

CUANTIFICAR LA ESCORRENTÍA Y PÉRDIDA DE SUELO EN PARCELAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN CON PENDIENTE

El objetivo principal de este estudio es conocer los tiempos de riego necesarios para que no se produzca escorrentía superficial, que a su vez pueda dar lugar a la ocurrencia de erosión de suelo. Con el fin último de que el agricultor sea capaz de programar los riegos, evitando la formación de escorrentía. De este modo, el agricultor podrá mantener la estructura del suelo, dando lugar a unas condiciones edáficas adecuadas para el desarrollo de los cultivos. Este estudio centra su investigación en 476 has agrícolas pertenecientes al término municipal de Artajona. Toda esta superficie está dotada de un sistema de riego por aspersión.

Con el fin de conocer y abordar el fenómeno de escorrentía, es necesario estudiar las condiciones climáticas de la zona, las características edáficas en las que se encuentran las parcelas proyectadas y las necesidades hídricas máximas que van a demandar los cultivos potenciales implantados en la superficie agrícola estudiada. La información obtenida de estos estudios junto a la metodología de estudio del comportamiento del agua en el suelo, han sido las bases del proyecto de investigación, en concreto, la ecuación de Green Ampt. Esta ecuación tiene en cuenta la conductividad hidráulica saturada (K_s), el potencial hídrico de succión (S_{av}) y el contenido de humedad existente en el momento que se aplica el riego, para determinar el tiempo de formación de escorrentía.

1. Zona de estudio

Dentro de este apartado se incluye la descripción de la zona de estudio, a nivel climático, edáfico y referente a las necesidades hídricas de los cultivos potenciales. Además, también se definen los métodos y modelos matemáticos, de gestión de información territorial, e informáticos, que han sido utilizados para obtener los resultados finales del proyecto.

El trabajo de investigación se localiza en 476 has pertenecientes al término municipal de Artajona. Este municipio pertenece a la Comunidad Foral de Navarra y se sitúa en la comarca de Tafalla, a 31 km de la capital navarra, Pamplona. La población de este municipio alcanza los 1658 habitantes en 2017 (INE), de los cuales un alto porcentaje tiene como actividad principal de forma directa o indirecta la agricultura. La zona regable estudiada en este proyecto pertenece a los sectores II.2 y III del Canal de Navarra. La

transformación de secano a regadío se hizo oficial el 11 de junio de 2008 (Gobierno de Navarra, 2008).

Esta transformación no hubiera sido posible sin la inquietud, por parte de la Cooperativa de Artajona para mejorar la situación agraria de la zona e incrementar sus conocimientos sobre el manejo de riego. La actividad de la Cooperativa de Artajona estaba centrada, anteriormente, en el cultivo de cereal de secano, contando con 372 socios y 4.000 hectáreas agrarias. Sin embargo, la falta de continuidad por parte de agricultores jóvenes despertó esta inquietud por mejorar y se mostró proactiva a la transformación. Para la cooperativa el objetivo principal era crecer en número de socios y en superficie, buscando ser además más competitivos en el mercado con productos más diferenciados.

1.2 Estudio climático

El presente punto se basa en la descripción de las condiciones climáticas en las que se desarrolla la superficie agrícola estudiada en el proyecto de investigación sobre la determinación de tiempos de formación de escorrentía en 476 Ha, las cuales se encuentran íntegramente en el municipio navarro de Artajona, estando el núcleo de la población situado a 353 m de altitud.

El objetivo de este estudio es conocer las condiciones climáticas de la zona para determinar su incidencia sobre los factores que afectan a la formación de escorrentía.

En primer lugar, se van a tomar los datos de la estación meteorológica manual de Olite. Esta se halla ubicada en las siguientes coordenadas:

X: 610487

Y: 4704973

Además, se encuentra a una altitud de 389 m. Dicha estación proporciona datos de precipitación desde 1931 y posteriormente en 1938 se inició el registro de los referidos a temperaturas. Por otra parte, al tratarse de una estación manual, los datos se reflejan una vez al día mientras que estaciones que presentan mayor autonomía siendo así automáticas, son capaces de tomar datos cada 10 minutos. En el caso de las estaciones manuales la recopilación de datos se lleva a cabo por observadores. Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) la configuración de este tipo de dispositivos debe

contener (1) una garita, la cual tiene una función protectora del sol, la lluvia, el granizo y la nieve, (2) los instrumentos esenciales que se corresponden con: termómetro seco y húmedo, termómetros de máxima y mínima, y un pluviómetro, (3) y finalmente instrumentos no esenciales como por ejemplo elementos registradores como termógrafo, hidrógrafo y/o pluviógrafo, barómetro / barógrafo, anemómetro / anemógrafo, veleta, heliógrafo o medidor de insolación, termómetros a diferentes profundidades y alturas respecto el suelo y por último un evaporímetros.

En esta línea, se ha seleccionado la estación meteorológica “Olite MAN”, propiedad compartida entre la Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET) y el Gobierno de Navarra, debido a su proximidad a las parcelas objeto de estudio. Es cierto que Olite presenta una estación automática, la cual inició su actividad en Junio de 1998. Este hecho hace que sólo sean accesibles datos desde hace 22 años, lo que se traduce en una serie de datos no representativa para realizar, por ejemplo, un estudio de las características hídricas de la zona. Por otra parte, la estación de Artajona queda descartada ya que no hay datos suficientes para los períodos mínimos de estudio debido a que inició su actividad en 2004.

A la hora de describir de forma general el clima correspondiente al área dónde se encuentran las parcelas objeto de estudio, se tienen en cuenta tres parámetros: características térmicas, características hídricas y, diagrama ombrotérmico.

Estos tres parámetros se desglosan en los siguientes subapartados aportando al proyecto una descripción general del clima de la zona.

Para definir las características térmicas del área dónde se encuentran las parcelas objeto del presente proyecto, se requiere tomar una muestra representativa de datos térmicos de la estación manual seleccionada. Para que la muestra sea representativa, se deben utilizar, como mínimo, los datos recogidos en los últimos 15 años, es decir, desde 2004 hasta 2019 para nuestro caso. Al haber disponibilidad de datos desde 1938, se ha decidido contemplar la serie completa de datos. De esta forma, se han seleccionado, para realizar el estudio de características térmicas, los datos registrados a lo largo de 81 años. A continuación, en la tabla 1 se detallan los valores térmicos obtenidos.

Tabla 1: Valores térmicos registrados por “Olite MAN” entre 1938 y 2019 (Agencia Estatal de Meteorología & Gobierno de Navarra, 2021).

Parámetro (°C)	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Año
Temperatura máxima absoluta	21,0	25,0	29,2	34	38,2	41,0	42,0	42,6	40,8	33,0	29,8	21,0	42,6
Temperatura media de máximas	9,6,0	11,4	14,9	17,3	21,3	25,9	29,1	28,9	25,6	19,8	13,6	9,9	19
Temperatura media	5,3	6,7	9,6	11,9	15,5	19,6	22,3	22,2	19,3	14,5	9,2	6,0	13,5
Temperatura media de mínimas	1,1	1,9	4,2	6,5	9,7	13,3	15,4	15,4	13,1	9,2	4,7	2,0	8,0
Temperatura media de mínimas absolutas	-4,7	-4,4	-1,4	0,9	3,7	7,8	10,7	10,2	7,4	2,7	-1,5	-3,9	2,3
Temperatura mínima absoluta	-11,0	-11,6	-7,5	-3,0	-0,2	3,0	7,0	5,5	4,0	-3	-7,5	-11,9	-11,9

Realizando un análisis de la tabla 1, la temperatura media anual es de 13.5 °C. Así mismo, se observa cómo los meses más cálidos son junio, julio, agosto y septiembre, y en contraposición, en diciembre, enero y febrero se registran las temperaturas medias más bajas. Dentro de los cuatro meses más cálidos del año, cabe destacar que en julio se alcanza la temperatura media más alta, pero, sin embargo, es en el mes de agosto cuando se registra la temperatura máxima absoluta, siendo esta de 42.6 °C.

El estudio de las temperaturas, sobre todo durante los meses de verano, en los cuales las temperaturas son más altas, va a ser la base para conocer el comportamiento del agua para infiltrarse en el suelo, ya que, durante este periodo del año, las necesidades hídricas de los cultivos de verano van a ser muy altas, y la aplicación de riegos va a ser correspondiente a esta necesidad.

En cuanto a los datos referentes a las temperaturas mínimas, son datos que no influyen en el objetivo final del proyecto, ya que, no van a afectar al incremento de las necesidades hídricas de los cultivos y, por tanto, la necesidad de aplicación de riego en esos momentos no va a ser tan alta.

Para realizar el estudio de las características hídricas se toma una muestra representativa de datos, siendo el mínimo los últimos 30 años, es decir, desde 1989 hasta 2019. Al haber disponibilidad de datos desde 1931, se va a coger la serie completa, es decir, 88 años en total. A continuación, en la tabla 2 se detallan los valores pluviométricos obtenidos.

Tabla 2: Valores pluviométricos registrados por “Olite MAN” entre 1931 y 2019 (Agencia Estatal de Meteorología & Gobierno de Navarra, 2021).

Parámetro	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Año
Precipitación media (mm)	40,8	34,7	40,5	51,5	54,1	45,1	26,5	25,3	38,1	51,2	55,1	40,8	503,7
Precipitación máxima 24 horas (mm)	45	50	40,6	61,5	55,5	75	111	65	66	86,5	86,5	50,3	111
Días de lluvia	9,6	8,8	8,9	9,1	9,2	6,7	4,4	4,4	6,1	8,4	10	9,9	95,5
Días de nieve	1,6	1,4	0,7	0,3	0	0	0	0	0	0	0,4	1	5,4
Días de granizo	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0,7

Como puede verse en la tabla 2, la precipitación media anual se aproxima a los 504 mm. Con relación al tipo de precipitaciones que se dan puede verse cómo la mayor parte de éstas son en forma de lluvia ya que de media al año hay 5.4 días de nieve y 0.7 días de granizo frente a los 95.5 días lluviosos. En consecuencia, se han registrado lluvias un total del 26.16% de los días del año, es decir, aproximadamente un día de cada cuatro.

Puede observarse cómo los meses menos lluviosos son junio, julio, agosto y septiembre. Además, en relación con los días de lluvia de los cuatro meses más secos, éstos presentan los valores más bajos, siendo el mínimo 4 días al mes. Por el contrario, en el extremo opuesto, noviembre registra el máximo de precipitación media en relación con el resto de meses, así como el récord en cuanto a días de lluvia.

Si se establece una comparativa entre el mes más lluvioso (noviembre) y el menor (agosto), hay una diferencia de 29.8 mm. En cambio, si se obtienen los mm de agua por cada precipitación se observa cómo en agosto llueve 5.75 mm por día mientras que en noviembre son 5.51 mm. De este hecho se concluye, que, aunque sea el mes de valores de precipitación media más bajos, los días de lluvia se dan datos pluviométricos similares a los meses que presentan mayor incidencia. En esta línea, según el método de clasificación climática Köppen, existe un mínimo marcado de precipitación en verano. Aparte de lo expuesto, la precipitación máxima histórica en 24 horas para un periodo de retorno de 10 años es de 65.8 mm.

Siguiendo en la línea del apartado anterior, los meses de verano van a ser limitantes a nivel hídrico, ya que durante esos meses van a aparecer una mayor demanda hídrica y las

precipitaciones van a ser muy escasas. Por tanto, la aplicación de riego durante este periodo va a ser la más alta del año.

Un elemento muy útil para analizar la climatología de una zona es el diagrama ombrotérmico. A continuación, en la figura 1 se representa el correspondiente a la estación meteorológica de tipo manual localizada en Olite.

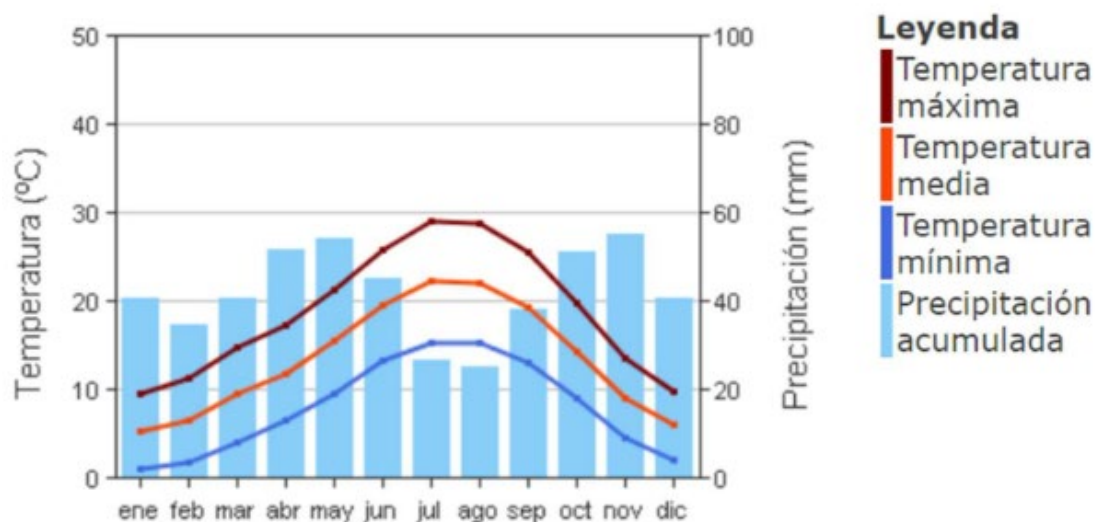


Figura 1: Diagrama ombrotérmico (Agencia Estatal de Meteorología & Gobierno de Navarra, 2021).

Puede apreciarse cómo en el eje de abscisas se representan los meses del año frente a un eje de ordenadas a la izquierda correspondiente a las temperaturas y otro a la derecha con la variable precipitación acumulada. El total anual de precipitaciones correspondientes a la estación meteorológica asciende hasta 504 mm y la temperatura media anual es de 13.5 °C. La evapotranspiración de referencia es de 1,057 mm al año.

Respecto a la oscilación térmica anual puede verse cómo los meses invernales presentan temperaturas más bajas a las que pueden apreciarse para junio, julio, agosto y septiembre. El mes con mayor temperatura media es Julio con 22.3 °C mientras que el más frío es Enero con 5.3 °C, lo que se traduce en una amplitud térmica de 17 °C. Por otra parte, solamente con el diagrama ombrotérmico puede diferenciarse la localización de la estación meteorológica a la que pertenece ya que, al poseer una forma de campana, es decir, las temperaturas más altas se dan en verano, se encuentra en el hemisferio norte.

Con relación a las máximas precipitaciones, se registran en primavera y otoño mientras que los meses estivales presentan los valores mínimos. Por otro lado, el periodo de riesgo de heladas se extiende desde finales de octubre a finales de abril.

Además, según el índice de aridez de Gaussen, el cual establece que un mes es árido cuando el doble de su temperatura es igual o mayor que las precipitaciones registradas, pueden darse tres meses áridos: julio, agosto y septiembre. Este hecho es conocido también como estación seca y es muy característico del clima mediterráneo. (Agencia Estatal de Meteorología & Gobierno de Navarra, 2021)

A partir de las características climáticas mencionadas, Artajona posee unos veranos calientes, secos y mayoritariamente despejados mientras que hay presencia de nubes y temperaturas más bajas en invierno. Estas últimas no presentan variaciones abruptas a lo largo del año, sino que oscilan entre los 1 y 30 °C.

1.3 Estudio edáfico

El siguiente documento incluye una descripción de las condiciones edáficas en las que se desarrolla la superficie agrícola estudiada en el proyecto de investigación sobre la determinación de tiempos de formación de escorrentía en 476 HA, las cuales se encuentran íntegramente en el municipio navarro de Artajona, estando el núcleo de la población situado a 353 m de altitud.

El objetivo de este estudio es conocer las condiciones en las que se encuentra el suelo de la zona para determinar su incidencia sobre los factores que afectan a la formación de escorrentía.

En este estudio se van a evaluar las diferentes unidades cartográficas (UD) que componen el proyecto. Dentro de esta evaluación se estudiarán las características del suelo, centrando el foco sobre la textura y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo. Estos dos factores son determinantes dentro del modelo Green Ampt. Además, se focalizará la atención sobre las pendientes que componen el suelo de la zona de estudio, ya que este factor también tiene una incidencia directa sobre la formación de escorrentía.

La clasificación textural de un suelo se define a partir de la distribución del tamaño de las partículas que componen dicho suelo. Los principales tipos de partículas de un suelo son arcilla, limo y arena que abarcan los tamaños desde 0 a 2 mm. Las partículas cuyo tamaño superan los 2 mm, no suelen considerarse en las determinaciones analíticas y se denominan gravas.

Tabla 3: Tamaño partículas del suelo (Porta, 2003)

Nombre de la partícula		Tamaño (mm)
Arena	Muy Gruesa	1.0 a 2.0
	Gruesa	0.5 a 1.0
	Mediana	0.25 a 0.5
	Fina	0.10 a 0.25
	Muy fina	0.05 a 0.10
Limo		0.002 a 0.05
Arcilla		< de 0.002

Siguiendo el estudio realizado por Muñoz y Ritter (2005), poder determinar la clasificación textural de un suelo o de un horizonte permite conocer el comportamiento del mismo, y, en consecuencia, la respuesta que tendrán los cultivos para desarrollarse en dicho suelo.

Los suelos agrícolas se clasifican normalmente como arenoso, arcilloso, limos, franco o combinaciones de éstos. Estas designaciones texturales se determinan según los porcentajes (en masa) de cada uno de los principales tipos de partículas.

Según los autores anteriores, esta propiedad del suelo afectará también a otras propiedades del suelo:

- La capacidad de retención de agua disponible para las plantas y su suministro
- La facilidad para la circulación del agua
- La facilidad para el laboreo
- El riesgo de formación de costra superficial, que condiciona la infiltración y la nascencia de los cultivos
- El riesgo de erosión eólica e hídrica
- La capacidad de almacenamiento de nutrientes y sales minerales
- La capacidad para admitir aguas residuales, purines y otros residuos líquidos
- El orden de magnitud de la superficie específica



La fracción arcilla tiene un carácter mucho más determinante en las características del suelo, en comparación con el resto de las fracciones. Por ello, debe haber unas tres veces más arena gruesa que arcilla para que el suelo tenga unas propiedades condicionadas por la arena. A continuación, en base a Muñoz y Ritter, se describen las propiedades y condicionantes que tendrán los suelos objeto del presente estudio de investigación, en función de la textura de la que estén compuestos.

Los suelos donde predomine la fracción arena, sobre todo con elementos gruesos van a tener unas fuerzas de unión entre partículas muy débiles. Este factor condiciona a la fuerza de cohesión entre las partículas, incluso en los momentos donde los niveles de humedad sean altos. En el caso de suelos donde el tamaño de las arenas sea menor, no tendrá tanta limitación. No obstante, seguirán siendo suelos con una alta capacidad de drenaje y una baja capacidad de almacenamiento de agua.

El predominio de partículas de tamaño limo, dota al suelo unas características físicas desfavorables, ya que va a aparecer una inestabilidad estructural, generando una mayor facilidad para los procesos de compactación y aplastamiento. Además, serán suelos más susceptibles a la erosión y a la formación de costra superficial. Por último, los suelos con un alto porcentaje de arcillas serán suelos con una alta capacidad de intercambio iónico, suelos muy pesados y con una superficie específica muy elevada y la aplicación de un exceso de agua, podrá generar problemas de encharcamiento.

Con el objetivo de estudiar el comportamiento del agua en el suelo, el presente estudio se basa en las aportaciones de Tarjuelo (2005), el cual describe la estructura del suelo centrando el foco sobre las diferentes partículas, previamente definidas en el presente documento, las cuales se encuentran en el suelo agrupadas y asociadas entre ellas, gracias al contenido de materia orgánica (MO). Este nivel de materia orgánica tiene una gran importancia a la hora de la formación de agregados, ya que estas agrupaciones dan lugar a un cierto nivel de porosidad que permite el movimiento del agua a través del suelo. De esta manera, el suelo está constituido de tres fases. La fase sólida está formada por los minerales y materiales orgánicos. La fase gaseosa se corresponde con el nivel de porosidad del suelo y que depende de la textura y la forma en la que se agrupan los agregados. Esta textura se define como el cociente entre el volumen de poros y el volumen aparente del suelo. La fase líquida tiene lugar cuando los poros se llenan de agua. Para poder estudiar y cuantificar el tiempo máximo de riego para que se produzca la formación de escorrentía en los suelos agrícolas de la zona estudiada, se ha tenido en cuenta el factor más determinante conocido de estos suelos, que es la textura. Las diferentes texturas existentes en la zona regable del proyecto localizado en el Término Municipal de Artajona, van a determinar las siguientes características del suelo:

- Contenido de agua, tras la acción de la gravedad, que queda retenido por los poros del suelo y disponible para las plantas. Capacidad de Campo (CC)
- Contenido de agua almacenado en el suelo, por debajo del cual las plantas sufren un estrés irreversible. Punto de Marchitez (PM)

De estos dos factores se extrae la reserva útil del suelo, que es la comprendida entre el punto de capacidad de campo y el punto de marchitez. La dificultad de la planta para asimilar el agua disponible aumenta conforme los niveles de agua se acercan al punto de marchitez. Por ello, el manejo del riego busca agotar únicamente una parte de la reserva útil antes de volver a regar.

En función de la clase textural que compone el suelo de las diferentes unidades de riego del proyecto de investigación se asignan los siguientes niveles hídricos:

Tabla 4: Valores de los parámetros de Green-Ampt para distintas texturas (adpt. de Rawls and Brakensiek, 1983)

Textura (USDA)	Porosidad total	Porosidad efectiva	CC (%)	PM(%)	Disponibilidad máxima (mm)
Arcillosa	0,523	0,427	0,36	0,22	73,44
Arcillo arenosa	0,49	0,37	0,3	0,2	50,4
Franco arcillosa	0,519	0,409	0,33	0,21	61,92
Arcillo limosa	0,533	0,425	0,36	0,23	66,96
Franco arcillo limosa	0,524	0,418	0,335	0,205	68,16
Franco arcillo arenosa	0,464	0,332	0,33	0,205	65,16
Franca	0,551	0,375	0,25	0,12	72,24
Franco limosa	0,582	0,42	0,29	0,15	76,8
Franco arenosa	0,555	0,351	0,23	0,11	66,72
Arenosa franca	0,506	0,363	0,15	0,065	47,88
Arenosa franca	0,5	0,374	0,12	0,045	42,84

Haciendo un análisis de la tabla 3, se observa como el contenido de agua en los suelos cuya clase textural se acerca más a suelos pesados (arcillosos) aumenta, mientras que en suelos más ligeros (arenosos) el contenido de agua en capacidad de campo es mucho menor. Esto influye de forma directa en la formación de escorrentía, puesto que cuanto mayores sean los contenidos de humedad iniciales, más rápido se formará la escorrentía.

Para calcular el contenido de humedad inicial en las parcelas objeto del estudio, se ha tenido en cuenta las necesidades hídricas definidas en el punto 1.4: Estudio necesidades hídricas, durante la semana más demandante de agua del año. Estas necesidades hídricas se corresponderán con el contenido de agua aplicado en la zona regable estudiada en el presente documento.

Para estudiar el proceso de formación de escorrentía se proponen tres escenarios diferentes, en cuanto al contenido de humedad inicial se refiere. El primer escenario se corresponde con un riego diario, donde se aplique las necesidades hídricas del cultivo cada día.

El segundo escenario se corresponde con un riego cada dos días, donde se aplicará la cantidad de agua que el cultivo demanda en esos dos días. Dentro de este escenario se observará un contenido de agua inicial menor al del primer escenario.

Por último, un tercer escenario donde se propone un riego cada 5 días, este riego será mucho más largo, ya que la cantidad de agua demandada por el cultivo será mucho mayor. Este escenario mostrará el contenido de humedad inicial más bajo.

Las unidades cartográficas representadas en un mapa de suelos muestran la distribución de las diferentes clases de suelos y áreas misceláneas en el paisaje. En mapas detallados y con modelos de distribución de suelos sencillos, las unidades cartográficas representadas están relacionadas con una unidad taxonómica única, es decir, una sola serie de suelos. Para la realización del presente estudio edáfico, se ha utilizado el mapa de suelos, perteneciente al Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2021), correspondiente al municipio de Artajona. En dicho mapa encontramos unidades cartográficas que representan áreas dominadas por dos o más series de suelos, es decir, más de una unidad taxonómica. Esto es debido a la escala del mapa.

Las parcelas objeto de estudio, las cuales están localizadas en el municipio de Artajona, están recogidas a lo largo de las siguientes unidades cartográficas (figura 2).

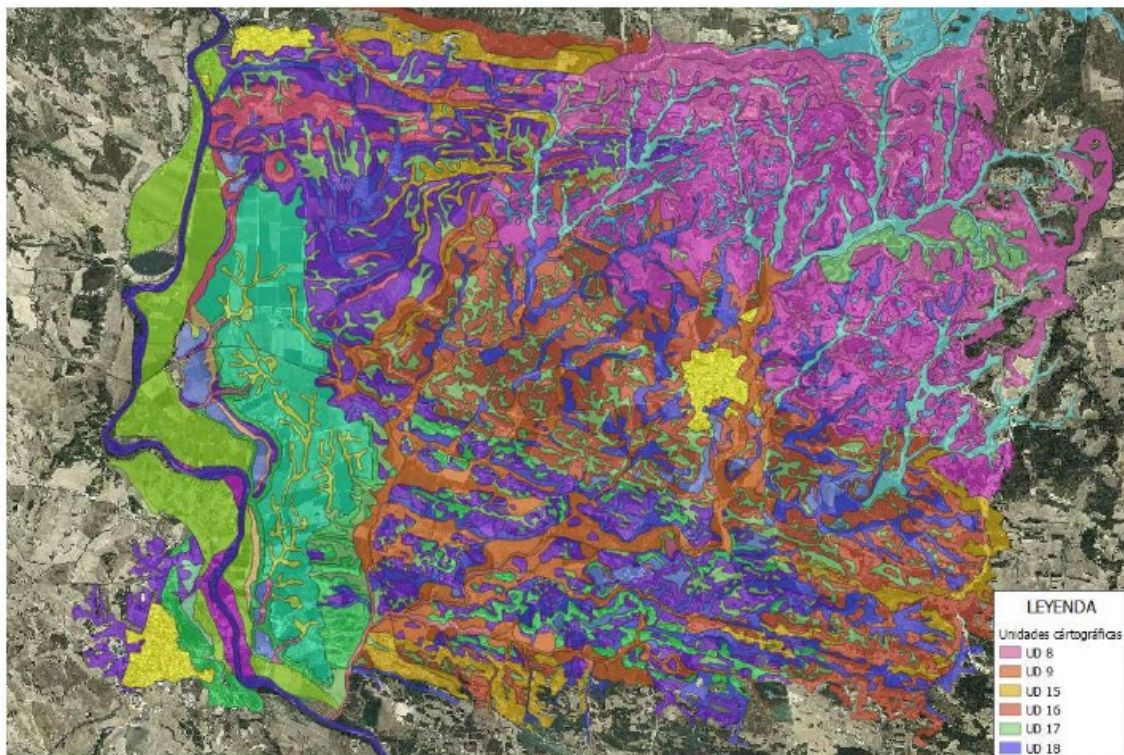


Figura 2: Representación de las Unidades Cartográficas del Término Municipal de Artajona.

Tal y como se ha citado en el subapartado anterior, a continuación, se describirán y evaluarán las principales unidades cartográficas, que componen el proyecto de investigación, terminando de describir el suelo que compone el proyecto de investigación.

UD 8 – Serie 14

La unidad cartográfica 8 representa un área dominada por dos series de suelo, la serie 13 y la serie 14. La unidad taxonómica de ambas series se corresponde con Fluventic Haploxerepts, sin embargo, estas se distinguen en las familias. La serie 13 está relacionada con la familia arcillosa fina, mixta, profunda, mientras que la serie 14, con la familia limosa fina, carbonática, profunda.

Son suelos caracterizados por ser muy profundos y por ocupar los fondos aluviales de los arroyos principales (fondos amplios y planos). A simple vista, sus horizontes se caracterizan por ser muy homogéneos entre sí. Sin embargo, en ocasiones se aprecia en algunos horizontes a altas profundidades, moteados de reducción, lo cual desde el punto edafogenético nos indica un nivel freático considerablemente profundo.

En cuanto al contenido de materia orgánica (MO), el nivel es medio, alcanzando entre el 1-2% en el horizonte superior. Esta concentración disminuye de forma irregular a lo largo del perfil. Así mismo, se presentan diferencias texturales entre horizontes aunque la familia textural dominante es la limosa fina y la clase textural del horizonte superficial es predominantemente franco limosa. Con todo ello, es preciso resaltar la alta fertilidad de los suelos de esta serie debido a su dotación de nutrientes, capacidad de reserva de agua y suelo explorable.

Siguiendo con la mineralogía, el contenido de carbonatos es constante a lo largo de todo el perfil alcanzando valores de 40-50%. A pesar de ser suelos con buenas aptitudes agronómicas, es necesario tener en cuenta a la hora del manejo las posibles limitaciones que la salinidad y la alcalinidad puedan conllevar.

UD 9 – Serie 15

La unidad cartográfica 9 representa un área dominada por una serie de suelo, la serie 15. La unidad taxonómica de dicho suelo se corresponde con Typic Calcixerepts.

Los suelos recogidos en la serie 15, son suelos desarrollados sobre glaciares, de moderadamente profundos, a profundos. Las formas del relieve que presentan se caracterizan por su nula o ligera pendiente.

En cuanto al contenido de materia orgánica, los horizontes formados en la superficie del suelo, es decir, los epipedones, tienen contenidos medios (en torno al 1.5-2%). Este contenido de materia orgánica aporta a los suelos un color oscuro, aunque descienden bruscamente a medida que aumenta la profundidad en el perfil.

La familia textural predominante en la sección de control es la arcillosa fina y la clase textural del horizonte superficial es franco arcilloso. Siguiendo en la línea de la mineralogía, cabe destacar que el suelo se encuadra principalmente en la familia carbonática al presentar contenidos de carbonatos entre un 40-50%.

Por último, falta señalar la aptitud de dichos suelos correspondientes a la serie 15. Son suelos con fertilidad media, generalmente sin problemas de drenaje y con aceptable capacidad de retención de agua. Con todo ello, son aptos para el cultivo, pero se ha de tener en cuenta las posibles limitaciones debido a la posible pedregosidad.

UD 15 – Serie 22

La principal característica de esta unidad es la gran presencia de afloramientos rocosos, tanto en la superficie como en profundidad, es un terreno no agrícola. Se trata de suelos someros, cuya clase textural predominante, en el horizonte superficial es franco arcillosa.

Las laderas de gran pendiente marcan en gran medida la estructura de este suelo, ya que va a dar lugar a grandes problemas por erosión. El material de partida de los suelos que componen esta unidad son margas con paleocanales de areniscas, además presenta cantos de areniscas limpios y vegetación del tipo: tomillo, tynus, juniperus oxicedros, braquipodium, lastoner.

Son suelos con escasos recursos nutricionales, que apenas tienen capacidad de retención de agua y con poco volumen explorable por las raíces.

UD 16 – Serie 23

La unidad taxonómica de este suelo es Tipic Calcixerepts. Esta unidad presenta unos suelos moderadamente profundos, que ocupan suaves laderas, formadas sobre margas areniscas y limos. La principal característica es la presencia de uno o varios horizontes que presentan acumulaciones de carbonatos.

En referencia al contenido de materia orgánica, los niveles en el horizonte superficial son adecuados entre 1.5 y 2 %, no obstante, descienden bruscamente en profundidad, lo que

afectará a los cultivos con un mayor desarrollo radicular. Están compuestos por una textura bastante heterogénea en la que predomina la franco arcillosa y no encontramos problemas de pedregosidad en ningún horizonte.

Por último, a nivel nutricional no suelen ser suelos muy ricos en nutrientes y la capacidad de retención de agua es variable, además presentan altos niveles de carbonatos lo cual, puede suponer una limitación para el correcto desarrollo de los cultivos.

UD 17 – Serie 24

La unidad taxonómica de este suelo es Pachic Calcixerolls. Se trata de suelos profundos formados en laderas cóncavas y relieves suaves que permiten la acumulación de materiales diversos.

Además, se dan altos contenidos en materia orgánica a lo largo de todo el perfil caracterizados estos últimos por un color oscuro y poseer una buena estructura. La fracción de arenas, limos y arcillas se mantiene constante en profundidad, siendo la clase textural predominante la franca.

El contenido de carbonatos varía en profundidad, oscilando entre el 35-50%. Respecto a la fertilidad del suelo, es considerada como alta ya que están bien dotados de nutrientes y materia orgánica, así como que son capaces de retener altas cantidades de agua. Finalmente, en alguna zona concreta pueden darse problemas de salinidad en profundidad.

UD 18 – Serie 26

La clasificación taxonómica de este suelo se corresponde con Fluventic Haploxerepts. Se localiza en fondos de vaguada y laderas de acumulación sobre arcillas y areniscas presentando poca pedregosidad. Los contenidos en materia orgánica oscilan entre el 1 y 2% en el primer horizonte decreciendo irregularmente conforme se profundiza. En relación a la clase textural, el horizonte superficial es generalmente franco limoso. El contenido en carbonatos es alto, siendo superior al 40% destacando el enriquecimiento en carbonatos de los horizontes inferiores.

Finalmente, esta unidad presenta una alta fertilidad con una capacidad de retención de agua aceptable, además al ser suelos profundos sin apenas pedregosidad existe mucho volumen del mismo explorable por las raíces. Un factor limitante que posee es la moderada salinidad que presenta, la cual debe ser considerada para un mejor manejo.

1.4 Estudio de necesidades hídricas

El siguiente punto comprende el estudio de las necesidades de agua, el cual se desarrolla partiendo de la base expuesta en el Estudio Climático y Edáfico. Todo ello sigue encaminado hacia el estudio de la zona donde se desarrolla la investigación sobre la formación de escorrentía en el Término Municipal de Artajona.

El objetivo de este documento es conocer las máximas necesidades hídricas, durante el cultivo más exigente a nivel hídrico y en la época del año que presente unas condiciones climáticas más exigentes. De este modo, se estudiará el tiempo de formación de escorrentía durante el periodo más intenso de riego.

Dentro de este apartado se estudian, en consonancia con Bardaji (1987) y Agrosistemas (1993), las características de diversos cultivos, cuya presencia y arraigo en la zona es muy común.

1.4.1. Maíz grano

Este cultivo se adapta en gran medida a las temperaturas del clima de la zona, necesita situaciones de climas secos durante el periodo de crecimiento, ya que, sino su rendimiento disminuye, sobre todo durante la formación del penacho y granazón. Los días largos y las noches frescas favorecen a un alto rendimiento del cultivo. El periodo más crítico del maíz se da en el mes que precede a la formación del grano.

A nivel de suelo, se trata de un cultivo que necesita suelos profundos, con una estructura adecuada, debido a su gran desarrollo radicular. Además, se recomienda no sembrar maíz en suelos con excesiva pendiente o con problemas de drenaje, ya que la erosión superficial puede generar problemas en su correcto desarrollo radicular. Por último, como factor limitante cabe destacar la baja tolerancia del maíz hacia la salinidad.

Las necesidades hídricas de este cultivo son altas, tal y como se expone en la tabla 1, sobre todo en los meses de julio y agosto.

1.4.2. Cereales de invierno

Estos cultivos se adaptan muy bien a climas frescos y secos, la temperatura mínima de germinación son 6°C, mientras que las temperaturas óptimas de desarrollo vegetativo y reproductivo son 15°C y 17°C respectivamente.

Edáficamente son sensibles al encharcamiento, por lo que se obtendrán mejores resultados en parcelas con un drenaje superficial adecuado y con una velocidad de infiltración alta. No tienen un sistema radicular tan desarrollado como otros cultivos como el girasol o el maíz, por lo que no necesitan desarrollarse en suelos muy profundos. Una de las mayores ventajas de estos cultivos es su alta tolerancia a la salinidad. Las necesidades hídricas son mucho menores en comparación con los cultivos de verano, pero necesitan humedad abundante durante el mes que precede y los días que siguen a su espigazón.

1.4.3. Alfalfa

Aunque se trata de un cultivo meridional, es una planta con una gran resistencia a las temperaturas del invierno. La temperatura óptima de germinación de las semillas de alfalfa se sitúa en torno a 2-3°C, mientras que su temperatura óptima de crecimiento es de 28-30°C. Sin embargo, sí que se ve afectado por las heladas tardías, que afectarán a los brotes de primavera.

Necesita suelos profundos, debido a su alto desarrollo radicular. A nivel textural, se trata de un cultivo con una buena adaptación a muchos tipos de texturas, pero que obtendrá mejores resultados en suelos franco limoso. Por último, es un cultivo que tiene una baja tolerancia a la salinidad

Durante los meses de verano y primavera las necesidades hídricas de este cultivo se verán incrementadas. Se trata de un cultivo que necesita una gran cantidad de agua para obtener unos rendimientos adecuados.

1.4.4. Guisante verde

A nivel climático este cultivo tiene una baja tolerancia a las heladas, por eso es importante programar de forma adecuada los periodos de siembra y evitar que cuando llegue una helada el guisante esté muy desarrollado, ya que temperaturas inferiores a 2, 3 y 4 bajo

cero van a generar graves problemas en la planta. Otra medida preventiva es la elección varietal, puesto que hay variedades más resistentes a estas temperaturas.

En cuanto a la edafología, el guisante soporta muy mal los encharcamientos, por lo tanto, será necesaria la implantación del mismo en un suelo con alta capacidad de drenaje superficial. Se desarrolla mejor en suelos con una profundidad superior a los 50 cm con baja pedregosidad en las capas superficiales. Por último, al igual que el maíz, se trata de un cultivo que soporta muy mal los problemas de salinidad.

Al tratarse de un cultivo de invierno, las necesidades hídricas del guisante durante los meses de enero, febrero y marzo son compensadas con las propias precipitaciones de la zona, sin embargo, son los meses de abril y mayo cuando el cultivo sí que necesita una cantidad mayor de agua.

1.4.5. Girasol

Normalmente se usa como un cultivo alternativo dentro de una rotación en la explotación. Se trata de un cultivo de verano que suele durar unos cuatro o cinco meses, desde abril hasta septiembre. A nivel de temperaturas es un cultivo que se asemeja en gran medida a cereales de verano, como es el caso del maíz.

Tradicionalmente ha sido relegado al uso en suelos poco fértiles debido a los pocos beneficios que se obtenían del mismo, sin embargo, si se utiliza en suelos profundos, con altos contenidos de nutrientes y buena estructura los rendimientos pueden ser mucho mayores. Es importante, a nivel de manejo, intentar evitar la costra superficial, ya que va a dificultar su correcto desarrollo.

El girasol es un cultivo bastante exigente a nivel hídrico, sobre todo durante el periodo de floración. Sin embargo, estas necesidades son muy inferiores a otros cultivos de verano como podría ser el maíz. Para obtener un mayor rendimiento del cultivo se recomienda una correcta nutrición hídrica en post-floración, para que se produzca un buen llenado del grano.

1.4.6 Cálculo de las necesidades de agua

A lo largo del crecimiento de los cultivos, la variación del coeficiente de cultivo (K_c) expresa los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del suelo. Con el fin de

representar las variaciones producidas a lo largo del periodo de crecimiento, se establece una curva de coeficiente de cultivo (Allen et al., 2006). Para construir dicha curva se necesitan tres valores de K_c :

- Durante la etapa inicial ($K_{c\text{ ini}}$)
- Etapa de mediados de temporada ($K_{c\text{ med}}$)
- Etapa final ($K_{c\text{ fin}}$)

A continuación, en la figura 3 puede observarse cómo evolucionan a lo largo de la temporada.

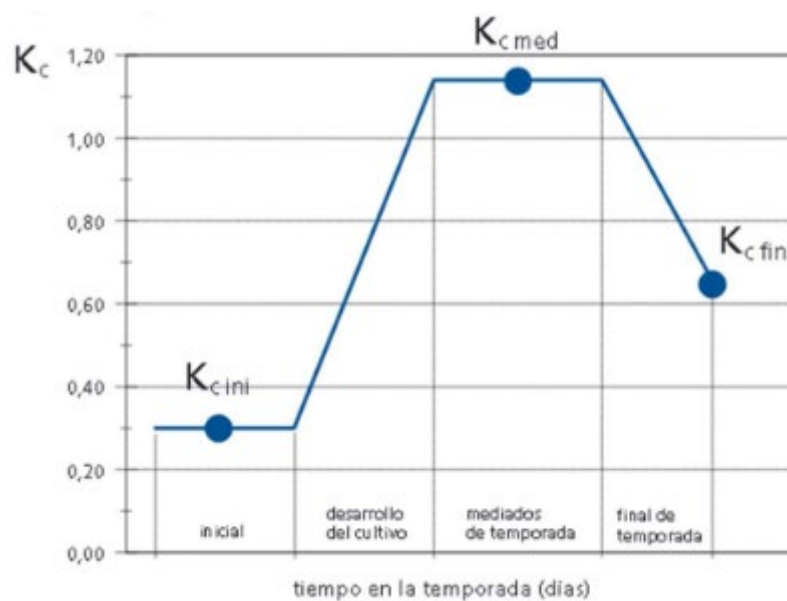


Figura 3: Curva del coeficiente de cultivo (Allen et al., 2006).

El valor del coeficiente de cultivo puede obtenerse a partir de diversos métodos. En primer lugar, puede extraerse de libros en los que se incluyen valores típicos, determinar su valor a través de gráficas, extrapolar los valores previos de K_c , utilizar la alfalfa como referencia o realizar su cálculo numérico a través de la siguiente fórmula, siendo $K_{c\text{ i}}$ el coeficiente para el día i , L la duración de la etapa, $K_{c\text{ prev}}$ el correspondiente a la etapa anterior y $K_{c\text{ prox}}$ el opuesto de la última expuesta (Allen et al., 2006):

$$K_{c\text{ i}} = K_{c\text{ prev}} + \left[\frac{i - \sum(L_{\text{prev}})}{L_{\text{etapa}}} \right] (K_{c\text{ prox}} - K_{c\text{ prev}})$$

En el caso que abarca, el coeficiente de cultivo se ha obtenido a partir del Servicio de Asesoramiento al Regante proporcionado por INTIA. Como se ha indicado en la figura 5, éstos vienen descritos por Kc ini, Kc med y Kc fin, siendo el resultado expuesto en la siguiente tabla número 3 la media mensual de cada coeficiente.

Tabla 5: Coeficientes de cultivo medios mensuales para cada cultivo propuesto.

	K _c											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Trigo	0,1	0,33	0,54	0,9	0,93	0,18	0	0	0	0	0	0
Cebada cervecera												
Avena												
Colza	0,47	0,52	0,91	1,15	0,84	0,15	0	0	0,34	0,35	0,35	0,35
Girasol	0	0	0	0	0,02	0,46	1,09	0,83	0,05	0	0	0
Alfalfa	0	0	0,8	0,8	0,8	0,9	0,95	0,95	0,9	0,8	0	0
Guisante temprano	0	0,1	0,59	1,02	1,09	0	0	0	0	0	0	0
Alubia	0	0	0	0	0	0	0,51	1,04	0,29	0	0	0
Maíz grano	0	0	0	0,2	0,43	0,87	1,1	1,07	0,45	0	0	0
Maíz grano segunda cosecha	0	0	0	0	0	0,33	0,71	1,1	1,1	0,48	0	0
Tomate	0	0	0		0,39	0,76	1,1	1,02	0,6	0	0	0
Brócoli	0	0,4	0,6	0,85	1		0	0,4	0,6	0,85	1	0

1.4.7 ETo

La evaporación del cultivo de referencia (ETo) se define como la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua correspondiendo la superficie de referencia con un cultivo hipotético de pasto con características específicas. También, la ETo expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo ya que los únicos factores que le afectan son los parámetros climáticos (figura 4). Por lo tanto, ETo puede ser calculado a partir de datos meteorológicos.



Figura 4: Evapotranspiración del cultivo de referencia (Allen et al., 2006).

A pesar de la variabilidad de métodos, el método de FAO Penman-Monteith se recomienda como el único para determinar la evapotranspiración de referencia (Allen et al., 2006). En el caso objeto de estudio, los datos de la ETo han sido obtenidos a través del “Estudio Climático de Navarra”.

Tabla 6: Valores de ETo obtenidos con el método Penman-Monteith para la estación “Olite MAN”.

ET ₀ (Penman-Monteith)													
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
mm/mes	7,6	31,8	91,2	149,2	219,0	262,5	280,6	226,1	134,2	59,1	14,5	3,5	1464,2
mm/día	0,25	1,14	2,94	4,97	7,06	8,75	9,05	7,29	4,47	1,91	0,48	0,11	48,43

Puede observarse cómo durante los meses estivales se da una mayor tasa de evapotranspiración alcanzando el máximo en julio con 280.6 mm mientras que en los meses invernales los valores son relativamente más bajos: 7.6 mm en enero o 3.5 mm en diciembre.

1.4.8 ETc

La evapotranspiración del cultivo (ETc) se define como la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar considerando como estándar aquellas condiciones en las que los cultivos se encuentran exento de enfermedades, con buena fertilización y se desarrollan en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanzan la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes (Allen et al., 2006).

Así, la ETc se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$ETc \text{ (mm/día)} = ET_0 \text{ (mm/día)} \times Kc$$

A continuación, en la tabla número 7 se exponen los resultados obtenidos:

Tabla 7: Necesidades hídricas totales en mm/mes.

	NECESIDADES HÍDRICAS (mm/mes)												TOTAL
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Trigo													445,7
Cebada cervecera													
Avena	0,8	10,5	49,2	134,3	203,7	47,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Colza	3,6	16,5	83,0	171,6	184,0	39,4	0,0	0,0	45,6	20,7	5,1	1,2	570,6
Girasol	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4	120,8	319,9	187,7	6,7	0,0	0,0	0,0	639,4
Alfalfa	0,0	0,0	73,0	119,4	175,2	236,3	266,6	214,8	120,8	47,3	0,0	0,0	1253,2
Guisante temprano	0,0	3,2	53,8	152,2	238,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	447,9
Alubia	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	143,1	235,1	38,9	0,0	0,0	0,0	417,2
Maíz grano	0,0	0,0	0,0	29,8	94,2	212,6	308,7	241,9	60,4	0,0	0,0	0,0	947,6
Maíz grano segunda cosecha	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	86,6	199,2	248,7	147,6	28,4	0,0	0,0	710,5
Tomate	0,0	0,0	0,0	0,0	85,4	199,5	308,7	230,6	80,5	0,0	0,0	0,0	904,7
Brócoli	0,0	12,7	54,7	126,8	219,0	0,0	0,0	90,4	80,5	50,2	14,5	0,0	649,0
MÁX	3,6	16,5	83,0	171,6	238,7	236,3	319,9	248,7	147,6	50,2	14,5	1,2	

Se puede observar cómo el mes con mayores necesidades hídricas es julio con 308,7 mm. Si bien el estudio no acaba aquí ya que es necesario considerar la precipitación esperable.

Para finalizar, se ha establecido como precipitación esperable la correspondiente a un nivel de ocurrencia como mínimo del 75%. Así, se determina en base a los datos mensuales históricos la precipitación mínima esperada en el 75% de los años.

En la siguiente tabla 8 se establecen los valores mínimos o iguales de las precipitaciones esperadas para cada mes del año.

Tabla 8: Precipitaciones acumuladas esperadas con una probabilidad mayor que el 75%.

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Precipitación Esperable (mm/mes)	17	18,4	22,8	26,1	27,4	17,1	8,4	8,9	17	18,8	28,9	20,7

Una vez se es conocedor de las necesidades hídricas y la precipitación esperada de cada mes del año, mediante una operación de diferencia entre ambos términos, se puede conocer la cantidad de agua de riego necesaria a aportar. Es por ello por lo que en la tabla

9 se detallan los mm de agua requeridos de riego. Puede analizarse cómo hay meses que presentan cifras negativas, es decir, no requerirían riego.

Tabla 9: Necesidades hídricas finales en mm/mes.

	NECESIDADES HÍDRICAS (mm/mes)											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
TOTAL	-13,4	-1,9	60,2	145,5	211,3	219,2	311,5	239,8	130,6	31,4	-14,4	-19,5

Una vez se han realizado los cálculos respectivos a las necesidades de agua de los cultivos, se ha obtenido que el mes más demandante es julio con una necesidad hídrica de 311,5 mm/mes. Esto significa que durante ese mes se realizará la máxima cantidad de riegos, por tanto, será esta fecha la referencia para el estudio de formación de escorrentía. En concreto, el punto de partida para conocer el contenido de humedad existente serán los 10,38 mm/día máximos que se aplicarán de riego para cumplir con las necesidades hídricas del cultivo más demandante. En base a esta aplicación de agua, se estudian tres escenarios.

El primer escenario se corresponde con un riego diario, donde se aplique las necesidades hídricas del cultivo cada día.

El segundo escenario se corresponde con un riego cada dos días, donde se aplicará la cantidad de agua que el cultivo demanda en esos dos días. (Dentro de este escenario se observará un contenido de agua inicial menor al del primer escenario.

Por último, un tercer escenario donde se propone un riego cada 5 días, este riego será mucho más largo, ya que la cantidad de agua demandada por el cultivo será mucho mayor. Este escenario mostrará el contenido de humedad inicial más bajo.

2. Resultados y discusión

2.1. Caracterización de la zona de estudio

La primera parte de los resultados de este estudio se centra en la caracterización de la zona regable perteneciente al término Municipal de Artajona. La zona regable de Artajona se divide en 423 unidades de riego (*Figura 5*), cuya superficie se describe en la *Figura 6: Distribución de la superficie por unidad de riego*.

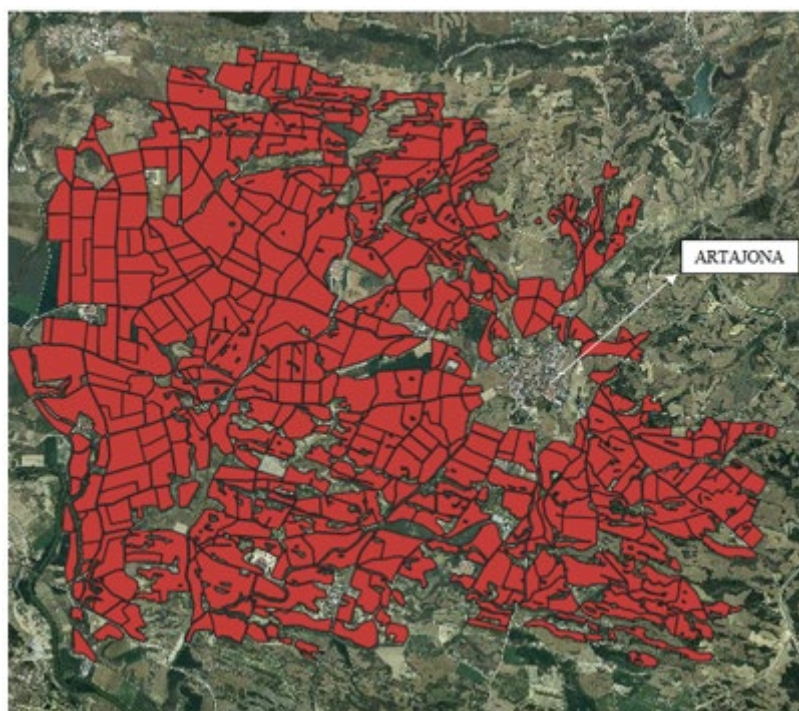


Figura 5: Unidades de riego estudiadas en el proyecto

En esta zona regable predominan las fincas con una superficie de riego entre 1 y 5 has. Este tamaño es algo habitual cuando se realiza una transformación de secano a regadío, ya que permite un reparto equitativo para los agricultores involucrados en la transformación. Con estas dimensiones se busca que sea más sencilla la reasignación de fincas, sin perjudicar a la distribución de los sectores dentro de la parcela. Además, la organización de los riegos y el diseño hidráulico de la instalación en parcela también es más operativo a nivel económico y de manejo.

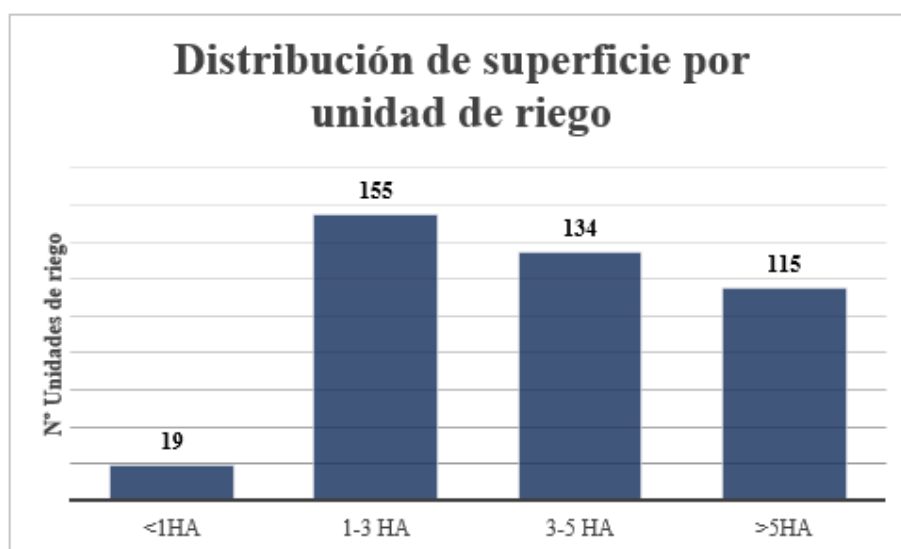


Figura 6: Distribución de la superficie por unidad de riego

Con el fin de analizar las características en las que se encuentra la zona regable, se estudian a continuación algunas condiciones edáficas que aparecen en el suelo y serán relevantes a la hora de determinar el tiempo de formación de escorrentía. Una de estas condiciones es el contenido de arcilla en el suelo, cuya distribución en las unidades de riego que componen el proyecto se refleja en la siguiente figura.

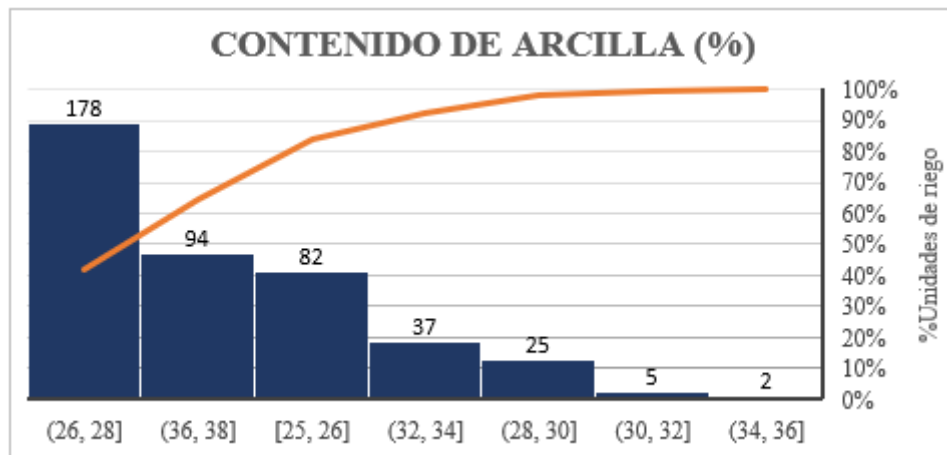


Figura 7: % Contenido de arcilla en las unidades de riego de Artajona

Una alta desproporción del contenido de arcilla puede dar lugar a un desequilibrio estructural del suelo, lo que conlleva una mayor facilidad para la formación de escorrentía y por tanto de erosión. Esta situación podría aliviarse realizando un manejo adecuado del suelo, a través de técnicas de mínimo laboreo, una correcta rotación de cultivos, etc. Además, otro factor que podría atenuar los efectos de una desestructuración del suelo es el contenido de Materia Orgánica, ya que un suelo con un nivel adecuado de MO tendrá una mayor fuerza de unión entre las partículas que lo componen y, de este modo, una mayor capacidad de infiltración y distribución del agua.

Este histograma (*Figura 7: % Contenido de arcilla en las unidades de riego de Artajona*) muestra como la mayor parte de las unidades de riego tienen niveles de arcilla entre 26 y 28% y muy pocas superiores al 30%. Esto significa que la presencia de arcilla es estable y no va a afectar en gran medida a la estructuración del suelo.

El concepto de conductividad hidráulica del suelo va a indicar la capacidad de infiltración del mismo. En el caso del presente estudio, se determina la conductividad hidráulica en base a la textura predominante del suelo. Cuanto mayor sea la conductividad hidráulica del suelo, mayor será su capacidad de infiltración, asimismo, menor será la vulnerabilidad que presente ante la formación de escorrentía.

Tabla 10: Conductividad hidráulica (K_s) en función de la textura

Textura (USDA)	K_s (m/s) * 10^{-6}
Arcillosa	0,167
Arcillo arenosa	0,333
Franco arcillosa	0,556
Arcillo limosa	0,278
Franco arcillo limosa	0,556
Franco arcillo arenosa	0,833
Franca	3,67
Franco limosa	1,89
Franco arenosa	6,06
Arenosa franca	16,6
Arenosa franca	65,4

En la tabla 10 se exponen los valores de conductividad hidráulica (K_s) en función de la textura que tenga en el suelo. Puede observarse como las texturas formadas por partículas de mayor tamaño tendrán una mayor capacidad de infiltración, por el contrario, las texturas cuyo contenido de arcilla sea mayor presentarán a priori una mayor vulnerabilidad ante el encharcamiento.

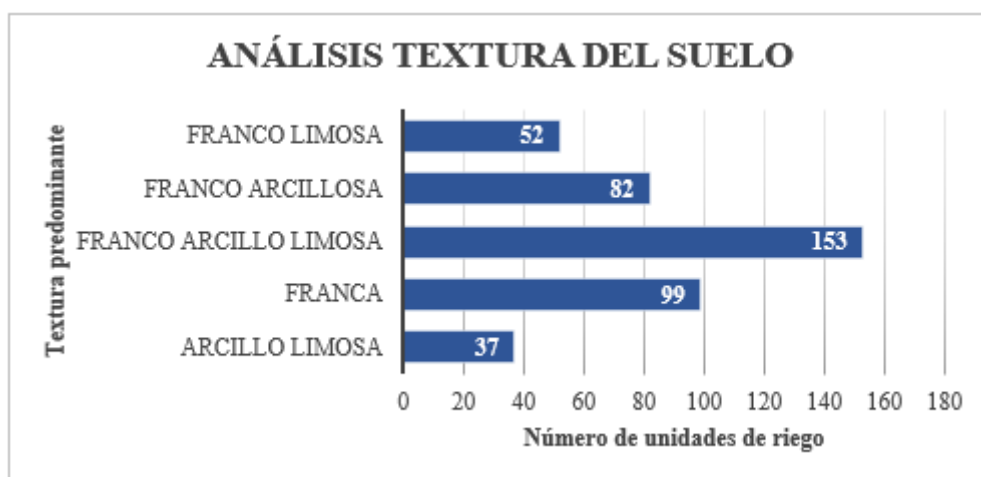


Figura 8: texturas predominantes en las unidades de riego de Artajona

En la Figura 8 se observa como las texturas predominantes se encuentran entre franco arcillo limosas, francas y franco arcillosas. Esto muestra una diversidad textural en el terreno de la zona estudiada, ya que, estas texturas presentan diferentes conductividades hidráulicas y por tanto diferente capacidad de infiltración, siendo las texturas franca y

franco limosa las que poseen una mayor capacidad de infiltración. Por el contrario, las unidades de riego cuyo suelo tenga un contenido de arcilla más alto, tendrá una mayor vulnerabilidad ante el encharcamiento.

No obstante, la textura no es el único factor a tener en cuenta, reiterando lo expuesto anteriormente, el manejo del suelo, los niveles de MO o la pendiente de la parcela también afectarán a la capacidad de infiltración del suelo. Con el objetivo de terminar de caracterizar la zona de estudio, se expone a continuación un gráfico donde se reflejan las pendientes medias de las unidades de riego pertenecientes a la zona de estudio:

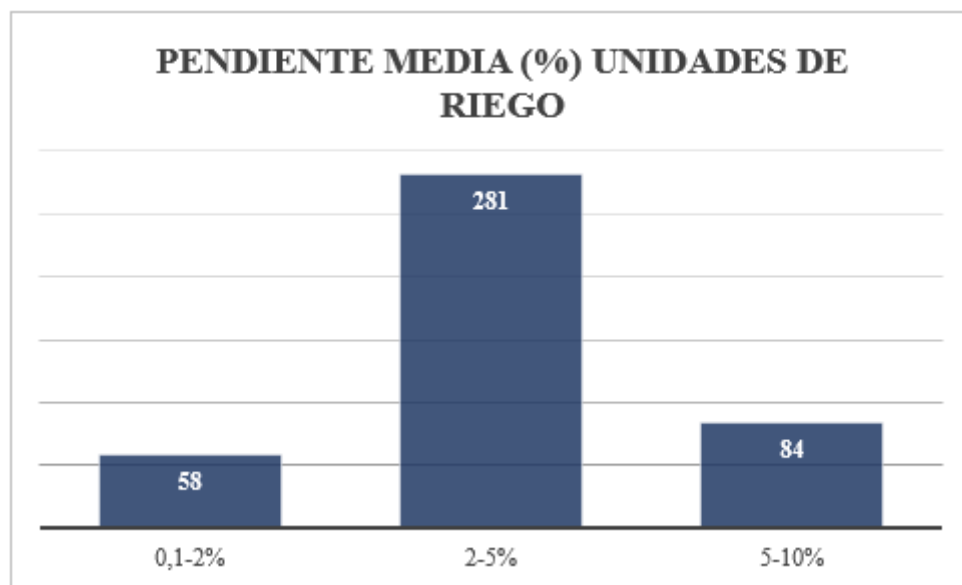


Figura 9: Pendiente media (%) por unidad de riego

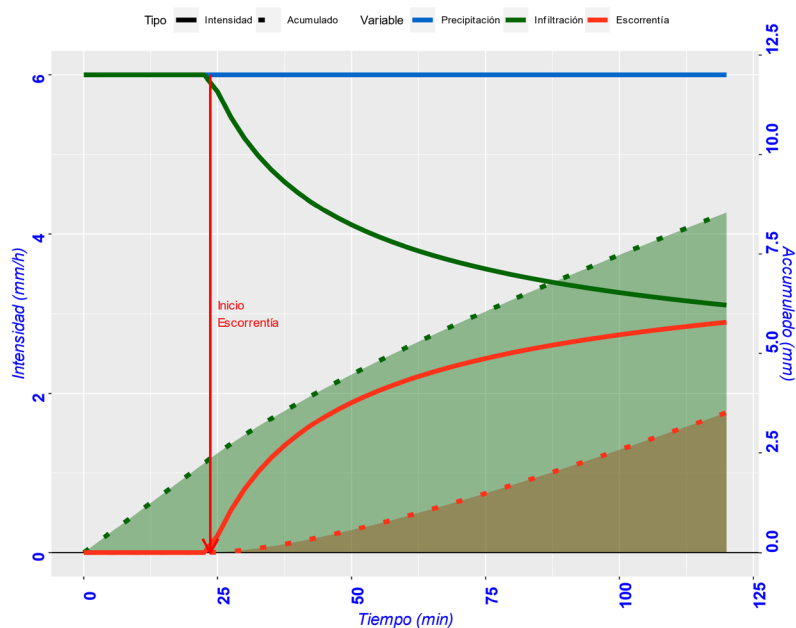
La pendiente es un factor que influye en las aptitudes del suelo frente al proceso de infiltración, ya que, en las zonas donde se profundizan las pendientes, la profundidad del suelo disminuye, por tanto, no tiene tanta capacidad de almacenamiento de agua. Esta falta de capacidad para almacenar el agua puede dar lugar a un encharcamiento más rápido y por tanto una mayor erosión. Además, en las zonas con pendientes la velocidad de avance del frente de agua aumenta, de este modo puede afectar en mayor medida al proceso erosivo.

En el caso de las unidades de riego pertenecientes a la zona de estudio, la gran mayoría de la superficie tiene una pendiente moderada, es decir, presenta unas condiciones favorables para la infiltración y almacenamiento de agua a nivel geomorfológico.

2.2. Cálculo de los tiempos de encharcamiento

A través del método Green Ampt, descrito previamente, se ha colaborado en el diseño de un programa de simulación en R, del cual se obtienen las curvas de infiltración y los tiempos de formación de escorrentía en las unidades de riego estudiadas en el proyecto. La elaboración del programa tiene como base el método de Green Ampt, los datos obtenidos del estudio climático y edáfico.

Del programa de simulación se obtendrán en primer lugar las siguientes gráficas que definen la infiltración del agua en el suelo durante un periodo de riego de dos horas:



En la figura se observa una aplicación constante de agua de 6 mm (línea azul: precipitación), la línea verde muestra cómo se va infiltrando de forma lineal hasta que el suelo llega al punto de saturación, donde la velocidad de infiltración es inferior al agua aplicada sobre el terreno. Esto provoca la formación de encharcamiento en el punto de inicio de escorrentía (línea roja), la cual se va incrementando hasta el final del riego.

Para estudiar los procesos de formación de escorrentía, y determinar los diferentes tiempos de riego a aplicar por el agricultor, se proponen tres escenarios diferentes, referentes a la frecuencia de riego.

El primer escenario se corresponde con un riego diario, donde se satisfagan las necesidades hídricas del cultivo cada día.

El segundo escenario se corresponde con un riego cada dos días, donde se aplicará la cantidad de agua que el cultivo demanda en esos dos días. Dentro de este escenario se observará un contenido de agua en el suelo, al inicio del riego, menor que en el caso del primer escenario.

Por último, un tercer escenario donde se propone un riego cada 5 días. Este escenario mostrará un contenido de humedad al inicio del riego todavía más bajo.

A partir del programa de simulación también se obtendrá la profundidad del suelo a la que llega el frente de avance del agua de riego en cada uno de los escenarios

A continuación, se reflejan los resultados obtenidos del programa de simulación, según las diferentes texturas existentes en la zona de estudio:

Unidad de riego con textura arcillo-limosa

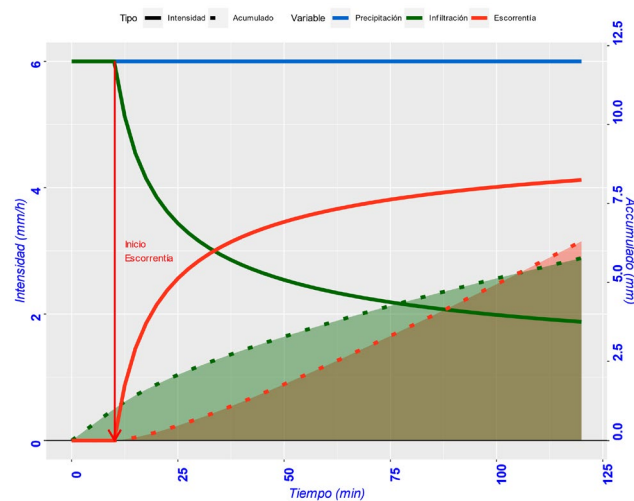


Figura 10: Riego cada 1 día

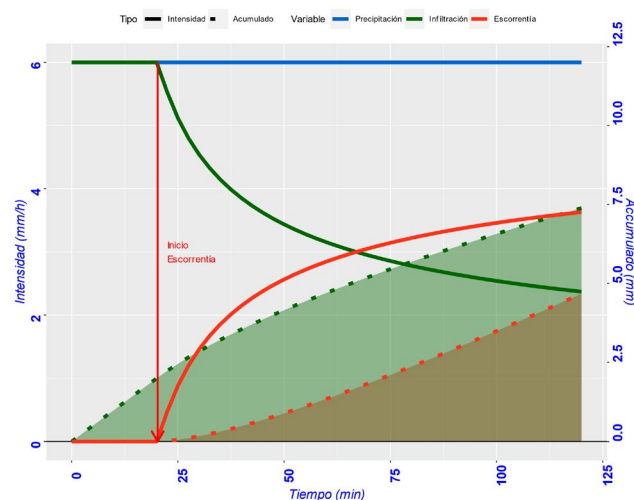


Figura 11: Riego cada 2 días

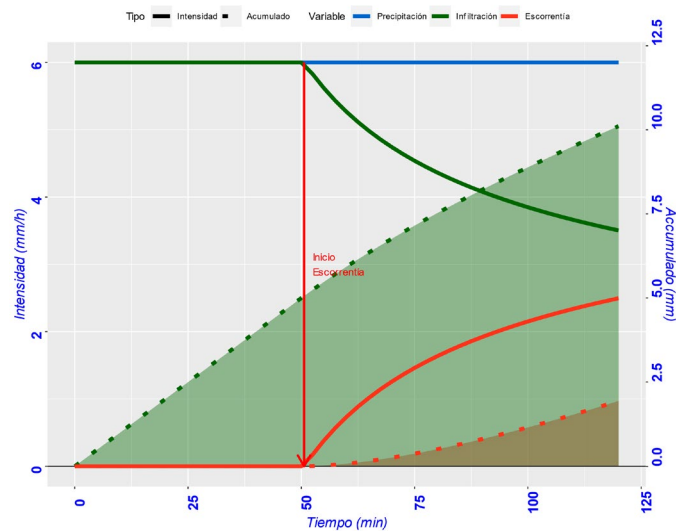


Figura 12: Riego cada 5 días

Este tipo de suelo es el que posee una conductividad hidráulica menor dentro de la zona de estudio, por tanto, su capacidad de infiltración será más baja que en el resto de las texturas. Haciendo un análisis de las gráficas expuestas, se observa como en el caso del riego diario la formación de la escorrentía se produce a los 10 minutos del inicio del riego, lo cual es realmente un problema para el agricultor. Además, a los 30 min de riego la escorrentía supera la velocidad de infiltración, lo cual generará mayores problemas erosivos en la parcela. Esta situación mejora conforme se reduce la frecuencia de riego, en el caso del riego cada 5 días la formación del encharcamiento no aparece hasta los 50 minutos de riego y la velocidad de la escorrentía no llega a superar la velocidad de infiltración.

Esta vulnerabilidad hacia el encharcamiento y la erosión deberá ser minimizada a través de un mantenimiento adecuado de la estructura del suelo, haciendo uso de técnicas de mínimo laboreo, teniendo un adecuado control sobre los niveles de materia orgánica y diseñando una correcta rotación de cultivos.

Unidad de riego con textura franco arcillosa

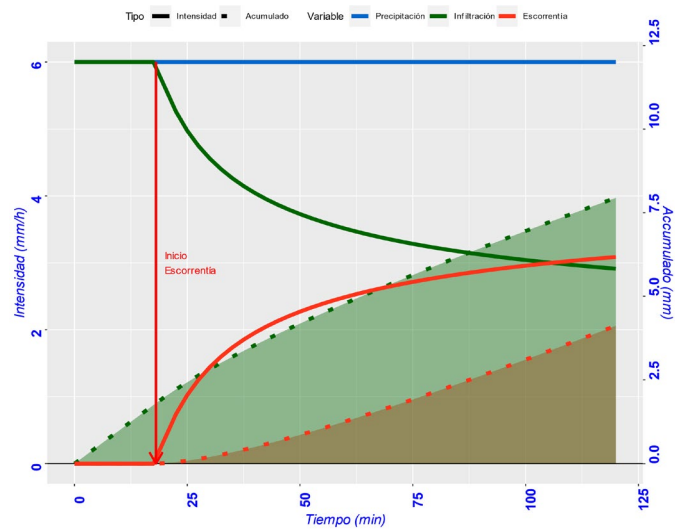


Figura 13: Riego cada 1 día

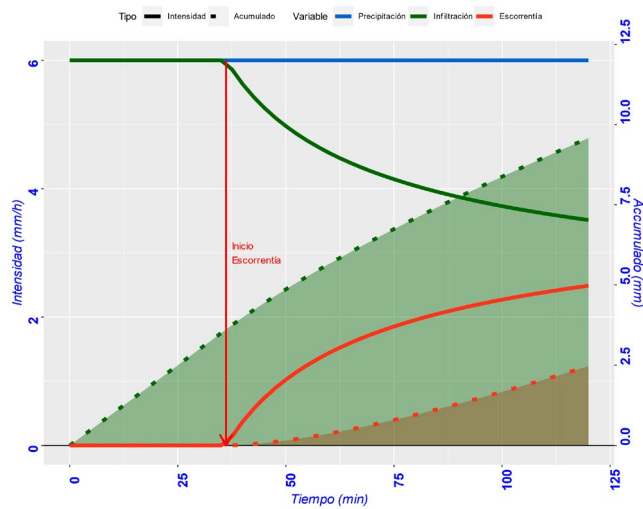


Figura 14: Riego cada 2 días

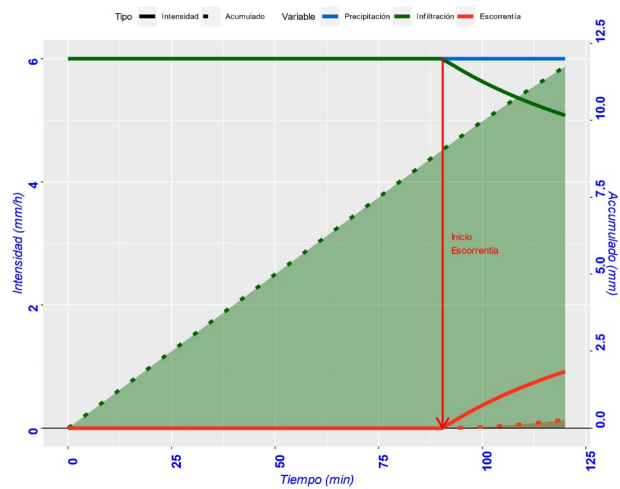


Figura 15: Riego cada 5 días

Esta clase textural posee una mayor conductividad hidráulica, por tanto, en un riego diario, es capaz de infiltrar agua hasta los 18 minutos de aplicación, momento en el que comienza a encharcarse el suelo. Además, la velocidad de infiltración se ve superada por la velocidad de la escorrentía casi al final del riego estipulado en 2 horas. Al igual que en el caso anterior esta situación mejora cuando el contenido de humedad es menor, como es el caso del riego cada 5 días, donde el encharcamiento no se produce hasta los 90 minutos de riego.

Aunque en menor medida, la vulnerabilidad hacia el encharcamiento y la erosión sigue estando presente en estos suelos, de este modo, deberá ser minimizada a través de un mantenimiento adecuado de la estructura del suelo, haciendo uso de técnicas de mínimo laboreo, teniendo un adecuado control sobre los niveles de materia orgánica y diseñando una correcta rotación de cultivos.

Unidad de riego con textura franco arcillo limosa

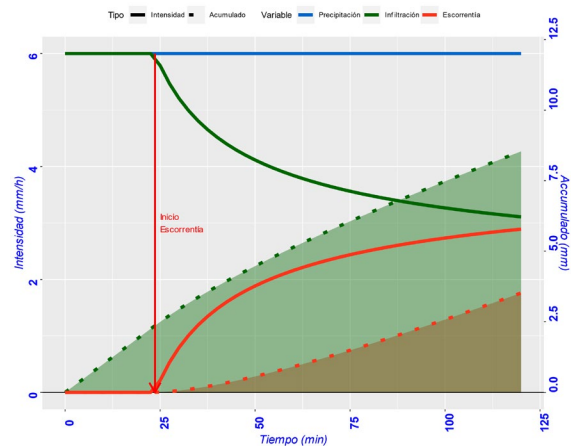


Figura 16: Riego cada 1 día

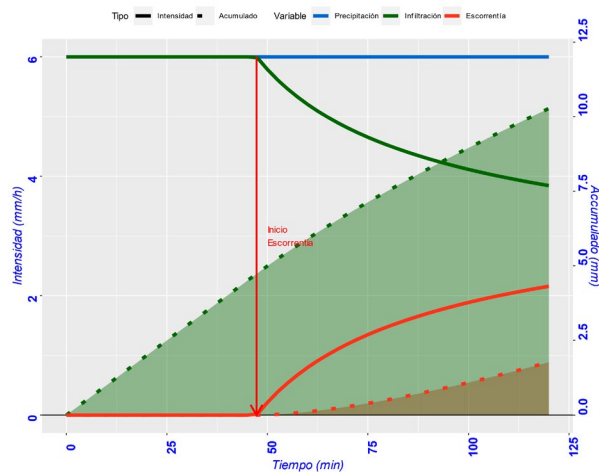


Figura 17: Riego cada 2 días

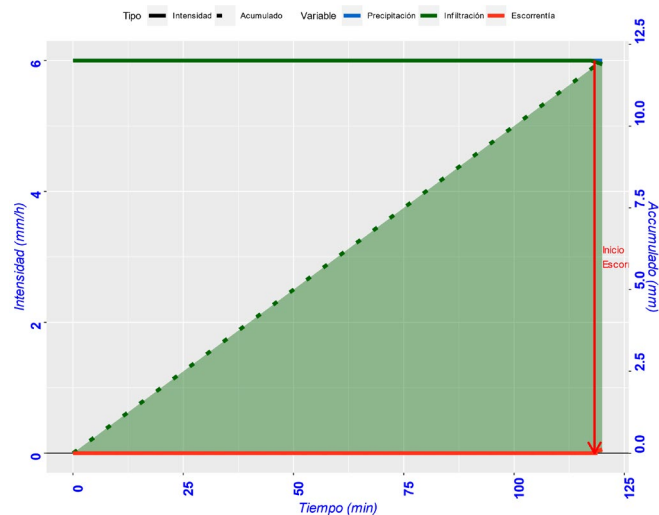


Figura 18: Riego cada 5 días

La textura predominante en estas unidades de riego es una textura más equilibrada que las anteriores. Este equilibrio textural le ofrece una mayor estabilidad frente al encharcamiento, no obstante, en el caso del riego diario y del riego cada dos días, la capacidad de infiltración del suelo no es suficiente para evitar el encharcamiento. En el primer escenario la escorrentía aparece a los 24 minutos mientras que en el segundo escenario a los 48 minutos desde el inicio del riego y en ninguno de los dos casos, la velocidad de encharcamiento llega a superar la velocidad de infiltración del agua en el suelo. Por último, con una frecuencia de riego cada 5 días no se forma la escorrentía durante el riego de 2 horas.

Este tipo de suelo presenta una mayor resistencia frente al encharcamiento, aunque el agricultor deberá controlar adecuadamente los tiempos y frecuencias de riego para evitar las situaciones descritas en los escenarios 1 y 2.

Unidad de riego con textura franca

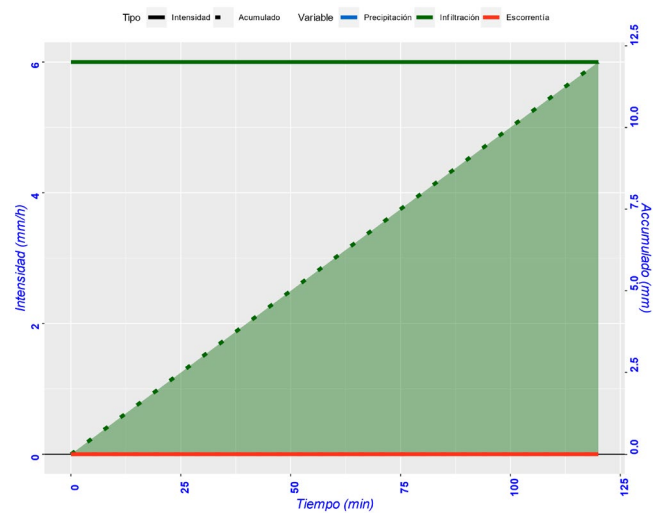


Figura 19: Riego cada 1 día

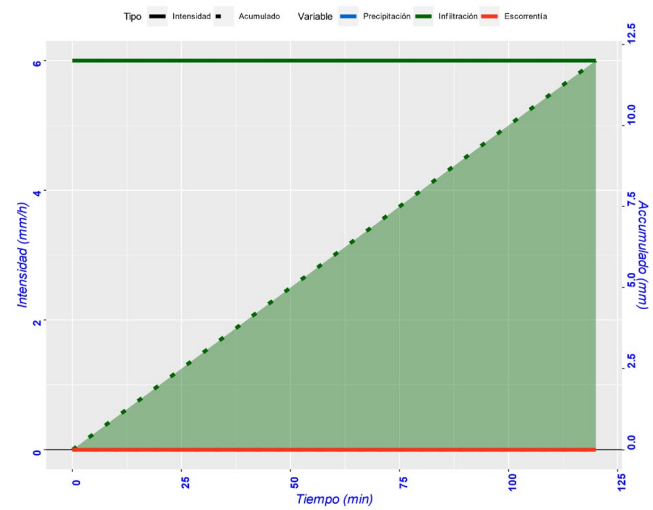


Figura 20: Riego cada 2 días

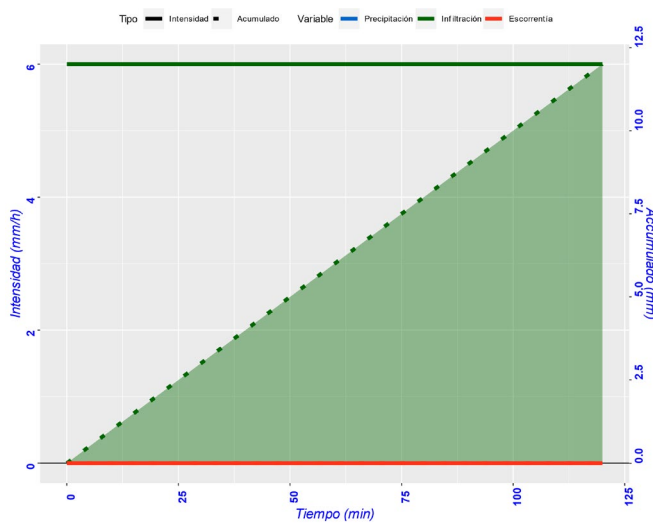


Figura 21: Riego cada 5 días

La textura franca presenta una conductividad hidráulica mucho más alta que las texturas expuestas previamente. Esta propiedad dota al suelo de una gran capacidad de infiltración, de este modo, analizando las gráficas 15, 16 y 17, se observa como no se genera escorrentía en ninguno de los escenarios, ya que en todo momento la velocidad de infiltración es muy superior al agua aplicada durante las dos horas de riego.

Esta situación es la más favorable para el agricultor, ya que podrá realizar los riegos con una alta frecuencia sin que se genere escorrentía.

Profundidad avance riego

A continuación, se exponen las profundidades a las que llega el frente de avance del agua según la textura predominante del suelo y en función de los tres escenarios previamente descritos:

Tabla 11: Resultados profundidad avance riego (cm)

TEXTURA	Lc 1 día (cm)	Lc 2 día (cm)	Lc 5 día (cm)
Arcillo limosa	33,36	21,35	11,68
Franco arcillosa	45,90	2,77	0,01
Franco arcillo limosa	49,34	29,68	13,87
Franca	69,35	34,67	13,87

En esta parte de los resultados se observa como las texturas con mayor capacidad de infiltración son capaces de distribuir el agua a las partes más profundas del suelo, lo cual favorece la producción de cultivos con alto desarrollo radicular. Además, se observa como cuando se reduce la frecuencia de riego, el agua no es capaz de avanzar a los horizontes más profundos, lo cual puede afectar al desarrollo radicular de ciertos cultivos.

Siguiendo las orientaciones anteriores y reiterando la importancia del manejo del suelo, la rotación de cultivos y el mantenimiento de los niveles de materia orgánica, en este caso también cabe destacar la importancia de la organización de los riegos y el control de los tiempos de aplicación, para que el agricultor sea capaz de abastecer las necesidades de los cultivos que se implanten en la unidad de riego.

Resultado final

El resultado final es la elaboración de un plano para cada unidad de riego perteneciente al proyecto. En este plano se localiza la unidad de riego dentro de un mapa de la zona

regable, también se caracteriza la unidad de riego con las texturas que lo componen y se incluye una planta general de la unidad de riego.

3. Conclusiones

Una vez analizados los resultados obtenidos del programa de simulación queda reflejado como el tipo de suelo predominante dentro de la unidad de riego va a determinar en gran medida los tiempos máximos de riego antes de la formación de escorrentía.

Los suelos compuestos con texturas finas, donde las arcillas tengan un alto porcentaje de influencia serán más propensos a encharcarse, de este modo el agricultor deberá tener una alta atención sobre la programación de los riegos y sobre el mantenimiento de la estructura del suelo. Por el contrario, los suelos cuya clase textural predominante esté más cercana a la textura franca, tendrán una mayor capacidad de infiltración y por tanto un menor riesgo de que se genere escorrentía.

No obstante, a pesar de la diferencia sobre el comportamiento del agua al infiltrarse en las diferentes texturas es evidente, para conseguir controlar de forma más certera el proceso erosivo se deberán tener en consideración otros factores particulares de cada unidad de riego, como pueden ser la pendiente, el nivel de materia orgánica o el manejo del laboreo.

En conclusión, esta información va a servir como una orientación clara para determinar los tiempos de formación de escorrentía, pero, además, se recomienda prestar especial interés al control de las unidades de riego que presenten unas condiciones vulnerables hacia la formación de escorrentía, como pueden ser pendientes abruptas, suelos compactados o desestructurados.