



# **Identificación de los lugares con mayor potencialidad para el establecimiento de un humedal en el Campus de Moncloa (Ciudad Universitaria de Madrid)**

**Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas**

**Presentado por:** D. Álvaro Lázaro Novell

**Directores:** Dr. José Vicente Rovira Sanroque

Dr. Felipe Morcillo Alonso

Dra. María Clara Rubio

**Tutor Académico:** Dr. Diego García de Jalón

EN MADRID A 28 DE SEPTIEMBRE DE 2021

# Índice

- Introducción
- Materiales y métodos
  - Área de estudio
    - Clima y litología
  - Selección de las zonas idóneas para albergar un humedal dentro del área de estudio
  - Caracterización hidrológica del área de estudio y morfológica de los humedales
    - Información geográfica
  - Balance hídrico
    - Evapotranspiración de referencia  $ET_0$
    - Ficha hídrica
- Resultados y discusión
  - Selección de las zonas idóneas para albergar un humedal dentro del área de estudio
  - Caracterización hidrológica del área de estudio y morfológica de los humedales
  - Balance hídrico
- Conclusiones
- Bibliografía
- Agradecimientos

## Título y abstract

(ESP) Identificación de los lugares con mayor potencialidad para el establecimiento de un humedal en el Campus de Moncloa (Ciudad Universitaria de Madrid).

(EN) Identification of the emplacements with the greatest potential for the establishment of a sustainable wetland on Moncloa Campus (University City of Madrid).

(ESP) Los humedales son los ecosistemas que aportan más servicios ecosistémicos por unidad de superficie para la flora, la fauna y la especie humana. A pesar de los servicios de regulación que aportan los humedales, como el control de las inundaciones, la regulación local del clima y la purificación de aguas, entre otros, la degradación y destrucción de estos ecosistemas se ha incrementado en los últimos años, impulsado en muchos lugares por el aumento de la urbanización y la agricultura. El previsto crecimiento urbano que se espera en los próximos años supone una oportunidad para la planificación de grandes ciudades que incluya infraestructura verde y azul. El presente trabajo pretende realizar una prospección del Campus de Moncloa de la Ciudad Universitaria de Madrid para buscar zonas idóneas para el establecimiento de un humedal. Mediante el uso de sistemas de información geográfica se han localizado las depresiones existentes en la red de drenaje dentro del Campus, que puedan ser aprovechadas para recrear un humedal. Estas depresiones son las zonas con mayor acumulación de escorrentía, lo que permitirá aprovechar al máximo las lluvias. Se ha realizado un balance hídrico de la zona de estudio, para obtener información sobre el déficit hídrico, la cantidad aproximada de agua

excedente en el sistema y los meses del año con mayor estrés hídrico, así como para tener una idea del tipo de humedal que podría albergar el área de estudio según su hidroperiodo. Proponemos una herramienta de planificación espacial para ayudar en la toma de decisiones.

(EN) Wetlands are classified among the ecosystems which provide the most quantity of ecosystem services per unit of surface, benefiting flora, fauna and the human species. Despite the regulatory services that wetlands provide, such as flood control, local climate regulation and water purification, the degradation and destruction of these ecosystems has increased in recent years, driven by rapid urbanization and agriculture expansion and intensification. The urban growth expected for the following years can serve as a pivotal moment to include green and blue infrastructure into the spatial planification of large cities. This work pretends to carry out a prospection of the Campus de Moncloa of Ciudad Universitaria de Madrid with the objective of finding suitable areas for the establishment of a wetland. Through geographical information systems (GIS) the topographical depressions of the drainage network have been located, which can be used to recreate a wetland. These topographic depressions are located in zones with the largest accumulation of runoff, a fact that will allow to take the maximum advantage of the rain. A hydric balance of the study area has also been performed in order to obtain information about the water deficit, the approximate amount of surplus water in the system and the months with the highest water deficit. These hydric balance will also serve to have an approximate idea of the typology of wetland that the study area can harbor according to its hydroperiod. We propose here a tool of spatial planification to help with decision making.

### **Palabras clave**

(ES) Análisis espacial, idoneidad, GIS, planeamiento, humedal urbano

(EN) Spatial analysis, suitability, GIS, planning, urban wetland

## **Introducción**

El concepto de humedal es muy amplio y ha sido definido por multitud de organismos, administraciones y autores que aportan diferentes matices (Zedler y Kercher, 2005; Moore, 2008). Sin embargo, hasta ahora no ha habido consenso para establecer una definición de referencia para este tipo de ecosistemas. Aunque la cantidad de definiciones sea tan grande y estas puedan ser muy diferentes entre sí, la presencia de agua es común en todas ellas. La Convención Ramsar (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2013) en su artículo 1.1 define un humedal como *un área de marisma, pantano, turbera o cuerpo de agua, tanto natural como artificial, permanente o temporal, con agua estática o en circulación, dulce, salada o salobre, incluyendo áreas marinas donde la profundidad en períodos de marea baja no exceda los seis metros*. La US EPA (Federal Geographic Data Committee, 2013) los define como aquellas áreas donde el agua cubre el suelo o está presente en la superficie o cerca de ésta, permanentemente o en períodos variables durante el año, incluyendo la duración de la época de crecimiento vegetativo. La Directiva 2000/60/CE (DOCE 327, 2000) o Directiva Marco del Agua (DMA), aplicada en España mediante la ley 62/2003 (BOE 313, 2003), introduce obligaciones para el uso eficiente de

los recursos hídricos y el cumplimiento de objetivos ecológicos para la conservación del buen estado de los ecosistemas acuáticos de la Unión Europea. Otras dos directivas europeas incluyen aspectos para la protección y conservación de los humedales: la Directiva 2009/147/CE o Directiva Aves (DOCE 20, 2009) y la Directiva 92/43/CEE o Directiva Hábitats (DOCE 206, 1992). Para el cumplimiento de estas y otras directivas, que tienen en común la conservación de los humedales, se elaboró el “Plan Estratégico Español para la Conservación y Uso Racional de los Humedales” (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2000). El documento pretende garantizar: i) la conservación y uso racional de los humedales, incluyendo restauraciones o rehabilitaciones, ii) la integración de la conservación con el uso racional de los humedales y iii) es una contribución para el cumplimiento de los compromisos del estado español con los convenios, directivas, políticas y acuerdos europeos e internacionales relacionados con los humedales. En la misma línea, la Comunidad de Madrid aprobó la Ley 7/1990 (BOE 234, 1990) de protección de embalses y zonas húmedas. Actualmente se está elaborando el “Plan integral de Recuperación y Conservación de los Ríos y Humedales de la Comunidad de Madrid” que tiene como objetivo mantener o recuperar ríos y humedales de la región.

En cualquier humedal, tanto artificial como natural, siempre hay presentes al menos 5 servicios ecosistémicos: regulación del clima local, polinización, papel educacional, soporte para la biodiversidad y almacenaje y reciclaje de nutrientes. De estos servicios ecosistémicos, aquellos que se consideran de soporte son los más infravalorados en la mayoría de los estudios y son también los menos analizados. Los humedales constituyen un punto caliente (*hotspot*) de biodiversidad en la cuenca mediterránea dado que proporcionan hábitat para multitud de especies autóctonas, tanto endémicas como migratorias (Geijzendorffer et al. 2019), aunque su recreación puede suponer también una oportunidad de colonización para especies alóctonas. Su importancia no recae únicamente en sus beneficios para la biodiversidad, sino que los humedales proporcionan multitud de servicios ecosistémicos y beneficios para las personas (Costanza et al. 1997; Janse et al. 2019). Tan grande es el número de servicios que proveen que han sido considerados como el tipo de ecosistema terrestre más valioso por unidad de superficie (Costanza et al. 1997). Aunque este tipo de sistemas en la mayoría de los casos sean usados para obtener beneficios económicos o para el tratamiento de residuos (Russo et al. 2019), también ha sido demostrado el gran papel en la conservación de la biodiversidad a escala regional (Cereghino et al. 2008). Tanto por el aprovechamiento económico de estos sistemas como por su papel ecológico, la recuperación o recreación de humedales en zonas urbanas puede aportar múltiples beneficios (Bolund y Hunhammar, 1999). Estas acciones, aunque comprendan porciones del territorio muy pequeñas, pueden llegar a tener un impacto muy significativo (Callaway y Zedler, 2004).

La destrucción y degradación de los humedales se ha dado por la urbanización y por un incremento de la actividad agrícola (Geijzendorffer et al. 2019). En el mediterráneo, la superficie natural de humedales se ha reducido un 48 % desde 1970 (Ravit et al. 2017; Geijzendorffer et al. 2019), mientras que por todo el mundo la reducción es generalizada y continua. Sin embargo, en los últimos 30 años ha ido en aumento la superficie de humedales artificiales. De forma global se ha perdido un 54-57 % de la extensión de los humedales, pero se cree que la pérdida es mayor (Davidson, 2014). En las zonas urbanas

la mayoría de los humedales que aún existen acaban siendo alterados por la acción humana, por lo que es de vital importancia su restauración o recreación.

Las principales amenazas para los hábitats de agua dulce son en general: i) la degradación de hábitat, ii) la contaminación del agua, iii) las modificaciones en los caudales circulantes, y iv) la sobreexplotación e invasión por especies alóctonas. Además, el Cambio Global supone quizás su mayor amenaza actual, debido a: i) el incremento del depósito atmosférico de N reactivo, ii) el calentamiento global, iii) los cambios en el régimen de precipitaciones, y iv) la variación del patrón de la escorrentía por la urbanización (Dudgeon et al. 2006). Estos y otros impactos que les afectan y amenazan son debidos a la intensificación e industrialización agrícola, al desarrollo urbanístico, a la contaminación de las aguas y al cambio climático, como ya se ha comentado (Biggs et al. 2005). El desarrollo urbanístico supone una potente perturbación para el ambiente y su impacto se hace aún mayor para los ecosistemas acuáticos. Estos sistemas se ven rellenos, drenados y fragmentados por diferentes acciones, sufriendo alteraciones hidrogeomorfológicas en sus cuencas de drenaje que afectan a su hidropereodo. Todo esto produce una drástica reducción de las condiciones ecológicas y ambientales del sistema (Heino et al. 2017). Debido a la cantidad de amenazas e impactos a los que los humedales están siendo sometidos en los últimos años, la comunidad científica recomienda que se debe fomentar su interés y atención y que deben de ser protegidos y conservados. Un ejemplo de este tipo de iniciativas para el aumento de la concienciación social y la divulgación de los servicios prestados, en concreto por las charcas y estanques, es la creación, en 2004, de la *European Pond Conservation Network* (EPCN), organización que realiza desde entonces reuniones científicas y de trabajo, entre otros eventos; en mayo de este año la EPCN ha realizado su novena conferencia (<https://www.europeanponds.org/conference/>) en la que se presentaron ponencias y conferencias muy variadas e interesantes.

Actualmente el 55 % de la población mundial vive en zonas urbanas, porcentaje que está proyectado que aumente hasta el 68 % en 2050 (UN, 2019). El crecimiento de la población urbana va asociado a una rápida urbanización que, en muchos casos, degrada o destruye la mayoría de los humedales preexistentes. Por todo lo ya comentado es de vital importancia incorporar sistemas y políticas de desarrollo sostenible en las ciudades. Estos nuevos planes deben considerar la protección y conservación de humedales existentes y considerarlos como unas infraestructuras urbanas de vital importancia para la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos. Humedales tales como los estanques y charcas urbanos se pueden emplear para controlar las inundaciones y la escorrentía superficial, mejora la calidad del agua, ya que facilitan el reciclaje de nutrientes y materia orgánica, pero también mejoran la calidad del aire, aportan sombra y humedad y permiten la presencia de especies y procesos ecológicos que mejoran la calidad de vida, entre otros beneficios. Se enmarcan en el grupo de infraestructuras verdes o azules, con un rol muy importante en la salud y bienestar de la sociedad. En una ciudad la infraestructura verde está compuesta por elementos como árboles, parques, prados, campos y bosques, entre otros, mientras que la infraestructura azul se refiere a elementos relacionados con el agua como ríos, canales, charcas y humedales en general. En zonas urbanas las áreas verdes que incluyen elementos relacionados con el agua son mejor valoradas por la población que aquellas que no los incluyen (Dou et al. 2017). No es menos importante el vínculo que el ser humano tiene con la naturaleza y que puede verse beneficiado por la presencia de este

tipo de sistemas en áreas urbanas, donde el aspecto que más se percibe, además de los anteriormente mencionados, es el de un incremento en la socialización entre familia y amigos. Todo ello incrementa la sensación de bienestar y de mejora de salud mental de la población (Pedersen et al. 2019). En zonas periurbanas los humedales son percibidos como zonas que contribuyen a una mejora de la calidad de vida, y su aspecto más valorado por la ciudadanía es el de “tener acceso a un ambiente natural con gran variedad de plantas y animales” o “estar más cerca de los animales y la naturaleza”. De forma similar, también está presente el hecho de disfrutar de la belleza de la naturaleza y del paisaje.

Aún con todos los beneficios que pueden aportar los humedales urbanos se cuantifican y estudian pobremente (Hassall, 2014). Debido al rápido ritmo de urbanización es esencial su estudio, protección y conservación. En un contexto de cambio climático con eventos climáticos extremos (p. ej. episodios de precipitación extrema), los humedales adquieren un importante papel como reguladores. En los últimos años, se está promoviendo un incremento de espacios verdes y azules en el desarrollo de las ciudades. Un ejemplo de la creciente necesidad e interés sociales por los humedales es Melbourne (Australia), donde en los últimos 20 años, la cantidad de espacios azules (pequeños humedales, charcas o estanques) ha aumentado hasta cinco veces (Hale et al. 2015). Países como Moldavia, Reino Unido y Bélgica, están haciendo uso de los humedales en zonas urbanas como sistemas de complemento para el tratamiento de aguas residuales. En Alemania, Francia e Italia hay ejemplos de humedales urbanos construidos que han sido utilizados para el control de inundaciones o escorrentías superficiales (Stefanakis, 2019).

En las ciudades la mayoría de los cuerpos de agua pequeños son normalmente construidos, creados o recreados con la principal función de proveer servicios como la purificación de agua o la regulación del agua de lluvia, entre otros. Se maximizan los servicios de los cuales se obtiene un beneficio directo en detrimento de otros servicios con beneficios no tan tangibles, como la biodiversidad, el refugio para plantas y animales, los educativos y culturales y la regulación del clima, entre otros. La presencia de pequeños (< 5 ha) cuerpos de agua en las ciudades da soporte a gran parte de la biodiversidad regional y pueden actuar como refugio para especies en peligro de conservación (Ives et al. 2016). Por ejemplo, las comunidades de anfibios se ven reducidas en abundancia y diversidad cuanto más cerca estén del centro de áreas urbanas, lo que puede ser debido a una baja conectividad entre parches de hábitat y a la baja calidad de éste. La presencia de pequeños humedales y estanques en zonas urbanas favorece la diversidad de las especies anfibias y de muchas otras, como odonatos, avifauna y micromamíferos, entre otros... (Menetrey et al. 2005) Para los anfibios puede servir como un sistema de microhábitats conectados en una gran matriz inhabitable; para el resto de las especies es esencial para sus migraciones y su dispersión. En las ciudades es habitual referirse a estanques debido a sus características singulares o su seminaturalidad o artificialidad, que pueden hacerlos diferir en cierto modo de las de un humedal tradicional, por su tamaño, hidroperiodo, o por las comunidades biológicas presentes. Dentro de la definición de estanque se incluye a un grupo de cuerpos de agua dulce con gran variabilidad en tamaño, desde 1 m<sup>2</sup> hasta 2 ha, y en las características de su hidroperiodo (permanente, estacional o semiestacional). Pueden ser naturales o creados por el ser humano y tienen una profundidad menor a 8 m, pudiendo ser colonizados por especies vegetales en la totalidad de su superficie (Indermuehle et al. 2008). A nivel mundial este tipo de sistemas se dan en todas las

regiones biogeográficas. Las estimaciones cuentan más de 277 millones de estanques de menos de 1 ha y más de 24 millones de estanques de entre 1 y 10 ha. Estas cantidades representan el 30 % del área de superficie global de agua, según Downing et al. (2006). Los estanques y charcas urbanos y periurbanos contribuyen al aumento de la biodiversidad de la misma forma que otros cuerpos de agua, pudiendo incluso mantener comunidades biológicas más diversas que en otros sistemas de agua dulce como lagos o ríos (Williams et al. 2004), también tienen elevado valor económico, recreacional, estético, paisajístico y pueden servir en muchos casos como pequeños modelos para estudios sobre ecología (De Meester et al. 2005).

En el ámbito mediterráneo destacan los estanques temporales (o vernaes), establecidos como hábitat prioritario por la Red Natura 2000 (Camacho et al. 2009), muy valiosos por sus características únicas en cuanto a estructura y composición de especies. Estos sistemas también están en peligro debido a las alteraciones que sufren por el incremento en la urbanización y el cambio climático. Estos sistemas se caracterizan por rellenarse de agua en invierno y primavera y permitir el desarrollo de comunidades animales y vegetales (Dimitriou et al. 2006), perdiendo posteriormente toda el agua. La conservación y protección de estos tipos de estanques es de vital importancia ya que, debido a las peculiares características que tienen, albergan gran cantidad de especies endémicas y en peligro de extinción.

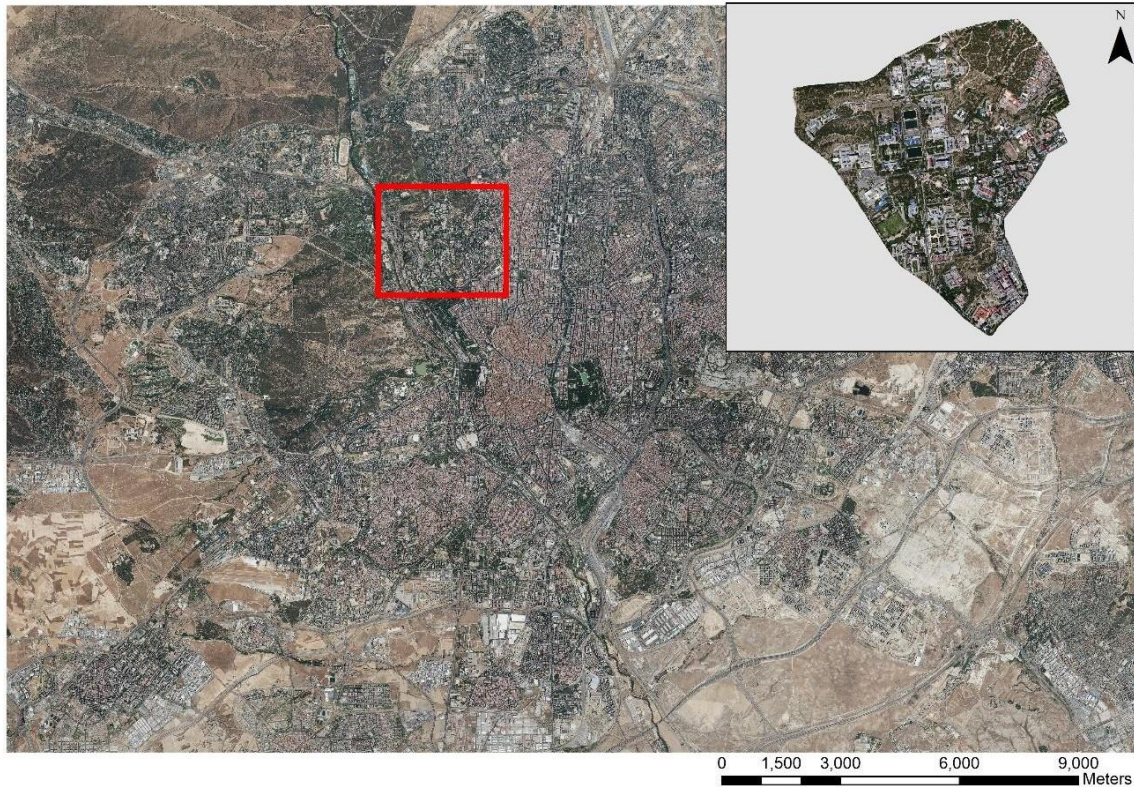
Este análisis preliminar aquí presentado como memoria del Trabajo de Fin de Máster, surge del interés del Vicerrectorado de Tecnología y Sostenibilidad de la UCM (dentro del Plan Estratégico Complutense de Infraestructura Verde y Biodiversidad) para recrear un humedal en la Ciudad Universitaria de Madrid (Campus de Moncloa). Esta propuesta se enmarca dentro de la creciente tendencia en gran parte del mundo para incluir, restaurar o conservar humedales en zonas urbanas y periurbanas con la finalidad de beneficiarse de los múltiples servicios ecosistémicos que brindan. El objetivo general es conseguir recrear un ecosistema con la mayor autonomía y naturalidad posibles para conseguir su sostenibilidad a medio y largo plazo. Los objetivos específicos del estudio son los siguientes.

1. Propuesta y desarrollo de una metodología para la identificación de las depresiones topográficas aptas para albergar un humedal en la zona de estudio;
2. Realización de un balance hídrico de la zona de estudio para conocer el hidropotencial del humedal y poder aproximar cuáles serían sus demandas de agua;
3. Finalmente, con toda la información obtenida, proponer las características tipológicas más adecuadas para ese potencial humedal.

# Materiales y métodos

## Área de estudio

El estudio se enmarca dentro del distrito de Moncloa-Aravaca, en la Ciudad Universitaria de Madrid (Municipio de Madrid) (**Fig. 1**).



*Figura 1. Localización del Campus de Ciudad Universitaria de Moncloa dentro de la Ciudad de Madrid. Fuente: elaboración propia. Ortoimagen: CNIG.*

### Clima y litología.

El clima del área de estudio se clasifica en el grupo de “Bsk” (árido, estepario y frío) según el sistema de clasificación del clima de Köppen-Geiger (AEMET, 2021). Caracterizado por veranos cálidos y secos e inviernos fríos con probabilidad de precipitación en forma de nieve. El diagrama ombrotérmico (**Fig. 2**) refleja las características temperaturas relativamente altas del verano y las temperaturas frías de invierno. En cuanto a la precipitación se observa una marcada estacionalidad de lluvias, característica del clima mediterráneo, que se acumula en invierno y primavera y escasea en los meses de verano.



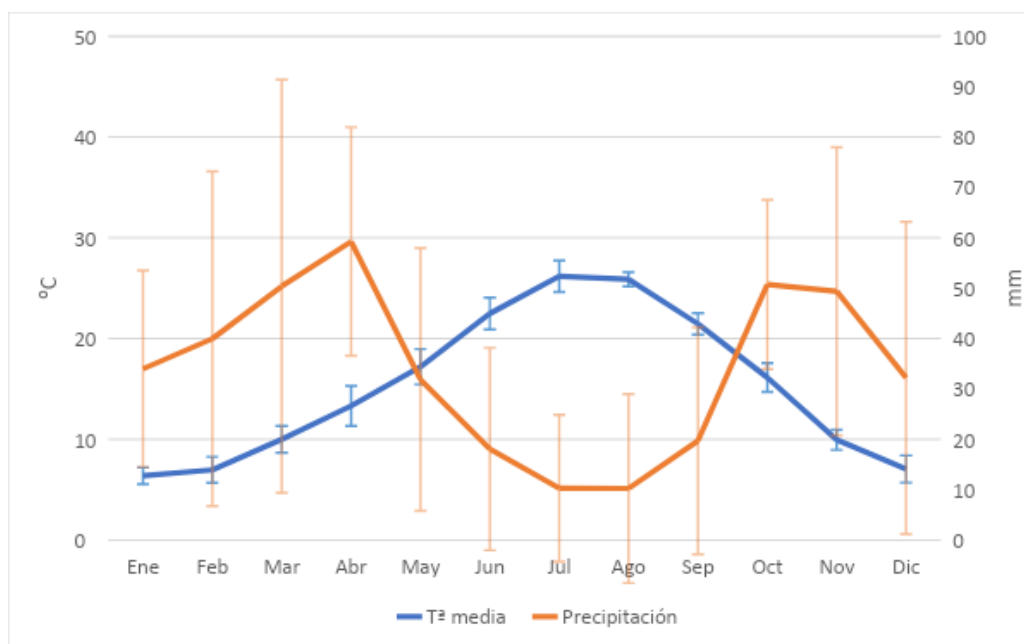


Figura 2. Diagrama ombrotérmico de Gausson (Madrid) para el periodo 2010-2019. Fuente: elaboración propia. Datos de temperatura: CIEMAT. Datos de precipitación: AEMET.

El tipo de suelo que encontramos en ambas zonas pertenece al grupo de los haploxeralfs típicos, grupo que se encuentra de manera muy frecuente en la Comunidad de Madrid (Rodríguez et al. 2011). Estos suelos son franco-arenosos y están caracterizados por ser moderadamente profundos y con buen drenaje, presentan un horizonte ócrico y cámbico. Se desarrollan en yesos, calizas y materiales coluviales más o menos arcillosos. La vegetación asociada a este tipo de suelos en la Comunidad de Madrid son los encinares, quejigares y los matorrales de sustitución.

## Selección de las zonas idóneas para albergar un humedal dentro del área de estudio

Para la selección de las áreas candidatas a albergar un humedal se han seguido los siguientes criterios:

- Debe encontrarse dentro del Campus Universitario de Ciudad Universitaria de la Universidad Complutense de Madrid;
- Debe ser una zona sin edificar, ni en proyecto de edificarse;
- Debe albergar divisorias y vaguadas que se puedan constatar al observar el Modelo Digital del Terreno.

## Caracterización hidrológica del área de estudio y morfológica de los humedales.

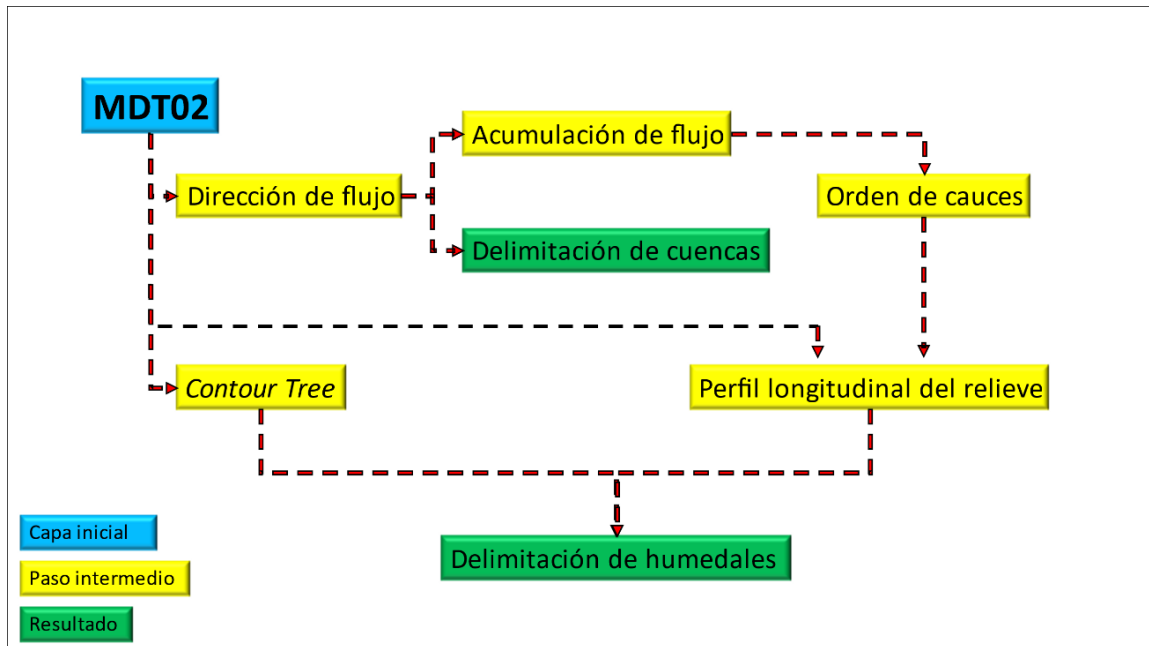


Figura 3. Metodología para la caracterización hidrológica del área de estudio y la delimitación de las zonas de humedal, estanque o charca. Fuente: elaboración propia.

Todo el proceso de caracterización de las áreas se ha realizado a partir del Modelo Digital del Terreno de 2 m (MDT02) (Fig. 3). Esta capa no ha sido preprocesada, no se han rellenado los huecos o depresiones que pueda haber, como otros autores realizan, con el objetivo de no eliminar o modificar posibles depresiones del terreno que el software pueda considerar como anomalías o errores y no lo sean. A partir del MDT02, el primer paso ha sido obtener una capa de dirección del flujo, mediante el método de dirección del flujo D8 (Garbrecht et al. 1997), posteriormente utilizada en otros cálculos. Mediante el mismo método y a partir de la capa de dirección de flujo se ha obtenido la capa de acumulación del flujo. Con la finalidad de ordenar los cauces generados por la herramienta de acumulación de flujo, se ha reclasificado esta misma capa para obtener 2 clases (0 y 1). Con la capa reclasificada de acumulación de flujo se ha conseguido una capa de orden o jerarquía de cauces mediante el método *Strahler* (Strahler 1952). Finalmente, la capa de dirección del flujo ha servido para obtener una capa de cuencas hidrológicas preliminares. Se ha realizado una pequeña prospección sobre el terreno para observar las cuencas delimitadas por la capa de cuencas preliminares. En la prospección se ha visitado cada cuenca para analizar su viabilidad para albergar un humedal. Posteriormente se ha decidido descartar, tanto las cuencas con menor superficie debido al reducido tamaño de sus redes de escorrentía superficial que producirían una acumulación de agua muy pequeña como a aquellas cuencas más próximas a vías de transporte que podrían ocasionar problemas en caso de desbordamiento. A partir del MDT02, se ha realizado un perfil longitudinal del relieve del cauce de mayor orden en cada cuenca. Se propone que los humedales se van a establecer en los cauces de mayor jerarquía debido a que serán las zonas con mayor acumulación de agua de la cuenca, de esta manera se aprovechará al máximo el aporte de agua por escorrentía superficial, subsuperficial y subterránea. Una

vez realizado el perfil longitudinal del relieve, se ha analizado cada uno de éstos en busca de depresiones topográficas que puedan servir para el establecimiento de un humedal. Se ha decidido determinar las depresiones y concavidades existentes en el terreno para que, en caso de que se decida recrear un humedal esté más integrado en el paisaje y no altere en demasía la topografía de la zona, también teniendo en cuenta el abaratamiento de costes que puede suponer aprovechar estas zonas.

Para la caracterización del área de los humedales se ha utilizado el método *Contour Tree*

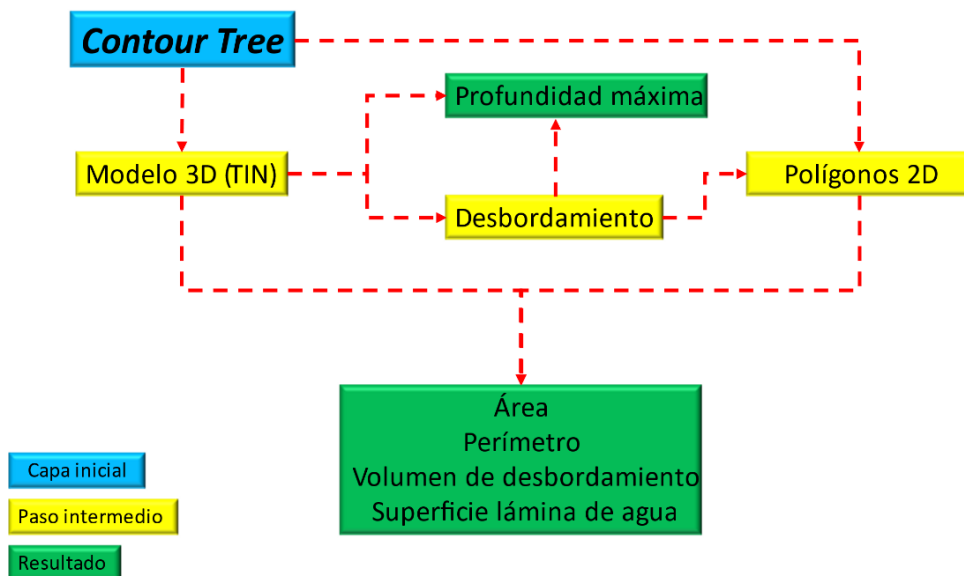


Figura 4. Metodología para la caracterización morfológica de los humedales. Fuente: elaboración propia.

(Wu et al. 2015). Este método crea un mapa de contornos (o líneas de nivel) a partir de un mapa de superficies y gracias a variar la distancia entre líneas de nivel consigue detectar depresiones en la superficie. Mediante la herramienta de este método y la capa del MDT02, con un tamaño mínimo de depresión de 3 m y una distancia tampón (*buffer*) de 2 m, se ha obtenido una capa con todas las depresiones existentes en las cuencas. La capa resultante es un recorte del MDT02 que contiene únicamente las zonas detectadas como depresiones del terreno. Estos resultados se han comparado con los perfiles longitudinales del relieve de las cuencas, observando si las zonas delimitadas por el método *Contour Tree* coincidían con depresiones del perfil longitudinal del relieve de las cuencas. A partir de aquí se han escogido las depresiones de *Contour Tree* en función de los criterios listados a continuación.

- Si se encuentran en el cauce de mayor orden de la cuenca.
- Si no se encuentran al inicio del cauce de mayor orden.
- Si no son las zonas de menor superficie detectadas por el método *Contour Tree*.
- Si son zonas reflejadas como depresiones en el perfil longitudinal del relieve.

Para la caracterización del volumen de las zonas se ha creado un modelo 3D (TIN) de cada una de las zonas de humedal a partir de la capa *Contour Tree*. Se ha visualizado cada modelo 3D mediante el aplicativo *ArcScene* (3D Analyst Tools). En el modelo 3D la zona de humedal está dividida en intervalos de elevación regulares. Se ha identificado en cuál de estos intervalos se produciría un desbordamiento. Este dato se ha guardado como altitud

de desbordamiento en la capa de polígonos para un posterior cálculo de volúmenes. Se ha obtenido también el valor de profundidad máxima del humedal, para ello se ha restado el valor de desbordamiento del valor de elevación mínimo del modelo 3D. Finalmente se ha obtenido el volumen de agua y la superficie de la lámina de agua para cada humedal. Se han utilizado los valores de elevación de desbordamiento, guardados en la capa de polígonos 2D de cada zona, para calcular el volumen existente en la capa 3D por debajo de esos valores (Fig. 4).

### **Información geográfica**

La información geográfica se ha extraído de 2 capas: i) Modelo Digital del terreno de 2 m (MDT02) y ii) Ortofoto PNOA de máxima actualidad (2020), ambas obtenidas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG, 2021a y 2021b). El sistema geográfico de referencia utilizado durante todo el estudio ha sido el ETRS89 Huso 30. Los análisis del área de estudio se han realizado mediante el software ArcGIS (v. 10.7.1 de ArcMap, ESRI Inc.). Las herramientas usadas para la caracterización hidrológica están incluidas en el software ArcGIS (3D Analyst Tools, Conversion Tools y Spatial Analyst Tools). Para la caracterización de los humedales se ha utilizado el método Contour Tree descrito por Wu *et al.* 2015. Asimismo, se ha hecho uso de herramientas de ArcGIS proporcionadas por los autores para la implementación del método en la zona de estudio (Wu *et al.* 2019).

### **Balance hídrico.**

Para el área de estudio se ha considerado únicamente el aporte de agua mediante precipitación atmosférica y la pérdida de agua mediante evapotranspiración. Idealmente, el suelo del humedal estaría impermeabilizado por lo que las pérdidas de agua por infiltración o escorrentía subsuperficial serían mínimas. Asimismo, debido a las características del suelo, se considera que no hay aporte de agua por escorrentía superficial (solamente en casos de precipitación intensa) y que toda entrada de agua procederá de la escorrentía subsuperficial que no se han calculado.

### **Evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ )**

El cálculo diario de  $ET_0$  se ha realizado según las directrices de la FAO (Allen et al. 1998), siguiendo el método Penman-Monteith. Se ha decidido optar por este método para el cálculo de la evapotranspiración debido a las características de los datos de los que se disponía, que encajaban con las que debían tener para el uso de esta metodología. El método Penman-Monteith requiere datos de velocidad del viento, presión, radiación, temperatura y humedad relativa. Se ha podido obtener datos meteorológicos para la serie de años 2010-2019 gracias al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). La estación meteorológica se encuentra en la zona de Ciudad Universitaria, más concretamente en el edificio 52 del CIEMAT, en las coordenadas UTM (huso 30T): Longitud 0438676 y Latitud 4478881. Para la precipitación no se han podido obtener datos de la misma estación meteorológica debido a fallos en los sensores. Se han obtenido datos de precipitación para la serie 2010-2019 de la estación meteorológica del Parque del Retiro, proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Se ha seleccionado esta estación meteorológica debido a que es la estación homologada más cercana a la zona de estudio de la cual se podía obtener una serie de datos relativamente extensa, de forma gratuita y sin datos erróneos o falta de datos.

Los datos meteorológicos de partida han sido: promedios diarios de velocidad del viento ( $m s^{-1}$ ), presión (mbar) y radiación ( $W m^{-2}$ ), promedios horarios de temperatura ( $^{\circ}C$ ) y humedad relativa (%) y la precipitación diaria acumulada (mm). A partir de los promedios horarios de temperatura y humedad relativa se han obtenido los valores máximos y mínimos diarios para estas variables. Se ha realizado también una conversión de unidades para la presión (de mbar a kPa) y para la radiación (de  $W m^{-2}$  a  $MJ m^{-2}$ ).

El cálculo de la  $ET_0$  se ha realizado para cada día del año para el período 2010-2019. Se ha realizado un sumatorio de los valores de  $ET_0$  de cada día para obtener los valores mensuales y poder hacer uso de estos datos en el balance hídrico, juntamente con la precipitación mensual acumulada.

Para el cálculo de la  $ET_0$  se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

donde:

$ET_0$	evapotranspiración de referencia ( $mm día^{-1}$ )
$R_n$	radiación neta en la superficie del cultivo ( $MJ m^{-2} día^{-1}$ )
$G$	flujo de calor del suelo ( $MJ m^{-2} día^{-1}$ )
$T$	temperatura del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}C$ )
$u_2$	velocidad del viento a 2 m de altura ( $m s^{-1}$ )
$e_s$	presión de vapor de saturación (kPa)
$e_a$	presión real de vapor (kPa)
$e_s - e_a$	déficit de presión de vapor (kPa)
$\Delta$	pendiente de la curva de presión de vapor ( $kPa ^{\circ}C^{-1}$ )
$\gamma$	constante psicrométrica ( $kPa ^{\circ}C^{-1}$ )

Temperatura diaria media del aire (T):

Se ha tomado como temperatura media del día el promedio entre las temperaturas diarias máxima y mínima.

Radiación neta en la superficie del cultivo diaria (Rn):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

donde:

$R_{ns}$ : Radiación neta de onda corta

$R_{nl}$  Radiación neta de onda larga

Radiación neta de onda corta (Rns):

Se define como la radiación solar entrante menos la radiación solar reflejada. El albedo considerado es el del valor medio para una superficie de herbáceas con un coeficiente de reflexión  $\alpha = 0,23$ .

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$$

donde:

$R_s$ : Radiación solar o de onda corta que llega al plano horizontal de la superficie terrestre

Radiación neta de onda larga (Rnl):

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left( 1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right)$$

donde:

$R_{nl}$	Radiación neta de onda larga ( $MJ m^{-2} día^{-1}$ )
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann ( $4,903 \times 10^{-9} MJ K^{-4} m^{-2} día^{-1}$ )
$T_{max,K}$	Temperatura máxima absoluta durante 24 horas ( $K = °C + 273,16$ )
$T_{min,K}$	Temperatura mínima absoluta durante 24 horas ( $K = °C + 273,16$ )
$e_a$	Presión de vapor real (kPa)
$R_s$	Radiación solar medida ( $MJ m^{-2} día^{-1}$ )
$R_{so}$	Radiación en un día despejado

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z)R_a$$

donde

$z$ : elevación de la estación sobre el nivel del mar (680 m)  
 $R_a$ : radiación extraterrestre para periodos diarios

El valor de la radiación extraterrestre mensual se ha obtenido a partir del documento de la FAO (Allen et al. 1998).

Flujo de calor del suelo (G):

Se puede considerar que  $G=0$  debido a que, para periodos diarios, la magnitud del flujo de calor es relativamente pequeña.

Velocidad del viento ( $u_2$ ):

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8 z - 5,42)}$$

donde

$u_z$ : Velocidad media diaria del viento a la altura  $z$  ( $m s^{-1}$ )  
 $z$ : Altura del anemo sobre la superficie del terreno (m)

En la estación meteorológica el anemo se encuentra a 52 m de altura

Presión de vapor de saturación para un día ( $e_s$ ):

La siguiente fórmula relaciona la presión de saturación de vapor y la temperatura del aire:

$$e^0(T) = 0,6108 e^{\frac{17,27T}{T+237,3}}$$

Se toma como presión de la saturación para un día:

$$e_s = \frac{e^0(T_{máx}) + e^0(T_{mín})}{2}$$

Presión real de vapor ( $e_a$ ):

$$e_a = \frac{e^0(T_{min}) \frac{HR_{max}}{100} + e^0(T_{max}) \frac{HR_{min}}{100}}{2}$$

donde:

$e_a$	presión real de vapor (kPa)
$e^0(T_{min})$	presión de saturación de vapor a la temperatura mínima diaria (kPa)
$e^0(T_{max})$	presión de saturación de vapor a la temperatura máxima diaria (kPa)
$HR_{max}$	humedad relativa máxima (%)
$HR_{min}$	humedad relativa mínima (%)

Pendiente de la curva de presión de vapor ( $\Delta$ ):

$$\Delta = \frac{4098 \cdot 0,6108 e^{\frac{17,27T}{T+237,3}}}{(T + 237,3)^2}$$

donde:

$T$ : temperatura media del aire diaria ( $^{\circ}\text{C}$ )

Constante psicrométrica ( $\gamma$ ):

$$\gamma = 0,00163 \frac{P}{\lambda}$$

donde:

$P$ : presión atmosférica (KPa)

$\lambda$ : calor latente de vaporización;  $2,501 - 2,361 \cdot 10^{-3}T$

$T$ : temperatura media del aire ( $^{\circ}\text{C}$ )

### Ficha hídrica

Para la descripción del balance hídrico se ha realizado una ficha hídrica del área de estudio (Aguiló *et al.* 2014). Los parámetros reflejados en la ficha hídrica son los siguientes:

- Temperatura media mensual expresada en  $^{\circ}\text{C}$  ( $T$ ). Se ha realizado un promedio de las temperaturas medias diarias utilizadas en el cálculo de  $\text{ET}_0$ ;
- Evapotranspiración potencial mensual en mm ( $\text{ET}_0$ ). Se ha realizado un sumatorio de los valores diarios calculados de  $\text{ET}_0$ ;
- Precipitación mensual acumulada en mm ( $P$ ). Se ha realizado un sumatorio de valores de cada mes y posteriormente se ha realizado un promedio de los sumatorios por mes, obteniendo de esta forma un promedio mensual para el periodo 2010-2019;
- Pérdidas o adiciones potenciales de la humedad del suelo ( $P - \text{ET}_0$ );
- Pérdida potencial acumulada ( $\text{Ppa}$ );
- Agua almacenada en el suelo ( $\text{ST}$ );
- Cambios de humedad almacenada en el suelo ( $\Delta\text{ST}$ );
- Evapotranspiración real ( $\text{ETR}$ );
- Déficit ( $D$ );
- Superávit ( $S$ );

Posteriormente se ha realizado el cálculo de pérdidas o adiciones potenciales de la humedad del suelo ( $P - \text{ET}_0$ ), siendo los valores negativos pérdidas (periodo seco) y los valores positivos ganancias o adiciones (periodo húmedo). Se calcula también la pérdida potencial acumulada ( $\text{ppa}$ ), suma de pérdidas potenciales del mes y de meses anteriores.

El agua almacenada en el suelo ( $\text{ST}$ ) depende de la capacidad de campo del suelo y de las pérdidas potenciales acumuladas. Al no disponer de datos sobre las características del suelo del área de estudio el valor para la capacidad de campo se ha extraído de Botey (2014). En esta tesis se describen y analizan distintos tipos de suelos, entre ellos un haploxeralf cumúlico ubicado en la zona de Barajas (Madrid). Debido a que el suelo descrito en la tesis se halla dentro del mismo grupo que el suelo del área de estudio (haploxeralfs) se ha decidido usar los datos aportados por este trabajo para determinar la capacidad de campo del área de estudio. En este caso se ha realizado un sumatorio de las distintas capacidades de campo de los horizontes del suelo a 33 kPa ( $\text{Cc}_{33}$ ) para obtener un valor de capacidad de campo total del suelo. Este valor ha sido de 92,7 mm.

Para el agua almacenada en el suelo ( $\text{ST}$ ) se distingue entre meses secos ( $\text{ST}_s$ ) y meses húmedos ( $\text{ST}_h$ ). Para los meses secos ( $P - \text{ET}_0 < 0$ ):

$$ST_S = C_c \cdot e^{\frac{ppa}{C_c}}$$

Para los meses húmedos ( $P - ET_0 > 0$ ):

$$ST_h = ST_{h-1} + P_h - ET_0$$

De forma posterior se ha obtenido los cambios de humedad acumulada en el suelo ( $\Delta ST$ ) mediante la diferencia entre la humedad que contiene el suelo un mes y la humedad del suelo del mes anterior.

$$\Delta ST = ST_m - ST_{m-1}$$

Se ha realizado el cálculo de la evapotranspiración real ETR para meses secos y para meses húmedos:

$$ETR_S = ST_{S-1} - ST_S + P_S$$

$$ETR_h = ET_0$$

El déficit de agua en el suelo (D) está definido como la diferencia entre la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real. Éste aparece solamente en aquellos meses donde los cambios en la humedad del suelo tienen valor negativo. El superávit (S) es la cantidad de agua que no puede ser almacenada en el suelo y se obtiene de la siguiente manera:

$$S = P - (ET_0 - \Delta ST)$$

Los valores del superávit no podrán ser nunca negativos, en caso de que el valor calculado resulte negativo el valor de S se considerará 0.



# Resultados y discusión

## Selección de las zonas idóneas para albergar un humedal dentro del área de estudio

Después de aplicar los criterios de selección para el área de estudio se han obtenido 2 zonas:

- La primera (área 1) se encuentra al NO del Campus, colindando con la calle M-30 por el O y con la carretera de la Dehesa de la Villa por el N (**Fig. 5**), con una superficie total de 269 000 m<sup>2</sup>. En esta zona se tendrá como referencia el edificio donde se encuentran las facultades de Psicología y Educación de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), que la divide en 2 secciones diferenciadas.
- La segunda (área 2) se encuentra al NE del Campus, entre la Agencia Estatal de Meteorología, el Colegio Mayor Aquinas y el Cerro de los Locos (**Fig. 6**), con una superficie total de 16 028 m<sup>2</sup>.

El Modelo Digital del Terreno permite caracterizar sus redes de drenaje en ambas zonas: la primera presenta 2 grandes vaguadas mientras que la segunda zona presenta únicamente una pequeña vaguada. Ambas zonas están sin edificar y son usadas como lugares de paso y zonas recreacionales, en parte como extensión de la Dehesa de la Villa, habiendo en una parte de éstas incluso circuitos de bicicross. Es de señalar que en ambas se realizaron prospecciones y excavaciones debido a la presencia de restos de la Guerra Civil Española, en concreto trincheras, pues los terrenos universitarios fueron frente de guerra durante la mayor parte del conflicto (González *et al.* 2010).



Figura 5. Localización del área 1 (en rojo) en Ciudad Universitaria (Madrid). Fuente: elaboración propia. Ortoimagen: CNIG.



Figura 6. Localización del área 2 (en rojo) en Ciudad Universitaria (Madrid). Fuente: elaboración propia. Ortoimagen: CNIG.

## Caracterización hidrológica del área de estudio y morfológica de los humedales.

Para la zona 1, la situada al NO del Campus, se ha realizado un primer cálculo de la acumulación de flujo, que refleja la existencia de 3 zonas principales de acumulación de agua. A partir de los datos de acumulación y dirección del flujo se ha obtenido la totalidad de cauces de la zona 1 y su jerarquía (**Fig. 7**). El orden de los cauces va de 1 a 4, cuanto mayor es su jerarquía mayor cantidad potencial de agua puede acumularse en él. La delimitación de las cuencas hidrológicas de la zona se muestra en la **Figura 7**. Entre las múltiples cuencas presentes destacan 3 con una mayor superficie y con los cauces de mayor jerarquía y, por tanto, son las zonas donde mayor agua se podrá acumular. Se ha decidido descartar el resto de cuencas de menor superficie más reducida por su cercanía a vías de transporte y por la baja jerarquía de sus cauces. Por este mismo criterio se ha decidido descartar la cuenca de gran superficie situada al N del área de estudio ya que colinda con la Carretera de la Dehesa de la Villa. Como resultado se han obtenido un total de 2 cuencas para el área de estudio número 1: la cuenca 1 (**Fig. 8**), situada al N de la UNED, y la cuenca 2 (**Fig. 9**), situada al S de la UNED.

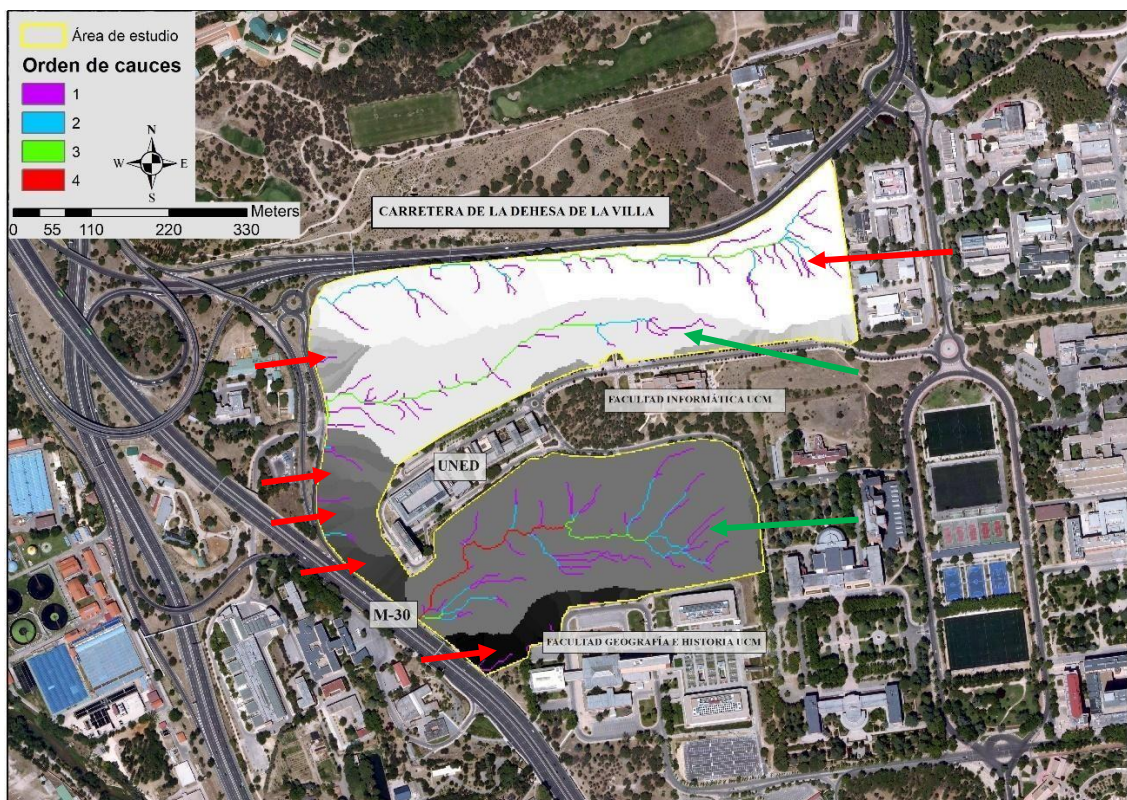


Figura 7. Identificación de las cuencas hidrológicas del área 1 (en amarillo) e identificación de la jerarquía de cauces. Cuencas seleccionadas (flecha verde) y descartadas (flecha roja) Fuente: elaboración propia. Ortoimagen: CNIG.

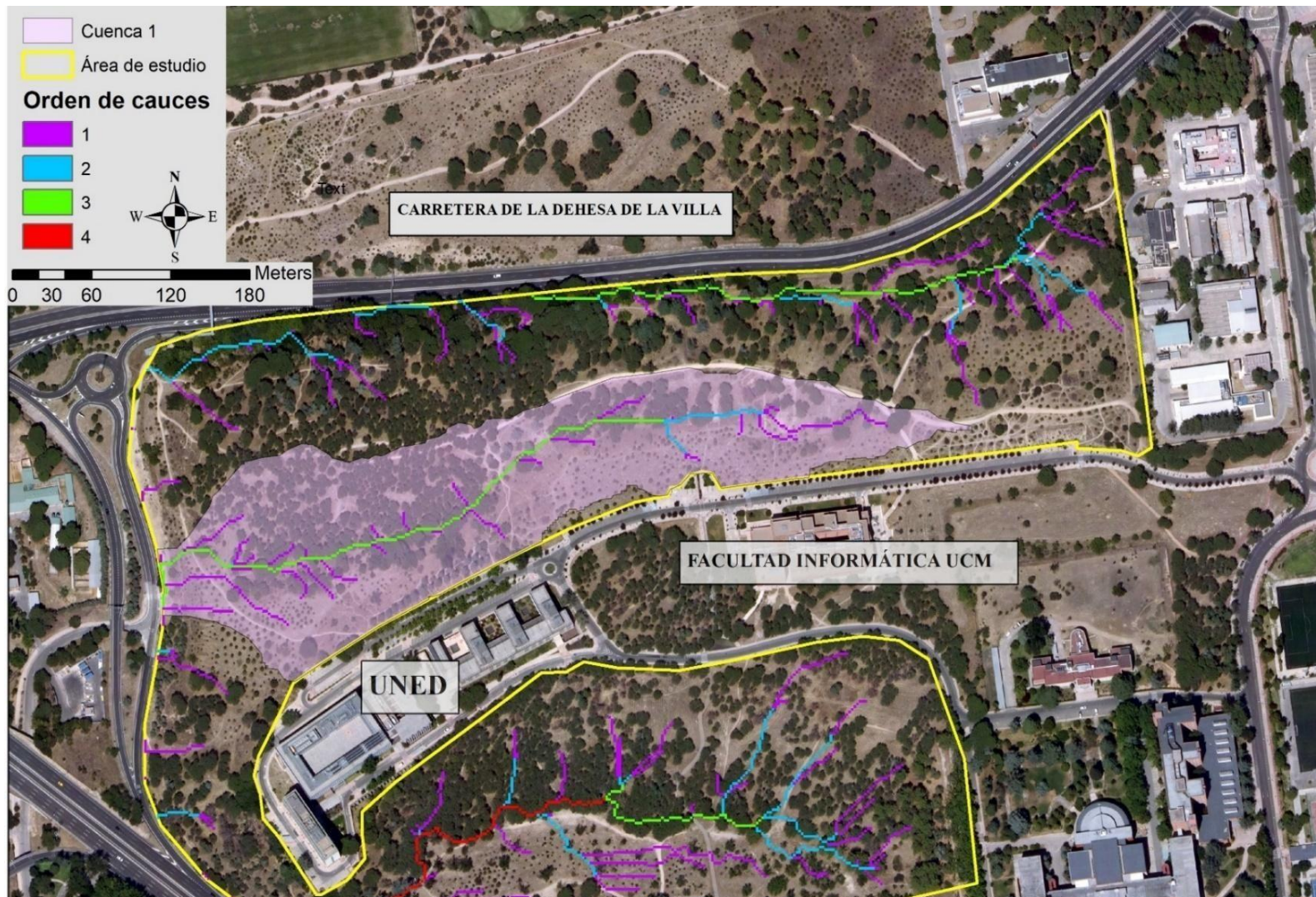


Figura 8. Ubicación de la cuenca 1 en el área 1. Fuente: elaboración propia. Ortoimagen: CNIG.

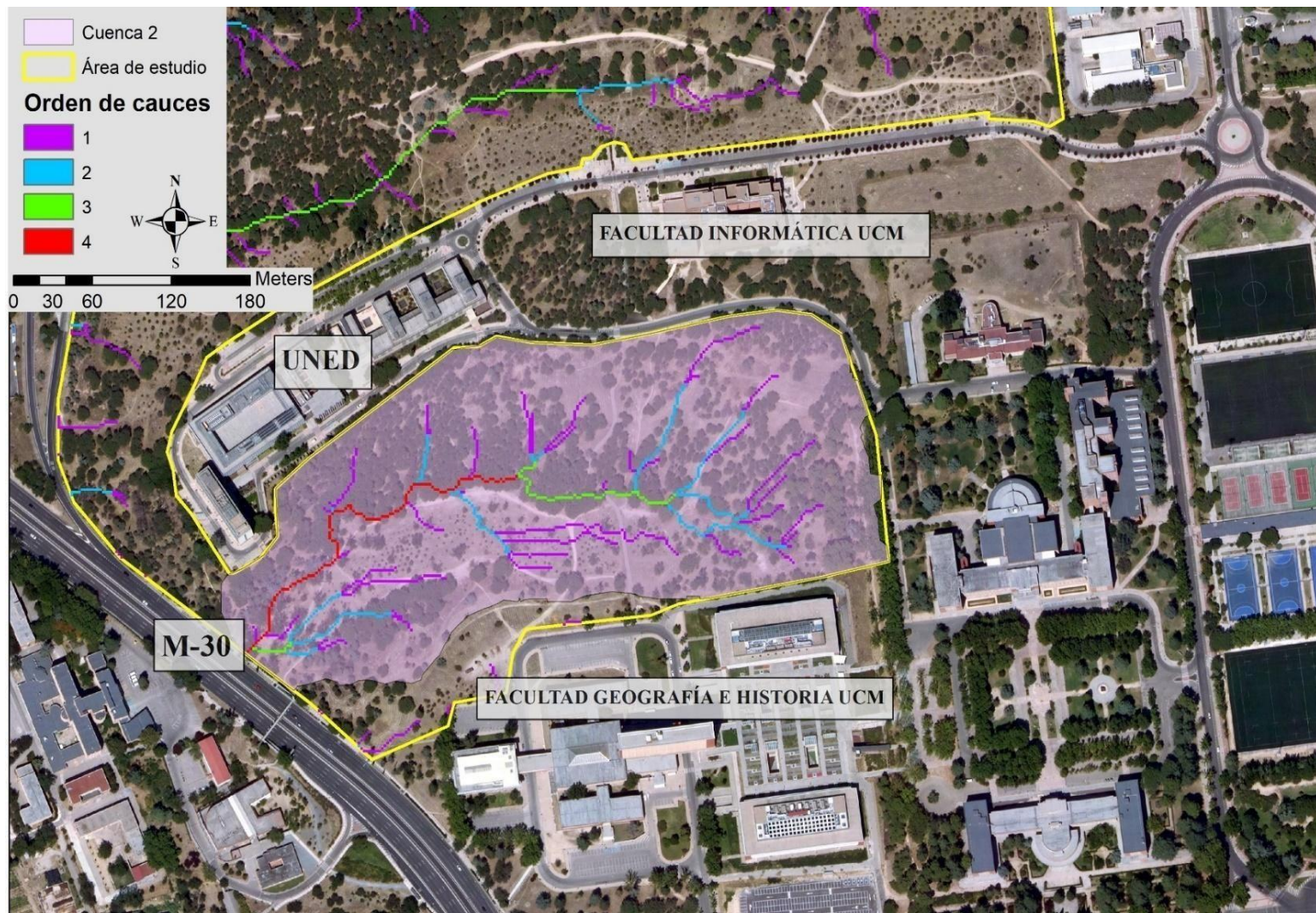


Figura 9. Ubicación de la cuenca 2 en el área 1. Fuente: elaboración propia. Ortoimagen: CNIG

En la zona 2, la situada al NE del Campus, se ha detectado una única zona de acumulación de flujo con 3 cuencas, de las cuales se ha seleccionado la cuenca central (**Fig. 11**), cuenca 3, por su mayor extensión y por albergar los cauces de mayor jerarquía. El análisis del perfil longitudinal del relieve de la cuenca 3 (**Fig. 11**) ha detectado una única zona llana ubicada al final de la pendiente, muy cercana a una carretera. El análisis de la topografía de la cuenca 3 mediante el método *Contour tree* no ha aportado ningún resultado. Por estos 2 motivos se ha decidido descartar esta zona 2 como candidata para albergar un humedal.

En la cuenca 1 (**Fig. 10**) se observa un desnivel de 28 metros entre el inicio y el final del cauce de mayor orden, de orden 3. El recorrido del cauce se aproxima a los 530 metros. A lo largo del perfil se han localizado 5 depresiones topográficas que podrían servir como lugares para recrear un humedal. En la cuenca 2 (**Fig. 10**) el desnivel del cauce de mayor orden (orden 4) es de 14 metros y su longitud se aproxima a los 475 metros. A lo largo de su se han localizado 4 depresiones topográficas.

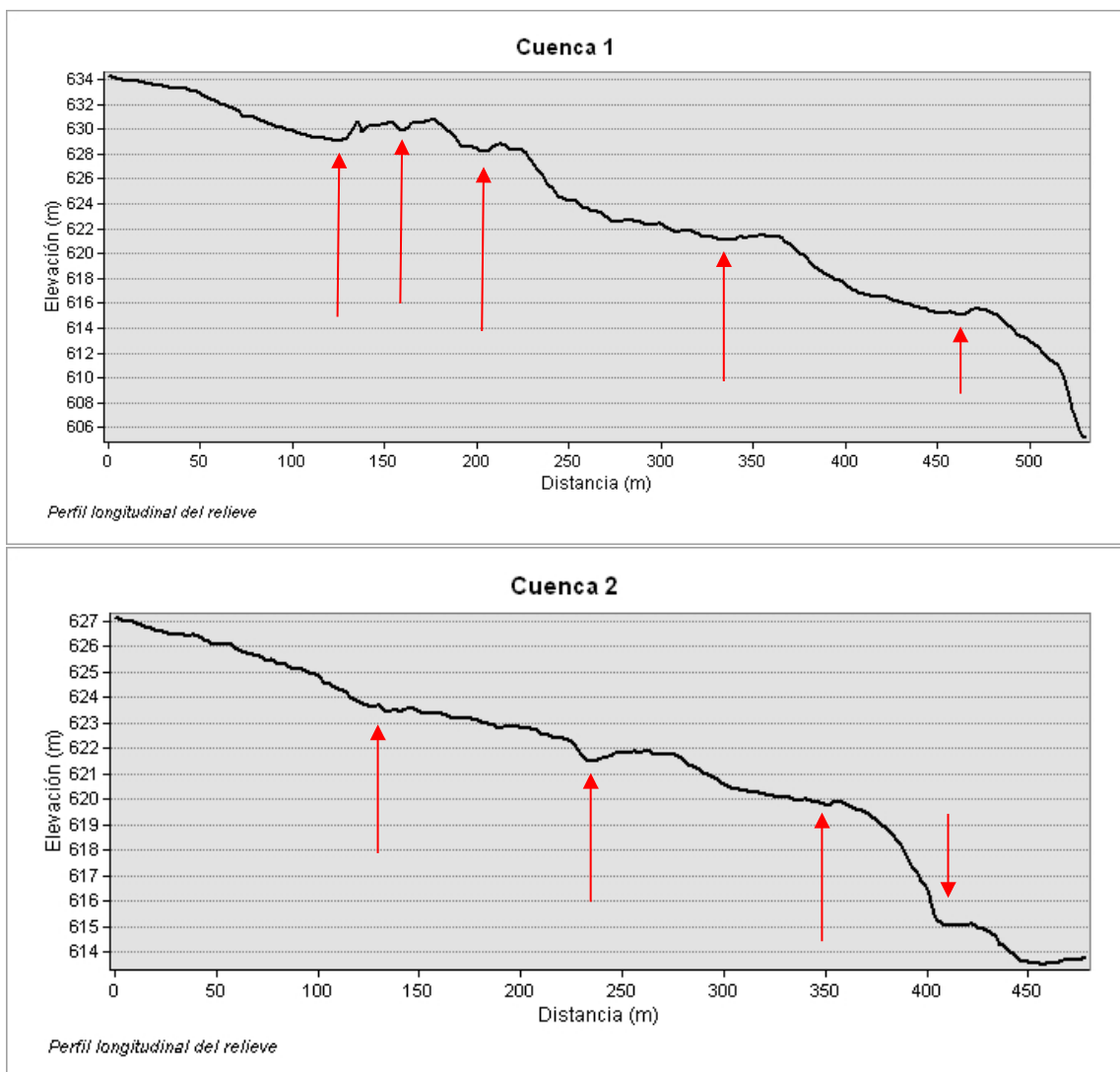


Figura 10. Perfiles longitudinales de la cuenca 1 (superior) y 2 (inferior) del área 1, en rojo las depresiones identificadas. Fuente: elaboración propia.

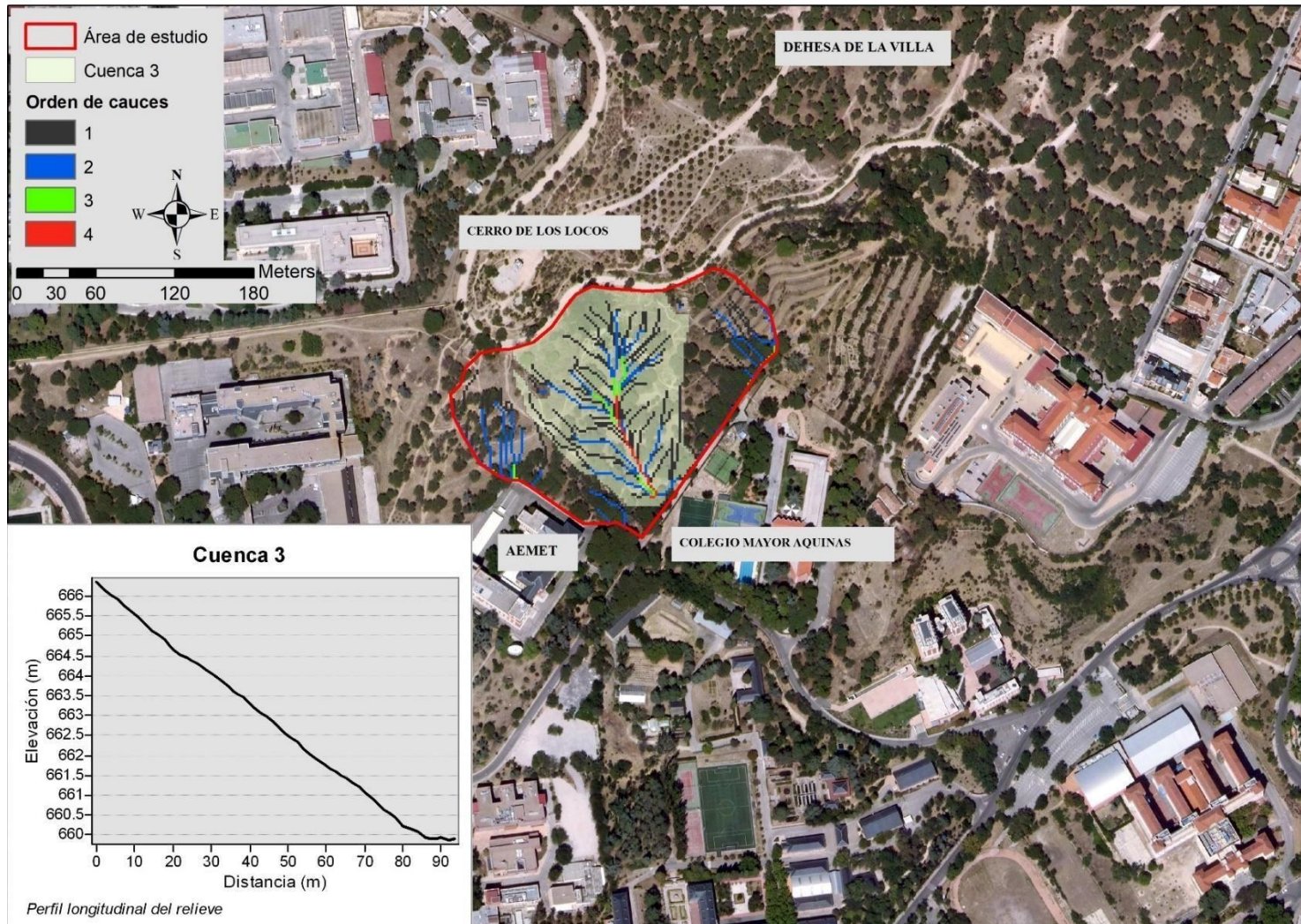


Figura 11. Análisis del perfil longitudinal del cauce de mayor orden de la cuenca 3 (en amarillo) en el área 2 (en rojo). Fuente: elaboración propia. Ortoimagen: CNIG.



Una vez analizado el perfil longitudinal del relieve del área 1 se ha obtenido un mapa de depresiones topográficas del terreno mediante el método *Contour Tree* (Wu et al. 2015) (**Fig. 12**). Para cada cuenca se han descartado todas aquellas zonas que no estuvieran ubicadas en el cauce de mayor orden. Dentro del mismo cauce, se han descartado aquellas zonas ubicadas en el inicio del cauce y las zonas más pequeñas. Las zonas más pequeñas se han descartado por su reducido tamaño en relación a otras zonas de mayor tamaño detectadas por este método y también para evitar errores en la interpretación del MDT02 (que tiene resolución relativamente pequeña) por parte del *software*. Se han comparado los resultados del método *Contour Tree* con los resultados del análisis del perfil longitudinal del relieve. Como resultado del cribado y de la comparación, se han obtenido un total de 7 zonas (**Fig. 13 y 14**), que se han denominado de la siguiente manera:

- $C_xH_y$ . Siendo X el número de cuenca y Y el número de humedal de cada cuenca. Los humedales se han ordenado de forma ascendente desde aguas arriba hacia aguas abajo del cauce de mayor orden, siendo el humedal 1 aquel ubicado en la parte más alta del cauce.

Para cada zona se ha realizado un modelado en 2D, para calcular su área y su perímetro, y un modelado en 3D para obtener los valores de volumen de agua máximo y la superficie de su lámina de agua. Cabe destacar que, dada la resolución del MDT02, se encuentran pequeñas diferencias entre las formas del polígono 2D y el polígono 3D. Debido a esto se considera que los datos obtenidos tanto de los polígonos 2D como 3D son aproximaciones que pueden estar sobreestimando la realidad. Sería necesaria una topografía de alta resolución para conseguir resultados más precisos.

Las zonas identificadas han resultado ser muy variables entre ellas. La zona C1H1 (1917 m<sup>2</sup>) podría albergar un humedal notablemente mayor que C2H3 (81 m<sup>2</sup>) donde se podría recrear un humedal notablemente más pequeño. En cuanto al resto de las zonas identificadas, se encuentran en un rango de tamaños similares, de entre 229 m<sup>2</sup> a 452 m<sup>2</sup>. Los datos de la **Tabla 1** se espera que aporten información acerca de las depresiones topográficas que puedan aprovecharse para recrear un humedal. Las posibilidades son varias (**Fig. 13 y 14**):

- Un humedal profundo de gran extensión en C1H1 (**Fig. 13**).
- Un sistema de 2 humedales mediante la conexión de C1H1 y C2H2 (**Fig. 13**).
- La creación de un sistema de humedales que recorra todo el cauce de mayor orden de la cuenca 1 (**Fig. 13**).
- Establecimiento de pequeñas charcas en la cuenca 2 (**Fig. 14**).

Tabla 1. Área (m<sup>2</sup>), perímetro (m), elevación de desbordamiento sobre el nivel del mar (m), volumen (m<sup>3</sup>), superficie de la lámina de agua (m<sup>2</sup>) y profundidad máxima (m) de las depresiones seleccionadas. Fuente: elaboración propia.

Zona	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro (m)	Desbordamiento (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Lámina de agua (m <sup>2</sup> )	Profundidad máxima (m)
C1H1	1917	221,602	630,682	1091,24	1354,45	1,846
C1H2	229	68,41	628,642	53,41	148,04	0,814
C1H3	452	86,412	621,488	83,92	288,18	0,684
C1H4	400	85,548	615,692	63,95	268,22	1,141
C2H1	269	64,445	623,585	28,46	188,68	0,331
C2H2	422	87,409	621,979	56,13	308,90	0,47
C2H3	81	36,876	615,013	0,00646	0,9697	0,02

Existen numerosos artículos y autores que utilizan las herramientas GIS para la detección de zonas idóneas para el establecimiento, creación o restauración de humedales. Por ejemplo, van Lonkhuyzen et al. 2004, White et al. 2005 y Darwiche-Criado et al. 2017 utilizan información de variables tales como la permeabilidad del suelo, cercanía a masas de agua, tipo de suelo, uso del suelo y cobertura vegetal para realizar un mapa que reúna en qué zonas las variables tienen valores adecuados para el establecimiento del humedal. En el caso de este estudio no ha sido posible optar por este método. En comparación con los autores, la zona de estudio del presente trabajo es muy reducida y carece de la heterogeneidad regional para diversas variables que tienen las extensas zonas estudiadas en los trabajos de los autores anteriormente mencionados. En muchos casos, los autores trabajan con cuencas hidrológicas de gran superficie en las que hay gran diversidad de tipos de suelo, geología, usos de suelo y vegetación. En el caso de Ciudad Universitaria, los suelos son del mismo tipo en toda la zona de estudio (sino muy similar), los usos de suelo son únicamente urbanizado o zona urbana no urbanizada y sin diferencias sustanciales de cobertura vegetal.

Al no hacer uso de múltiples factores físicos y biológicos para realizar un mapa de idoneidad se ha decidido usar otro tipo de aproximación. De forma similar a lo realizado por Uuemaa et al. (2018), se han identificado depresiones topográficas existentes en el terreno que puedan ser aprovechadas para el establecimiento de un humedal. En el caso de esos autores, aparte de localizar las depresiones, también utilizan parámetros como la cercanía a cauces o índices de humedad edáfica.

En resumen, se propone que los futuros humedales se sitúen en depresiones existentes en las zonas de mayor acumulación de agua (o cauces de mayor orden). El aprovechamiento de depresiones topográficas del terreno supondrá un abaratamiento del coste económico. Cuando las depresiones están ubicadas en zonas de mayor acumulación de agua se puede lograr un mayor aprovechamiento de los aportes de agua por escorrentía superficial y subsuperficial, aparte de los aportes directos por precipitación. El objetivo es que el futuro humedal esté lo más integrado posible en la red de drenaje para conseguir así una mayor sostenibilidad ambiental.



Figura 12. Depresiones topográficas del área 1 (en amarillo) detectadas mediante el método Contour tree. Fuente: elaboración propia. Ortoimagen: CNIG.

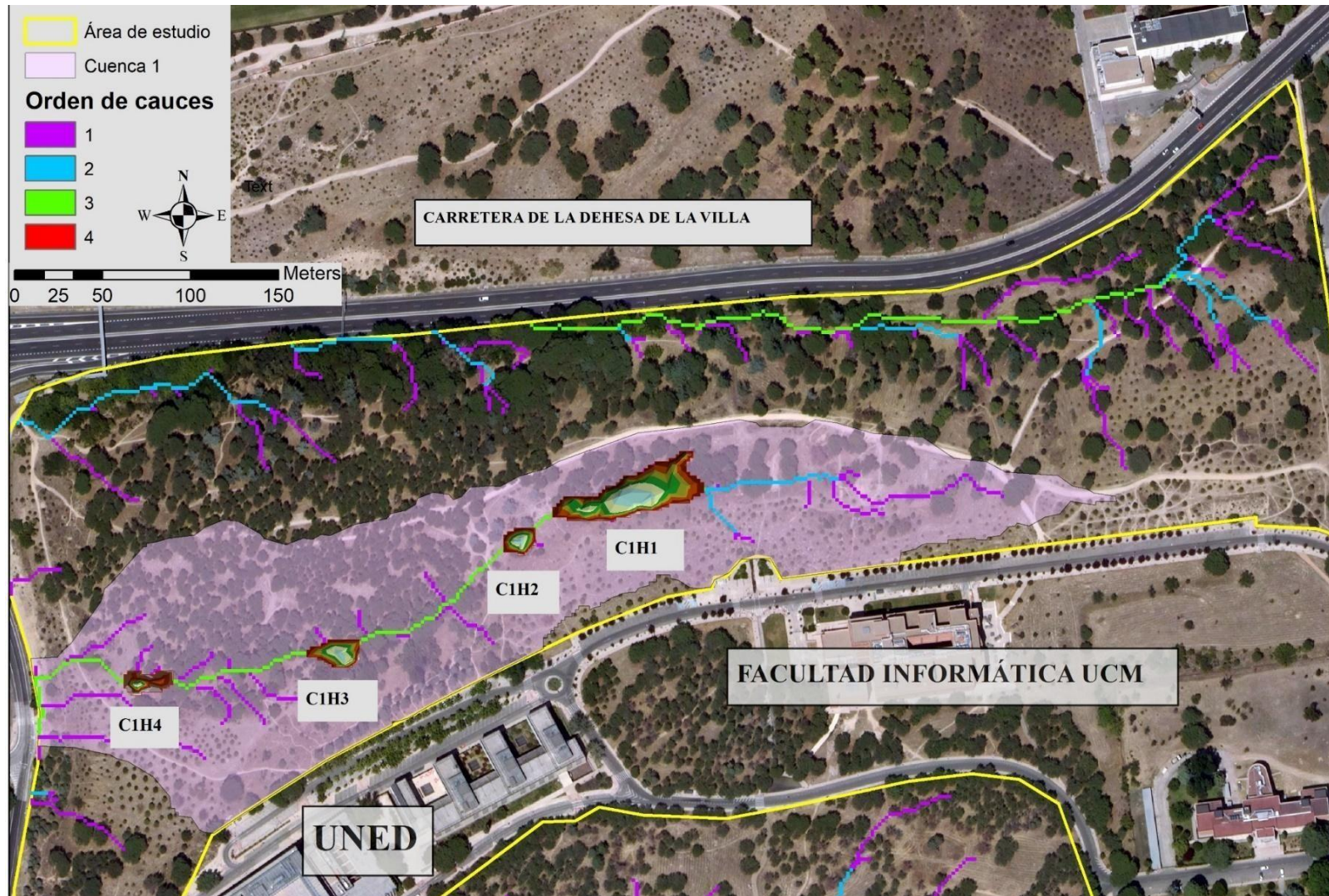


Figura 13. Depresiones topográficas seleccionadas en la cuenca 1 (en lila) del área 1 (en amarillo). Fuente: elaboración propia. Ortoimagen: CNIG.

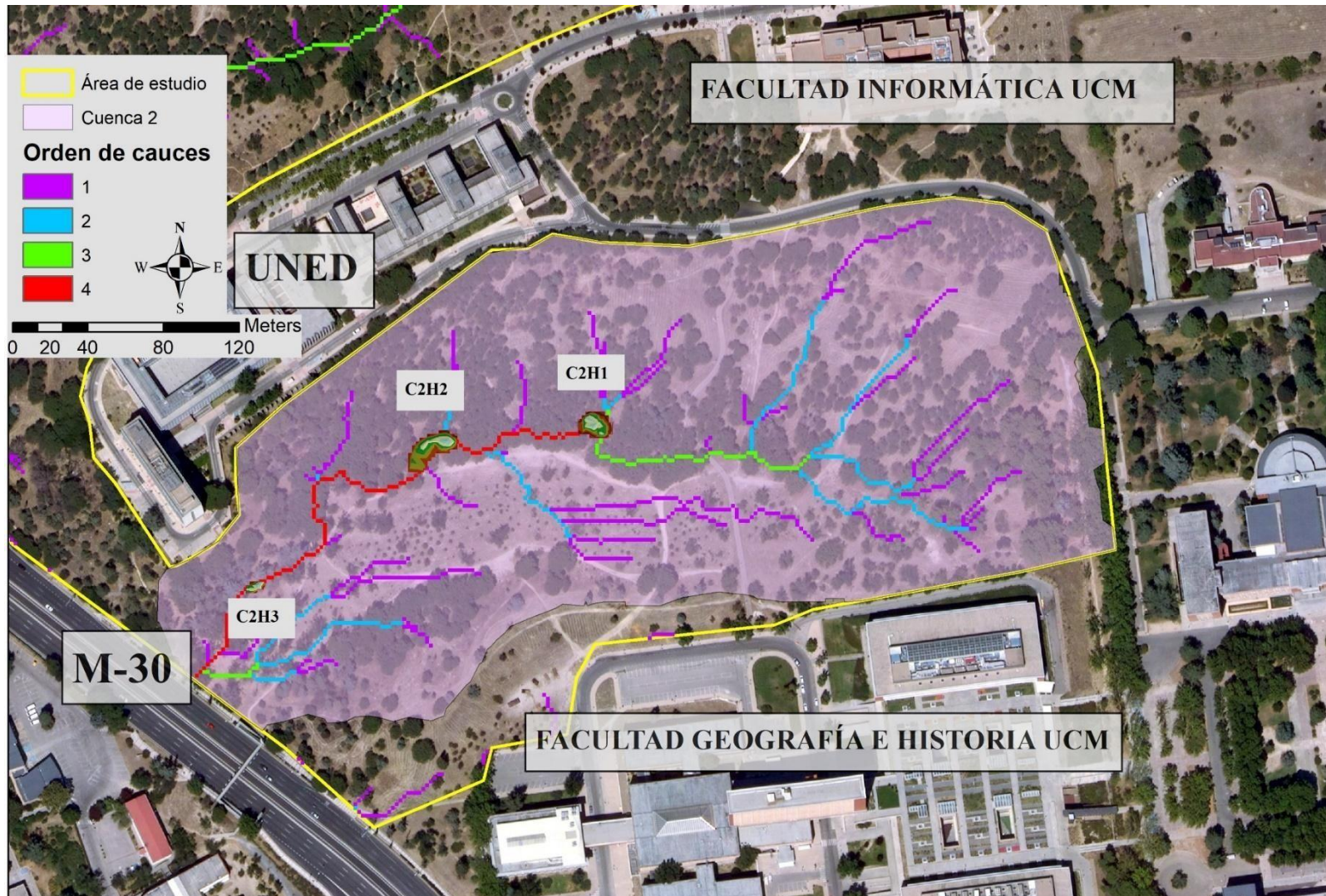


Figura 14. Depresiones topográficas seleccionadas en la cuenca 2 (en lila) del área 1 (en amarillo). Fuente: elaboración propia. Ortoimagen: CNIG.

## Balance hídrico

Con el balance hídrico de Ciudad Universitaria se pretende determinar cuáles serán los requerimientos hídricos de los humedales y determinar las épocas más húmedas y las más secas. Este balance hídrico podrá aportar un valor aproximado del agua necesaria para abastecerlo dado que sus requerimientos de agua serán lógicamente muy diferentes dependiendo de si se desea que su lámina de agua sea permanente o estacional el balance hídrico puede aportar un valor aproximado del agua necesaria para abastecer al humedal.

Mediante el uso de la metodología Penman-Monteith se han obtenido los valores diarios de evapotranspiración potencial ( $ET_0$ ) para el periodo de años 2010-2019, y también la precipitación mensual acumulada (**Tabla 2**).

*Tabla 2. Valores promedio y desviaciones estándar mensuales para los datos de evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) ( $mm\ mes^{-1}$ ) y precipitación ( $mm\ mes^{-1}$ ) de la serie 2010-2019. Fuente: elaboración propia. Datos precipitación: AEMET.*

Mes	$ET_0$ ( $mm\ mes^{-1}$ )	Precipitación ( $mm\ mes^{-1}$ )
Enero	28,63 ± 2,37	33,99 ± 19,50
Febrero	40,30 ± 4,48	39,96 ± 33,20
Marzo	68,47 ± 9,69	50,39 ± 40,98
Abril	95,65 ± 13,24	59,26 ± 22,68
Mayo	132,64 ± 15,16	31,88 ± 26,08
Junio	161,49 ± 13,60	18,07 ± 20,08
Julio	182,13 ± 7,92	10,29 ± 14,56
Agosto	164,34 ± 7,26	10,24 ± 18,75
Septiembre	109,32 ± 5,36	19,7 ± 22,52
Octubre	64,96 ± 6,96	50,74 ± 16,81
Noviembre	33,66 ± 3,59	49,38 ± 28,61
Diciembre	23,27 ± 3,10	32,19 ± 31,00

Como cabría esperar, la  $ET_0$  se incrementa a medida que llega la época seca y disminuye en las épocas húmedas, siendo mayor durante el verano. Para la precipitación se observa que sigue la distribución del clima mediterráneo, con una época seca en verano y una época húmeda aproximada de otoño a primavera. Se observa en la **Figura 15**, que los promedios mensuales de precipitación tienen mucha varianza, siendo en muchos casos mayor que el valor promedio de precipitación, hecho que indica la gran variabilidad de los datos. Para un balance hídrico más exacto serían necesarios datos de un período de tiempo que comprendiera más años, aún así estos valores pueden servir para hacer una aproximación que pueda ayudar en la toma de decisiones. Si estos valores se representan en una gráfica (**Fig. 15**) se pueden observar las épocas con déficit hídrico.

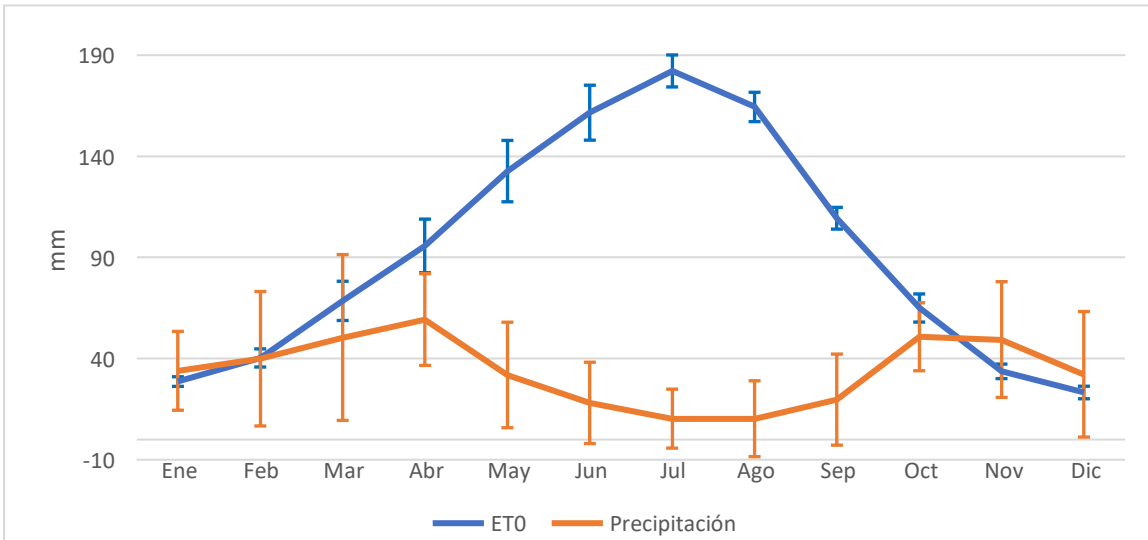


Figura 15. Promedios mensuales de evapotranspiración de referencia (mm) y precipitación (mm) para la serie 2010-2019. Fuente: elaboración propia. Datos precipitación: AEMET.

Se considera un mes seco cuando la precipitación es inferior a la  $ET_0$ . En este caso se observa un periodo seco claro de marzo-abril hasta septiembre. Los resultados del balance hídrico están representados en la **Tabla 3**. En la tercera columna ( $ET_0-P$ ), se puede apreciar cuáles son los meses secos ( $ET_0-P < 0$ ) y cuáles los húmedos ( $ET_0-P > 0$ ). Febrero, marzo y octubre, han resultado ser meses secos para el periodo 2010-2019. Este hecho se podría deber a la cantidad reducida de años considerados, que han sido los disponibles para realizar este balance. Este balance nos da una idea de cuál podría ser la demanda hídrica en los meses más críticos, los meses de verano. Se observa en la columna 4 (Ppa) (**Tabla 3**) que las pérdidas de agua acumuladas llegan a alcanzar valores de más de 700 mm/m<sup>2</sup> de agua y que la cantidad de agua en el suelo (ST, columna 5) llega a mínimos en estos meses.

Aunque los valores de  $ET_0-P$  sean negativos para los meses de febrero, marzo y abril se observa que la cantidad de agua acumulada en el suelo es elevada, más de la mitad de la capacidad de campo (92,7 mm), y que su reducción (columna 6) se produce de manera relativamente lenta hasta abril, en contraste con los meses secos. Finalmente, en las últimas 2 filas están indicados el déficit de agua y el superávit, respectivamente. El superávit se produce cuando la cantidad de agua en el suelo excede su capacidad de campo. El superávit de agua se perderá como escorrentía subsuperficial o subterránea. Se observa que el déficit empieza a principios de primavera y se incrementa a medida que transcurre el verano. Para el periodo de años considerado no se han observado valores de superávit, lo que puede significar que el agua se queda retenida en el suelo y, por tanto, no se producirán de forma general pérdidas por escorrentía.

Tabla 3. Ficha hídrica de la zona de estudio para el período 2010-2019.  $ET_0$ : evapotranspiración de referencia ( $mm/m^2$ ). P: precipitación acumulada ( $mm/m^2$ ).  $ET_0-P$ : pérdidas o adiciones potenciales en la humedad del suelo ( $mm/m^2$ ). Ppa: pérdida potencial acumulada ( $mm/m^2$ ). ST: agua almacenada en el suelo ( $mm/m^2$ ).  $\Delta ST$ : cambios de humedad almacenada en el suelo ( $mm/m^2$ ). ETR: evapotranspiración real ( $mm/m^2$ ). D: déficit ( $mm/m^2$ ). S: superávit ( $mm/m^2$ ). Fuente: elaboración propia.

	$ET_0$	P	$ET_0-P$	Ppa	ST	$\Delta ST$	ETR	D	S
<b>Ene</b>	28.63	33.99	5.36	0.00	58.67	42.91	28.63	0.00	0.00
<b>Feb</b>	40.30	39.96	-0.34	-0.34	92.36	33.68	6.28	34.03	0.00
<b>Mar</b>	68.47	50.39	-18.08	-18.43	75.99	-16.37	66.76	1.72	0.00
<b>Abr</b>	95.65	59.26	-36.39	-54.81	51.32	-24.67	83.93	11.72	0.00
<b>May</b>	132.64	31.88	-100.76	-155.57	17.31	-34.01	65.89	66.75	0.00
<b>Jun</b>	161.49	18.07	-143.42	-299.00	3.68	-13.62	31.69	129.80	0.00
<b>Jul</b>	182.13	10.29	-171.84	-470.84	0.58	-3.11	13.40	168.74	0.00
<b>Ago</b>	164.34	10.24	-154.10	-624.95	0.11	-0.47	10.71	153.64	0.00
<b>Sep</b>	109.32	19.70	-89.62	-714.57	0.04	-0.07	19.77	89.55	0.00
<b>Oct</b>	64.96	50.74	-14.22	-728.79	0.04	-0.01	50.75	14.22	0.00
<b>Nov</b>	33.66	49.38	15.72	0.00	15.76	15.72	33.66	0.00	0.00
<b>Dic</b>	23.27	32.19	8.92	0.00	24.68	8.92	23.27	0.00	0.00

El cálculo de la evapotranspiración es vital para determinar el funcionamiento de un humedal debido a que la mayor parte del agua que contiene se pierde a través de este proceso debido a la gran exposición de la lámina de agua a la insolación y al viento. Se ha decidido emplear el método Penman-Monteith debido que, aparte de ser usado en multitud de estudios sobre humedales, también puede ser corregido y mejorado para diferentes tipos de zonas y vegetaciones, como se muestra en Rodríguez-Morales et al. 2019. Para ello es necesaria la obtención de datos que describan las características de la zona de estudio, como el tipo de vegetación y de cobertura, características del suelo, información climática, entre otras variables. Debido a las características climáticas de la zona y la enorme demanda evapotranspirativa, el establecimiento de un humedal con una lámina de agua permanente parece inviable en la zona si no recibe aporte de agua de forma artificial. Para la zona de estudio, un humedal o charca con lámina de agua estacional puede ser una buena alternativa, en caso de que no se quiera realizar un mantenimiento ni aporte de agua que encarecería mucho la inversión. La lámina de agua estaría presente seguramente en los meses de otoño, invierno y primavera, dependiendo de la cantidad de precipitación de los meses de otoño. Esta lámina empezaría a disminuir en los meses de abril-mayo para, probablemente, secarse en los meses con mayor déficit hídrico. En caso de que se decida realizar un aporte de agua a estos humedales para mantener la lámina de agua en los meses más secos será necesario una mejora del presente balance hídrico. Es necesaria la obtención de una serie de datos climáticos más extensa que permita la obtención de valores de precipitación y evapotranspiración con menos desviación e incertidumbre. Con estos datos sería posible determinar épocas secas y húmedas, años más secos o húmedos de lo habitual y, posiblemente, inferir la cantidad de agua que será necesaria para mantener una cierta lámina de agua en el humedal. Es necesaria también la obtención de información sobre la granulometría del suelo para determinar las entradas que se producirían por escorrentías en sucesos de precipitación intensa y determinar cuál sería la infiltración. Aún con todo, este pequeño análisis de las condiciones climáticas permite determinar, de forma muy aproximada, qué requerimientos hídricos puede tener un humedal o charca en el área de estudio y, con esto, poder decidir qué tipología de masa de agua es preferible.



Se propone la zona C1H1 como un humedal con una tipología de estanque o charca que pueda tener una lámina de agua permanente durante todo el año (si hay aporte de agua) o un estanque o charca estacional. Es la zona de mayor área, que permite un mayor volumen de agua y con la mayor profundidad en comparación a los otros humedales, lo que podría permitir una diversidad de nichos mayor en comparación con las demás zonas. A parte, si se optara por un humedal formado por un sistema de charcas, si C1H1 estuviera mantenida recibiendo aporte de agua, ésta podría proporcionar agua a las charcas que se encuentran aguas abajo (C1H2, C1H3, C1H4) en episodios de precipitación fuerte o en episodios de desbordamiento del humedal, conectando el sistema de charcas mediante un flujo de agua intermitente. La charca más beneficiada por los aportes de C1H1 sería C1H2 debido a la cercanía al primero mientras que C1H3 y C1H4 tendrían lámina de agua durante menos tiempo debido a la lejanía en relación a C1H1 y C1H2. De esta manera se obtendría un sistema de 4 charcas, 1 permanente y 3 de ellas estacionales con hidroperiodos distintos, hecho que proporciona una mayor heterogeneidad ambiental y en el hidroperiodo de las charcas y, por tanto, una mayor heterogeneidad de nichos ecológicos. En cuanto a la cuenca 2, el tamaño reducido de las zonas identificadas en comparación con C1H1 hace que estas no sean tan recomendadas para el establecimiento de una charca con una lámina de agua permanente. Se propone que en esta cuenca las charcas que pueda haber sean de carácter estacional y no estén conectadas entre ellas mediante un flujo de agua intermitente.

## Conclusiones

1. La metodología empleada ha permitido identificar y caracterizar 7 depresiones topográficas del terreno candidatas a albergar un humedal en el Campus de Moncloa en la Ciudad Universitaria de Madrid.
2. El balance hídrico de la zona indica una demanda hídrica  $>700 \text{ mm/m}^2$  de Ppa.
3. La tipología del futuro humedal sería un sistema de estanques o charcas, temporales o permanentes.
4. Si se decidiera por un sistema permanente, sería necesario un aporte extra de agua, además de la precipitación de agua atmosférica. Para el caso anterior, se propone un establecimiento de una charca o estanque de mayor tamaño, C1H1, con lámina de agua permanente y el establecimiento de tres charcas, C1H2, C1H3 y C1H4, como sistemas con lámina de agua estacional.
5. En el caso de que el aporte de agua provenga únicamente de precipitación atmosférica se tratarían de sistemas con lámina de agua estacional.

# Bibliografía

AEMET Open Data. <https://opendata.aemet.es/centrodedescargas/inicio>. Fecha de descarga: 20 de agosto de 2021.

Agencia Estatal de Meteorología, AEMET. <http://www.aemet.es/es/portada>. Fecha de consulta: 2 de septiembre de 2021.

Aguiló Alonso, M., Albaladejo Montoso, J., Aramburu Maqua, M.P., Carrasco González, R.M., Castillo Sánchez, V., Ceñal González-Fierro, M.A., Cifuentes Morales, M., Cifuentes Vega, P., Cristóbal López, M.A., Martín Duque, J.F., Escribano Bombín, R., Glaría Galcerán, G., González Alonso, S., González Barberá, G., Iglesias Gómez, J., Iglesias del Pozo, E., López de Diego, L.A., Martín Llorente, F., Martínez- Mena García, M., Milara Vilches, R., Pedraza Gilsanz, J., Rastrollo Gonzalo, A., Rubio Maroto, R., Sanz Santos, J.M., Sanz Santos, M.A., Valero Huete, F. 2014. Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología. Fundación Conde del Valle de Salazar (ETSI Montes): Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.

Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Biggs, J., Williams, P., Whitfield, M., Nicolet, P., Weatherby, A. 2005. 15 years of pond assessment in Britain: results and lessons learned from the work of Pond Conservation, *Aquatic Conservation-Marine and Freshwater Ecosystems*, 15:693–714. <https://doi.org/10.1002/aqc.745>

Bolund, P., Hunhammar, S. 1999. Ecosystem services in urban areas, *Ecological Economics*, 29(2):293-301. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00013-0).

Botey, R. 2014. Aplicación de distintas metodologías a la monitorización de la humedad del suelo y al cálculo del balance hídrico diario. [Tesis de doctorado no publicada]. Universidad Politécnica de Madrid.

Callaway, J.C., Zedler, J.B. 2004. Restoration of urban salt marshes: Lessons from southern California, *Urban Ecosystems*, 7:107–124. <https://doi.org/10.1023/B:UECO.0000036268.84546.53>

Camacho, A., Borja, C., Valero-Garcés, B., Sahuquillo, M., Cirujano, S., Soria, J. M, Rico, E., De La Hera, A., Santamans, A. C., García De Domingo, A., Chicote, A. & Gosálvez, R.U., 2009. Lagunas y charcas temporales mediterráneas. En: VV.AA. Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. 87 p.

Centro Nacional de Información Geográfica. (2021a). *Ortofotos PNOA máxima actualidad de España* [Imagen]. Recuperado de: <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>. Fecha de descarga: 22 de abril de 2021 Madrid: Centro Nacional de Información Geográfica.

Centro Nacional de Información Geográfica. (2021b). *Modelo Digital del Terreno – MDT02* [Mapa]. Recuperado de: <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>. Fecha de descarga: 22 de abril de 2021 Madrid: Centro Nacional de Información Geográfica.

Cereghino, R., Biggs, J., Oertli, B., Declerck, S. 2008. The ecology of European ponds: Defining the characteristics of a neglected freshwater habitat, *Hydrobiologia*, 597:1-6. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-9088-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9088-1_1).

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van der Belt, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>

Darwiche-Criado, N., Sorando, R., Eismann, S.G., Comín, S.A. 2017. Comparing Two Multi-Criteria Methods for Prioritizing Wetland Restoration and Creation Sites Based on Ecological, Biophysical and Socio-Economic Factors, *Water Resour. Manage.*, 31:1227-1241. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1572-2>

- Davidson, N. C. 2014. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area, *Marine and Freshwater Research*, 65(10):934-941. <https://doi.org/doi:10.1071/mf14173>
- De Meester, L., Declerck, S., Stoks, R., Louette, G., Van de Meutter, F., De Bie, T., Michels, E. & Brendonck, L. 2005. Ponds and pools as model systems in conservation biology, ecology and evolutionary biology, *Aquatic Conservation-Marine and Freshwater Ecosystems*, 15:715–725. <https://doi.org/10.1002/aqc.748>
- Dimitriou E., Karaouzas I., Skoulikidis N., Zacharias I. 2006. Assessing the environmental status of Mediterranean temporary ponds in Greece, *Annales de Limnologie*, 42:33–41.
- Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres. (1992). *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 206, de 22 de julio de 1992, 07 a 50. <https://www.boe.es/doue/1992/206/L00007-00050.pdf>
- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. (2000). *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 327, de 22 de diciembre del 2000, 01 a 73. <https://www.boe.es/doue/2000/327/L00001-00073.pdf>
- Directiva 2009/147/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de noviembre, relativa a la conservación de aves silvestres. (2009). *Diario Oficial de la Unión Europea*, 20, de 26 de enero de 2010, 07 a 25. <https://www.boe.es/doue/2010/020/L00007-00025.pdf>
- Dou, Y., Zhen, L., De Groot, R., Du, B., Yu, X. 2017. Assessing the importance of cultural ecosystem services in urban areas of Beijing municipality, *Ecosyst. Serv.*, 24:79-90, <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.02.011>
- ESRI 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Federal Geographic Data Committee. 2013. Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. FGDC-STD-004-2013. Second Edition. Wetlands Subcommittee, Federal Geographic Data Committee and U.S. Fish and Wildlife Service, Washington, DC.
- Garbrecht, J., Martz, L. W. 1997. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models, *Journal of Hydrology*, 193(1-4):204–213. [https://doi.org/doi:10.1016/s0022-1694\(96\)03138-1](https://doi.org/doi:10.1016/s0022-1694(96)03138-1)
- Geijzendorffer, I.R., Beltrame, C., Chazee, L., Gaget, E., Galewski T., Guelmami A., Perennou C., Popoff N., Guerra C.A., Leberger R., Jalbert J., Grillas P. 2019. A More Effective Ramsar Convention for the Conservation of Mediterranean Wetlands, *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7:21. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00021>
- González Ruibal, A., Marín Suárez, C., Sánchez-Elipe Lorente, M., Lorente Muñoz, S. 2010. Guerra en la universidad: Arqueología del conflicto en la Ciudad Universitaria de Madrid, *Ebre*, 38:123-143
- Hale, R., Coleman, R., Pettigrove, V., Swearer, S.E. 2015. REVIEW: identifying, preventing and mitigating ecological traps to improve the management of urban aquatic ecosystems, *Journal of Applied Ecology*, 52:928–939. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12458>
- Hassall C. 2014. The ecology and biodiversity of urban ponds, *Wiley Interdiscip. Rev. Water*, 1:187–206.
- Heino J., Bini L.M., Andersson J., Bergsten J., Bjelke U., Johansson, F. 2017. Unravelling the correlates of species richness and ecological uniqueness in a metacommunity of urban pond insect, *Ecological Indicators*, 73:422–431. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.10.006>
- Indermuehle, N., Oertli, B., Biggs, J., Cereghino, R., Grillas, P., Hull, A., Nicolet, P., Scher, O. 2008. Pond Conservation in Europe: the European Pond Conservation Network (EPCN), *Verhandlungen International Verein Limnologie*, 30:446-448. <https://doi.org/10.1080/03680770.2008.11902163>.
- Ives, C. D., Lentini, P., Threlfall, C., Ikin, K. 2016. Cities are hotspots for threatened species. *Global Ecology and Biogeography*, 25:117–126. <https://doi.org/10.1111/geb.12404>
- Janse, J.H., van Dam, A.A., Hes, E.M.A., de Klein, J.J.M., Finlayson, C.M., Janssen, A.M.G., van Wijk, D., Mooij, W.M., Verhoeven, J.T.A. 2019. Towards a global model for wetlands ecosystem services, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 36:11-19. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.09.002>.

- Ley 7/1990, de 28 de junio, de Protección de Embalses y Zonas Húmedas de la Comunidad Autónoma de Madrid. (1990). *Boletín Oficial del Estado*, 234, de 29 de septiembre de 1990, 28349 a 28352. <https://www.boe.es/eli/es-md/l/1990/06/28/7/dof/spa/pdf>
- Ley 62/2003, de 30 de diciembre, de medidas fiscales, administrativas y del orden social. (2003). *Boletín Oficial del Estado*, 313, de 31 de diciembre de 2003, 46874 a 46962. <https://www.boe.es/boe/dias/2003/12/31/pdfs/A46874-46992.pdf>
- Menetrey, N., Sager, L., Oertli, B., Lachavanne, J.B. 2005 Looking for metrics to assess the trophic state of ponds. Macroinvertebrates and amphibians, *Aquatic Conservation-Marine and Freshwater Ecosystems*, 15:653–664. <https://doi.org/10.1002/aqc.746>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Plan Estratégico para la Conservación y Uso Racional de los Humedales, en el marco de los ecosistemas acuáticos que dependen. 2000. Madrid, España.
- Moore, P.D. 2008. Wetlands: Revised Edition, *Bang Hermitage* (Facts on File, Inc.), New York. 270 p.
- Pedersen, E., Weisner, S., Johansson, M. 2019. Wetland areas' direct contributions to residents' well-being entitle them to high cultural ecosystem values, *Science of The Total Environment*, 646:1315-1326 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.236>.
- Ravit, B., Gallagher, F., Doolittle, J., Shaw, R., Muñiz, E., Alomar, R., Hoefer, W., Berg, J., Doss, T. 2017. Urban wetlands: restoration or designed rehabilitation?, *Environmental Science*, 4(3):458-483. <https://doi.org/10.3934/environsci.2017.3.458>
- Rodríguez Rastrero, M. Gumuzzio, J. Gumuzzio Such, M.A. Loro Aguayo, M. 2011. Los suelos forestales de la Comunidad de Madrid, *Revista Foresta*, 52:6-15. <http://www.redforesta.com/wp-content/uploads/2011/10/MF11-Los-suelos-forestales-de-la-Comunidad-de-Madrid.pdf>
- Rodríguez-Morales, M., Acevedo-Novoa, D., Machado, D., Ablan, M., Dugarte, W., Dávila, F. 2019. Ecohydrology of the Venezuelan páramo: water balance of a high Andean watershed, *Plant Ecology & Diversity*, (), 1–19. <https://doi.org/10.1080/17550874.2019.1673494>
- Russo, N., Marzo, A., Randazzo, C., Caggia, C., Toscano, A., Cirelli, G.L. 2019. Constructed wetlands combined with disinfection systems for removal of urban wastewater contaminants, *Science of The Total Environment*, 656:558-566. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.417>.
- Sanchez-Ramos, D., Aragones, D.G., Florin, M. 2019. Effects of flooding regime and meteorological variability on the removal efficiency of treatment wetlands under a Mediterranean climate, *Science of The Total Environment*, 668:577-591. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.006>.
- Secretaría de la Convención de Ramsar, 2013. Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), 6a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza).
- Stefanakis, A. 2019. The Role of Constructed Wetlands as Green Infrastructure for Sustainable Urban Water Management, *Sustainability*, 11:6981. <https://doi.org/10.3390/su11246981>
- Strahler, A. N. 1952. Dynamic basis of geomorphology, *Bull. Geol. Soc. Am.*, 63:923–938.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2019. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. New York: United Nations.
- Uuemaa, E., Hughes, A., Tanner, C. 2018. Identifying Feasible Locations for Wetland Creation or Restoration in Catchments by Suitability Modelling Using Light Detection and Ranging (LiDAR) Digital Elevation Model (DEM), *Water*, 10. <https://doi.org/10.3390/w10040464>.
- Van Lonkhuyzen, R., LaGory, K., Kuiper, J. 2004. Modeling the Suitability of Potential Wetland Mitigation Sites with a Geographic Information System, *Environmental Management*, 33:368-375. <https://doi-org.bucm.idm.oclc.org/10.1007/s00267-003-3017-3>

White, D., Fennessy, S. 2005. Modeling the suitability of wetland restoration potential at the watershed scale, *Ecological Engineering*, 24:359-377. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.01.012>.

Williams, P., Whitfield, M., Biggs, J., Bray, S., Fox, G., Nicolet, P., Sear, D. 2004. Comparative biodiversity of rivers, streams, ditches and ponds in an agricultural landscape in Southern England, *Biological Conservation*, 115:329–341. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(03\)00153-8](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(03)00153-8)

Wu, Q., Liu, H., Wang, S., Yu, B., Beck, R., & Hinkel, K. 2019. Depression Analysis Toolbox [Código Fuente]. <https://github.com/giswqs/Depression-Analysis-Toolbox>

Wu, Q., Liu, H., Wang, S., Yu, B., Beck, R., Hinkel, K. 2015. A localized contour tree method for deriving geometric and topological properties of complex surface depressions based on high-resolution topographical data, *International Journal of Geographical Information Science*, 29(12):2041–2060. <https://doi.org/10.1080/13658816.2015.1038719>

Zedler, J. B., Kercher, S. 2005. WETLAND RESOURCES: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability, *Annual Review of Environment and Resources*, 30:39–74. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144248>

## Agradecimientos

Gracias a mis directores Dr. José Vicente Rovira y Dr. Felipe Morcillo de la Universidad Complutense de Madrid y a la Dra. María Clara Rubio del CONICET-Argentina, por la ayuda y la guía brindada durante el proceso de desarrollo del trabajo. Gracias a Manuel Pujadas Cordero del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas por su atención y por la ayuda con la obtención de datos meteorológicos. Finalmente, gracias a mi familia y amigos por el apoyo brindado durante todo el proceso.