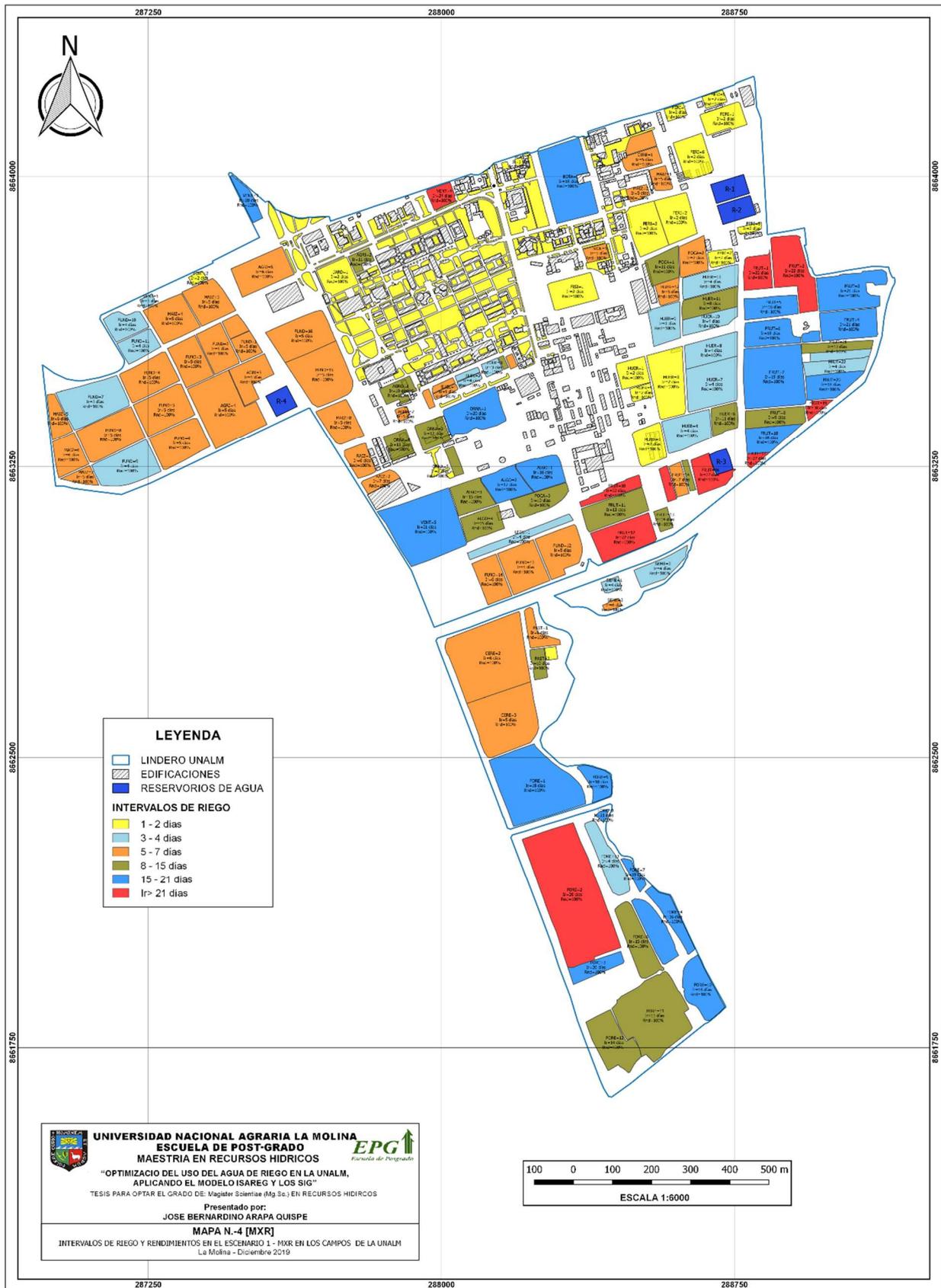
Textura de suelo y agua total disponible en el nivel 1 (0-30 cm), en campos de la UNALM



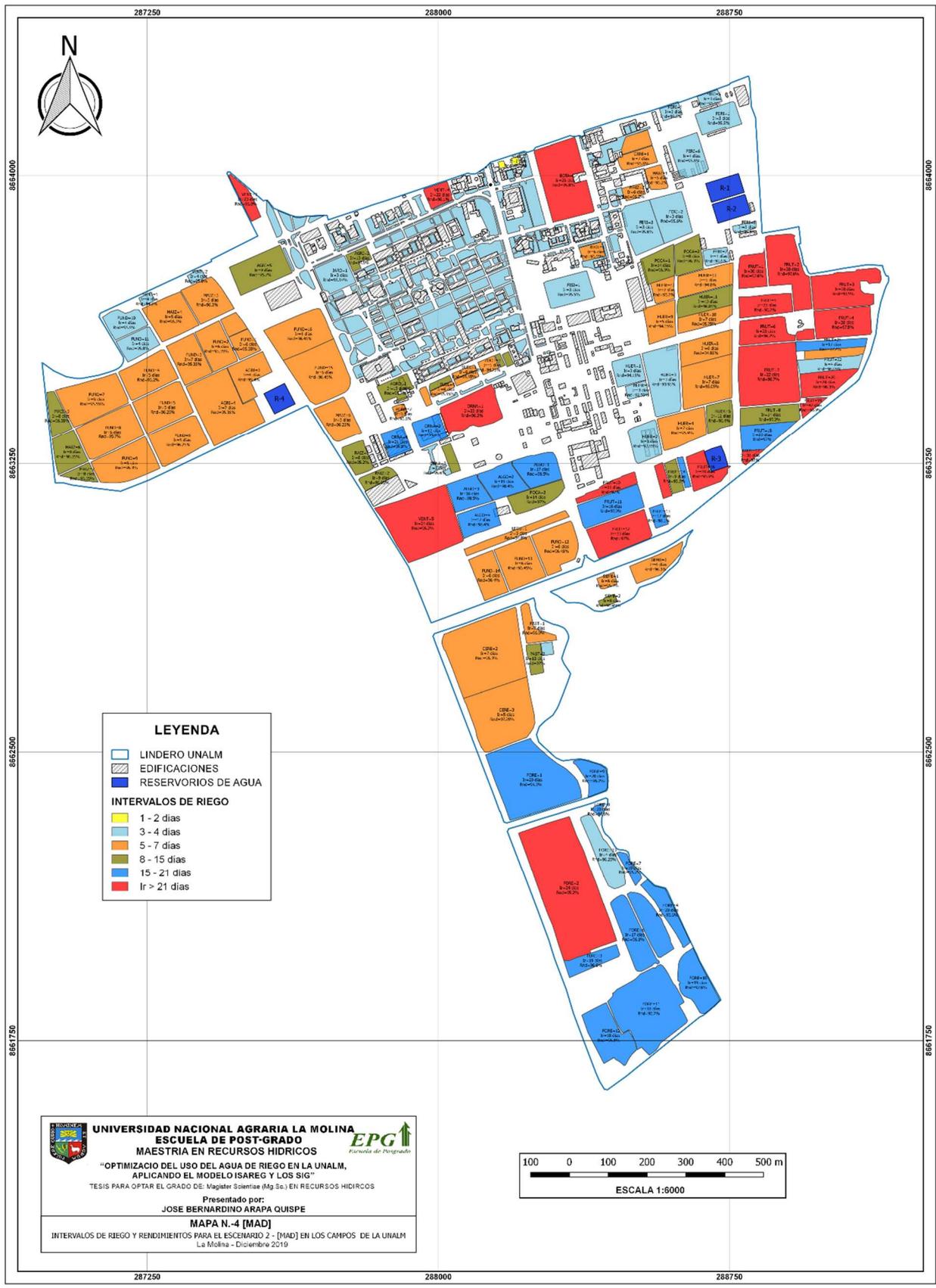
Textura de suelo y agua total disponible en el nivel 2 (30-60 cm), en campos de la UNALM



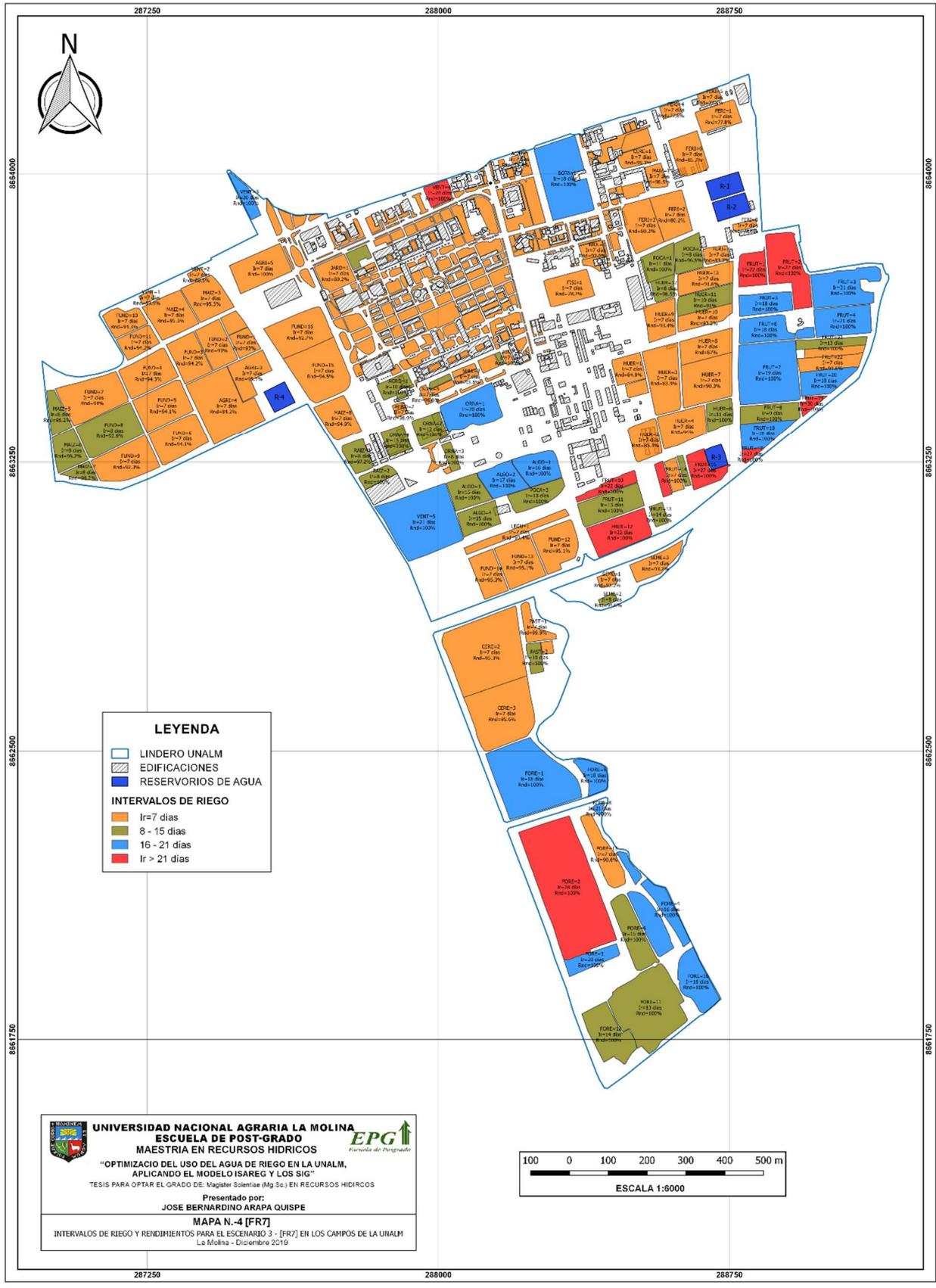
Textura de suelo y agua total disponible en el nivel 3 (60 – 90 cm), en campos de la UNALM



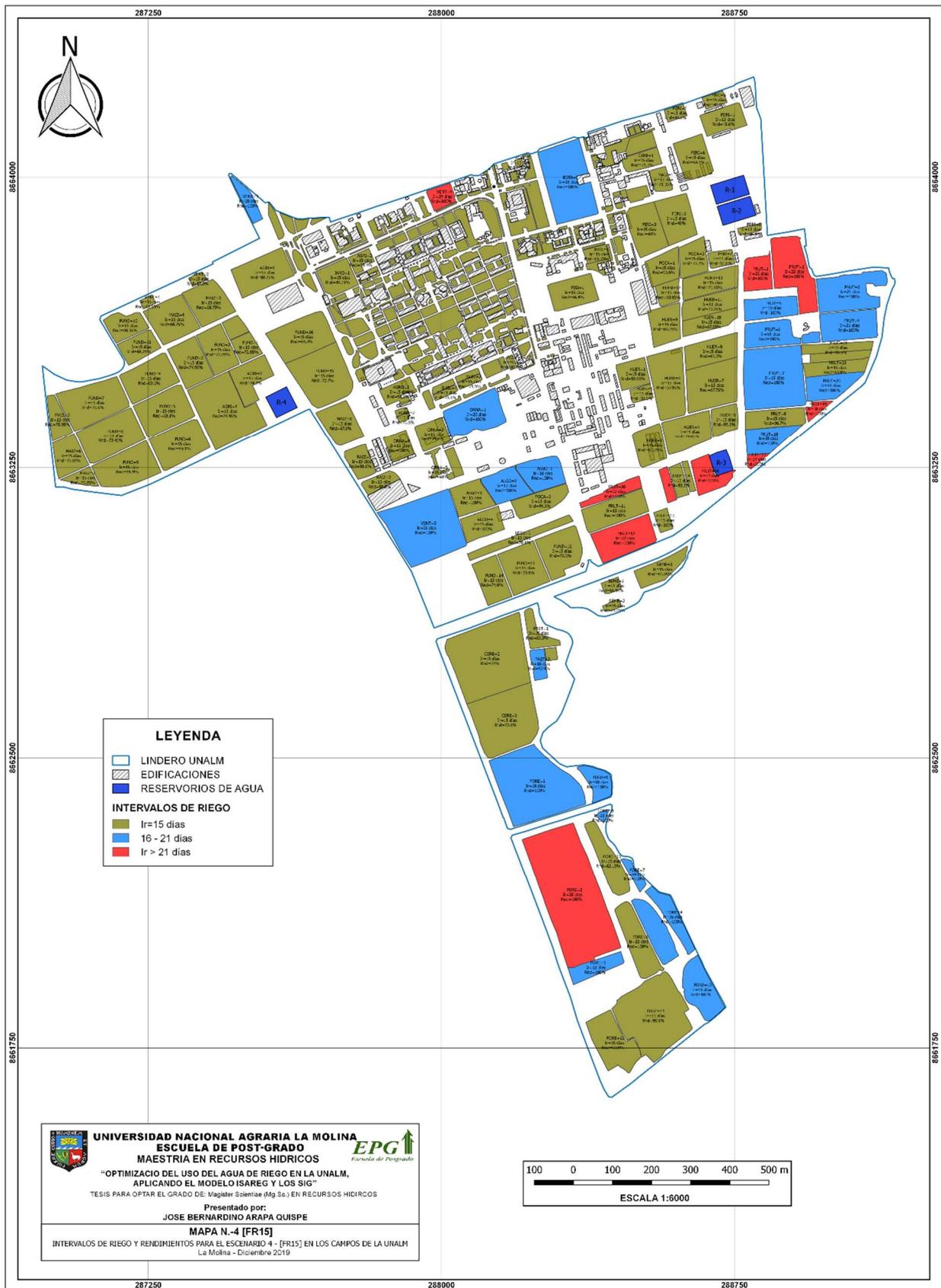
Intervalos de riego y rendimientos en el escenario 1 – (MXR) en los campos de la UNALM



Intervalos de riego y rendimientos en el escenario 2 – (MAD) en los campos de la UNALM



Intervalos de riego y rendimientos para el escenario 3 – (FR7) en los campos de la UNALM



Intervalos de riego y rendimientos para el escenario 4 – (FR15) en los campos de la UNALM