

IMPACTO DEL USO DE ASTILLAS DE MADERA COMO ENMIENDA AL SUELO EN UN FILTRO VERDE PILOTO: DINÁMICA DE LA INFILTRACIÓN

L. Barbero^{1,2}, V. Martínez-Hernández^{1*}, B. Huidobro López^{1,2}, R. Meffe¹, R. Pradana^{1,2,3}, J.A. Hernández-Martín⁴, A. de Santiago-Martín¹ y I. de Bustamante^{1,2}

¹IMDEA Agua, Avda Punto Com 2, 28805, Alcalá de Henares, Spain. *E-mail: virtudes.martinez@imdea.org

²Universidad de Alcalá, Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente. Facultad de Ciencias, Campus externo. Ctra A-II km 33,6, 28871, Alcalá de Henares, Spain.

³Grupo Eulen (Madrid), Calle del Valle de Tobalina, 56. 28021 Madrid, Spain.

⁴Arcadis, Calle Orense n°4, p11, 28020 Madrid, Spain.

RESUMEN. Los filtros verdes (FVs) son tratamientos no convencionales de aguas residuales que aprovechan los procesos naturales que se dan en el sistema suelo-planta-microorganismos. Se ha evaluado el impacto de la incorporación de enmiendas y del manejo de riego en la dinámica de infiltración de un FV piloto mediante i) los contenidos de humedad del suelo y ii) los tiempos de paso del frente de riego en cada evento. Su variación ha sido estudiada según la frecuencia (semanal o diaria) y sistema de riego (inundación o goteo), la actividad de la vegetación y la incorporación (mezcla o lecho superficial) de enmiendas. Los contenidos de humedad se incrementan con la incorporación de la enmienda aumentando la porosidad y la aireación del sistema. Los tiempos de paso están condicionados por el volumen y número de riegos en cada evento y los estados de actividad del chopo.

ABSTRACT. Vegetation Filters (VFs) are a non-conventional wastewater treatment that takes advantage of natural attenuation processes in the soil-plant-microorganism system. The impact of amendment incorporation and irrigation management in the infiltration dynamics of a pilot VF is assessed by: i) volumetric water content in soil and ii) irrigation front drainage times in each study event. The variation of these parameters was studied in relation with the irrigation schedule (weekly or daily) and system (gravity or drip), vegetation activity, the amendment application and its incorporation mode (mix or surface layer). The amendment incorporation rise soil water contents increasing its porosity and aeration. Irrigation front drainage times are conditioned by volume and number of irrigation times in each event and the vegetation activity status.

residuales de pequeñas poblaciones. En los FVs el agua residual se somete a un pretratamiento, y se aplica al terreno para el riego de una masa forestal. El riego se realiza de forma periódica y principalmente mediante inundación de surcos o por sistemas de goteo, considerando los requerimientos hídricos de la planta. La depuración que se produce durante la infiltración del agua a través de la zona no saturada tiene lugar por la acción conjunta del suelo, los microorganismos y la vegetación superior mediante procesos de biodegradación, adsorción y absorción por las plantas (Martínez-Hernández et al., 2018).

La variabilidad ambiental de estos sistemas genera, en ocasiones, una lixiviación de contaminantes, especialmente de aquellos altamente móviles como el nitrato. Algunos autores han observado cómo la dinámica de infiltración del agua tiene un impacto en la capacidad de atenuación de los contaminantes a su paso a través del suelo (Vázquez et al., 2006; Duan et al., 2009; Dukes et al., 2010; Zotarelli et al., 2010; Lasa et al., 2011 y Diaz et al., 2019). La dinámica de infiltración es función, entre otras cosas, de la carga de riego, de la estructura del suelo y de la frecuencia y método de riego aplicado. Una mayor carga de riego aumenta las velocidades de infiltración y reduce los tiempos de residencia. La distribución del agua en el tiempo genera ciclos de humectación y secado, que afectan a la aireación del sistema y mejoran el tratamiento bajo condiciones aerobias. Así mismo, el riego con aguas residuales o regeneradas, ricas en nutrientes e iones, puede conllevar un aumento de sales, que pueden afectar negativamente al drenaje en el suelo (Stewart et al., 1990; Bagarello et al., 2006; Zalacaín et al., 2017).

Para paliar el problema de la lixiviación de nitrato, se ha demostrado, a escala laboratorio, que la incorporación de astillas de madera en el suelo mejora la atenuación de nitrógeno (Meffe et al., 2016; Martínez-Hernández et al., 2020). Sin embargo, cuando la incorporación de las enmiendas se realiza en forma de mezcla con el suelo la estructura de este último se ve alterada impactando en la dinámica de infiltración. Además, en el escalado a piloto dicha dinámica se ve afectada por la variabilidad de las condiciones climáticas, la presencia de horizontes subyacentes que condicionan el flujo del horizonte más superficial donde ocurre la mayor parte de los procesos de atenuación y, finalmente, la actividad de la planta está condicionada por su periodo vegetativo. Algunos autores

1.- Introducción

Las soluciones basadas en la naturaleza (SBN) son herramientas inspiradas y respaldadas por el medio ambiente, que son rentables, brindan beneficios ambientales, sociales y económicos y ayudan a desarrollar la resiliencia (CE, 2021).

Los Filtros Verdes (FVs) se incluyen dentro de las SBN, como una técnica de depuración de aguas

han demostrado que aplicar riegos de volumen similar, atendiendo a los requerimientos de la planta, pero en eventos de larga duración, genera diferentes volúmenes de infiltración (Al-Jamal et al., 2002; Bayer et al., 2014).

La caracterización de la dinámica de infiltración a escala piloto en distintos periodos vegetativos, bajo diferentes frecuencias y métodos de riego y con formas alternativas de incorporación de enmiendas puede servir como una herramienta de apoyo a la interpretación de la eficiencia de tratamiento. Este trabajo se centra en desarrollar una metodología de estudio que, identificando los parámetros que describen la dinámica de infiltración, permita comparar los distintos escenarios descritos y evaluar cómo influyen las variables riego, periodo vegetativo y enmiendas y, posteriormente, identificar si estas tienen un efecto en el tratamiento.

El presente trabajo se enmarca en el proyecto FILVER+ cuyo objetivo general es la mejora del tratamiento de un FV a través de la incorporación de enmiendas de bajo coste. Los objetivos específicos de este estudio son: i) determinar los parámetros principales que describen la dinámica de infiltración, ii) comparar esos parámetros entre los diferentes escenarios propuestos para la mejora del tratamiento.

2.- Material y métodos

2.1. Descripción del FV piloto y datos climáticos

El FV piloto está instalado en el Instituto IMDEA Agua (Alcalá de Henares, Madrid) y se riega diariamente con el agua residual generada en el propio edificio. Esta agua es sometida a un pretratamiento mediante un tanque *Imhoff* de 9 m³, desde el que se bombea en pulsos de aproximadamente 300 L hasta el FV. El piloto cuenta con una superficie de 56 m² distribuida en 6 caballones o hileras de 8 chopos (*Populus euroamericana*, clon I-214) con un marco de plantación de 1 m x 1 m, entre los que discurren 5 calles o surcos de riego. El análisis granulométrico mostró que el suelo del FV está compuesto por 42,5% de arena, 26% de limo y 31,5% de arcillas, por lo que se clasifica como suelo franco arcilloso (Soil Survey Staff, 1999).

El clima es mediterráneo continentalizado, con una temperatura (T^a) media anual de 14,3°C, que oscila entre 0°C y 18°C en los meses de inactividad vegetativa del chopo (periodo inactivo, PI) y entre 5°C y 33°C en los meses de actividad (periodo activo, PA). Los valores medios de precipitación anual (PP) son de 489 mm (AEMET, 2021). La evapotranspiración de referencia (ET₀) y la evapotranspiración potencial (ETP) del chopo y las herbáceas, que espontáneamente crecen en el FV, se utilizan para calcular los volúmenes de riego necesarios, que se estiman en base al balance hídrico diario,

atendiendo a los requerimientos de las plantas y a la cantidad de PP. No obstante, el volumen real aplicado está condicionado por la cantidad de agua residual producida en el edificio. Dado que el riego se realiza diariamente, los volúmenes de agua que se infiltran en forma de recarga neta del acuífero subyacente se estiman también diariamente con cada evento de riego.

2.2. Instrumentación

Todos los equipos instalados se localizan en la parte central del FV piloto para evitar los efectos de borde en la adquisición de datos. Los contenidos volumétricos de humedad del suelo (θ) del FV piloto se detectan mediante tres sondas de humedad ECH2O-5TE (Decagon Devices, Pullman, WA, USA) instaladas a 15, 30 y 45 cm de profundidad. Además, estas sondas miden periódicamente la conductividad eléctrica (CE) y la T^a del suelo. También se ha instalado un tensiómetro T8 (UMS GmbH, München, Germany). La profundidad de la toma de datos del tensiómetro ha variado entre 15 y 30 cm hasta obtener un registro extenso del potencial matricial (Ψ_m), que aporta información sobre las fuerzas de adsorción y capilaridad (Radcliffe, 2010), y complementa la información de la dinámica de la infiltración en el suelo durante y entre eventos de riego. Ambos equipos realizan mediciones cada 10 min y las lecturas se almacenan conjuntamente en un *datalogger* Em50G (Decagon Devices, Pullman, WA, USA).

2.3. Diseño experimental

El experimento consta de 3 periodos diferenciados por i) la frecuencia y sistema de riego, y ii) por la incorporación o no de enmiendas y el método utilizado. El periodo 1 (P1) abarca desde enero de 2018 hasta abril de 2019. Durante el P1 el suelo está inalterado, no se colocan enmiendas y cada calle se riega por inundación una vez por semana. El periodo 2 (P2), se extiende desde la colocación de enmienda mezclada con el suelo en abril de 2019 hasta julio de 2020. La aplicación de la enmienda en el P2 se llevó a cabo mezclando 3% (en peso) de astillas de madera con los primeros 15 cm de suelo del FV. Estas astillas se obtuvieron de la poda de la propia biomasa producida en el FV en diciembre de 2018 y se dejaron secar al aire hasta su incorporación en el suelo. Durante el P2 la frecuencia y sistema de riego se mantienen como en el P1.

Los últimos meses del P2 así como el Periodo 3 (P3) están marcados por una menor afluencia de gente en el edificio debido a la pandemia de la COVID 19, lo que condiciona la cantidad disponible y calidad del agua residual disponible para el riego. El P3 comienza en julio de 2020 con la incorporación de un lecho de 10 cm de espesor de astillas sobre el suelo de los surcos del FV. A su vez, se instala un sistema de riego por goteo con tuberías de 20 mm perforadas en las cinco calles del FV.

Las tuberías cuentan con goteros turbulentos con el paso de luz máximo permitido por el diseño (8 L/h) para evitar el depósito de sólidos en suspensión. Los goteros están espaciados en tramos de 25 cm para garantizar la uniformidad en la aplicación de riego. Además, se cambia la frecuencia de riego de semanal a diaria en todas las calles. Esto implica una reducción de la carga de riego diaria pero no del volumen total tratado semanalmente.

2.4. Parámetros característicos de la dinámica de infiltración

El análisis de la dinámica de infiltración se ha llevado a cabo mediante la selección de múltiples eventos de riego en cada periodo de estudio utilizando las sondas de 15 y 45 cm. Cada periodo engloba un año completo, así podemos comparar tres ciclos de actividad (PA) o estivales, que incluyen los meses de abril a octubre en los que el coeficiente de cultivo o K_c del chopo es mayor a 0; y tres ciclos de estado de dormancia de los chopos o inactividad (PI) que engloban los meses de noviembre a marzo. Para cada evento de riego se han identificado parámetros que caracterizan la forma de la curva de humedad.

Estos parámetros son el contenido inicial de humedad previo al riego (H_0), el tiempo de respuesta de la sonda (T_r), o tiempo transcurrido desde que se inicia el riego hasta que el frente es detectado por las sondas y que marca la primera subida de humedad (H_1), y el contenido máximo de humedad (H_{max}). Tras el cese del riego, la humedad desciende bruscamente debido al drenaje del agua contenida en los macroporos. El contenido de humedad previo a ese descenso se ha definido como H_2 . El tiempo transcurrido entre H_1 y H_2 se ha definido como tiempo de drenaje rápido (TDr). El tiempo transcurrido desde H_2 hasta que se produce de nuevo un cambio en la pendiente de la curva de descenso de la humedad (considerado, en ausencia de evapotranspiración, como capacidad de campo – CC) se ha definido como tiempo de drenaje lento (TDI). De hecho, la CC dinámica supone un punto de inflexión en la curva de humedad (Zotarelli et al., 2010), y representa la humedad final que registra el paso del frente y a partir de la cual los valores son paulatinamente más bajos hasta alcanzar la H_0 del siguiente evento de riego.

Finalmente, la suma de los tiempos de drenaje (TDr+TDI) permite estimar el Temp o tiempo durante el cual se registran valores de humedad superiores a la capacidad de campo del suelo, desde que el suelo se humecta (H_1), alcanzando o no valores de saturación, hasta que finaliza el drenaje por gravedad en CC.

3.- Resultados y discusión

3.1. Las curvas de humedad

Durante los tres periodos estudiados se han observado, en general, dos dinámicas diferentes del frente de humedad (Fig. 1) que definimos como curvas Tipo A y Tipo B. Las primeras muestran un aumento en el contenido de humedad del suelo al iniciarse el riego seguido por valores de humedad próximos a H_{max} durante éste, y un descenso final brusco tras el TDr. Por otro lado, las gráficas de tipo B, están caracterizadas por un pico inicial o valor máximo de H_{max} seguido de una meseta o ligero descenso de los valores de humedad y finalmente un descenso brusco.

Una vez iniciado el riego, la sonda detecta la llegada del frente y experimenta una subida notable hasta alcanzar la H_{max} registrada en dicho evento y producida por uno o múltiples pulsos de riegos.

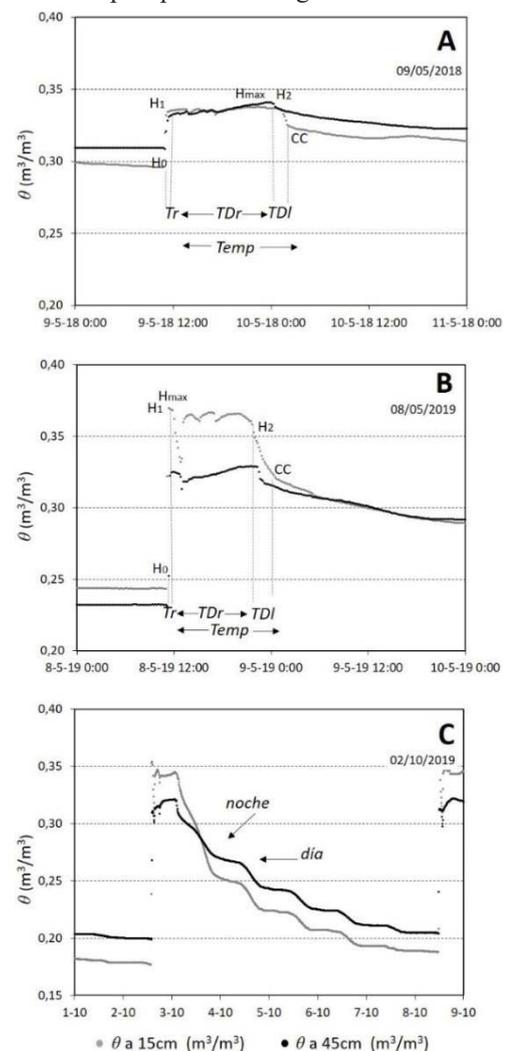


Fig. 1. Curvas tipo de las modalidades de respuestas de las sondas a los eventos de riego. A) corresponde con ejemplo de respuesta Tipo A; B) corresponde con ejemplo de respuesta Tipo B y C) corresponde con ejemplo de respuesta de Tipo C o drenaje escalonado según ciclos de día/noche.

Si permanece constante formando una meseta implica la presencia de condiciones de saturación (H_{max}) o contenido volumétrico de agua saturado (θ_s) que se corresponde con la porosidad total (ϕ) que, a su vez, depende de la estructura del suelo (Radcliffe, 2010).

Dicha H_{max} puede darse al inicio del riego o H_1 y descender ligeramente en el tiempo durante el cual el suelo drena (Fig. 1B), o al final del riego y coincidir con H_2 (Fig. 1A). Durante el TDr, se registran los valores más elevados de θ para ese evento o riego, siendo próximos a los de saturación (θ_s). Bajo estas condiciones, el flujo depende de la componente gravitacional (Ψ_g) del potencial hidráulico. Durante el TDI, los valores de θ descienden por debajo de saturación, los poros más grandes se vacían, continúa el drenaje por gravedad y la componente del potencial matricial (Ψ_m) adquiere una mayor relevancia, implicando que el movimiento del agua se vea más afectado por fuerzas de capilaridad y de adsorción (Radcliffe, 2010 y Zotarelli et al., 2010).

Además de las dos tipologías generales de respuesta de las sondas hay un tercer tipo (Tipo C) que aparece en los PA, especialmente en el P2 (mayo – octubre 2019), característica por su morfología escalonada tras el drenaje de agua gravitacional o CC (Fig. 1C). Este patrón, que se observa durante los dos o tres días sucesivos al riego, se relaciona con los ciclos día-noche de actividad de las plantas. En el PA las horas de luz y las temperaturas son elevadas, de modo que las plantas absorben el agua disponible en el suelo, produciendo el descenso del θ . Sin embargo, durante las noches esta absorción baja y la humedad se mantiene alrededor de un valor constante. La pendiente decae durante varios días consecutivos porque, aunque el contenido de humedad esté por debajo de la CC, tras drenar los macroporos del suelo, los microporos siguen estando saturados y sigue habiendo agua capilar o reserva hídrica disponible para las plantas (Zotarelli et al., 2010).

3.2. Dinámica de infiltración

En la Fig. 2 se muestran los valores de H_0 y H_{max} para los tres periodos de estudio a ambas profundidades (15 y 45 cm) en función del estado de actividad del chopo. La H_0 es el parámetro más influenciado por las fluctuaciones de las condiciones climáticas, así como por el estado de actividad o dormancia de los chopos del FV. Como cabe esperar, las H_0 son mayores en los meses de otoño e invierno (PI) y descienden en los meses de primavera y verano (PA) en ambos horizontes. Especialmente en el PA del P2, que presenta menores H_0 dado que el suelo removido es especialmente susceptible ante los cambios de T^a y ET_0 . Este hecho afecta especialmente a la sonda de 15 cm, y está relacionado con la colocación de la enmienda y la mezcla con los primeros cm de suelo, que favorece procesos de aireación y evaporación.

Los valores de H_0 más elevados y homogéneos se dan en el P3 en el estado de dormancia, ya que se riega diariamente, lo que permite que el suelo se mantenga húmedo durante toda la semana. En los meses de julio y agosto la curva de humedad con el riego por goteo del P3 no presenta una forma tan definida como con el riego por inundación del P2.

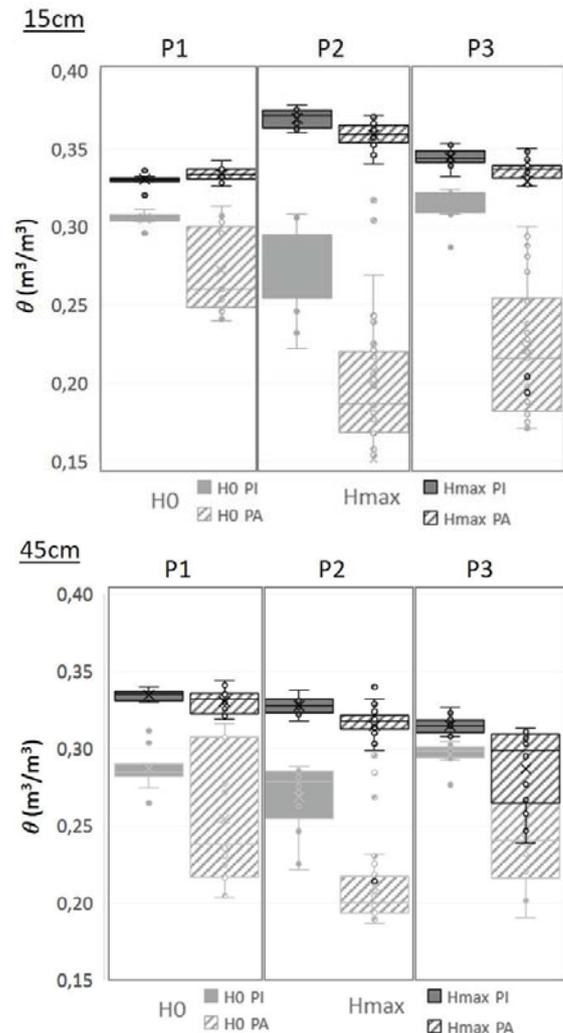


Fig. 2. Distribución de los valores de los parámetros de humedad (H_0 abajo y H_{max} arriba) estudiados en los eventos de riego de los distintos periodos (P1, P2, P3), diferenciados por estado de dormancia o inactivo (PI) y estival o activo (PA). A la izquierda a 15 cm y a la derecha a 45 cm de profundidad.

En el P2, la aplicación de la enmienda conlleva un aumento de porosidad y tamaño de poros, y por ende de los valores medios de H_{max} a 15 cm ($0,362 \text{ m}^3/\text{m}^3$) respecto a P1 y P3 ($0,333 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y $0,334 \text{ m}^3/\text{m}^3$ respectivamente) (Fig. 2 y Fig.3).

En el P3 los valores de H_{max} a 15 cm se aproximan al P1 ya que, por un lado, el suelo tiende a compactarse con el tiempo reduciendo su porosidad total. A 45 cm se observa un descenso de los valores de H_{max} debido a que aunque los volúmenes de riego total semanales son

similares en P2 y P3, las cargas diarias aplicadas en cada calle varían. Además, el descenso en los valores de H_{\max} a 45cm durante el estado activo del P2 y P3, así como la mayor dispersión de los datos en el P3, están asociados a los bajos volúmenes de riego disponibles durante los meses de verano de 2020 (Fig. 3) que en muchas ocasiones no permitían infiltración suficiente para alcanzar valores altos de H_{\max} ni de saturación a 45 cm. De esta manera, en el P3 son necesarios varios riegos en días consecutivos para que se detecte volumen de infiltración a 45 cm de profundidad (es decir, un aumento de H_0) y existen eventos de riego que producen infiltración hasta 15cm, pero no se detectan a 45cm.

El análisis del paso del frente de humedad (Fig. 3) muestra valores más elevados de Temp en P1 ($13,6 \pm 4,2$ h) debido a que la mayor variabilidad del volumen regado da lugar a eventos puntuales en los que se aplican mayores cargas de agua en un suelo con una estructura todavía inalterada. En el verano del P2 hay un incremento en la variabilidad del Temp ($13,24 \pm 7,93$ h) por la incorporación de la enmienda. También se observa que los Temp a 15 y 45 cm se tornan semejantes ($13,24 \pm 7,93$ h y $12,21 \pm 6,93$ h, respectivamente) debido a que la infiltración del agua en los primeros cm de suelo removido está ahora condicionada por el horizonte inferior. Durante el P3 la disminución observada de los Temp con respecto a los periodos anteriores ($5,90 \pm 3,40$ h y $6,09 \pm 2,88$ h a 15 y 45 cm) se explica esencialmente por la reducción en las cargas de riego. Las fluctuaciones en los Temp (Fig. 3) dependen de la carga de riego, así como del modo de aplicación, existiendo una clara correlación entre ambos parámetros. En eventos de riego

similar, se observa que los mayores Temp corresponden con eventos en los que se regó 3 o 4 veces al día, separadas por intervalos de 2 h, y los menores Temp con eventos de riego único o 2 riegos separados 4 h o más. En la Fig. 3 podemos ver cómo la tendencia de los Temp a 15 cm está estrechamente relacionada con la carga de riego, no así a 45 cm que parece más influenciada por el número de riegos por evento. Este hecho concuerda con los resultados de otras investigaciones basadas en la modificación y adecuación de riegos para el tratamiento de aguas con elevadas cargas de N (Zotarelli et al., 2011). La aplicación de riegos por goteo, frecuentes y de corta duración favorece el aumento de θ en la capa más superficial de suelo, disminuyen los volúmenes de drenaje y mantienen la humedad en los primeros cm de suelo, donde la rizosfera está más desarrollada y la absorción del agua por parte de la planta es mayor. El sistema de riego por goteo y la reducción de la carga de riego con un aumento en la frecuencia de aplicación han demostrado resultados similares en otros estudios (Dukes et al., 2010; Duan & Fedler, 2007) que describen bajas tasas de infiltración y mejor aprovechamiento del riego por parte de la planta.

Riegos muy prolongados como los del PA del P2 (mayo-octubre 2019) favorecen tasas de infiltración rápidas que además están estrechamente ligadas a lixiviación de nutrientes (datos mostrados en el artículo complementario de Barbero et al., 2021b (enviado)). Así, los riegos realizados en un único pulso provocan la llegada de un frente de gran volumen que satura los primeros cm y drena rápidamente (reducción de TDI) hasta el horizonte subyacente de estructura inalterada.

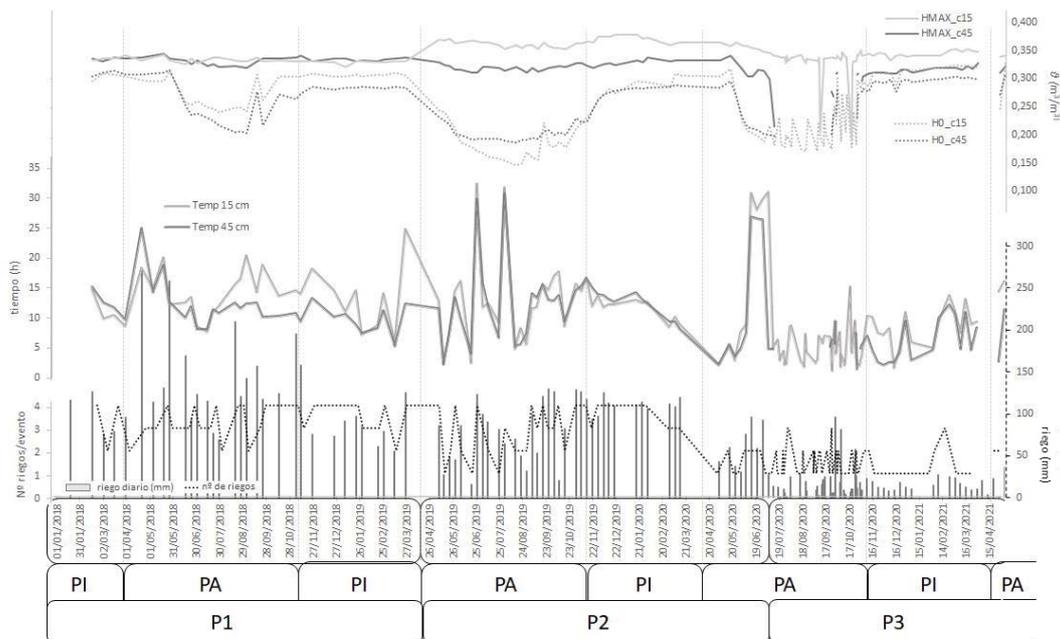


Fig. 3. Evolución temporal de riego (mm), los parámetros de humedad (H_0 , H_{\max} (m^3/m^3)) y tiempos calculados en horas (Temp) en los tres periodos de estudio.

Sin embargo, durante ese mismo periodo, la aplicación de varios riegos de menor volumen provoca una humectación inicial sin drenaje de los poros de mayor tamaño (con el primer pulso), y un posterior mantenimiento de la saturación del suelo entre los horizontes 15 y 45 (con los pulsos sucesivos), lo que se traduce en mesetas o TDr mayores, y por ende Temps de mayor duración. En general, los valores de TDr tienen un impacto mayor en el Temp que los de TDI ya que representan la mayor parte del tiempo total (datos no presentados). Este hecho concuerda con el aumento de los Temp hacia PI del P2 y con la posible compactación o asentamiento del suelo en P3.

En el PA del P3 el riego por goteo con bajas cargas diarias se ve afectado por procesos de evaporación y evapotranspiración, lo que deriva en la ausencia de infiltración hasta 45 cm, limitando el desarrollo de raíces por encima de 40 cm y aumentando la superficie para la absorción de agua en los primeros cm de suelo. Esto puede provocar la concentración de iones presentes en el agua de riego durante días o semanas, que pueden lavarse con riegos elevados (aumento de Na^+ en el agua de infiltración hasta valores entre 150 y 300 mg/L en julio y agosto de 2020). No obstante, no supone un problema a largo plazo ya que en los meses consiguientes o PI del P3 la salinidad del agua de infiltración vuelve a presentar valores normales y similares a periodos anteriores (50 mg/L).

4.- Conclusiones

Las variaciones observadas en los parámetros característicos de la dinámica de infiltración se relacionan con la incorporación de la enmienda, el volumen y número de riegos en cada evento, las fluctuaciones estacionales de los parámetros climáticos y los estados de actividad del chopo.

La incorporación de la enmienda en forma de mezcla con el suelo ha supuesto un incremento en la porosidad total y en el tamaño de los poros, dando lugar a una mayor aireación y exposición a las fluctuaciones climáticas de los primeros 15 cm. Esto se ve reflejado en la dinámica de infiltración puesto que aumentan los valores de H_{max} y se exagera la dependencia de la H_0 de los parámetros climáticos y de los periodos de actividad de chopo.

Cuando el riego se realiza por inundación una vez por semana (P1 y P2), los Temp están fuertemente condicionados por la carga de riego aplicada y el número de riegos. Cuando no se altera la estructura del suelo (P1) la respuesta de la sonda a 15 cm de profundidad está más influenciada por el volumen de riego aplicado mientras que la sonda a 45 cm es más susceptible al número de riegos.

Durante el P3 los riegos diarios mantienen los niveles de humedad impidiendo el desarrollo de ciclos de secado del suelo acusados. En este periodo, el parámetro Temp está condicionado por el riego del día anterior, dificultando la separación de los eventos de riego y la relación con los volúmenes y número de riegos.

5.- Bibliografía

- AEMET, Información elaborada por la Agencia Estatal de Meteorología. 2021: http://www.aemet.es/es/datos_abiertos/AEMET_OpenData
- Al-Jamal, M.S., Sammis, T.W., Mexal, J.G., Picchioni, G.A. & W.H. Zachritz, 2002. A growth-irrigation scheduling model for wastewater use in forest production, *Agricultural Water Management*, 56(1), 57-79
- Bagarello, V., Iovino, M., Palazzolo, E., Panno, M. & W.D. Reynolds, 2006. Field and laboratory approaches for determining sodicity effects on saturated soil hydraulic conductivity. *Geoderma*, 130(1-2), 1-13.
- CE, "Nature Based Solutions". 2021: https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/environment/nature-based-solutions_es
- Díaz, R., Salazar, O., Quemada, M., Nario, A. & X. Videla, 2019. Determinación de la eficiencia de uso del nitrógeno en maíz (*Zea mays* L.) y de las pérdidas por lixiviación. *XIV de Jornadas de Investigación de la Zona No Saturada (ZNS)*. Madrid (España).
- Duan, R., & C. B. Fedler, 2007. Quality and quantity of leachate inland application systems. *ASABE Annual Int. Meeting, Minneapolis Convention Center*, Minneapolis, Minnesota, 49085-9659
- Duan, R. & C.B. Fedler, 2009. Performance of a Combined Natural Wastewater Treatment System in West Texas. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136. 204-209.
- Dukes, M. D., Zotarelli, L., & K. T. Morgan, 2010. Use of Irrigation Technologies for Vegetable Crops in Florida, *HortTechnology horte*, 20(1), 133-142.
- Lasa, B., Irañeta, I., Muro, J., Irigoyen I. & P.M. Aparicio 2011. Isotopic composition of maize as related to N-fertilization and irrigation in the Mediterranean Region. *Sicentia Agricola* 68(2), 182-190.
- Martínez-Hernández, V., Leal, M., Meffe, R., De Miguel, A., Alonso-Alonso, C., de Bustamante, I., Lillo, J., Martín, I. & J.J. Salas, 2018. Removal of emerging organic contaminants in a poplar vegetation filter. *Journal of Hazardous Materials* 342, 482-491
- Martínez Hernández, V., Meffe R., Hernández Martín J., Alonso González A., de Santiago Martín A. & I. de Bustamante 2020. Sustainable soil amendments to improve nature-based solutions for wastewater treatment and resource recovery. *Journal of Environmental Management*, 261.
- Radcliffe, D.E. & J. Simunek, 2010. Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications. *CRC Press, Taylor & Francis Group*. 388
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2nd edition. Natural Resources Conservation Service. *U.S. Department of Agriculture Handbook*. 436
- Stewart, H.T.L. Hopmans, P. Flinn, D.W. & T.J. Hillman, 1990. Nutrient accumulation in trees and soil following irrigation with municipal effluent in Australia. *Environmental Pollution*, 63(2), 155 - 177.
- Vázquez, N., Pardo, A. Suso M.L. & M. Quemada 2006. Drainage and nitrate leaching in processing tomato under drip irrigation and plastic mulching. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 112. 313 - 323.
- Zalacáin, D., Sastre-Merlín, A., Martínez-Pérez, S., Álvarez-Guerra, R. & R. Bienes 2017. Efectos del riego de parques urbanos con agua

regenerada sobre la tasa de infiltración y la resistencia a la penetración del suelo. *XIII de Jornadas de Investigación de la Zona No Saturada (ZNS)*. Zaragoza (España).

Zotarelli, L., Dukes, M., & K. Morgan, 2010. Interpretation of Soil Moisture Content to Determine Soil Field Capacity and Avoid Over-Irrigating Sandy Soils Using Soil Moisture Sensors. *Gainesville: University of Florida*. Institute of Food and Agricultural Sciences. *AE460*

Zotarelli, L., Dukes, M., Scholberg, J., Femminella, K. & R. Muñoz-Carpena, 2011. Irrigation Scheduling for Green Bell Peppers Using Capacitance Soil Moisture Sensors. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*, 137. 73-81.