

**DETERMINACIÓN DE LA GEOFORMA Y DINÁMICA HÍDRICA DEL HUMEDAL
CIUDAD JARDÍN (MUNICIPIO DE POPAYÁN) COMO BASE PARA LA
FORMULACIÓN DE LINEAMIENTOS DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA**



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Colombia

Jaime Eduardo Mauna De Los Reyes

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
SANTIAGO DE CALI**

2025

**DETERMINACION DE LA GEOFORMA Y DINÁMICA HÍDRICA DEL HUMEDAL
CIUDAD JARDÍN (MUNICIPIO DE POPAYAN) COMO BASE PARA LA
FORMULACION DE LINEAMIENTOS DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA**



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Colombia

Jaime Eduardo Mauna De Los Reyes

Itma Selene Torres Rodriguez (MGA. Gerencia Ambiental)

Directora

Trabajo de Grado para optar por el título de

**MAGÍSTER EN RESTAURACIÓN ECOLÓGICA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
SANTIAGO DE CALI**

2025

NOTA DE ADVERTENCIA

“La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Solo velará porque no se publique nada contrario al dogma y a la moral católica y porque las tesis no contengan ataques personales contra persona alguna, antes bien se vea en ellas el anhelo de buscar la Verdad y la Justicia”

Artículo 23 de la Resolución No. 13 de julio de 1946.

1 INTRODUCCION

Los humedales representan uno de los ecosistemas más valiosos del planeta, sirviendo como interfaces críticas entre los sistemas terrestres y acuáticos, y desempeñando funciones ecológicas esenciales a escala global. A pesar de constituir apenas entre el 5% y 8% de la superficie terrestre, los humedales albergan una extraordinaria biodiversidad y proporcionan servicios ecosistémicos desproporcionadamente grandes en relación con su extensión, incluyendo la regulación hídrica, la retención de nutrientes, la captura de carbono, y el sustento de millones de personas alrededor del mundo (Zedler et al., 2005). La estructura ecológica de los humedales comprende la organización de sus componentes físicos y bióticos, como el suelo, el agua, la vegetación y la fauna asociada, que en conjunto determinan su funcionalidad y resiliencia (Spieles, 2022). Son los criterios geomorfológicos, hidrológicos, edafológicos y biológicos los que definen el funcionamiento de un humedal (Vilardy et al, 2014).

La acelerada pérdida y degradación de los humedales constituye una crisis ambiental de proporciones alarmantes, con implicaciones directas para la biodiversidad global y el bienestar humano. Las tasas de pérdida de humedales han oscilado entre el 30% y el 90% en diferentes regiones del mundo, con la tasa más elevada de pérdida registrada en las últimas décadas, particularmente en áreas con rápido desarrollo económico y crecimiento urbano (Mao et al., 2018). En Colombia alrededor del 24% de las zonas que tienen características de humedal o evidencias de que fueron humedal en el pasado han sido transformadas. La suma de las áreas intervenidas alcanza más del 90% de toda el área transformada de los humedales del país. Esto concuerda en gran medida con los principales impulsores de cambio de los humedales en otras partes del mundo (Patiño, 2016). El proceso de restauración ecológica de un humedal debe estar orientado a la recuperación de la geoforma y dinámica hídrica; por cuanto constituyen la estructura básica de su funcionamiento.

La geoforma se refiere a la forma, composición y estructura del suelo, mientras que la la dinámica hídrica se refiere al flujo del agua superficial y subsuperficial. El humedal Ciudad Jardín ubicado en la ciudad de Popayán es de tipo palustrino, corresponde a una zona de antiguos pantanos. Al ser un humedal urbano juega un papel fundamental en la regulación hídrica de este sector de la ciudad y la mitigación local de los efectos del cambio climático, así como social al ser un lugar de interacción y recreación. El proceso de transformación comenzó más intensamente a mediados de la década de

1980 convirtiendo el humedal en receptor de escombros de las viviendas destruidas durante el terremoto de Popayán de 1983. La urbanización aledaña posterior ha generado la compactación del suelo, disminución de la infiltración y alteración de los flujos hídricos superficiales y subsuperficiales, lo que ha derivado en un desequilibrio hidrodinámico. Estas modificaciones han reducido su capacidad de regulación natural, aumentado su vulnerabilidad frente a eventos climáticos (CRC–WWF, 2006). La urbanización ha contribuido en la alteración de su morfología, la recarga hídrica y la resiliencia de los humedales urbanos (Paul & Meyer, 2001), (Pickett et al., 2011). Como aporte en la recuperación de la estructura ecológica, el objetivo del presente trabajo es determinar la geoforma y dinámica hídrica del humedal Ciudad Jardín como base para la formulación de lineamientos para su restauración ecológica.

2 MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el Humedal Ciudad Jardín, ubicado en la zona urbana del municipio de Popayán (Cauca, Colombia) (Figura 1) correspondiente a un sistema léntico de topografía predominantemente plana, caracterizado por la presencia de vegetación arbustiva dispersa, pastos nativos y algunos individuos arbóreos de sauce (*Salix humboldtiana*). El humedal se localiza dentro de un predio de propiedad privada, el cual se encuentra actualmente cerrado perimetralmente. Desde 2010 se ha evidenciado el depósito recurrente de escombros, tierra y restos de material vegetal por parte de los propietarios, intervenciones que han alterado su morfología original y disminuido su capacidad de retención hídrica. Las áreas colindantes presentan usos asociados a parqueaderos y edificaciones urbanas; sin embargo, la zona de protección del humedal no se destina a dichas actividades. El polígono de intervención definido para el estudio abarca aproximadamente 3.463 m² (0,34 ha).

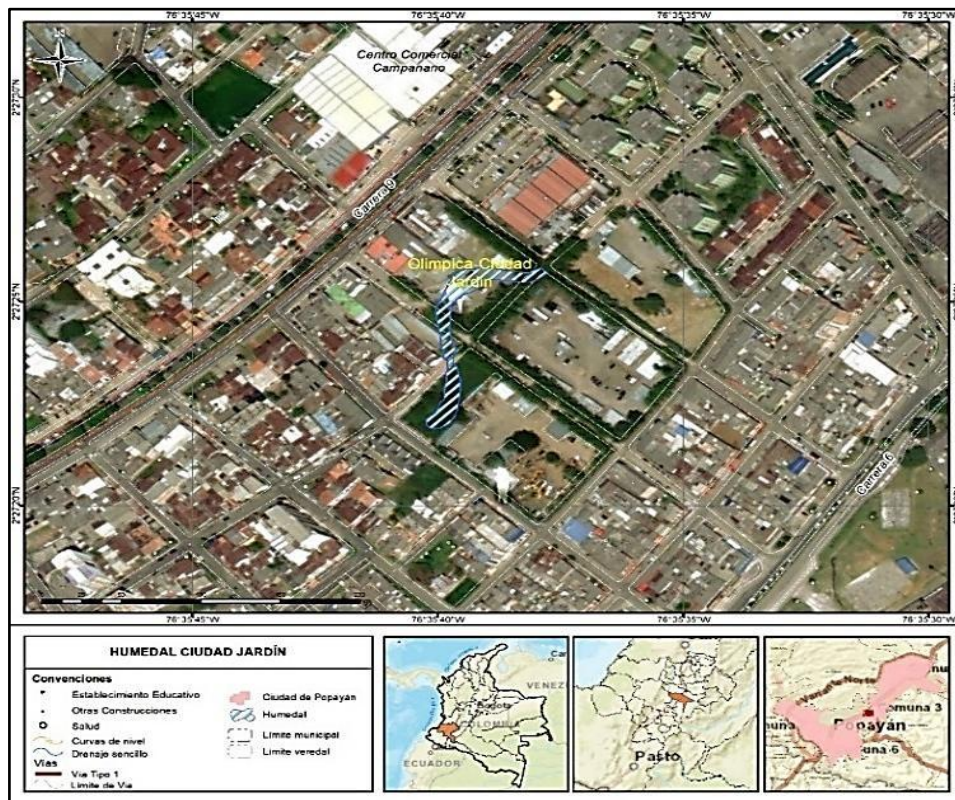


Figura 1 Localización humedal Ciudad Jardín. Municipio de Popayán. Fuente: Propia

El estudio del Humedal Ciudad Jardín se adelanta mediante la determinación de la geoforma y la dinámica hídrica. Para definir la geoforma, se realizaron sondeos exploratorios, que incluyeron perforación manual y mecánica, la Prueba de Penetración Estándar (PST) y ensayos de laboratorio. Además, se aplicó un estudio geoelectrico mediante el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV). Para determinar la dinámica hídrica, se empleó información climatológica como precipitación, evapotranspiración y balance hídrico y herramientas como el Modelo de Elevación Digital (DEM) para identificar direcciones de flujo del agua, junto con el SEV para determinar los niveles freáticos. (Figura 2)

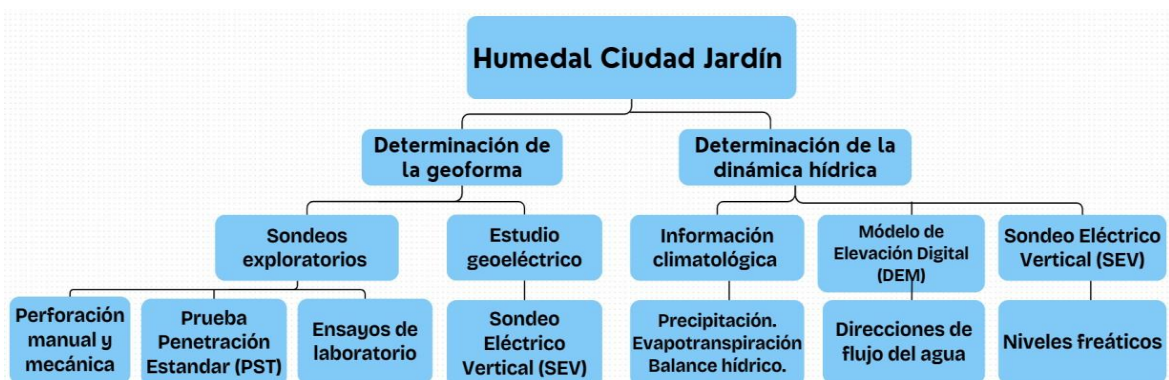


Figura 2. Metodología utilizada para la determinación de la geoforma y dinámica hídrica. Fuente: Propia.

2.2 Determinación de la geoforma

2.2.1 Sondeos exploratorios

Entre los días 16, 17 y 21 de Marzo de 2023 se realizaron siete (7) sondeos exploratorios (Figura 3), para lo cual se utilizó el equipo de perforación manual y mecánico de percusión hasta alcanzar una profundidad entre 5,60 y 6,35 metros, con pruebas de penetración estándar (SPT), utilizando “cuchara partida” para recolección de muestra con fines clasificatorios, barrenos helicoidales para el avance y reconocimiento del perfil y tubo “shellby” para recolección de muestras inalteradas con el fin de realizar el ensayo de compresión inconfiada, cortes directos y consolidación. En la Tabla 1, se presenta para cada sondeo la profundidad y coordenadas geográficas.

Tabla 1 Profundidad y coordenadas de cada sondeo exploratorio realizado. Fuente: Propia

SONDEO N°	PROFUNDIDAD (m)	COORDENADA NORTE	COORDENADA ESTE
1	6,05	2° 27.368'N	76° 35.679'O
2	6,10	2° 27.367'N	76° 35.665'O
3	5,60	2° 27.414'N	76° 35.657'O
4	6,15	2° 27.422'N	76° 35.665'O
5	6,35	2° 27.434'N	76° 35.641'O
6	6,00	2° 27.425'N	76° 35.654'O
7	6,05	2° 27.420'N	76° 35.657'O

Con el fin de zonificar adecuadamente el subsuelo y obtener tanto parámetros de resistencia como dinámicos, se hicieron ensayos de laboratorio sobre 7 muestras tomadas en campo. Se determinaron las características de resistencia mecánica del suelo, mediante la ejecución de los siguientes ensayos de laboratorio: Tamizado, límites líquido y plástico, determinación de humedad, resistencia a la compresión simple, peso específico, materia orgánica; clasificadas utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).



Figura 3 Ubicación de los muestreos de los 7 sondeos exploratorios. Fuente: Propia

2.2.2 Estudio geoelectrico

El 21 de Marzo de 2023 se realizó un Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) mediante un georesistivímetro, Modelo GPI FHMM-9601, con capacidades de sondear a profundidades $L/2$ mayores a 500 metros, utilizando electrodos de potencial y corriente, consistentes en varillas metálicas de Copperweld, acopladas a una fuente de poder (batería) que eleva el potencial hasta un rango de operación de 400 voltios. La interpretación geoelectrica de los SEV se realizó afinando la curva de campo en el programa IPI2win (Interpreting Program for the Inversion of 1D resistivity sounding data). El método

eléctrico utilizado en superficie permite determinar las características litológicas de las capas, estratigrafía, tipos de suelos o rocas, contaminación del suelo o cambios antrópicos, presencia de acuíferos y el nivel freático del subsuelo; cada uno con diferentes atributos físicos (porosidad, temperatura, humedad, geometría, conectividad entre poros). El arreglo de Schlumberger (cuadripolo) permitió determinar la curva de variación de las resistividades aparentes en función de la profundidad, empleando un sistema de cuatro electrodos denominados AMNB. La configuración de la línea de emisión está conformada por dos electrodos A y B (electrodos externos), enterrados en el suelo, que transmiten una corriente de intensidad I , para la cual se mide la diferencia de potencial entre la línea de recepción de los electrodos M y N (electrodos internos).

2.3 Determinación de la dinámica hídrica

2.3.1 Información climatológica

La información climatológica se obtuvo de la estación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) más cercana que corresponde a la localizada en el Aeropuerto Guillermo León Valencia (GLV) en Popayán, a 1,6 km del área de estudio (Altura: 1.752 m.s.n.m; Latitud: 2,452889 N Longitud: -76,60875 O); la cual cuenta con registros de precipitación diaria. Se incluyó la información para el periodo 1993-2022. Se consideran los datos de la estación Saté, también en Popayán (Altura: 1.742 m.s.n.m; Latitud: 2,49625 N; Longitud: -76,638361 O) localizada a una distancia de 6 km del área de estudio. Con la anterior información se realizó un análisis de la distribución temporal de la precipitación anual y mensual, análisis de parámetros climatológicos, análisis de datos de campo.

2.3.2 Evapotranspiración Potencial y Real

La evapotranspiración está definida como el agua que se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por transpiración de la vegetación. Este proceso juega un rol importante en la hidrodinámica de los humedales (Hallack, y otros, 2015). Debido a que al requerirse disponibilidad de agua en el sistema de humedal debe contemplarse en el diseño el cálculo del balance hídrico y por tanto de la evapotranspiración potencial (ETP) y real. A pesar de la complejidad del cálculo, algunos autores han desarrollado relaciones empíricas que permiten calcular la evapotranspiración potencial (ETP) a partir de datos de temperatura media y la evapotranspiración real (ETR) a partir de la

precipitación o de la ETP. Para este estudio se calculó la ETP a partir del método de Thornthwaite (Monsalve, 1995) y la ETR con la Ecuación de Budyko de 1974 (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2020) y la fórmula de Turc (Monsalve, 1995).

El método de Thornthwaite se desarrolló correlacionando datos de evapotranspiración potencial medida en campo, con datos de temperatura media mensual y longitud del día, para un mes de 30 días e insolación diaria de 12 horas, como se presenta en la siguiente ecuación:

$$ETP_j = ka \left(\frac{10 * t_j}{I} \right)^a * 16$$

ka : factor de corrección que depende de la latitud y el mes (Tabla XX).

ETP_j : evapotranspiración potencial mensual del mes j , no ajustada (mm)

t_j : Temperatura media mensual del mes j (°C)

I : Índice de calor, dado por:

$$I = \sum_{i=1}^{12} i_j$$

i_j : Índice de calor mensual

$$i_j = \left(\frac{t_j}{5} \right)^{1,534}$$

Y, por último, el índice a , dado de la forma:

$$a = 0.675 * 10^{-6} * I^3 - 0.771 * 10^{-4} * I^2 + 1,792 * 10^{-2} * I + 0.49$$

Posteriormente los valores de ETP_j deben ser ajustados a la longitud del día y al número de días al mes, lo cual depende de un factor de corrección, junto con los valores de i_j y la temperatura media mensual de los años tipo (Monsalve, 1995).

Balance hídrico

Con el fin de evaluar la cantidad de agua disponible anual, se define el cálculo del balance hídrico, a

partir de las fórmulas adoptadas por el IDEAM:

$$ESC = PMA - ETR$$

ESC: Escorrentía media anual (estimada) (mm/año)

PMA: Precipitación media anual (mm/año)

ETR: Evapotranspiración real (mm/año)

2.3.3 Determinación de flujos superficiales, subsuperficiales del agua y en perfil.

El Modelo de Elevación Digital (DEM) y los niveles freáticos obtenidos a partir de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) realizados el 21 de marzo de 2023 se utilizaron para calcular la trayectoria del agua superficial, subsuperficial y en perfil dentro del humedal. La dirección de flujo en perfil corresponde al desplazamiento del agua subsuperficial observado a lo largo de un corte o sección transversal. El análisis identifica con precisión los patrones de movimiento del agua subterránea entre dos unidades funcionales del sistema: la zona de recarga, caracterizada por mayor elevación hidráulica, y la zona de descarga, asociada a niveles menores. Estas zonas corresponden con los sondeos exploratorios 2 y 4, cuya información hidrodinámica describe los gradientes horizontales y verticales que rigen el flujo subterráneo. La integración de los datos geomorfológicos con los niveles freáticos permitió estimar la dirección del flujo. Este enfoque integrado mejora la comprensión del comportamiento hidrológico del humedal y aporta una base sólida para proponer medidas de restauración orientadas al restablecimiento de la conectividad hídrica.

3 RESULTADOS

3.1 La geoforma del humedal

3.1.1 Perfil estratigráfico

Se encontraron tres estratos de suelo (Figura 4), el primero con espesores variables (0,30- 3,10 m). Corresponde a un depósito antrópico no consolidado compuesto por un suelo fino limoso de alta

compresibilidad (MH), tipo relleno de escombros producto de excavaciones y terráceos en materiales blandos y orgánicos. Presenta una combinación de suelos de tonalidades cafés con suelos orgánicos y presencia de gravas y fragmentos de concreto, asfalto y ladrillo de consistencia muy blanda a blanda. El Ensayo de Penetración Estandar (SPT) que determina la resistencia del suelo y su capacidad de carga, arrojó valores medidos en campo de N (Resistencia a la penetración del suelo) entre 2-13 golpes/pie.

En el segundo estrato se encontró debajo del material de relleno y se caracteriza por presentar un suelo fino limoso de alta compresibilidad (OH), suelo orgánico con espesores entre 1,20-2,50 m, presenta tonalidad café oscuro con presencia de raíces, de consistencia muy blanda a blanda con valores de N SPT medidos en campo entre 2-11 golpes/pie, con media plasticidad, humedad alta y permeabilidad media. Con gradación compuesta por gravas entre 1-24%, arenas entre 8-34% y finos entre 57-91 %. Esta fracción fina presenta limite líquido (LL) entre 51-67%, limite plástico (LP) entre 28-44%, humedad entre 44-75% e índice de plasticidad (IP) entre 20-23%. Presenta valores de humedad por encima del límite lo que indica que el suelo se comporta como un líquido viscoso de alta plasticidad.

El tercer estrato corresponde a un suelo de color gris con vetas verdes, cafés y amarillas de consistencia blanda a media con valores de N SPT medidos en campo entre 6-25 golpes/pie, con alta plasticidad, humedad media a alta y permeabilidad de baja. Corresponde a un suelo fino limoso de alta compresibilidad (MH), con valores de resistencia última (q_u) entre 0,38-1,46 Kg/cm², gradación compuesta por gravas entre 1-22%, arenas entre 20-43% y finos entre 45-69 %. Esta fracción fina presenta (LL) entre 35-63%, (LP) entre 26-38%, humedad entre 32-68% e (IP) entre 9-32%. Cuenta con valores de humedad por debajo o muy cercanos al límite líquido lo que indica que el suelo está en el intervalo plástico.

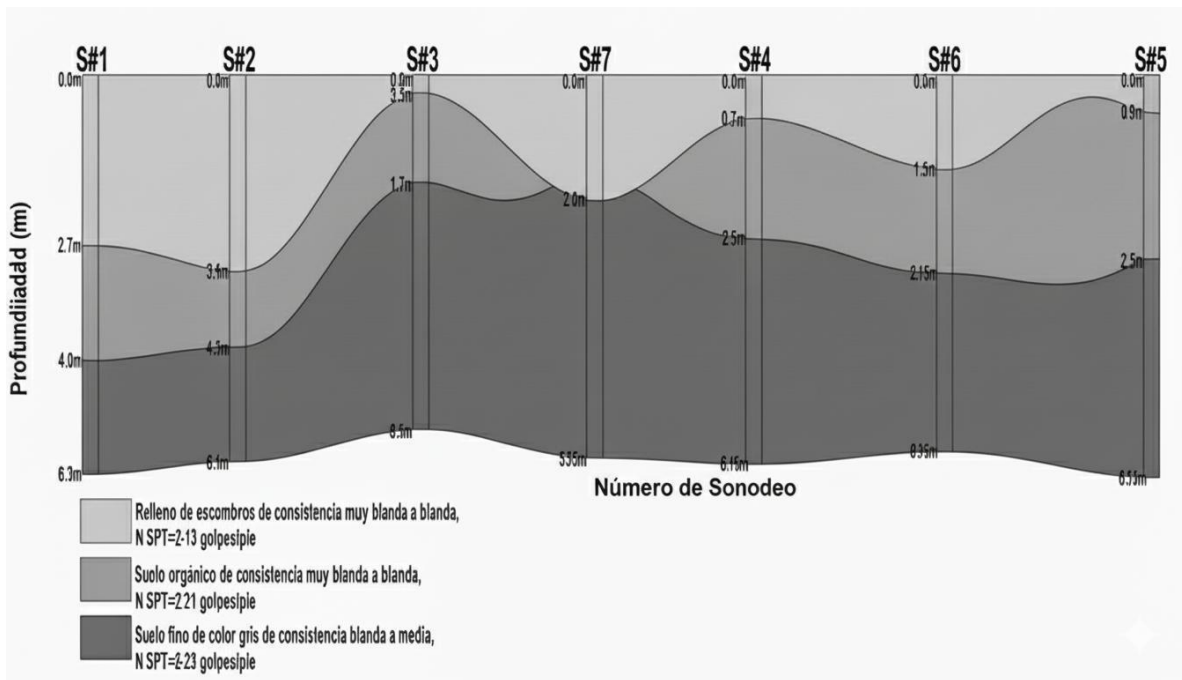


Figura 4 Perfil estratigráfico del Humedal Ciudad Jardín. Municipio de Popayán. Fuente: Propia.

3.1.2 Interpretación geoelectrica

Se determinaron cinco (5) horizontes de resistividad; el primero alcanza una profundidad de 3,00 metros y resistividad de 29 ohmios/metro y se correlaciona con llenos mecánicos y/o depósitos de caída de cenizas. El segundo y tercer horizonte se correlaciona con flujos de ignimbritas constituidos por clastos pobremente seleccionados embebidos en una matriz areno-limosa, alcanzan profundidades de 9,30 metros con resistividades del orden de 50 y 54 ohmios/metro. El cuarto se correlaciona con flujos de escombros y alcanzan una profundidad de 16,50 metros y resistividad de 18 ohmios/metro. El quinto se correlaciona con flujos vulcanoclásticos con resistividad de 910 ohmios/metro, pertenecientes a la Formación Popayán. La Tabla 2 define la curva de campo obtenida en el programa de computación IPI2win (Interpreting Program for the Inversion of 1D resistivity sounding data) con una longitud de L/2 de 30.00 metros.

Tabla 2 Curva de campo obtenida con una longitud de L/2 de 30,00 metros. Fuente: Propia

Profundidad (m.)	Resistividad (ohmios/metro)	Correlación Geológica
0,00 – 3,00	29	Llenos mecánicos y/o depósitos de caída de cenizas.
3,00 – 5,70	50	Formación Popayán.

5,70 – 9,30	54	
9,30 – 16,50	18	
> 16,50	910	

Se detectó nivel de aguas freáticas en cuatro de los sondeos realizados: En el sondeo N°2 a una profundidad de 3,10 m, en el sondeo N°4 a 1,20 m, en el sondeo N°5 a 0,70 m y en el sondeo N°6 a 1,50 m. La presencia de estos niveles se encuentra sobre el estrato de suelo orgánico o entre el material de relleno antrópico y el suelo orgánico.

3.2 Dinámica hídrica del humedal

3.2.1 Precipitación media anual y media mensual

La precipitación media anual de la estación Aeropuerto GLV calculada para el periodo 1993-2022 fue de 2210,4 mm (Figura 5). La precipitación media mensual establece un comportamiento bimodal, cuyo pico mayor se presenta en el segundo semestre del año considerando a noviembre como el mes más lluvioso con 326,02 mm; seguido del mes de marzo, en el primer semestre. El promedio de precipitación media mensual es de 186,0 mm. (Figura 6).

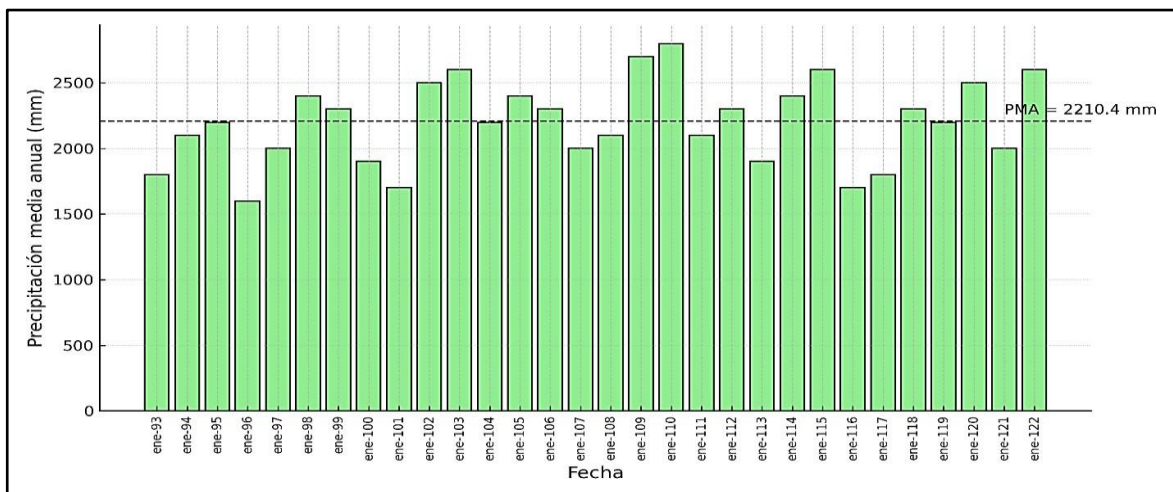


Figura 5 Precipitación media anual (1993-2022) estación Aeropuerto GLV. Fuente: Propia

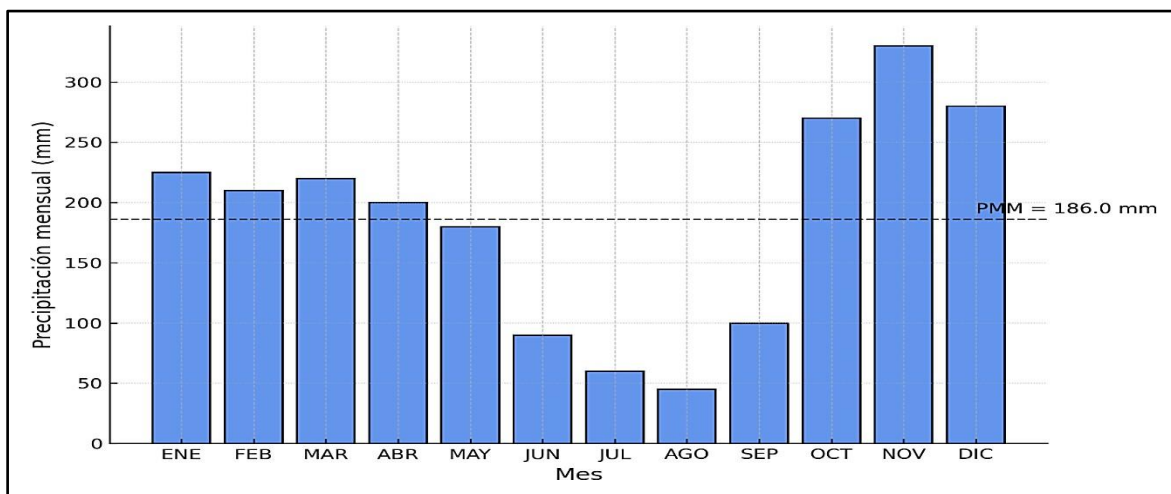


Figura 6 Precipitación media mensual de la estación Aeropuerto GLV. Fuente: Propia

3.2.2 Definición de años tipo para análisis de disponibilidad de agua en el humedal

Los años tipo para los análisis hidrológicos son, medio, húmedo o seco, según las condiciones en un año teórico (periodo continuo de 12 meses) definido por los valores medios, máximos o mínimos multianuales de la precipitación promedio de la serie histórica (IDEAM 2020). El balance hidrológico en humedales, define los tipos de años secos donde la precipitación es 15% menor a la media anual; los años húmedos, en contraste, aquellos que contaron con una precipitación mayor al 15%. Hallack-Alegría et al., 2015

Los tipos de años se definen con base en las medias calculadas para cada año, a partir de los cuartiles (división de la muestra en partes iguales utilizando la media y dispersión de los datos analizados) del 20, 40, 60 y 80, calculados del registro de precipitaciones anuales para el caso de este estudio en el periodo 1993-2022. Los años tipo se definen a partir de los cuartiles, Q, de la siguiente manera: Año muy seco: Precipitación igual o inferior a Q (20); Año seco: Precipitación superior a Q(20) e igual o inferior a Q(40); Año normal: Precipitación superior a Q(40) e igual o inferior a Q(60); Año húmedo: Precipitación superior a Q(60) e igual o inferior a Q(80); Año muy húmedo: Precipitación superior a Q(80). Esto permite establecer frecuencias de probabilidad de ocurrencia y diseñar el volumen de agua disponible para cada uno de los años tipo (Casals, 1983). Los valores de los cuartiles 20, 40, 60 y 80 para el registro de precipitación media anual entre 1993 y 2022 se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3 Valores de los cuartiles para el registro de precipitación media anual entre 1993 y 2022.
Fuente: Propia

Cuartil	20	40	60	80
PMA (mm)	1845,1	2007,7	2285,5	2524,8

En la Figura 7 se muestra la gráfica de los años tipo representado por colores. El promedio de las precipitaciones de los años establecidos como normales es de 2.123,0 mm y el promedio de precipitación media anual para todo el registro analizado 1993-2022 fue de 2.210,0 mm. Los valores promedio de los años tipo, oscilan entre 1.612,2 mm para el año tipo muy seco y 2.931,8 mm para el año tipo muy húmedo (Tabla 4). En el periodo comprendido entre los años 2004 y 2022 se ha presentado solo un año muy seco, en el 2015.

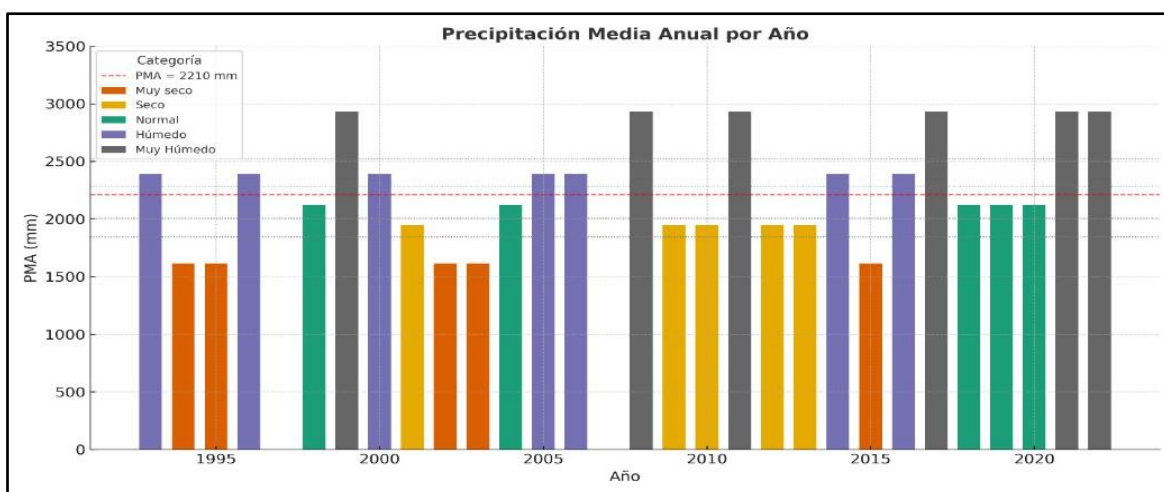


Figura 7 Clasificación de años tipo (muy seco, seco, normal, húmedo y muy húmedo). Fuente: Propia.

Tabla 4 Años tipo según registros de la estación Aeropuerto GLV. Fuente: Propia

Año Tipo	Rangos de precipitación del año tipo (mm)	Años	Precipitación promedio del año tipo (mm)
Muy seco	<1845,1	1994,1995,2002,2003,2015	1612,2
Seco	1845,1-2007,7	2001,2009,2010,2012,2013	1948,4
Normal	2007,7-2285,5	1998,2004,2018,2019,2020	2123,0
Húmedo	2285,1-2524,8	1993,1996,2000,2005,2006,2014,2016	2391,9
Muy Húmedo	>2524,8	1999,2008,2011,2017, 2021,2022	2931,8

Los cuartiles permiten de alguna manera establecer la probabilidad de ocurrencia de un año tipo definido. Sin embargo, por tratarse de series discretas se calculó la probabilidad de ocurrencia (P) para determinados periodos de retorno con base en la distribución de Poisson, a partir de la cual con una frecuencia de ocurrencia media (número de eventos en el periodo analizado, λ se calcula la probabilidad de que un evento (N) ocurra una o más veces durante un periodo de tiempo (t).

$$P(N \geq 1; t) = 1 - (e^{-\lambda t})$$

En la Tabla 5 se presenta la probabilidad en porcentaje (%) de que en un periodo de tiempo o periodo de retorno se presente una o más veces un año tipo. De acuerdo con los resultados se observa que la probabilidad de que se presenta cada año tipo es similar siendo el más probable el año húmedo (20,8%) y el menos probable el año normal (15,3%) en ambos casos para un periodo de un año.

Tabla 5 Probabilidad en porcentaje (%) de ocurrencia de un año tipo en un periodo de retorno.
Fuente: Propia

Año Tipo	Frecuencia media del año tipo	Periodo de retorno (años)				
	λ	1	5	10	20	50
Muy seco	6/30	18,13%	63,21%	86,47%	98,17%	100,00%
Seco	6/30	18,13%	63,21%	86,47%	98,17%	100,00%
Normal	5/30	15,35%	56,54%	81,11%	96,43%	99,98%
Húmedo	7/30	20,81%	68,86%	90,30%	99,06%	100,00%
Muy Húmedo	6/30	18,13%	63,21%	86,47%	98,17%	100,00%

3.2.3 Registros de Temperatura (°C)

El promedio anual de la temperatura registrado es de 19,53 °C. Las temperaturas promedio máxima y mínima mensual difieren entre sí solo en 1,16°C, siendo noviembre el mes con menor temperatura promedio (18,89°C) y agosto con el de mayor temperatura promedio (20,05°C), coincidiendo con los meses de mayor y menor precipitación promedio, respectivamente (Figura 8).

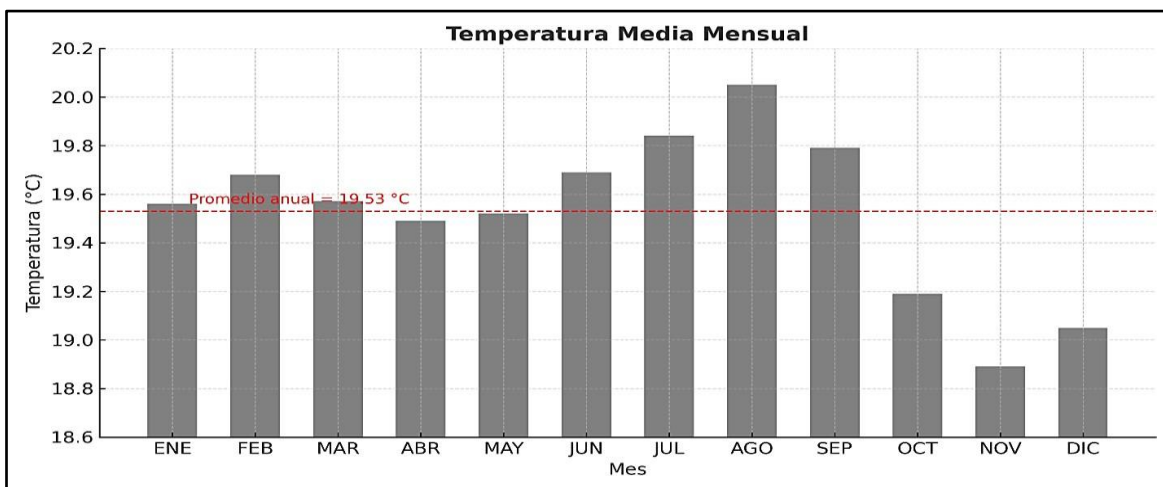


Figura 8 Promedios mensuales de temperatura (°C) de la estación Aeropuerto GLV. Fuente: Propia

3.2.4 Evapotranspiración Potencial y Real

Los años referencia de los años tipo establecidos según lo descrito anteriormente corresponden a 2003, 2010, 1998, 2016, 1999 para años muy secos, secos, normales, húmedos y muy húmedos respectivamente. Los valores de ETP mensual y anual para los años tipo establecidos, en los cuales se observan valores mensuales que oscilan entre 60,6 mm (noviembre de 2010 – año seco) y 87,7 mm (agosto de 2016 – año húmedo). Así mismo, los valores anuales de ETP varían entre 875,3 mm y 917,9 mm que corresponde los años tipo seco y húmedo, respectivamente. La ETR se calculó utilizando la Fórmula de Turc (Monsalve, 1995) y la de Budyko (IDEAM, 2020). Los valores anuales obtenidos se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6 Evapotranspiración real (mm) para los años tipo. Fuente: Propia

Relación empírica	ETR (mm/año)				
	2003	2010	1998	2016	1999
Ecuación de Turc	735	747,6	759,8	782,6	790,2
Ecuación de Budyko	763,1	775	794,3	829,7	834,4

Los valores de evapotranspiración real calculados con los dos métodos arrojan resultados similares de hasta 47 mm que corresponde aproximadamente al 6% del mayor valor calculado.

3.2.5 Balance hídrico para el área de estudio

La aplicación de la ecuación se realizó suponiendo que el agua de escorrentía que proviene de las áreas aledañas al humedal y que corresponden a la zona a recuperar, son impermeables y serán conducidas en su totalidad al espejo de agua. De otro lado, debido al reducido tamaño del área de estudio, los cambios por almacenamiento en periodos anuales son mínimos, por lo tanto, no son tenidos en cuenta (Tabla 7).

Tabla 7 Escorrentía media anual de años tipo (mm/año). Fuente: Propia

Año Tipo	Año	PMA (mm/año)	ETR (mm/año)	ESC (mm/año)
Muy seco	2003	1624,3	763,1	861,2
Seco	2010	1925,1	775,01	1150,1
Normal	1998	2009,7	794,2	1215,4
Húmedo	2016	2338,6	829,7	1508,9
Muy Húmedo	1999	2937,8	834,4	2103,4

3.2.6 Direcciones de flujo superficial, subsuperficial y en perfil

La dirección de flujo superficial del humedal Ciudad Jardín es el curso o trayectoria del agua en superficie, depende de su geofoma, microtopografía y curvas de nivel, previamente determinadas en campo y determina su dinámica hídrica (Figura 9). La dirección de flujo superficial es primordialmente hacia el noroeste.

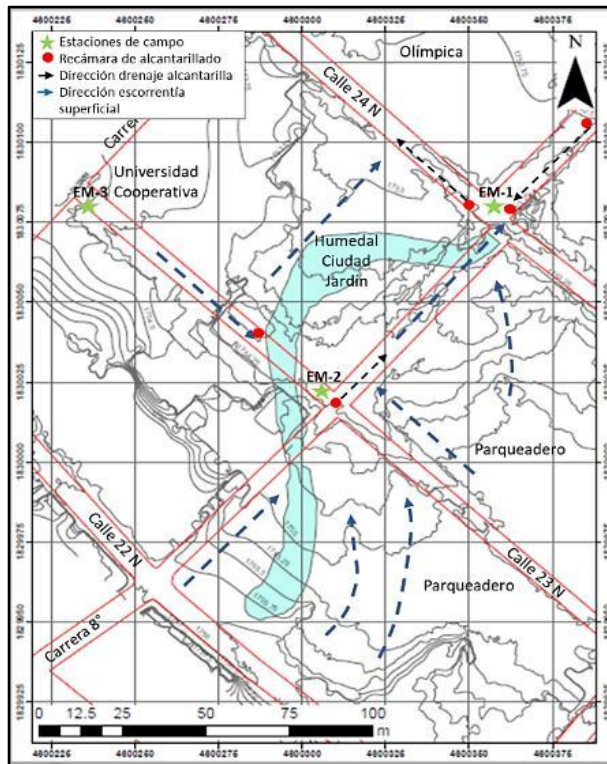


Figura 9 Direcciones de flujo superficial del humedal Ciudad Jardín. Fuente: Propia

La dirección del flujo subsuperficial define la trayectoria que sigue el agua subterránea dentro del sistema hidrológico, la cual está condicionada por la disposición y características de los diferentes estratos del suelo. Las variaciones en la permeabilidad de estos materiales donde algunos horizontes permiten una mayor infiltración y circulación del agua que otros, controlan los gradientes hidráulicos y en consecuencia, determinan las zonas de recarga y descarga del acuífero asociado al humedal. En la Figura 10 se presenta la dirección del flujo subsuperficial, definida con base en las cotas de los niveles freáticos, coincidiendo con la dirección del flujo superficial, la dirección del flujo subsuperficial es en sentido noroeste.

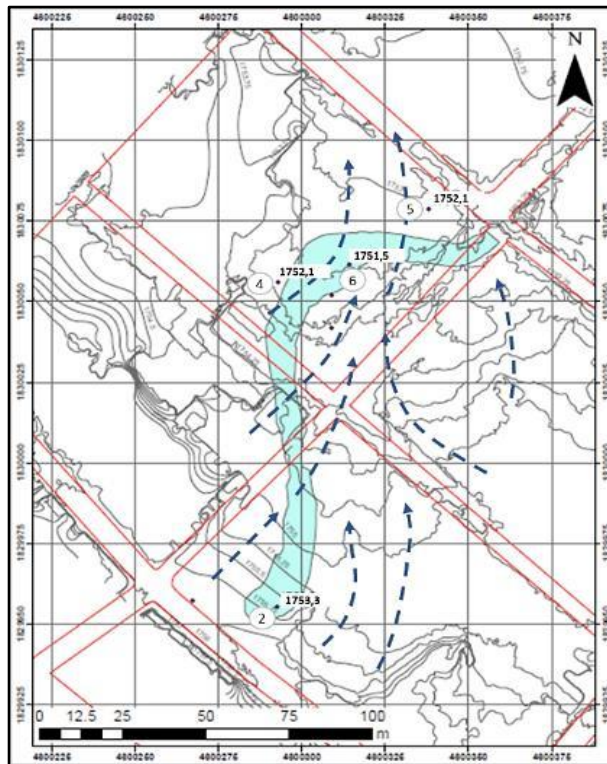


Figura 10 Dirección de flujo subsuperficial del humedal Ciudad Jardín. Fuente: Propia

Los sondeos 2 y 4 describen el movimiento horizontal y vertical del agua (gradiente hidráulico). Se encontró que el agua subsuperficial se mueve entre dos zonas: Zona de recarga (de mayor elevación hidráulica) y zona de descarga (de menor elevación hidráulica). La dirección de flujo en perfil es la dirección del agua subsuperficial en un corte o sección del humedal, ésta se movió en sentido noroeste, como en los anteriores casos Figura 11 y Figura 12.

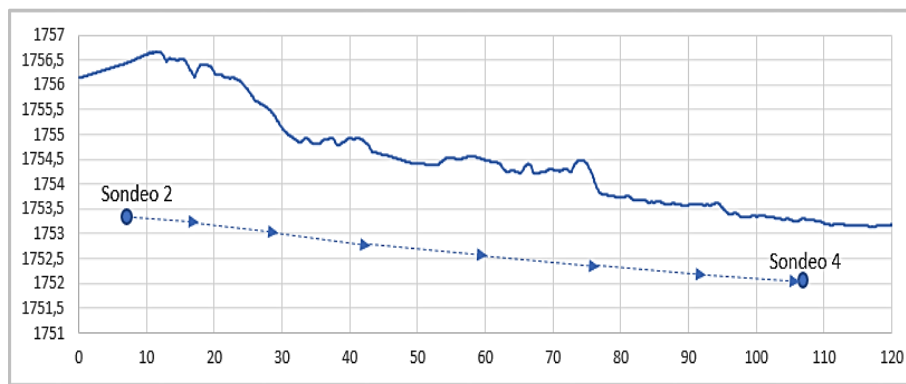


Figura 11 Dirección de flujo en perfil. Perfil: A-A'. Fuente: Propia

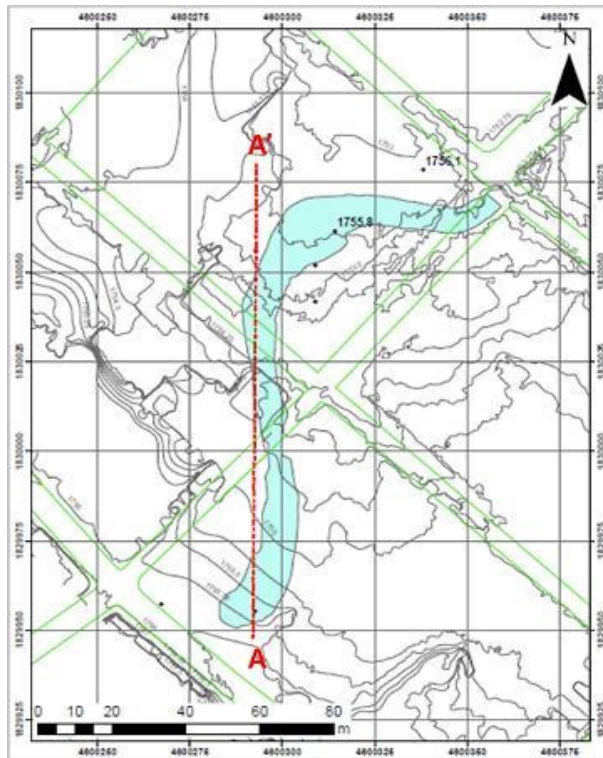


Figura 12 Dirección de flujo en perfil. Localización del perfil A-A'. Fuente: Propia

Lineamientos de restauración ecológica.

Con base en los resultados obtenidos, se recomiendan los siguientes lineamientos de restauración ecológica propuestos para el humedal Ciudad Jardín. Primero, la remoción del relleno superficial, la estabilización del suelo orgánico y la reconstrucción de la microtopografía funcional. Segundo, la recuperación de la dinámica hídrica mediante el restablecimiento de los flujos superficiales y subsuperficiales, mejorando la conectividad hidrológica y la regulación hídrica. Posteriormente, la estrategia se articula con infraestructura verde azul, orientada al manejo sostenible de escorrentías urbanas, incorporando sistemas de bioretención, superficies permeables y humedales artificiales (Figura13).

Se recomienda iniciar la intervención con la remoción del estrato superficial de relleno mediante escarificación mecánica, procedimiento que permite desestructurar y retirar el suelo alterado o compactado utilizando maquinaria ligera, como una miniexcavadora, complementada con mano de obra en zonas de difícil acceso. Una vez expuesto el horizonte orgánico, las acciones deben orientarse a la mejora de sus propiedades físicas y funcionales. Ante la ausencia de una escombrera en la ciudad

de Popayán, la gestión in sitio de los materiales extraídos constituye la alternativa más viable y ambientalmente responsable. Para ello, es indispensable delimitar previamente un área externa al humedal destinada al acopio temporal del material, el cual deberá clasificarse en categorías diferenciadas. El material orgánico: hojas, ramas y demás residuos vegetales, podrán ser aprovechados para la producción de abono, favoreciendo así un manejo circular y sostenible de los recursos. Los Residuos de Construcción y Demolición (RC&D) extraídos del estrato superficial de relleno antrópico se clasificarán como residuos aprovechables, tales como asfalto, cemento y ladrillo y podrán ser reutilizados o reciclados dentro de la misma propuesta de recuperación. Los residuos aprovechables pueden transformarse en material de subbase y construcción de mobiliario público (Bancas, plazoletas, senderos ecológicos).

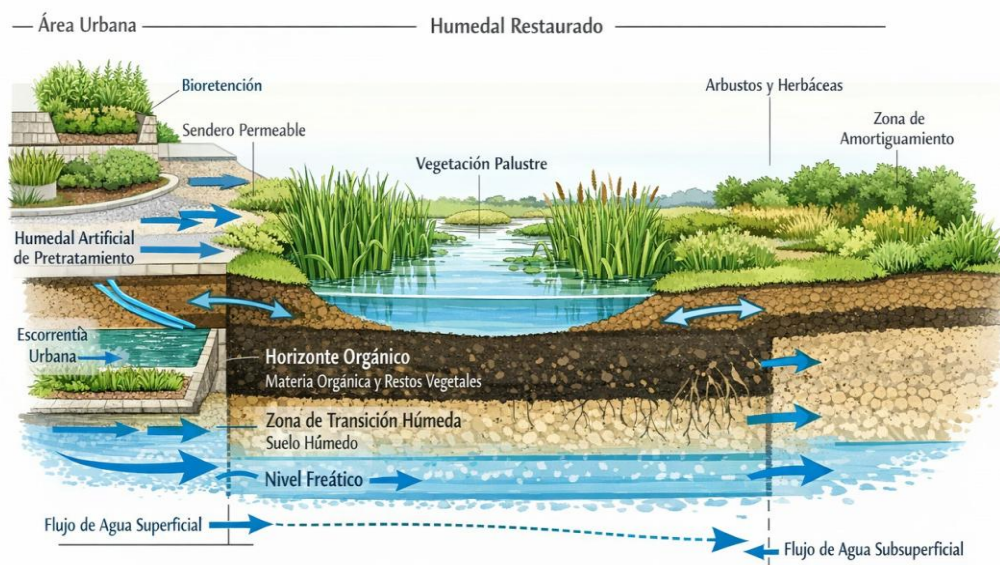


Figura 13. Ilustración Restauración ecológica del humedal Ciudad Jardín. Fuente: Propia

La restauración debe incorporar mecanismos de captación y filtración de aguas pluviales provenientes de las áreas contiguas, de modo que el humedal recupere su papel como regulador hidrológico y amortiguador de inundaciones (Zedler & Kercher, 2005; Meli et al., 2014). Al analizar la dirección del flujo de agua subterráneas y de escorrentía superficial del humedal, se observó que esta se desplaza desde el punto de sondeo #2 hacia el punto #6. Aunque dicho flujo se mantiene técnicamente dentro del vaso de recuperación, la geofoma actual no lo direcciona de manera eficiente hacia el punto central. De este modo, la recuperación no debe limitarse únicamente a la remoción de escombros, se requiere también la recuperación de la microtopografía a un estado similar al original, en donde la dirección del flujo de agua tendía hacia el noroeste; de tal forma que se pueda optimizar el flujo y garantizar la acumulación de aguas subterráneas y de lluvia en el vaso del humedal

La restauración de la dinámica hídrica del humedal debe enfocarse en la recuperación de sus flujos de agua superficiales y subsuperficiales, ya que estos determinan la funcionalidad hidrológica y la resiliencia del ecosistema. Estos se encuentran actualmente obstaculizadas por la modificación de la geoforma; su restablecimiento aportará a la conectividad entre las zonas de recarga y descarga (gradiente hidrológico), eliminando barreras físicas (rellenos, compactaciones) que interrumpen el movimiento del agua, facilitando el aumento de la capacidad volumétrica del humedal, asegurando la coexistencia de zonas con distintos grados de humedad, permanentes, semipermanentes y efímeras. Esta intervención resulta clave para restablecer la dinámica hídrica y favorecer la adecuada distribución del agua. La microtopografía cumple un papel determinante en la distribución temporal y espacial del almacenamiento y del flujo hidrológico de los humedales. Esto se debe a que el régimen hidrológico de estos ecosistemas depende tanto de factores externos (como la topografía y el clima), como de propiedades internas (ejemplo, tipo y distribución de la vegetación) del humedal. La reconstrucción de este relieve microtopográfico puede alterar la dinámica de la humedad del suelo y la inundación local, lo que a su vez repercute directamente en los procesos metabólicos del humedal (Diamond et al., 2020). Así mismo, se propone el restablecimiento de una infraestructura verde-azul (BGI) que conectan los espacios naturales y diseñados, mediante, áreas verdes y cuerpos de agua; creación de zonas de bioretención y superficies permeables que buscan gestionar eficientemente las aguas pluviales al favorecer su retención y posterior infiltración en el suelo (Guzmán Ramírez & Díaz Correa, 2022).

Las zonas de bioretención se presentan como un componente de la infraestructura verde-azul y una práctica usada dentro de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), tal como la establecida en el humedal de Maiporé, en el municipio de Soacha, al suroeste de Bogotá, en donde se destinaron aproximadamente 19 hectáreas para áreas de bioretención con el objetivo de gestionar el agua de lluvia. Estos espacios, diseñados como parques y zonas verdes, cumplieron la función de filtrar, infiltrar y conducir la escorrentía proveniente de las vías y superficies impermeables conectadas con el humedal. Se logró retener el 100% de la escorrentía de caminos y senderos, de la cual el 40% se infiltró y el 60% restante se dirigió al humedal, permitiendo mantener un ciclo hídrico similar al que existía previo a la urbanización, convirtiéndose en un caso relevante en la implementación de SUDS e infraestructura verde-azul. Instituto (Distrital de Gestión de Riesgo y Cambio Climático 2021).

Considerando la proximidad de fuentes de contaminación como parqueaderos y viviendas aledaña, esta práctica es esencial para filtrar las aguas pluviales y de escorrentía, la creación de una zona de

bioretención en el humedal Ciudad Jardín es viable, principalmente porque el nivel freático se encuentra entre 3,10 y 0,70 metros de profundidad. Su implementación ayudará a mitigar significativamente la carga de sedimentos, aceites y otros contaminantes antes de su ingreso al vaso del humedal (figura 14).

El diseño vertical de la zona de bioretención debe contar con los siguientes componentes, siguiendo las recomendaciones de (Higuera-Osorio et al., 2022): 1) Lámina inundable: capa superior donde se acumulará el agua de lluvia o de escorrentía temporalmente, con una profundidad de 0,3 m. 2) Cobertura vegetal: siembra de plantas adaptadas a humedad que protejan el suelo y ayuden a filtrar los contaminantes. Entre ellas algunas especies nativas de las familia: Asteraceae, como el Diente de León (*Emilia fosbergii*), Botón de oro (*Melampodium divaricatum*), Pacunga (*Bidens pilosa*); Familia Heliconiaceae, como las Heliconias (*Heliconia spathocircinata*) y los platanillos (*Heliconia rostrata*); Familia Apocynaceae, como la Viborana (*Asclepias curassavica*); y la familia Melastomataceae, como el Mortiño (*Miconia aeruginosa*). Representan una opción ventajosa, tal como señala (Navarro López et al., 2023). Su extenso sistema radicular ayuda a estabilizar el sustrato y lo protege contra la erosión, lo que a su vez favorece a una mayor capacidad de filtración del agua. Sin embargo, es importante considerar que la alta carga de nutrientes que puede ingresar a la zona de bioretención podría estimular el crecimiento en exceso de los pastos, lo cual implicaría un mayor requerimiento de mantenimiento y el riesgo de generar competencia con otras especies, con una profundidad de 0,2 m. 3) Sustrato o medio filtrante: consistirá en una mezcla de arena, material orgánico y nutrientes para permitir la filtración del agua y proveer soporte necesario para el crecimiento vegetal con un grosor recomendado 0,4 m. 4) Capa de drenaje: será una capa de arena o grava con un grosor de 0,2 metros donde se incluirá una tubería perforada encargada de recoger el agua infiltrada.



Figura 14. Diseño vertical de la zona de bioretención del humedal Ciudad Jardín. Fuente: Propia

Las superficies permeables constituyen un componente esencial dentro de los SUDS, ya que permiten el tránsito peatonal mientras que facilitan la infiltración y drenaje de las aguas pluviales hacia las capas inferiores del suelo. Su implementación contribuiría directamente a la recuperación de la dinámica hídrica, al favorecer la recarga del subsuelo y disminuir los volúmenes de escorrentía superficial que llegan al vaso, especialmente en los meses de mayor precipitación (marzo y noviembre), cuando las lluvias alcanzan los 226,07 mm y 326,02 mm respectivamente. En este caso, se propone fabricarlos de manera sostenible mediante el aprovechamiento de los Residuos de Construcción y Demolición (RC&D) encontrados durante la remoción del material de relleno del humedal, para producir agregados que, al mezclarse con cemento y agua, permiten obtener una mezcla para elaborar adoquines resistentes y funcionales (Ceballos-Medina et al., 2020). De esta manera, se integra una herramienta que no solo contribuye a la gestión hídrica, sino que también ofrece una alternativa innovadora para la reutilización de los RC&D en beneficio de la recuperación del humedal.

Para el manejo de las aguas de escorrentía en el humedal Ciudad Jardín se propone la construcción de un humedal artificial de flujo superficial (HFS), diseñado como un sistema anexo y conectado de manera controlada al humedal natural. Esta conexión permitirá que ambos cuerpos funcionen como un complejo integrado, en el cual el HFS actúe como unidad preliminar de tratamiento, adelantando procesos físicos, químicos y biológicos orientados a la remoción de contaminantes presentes en el agua antes de su ingreso al humedal principal. El HFS se plantea con una profundidad máxima de 0.6 m y ubicado a 10 m del humedal Ciudad Jardín, lo que favorece la circulación visible del agua entre vegetación emergente y la generación de hábitats adecuados para aves, peces y anfibios (Delgadillo et al., 2010). Asimismo, al mantener conexión con el humedal natural, este sistema funcionará como un regulador hidráulico complementario, recibiendo y gestionando excedentes hídricos durante eventos de alta precipitación, reduciendo riesgos de rebose y contribuyendo a la estabilidad y resiliencia de la dinámica hidrológica del ecosistema (figura 15).

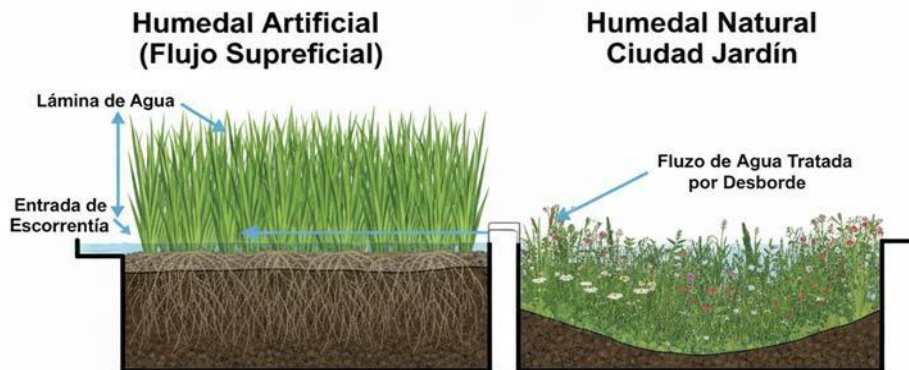


Figura 15 Esquema de la conexión entre el humedal artificial y el humedal Ciudad Jardín. Fuente: Propia

4 DISCUSION

La geoforma del humedal Ciudad Jardín, caracterizada por la presencia de un estrato superficial de relleno antrópico, un estrato intermedio de suelo orgánico de alta compresibilidad y un estrato inferior limoso, evidencia una transformación profunda de la estructura original del suelo. Este tipo de transformaciones son características de humedales urbanos intervenidos, en los que la sustitución del sustrato natural por materiales de baja permeabilidad y alta compresibilidad provoca la degradación funcional del ecosistema (Cortés et al., 2020). La funcionalidad ecológica de un humedal depende directamente de la interacción entre su morfología y su régimen hídrico; por tanto, el restablecimiento de estos procesos debe ser la base de toda intervención de restauración.

Algunos lineamientos claves para la recuperación del suelo en humedales altamente intervenidos, son la recuperación de la profundidad efectiva, que implica que durante la remoción del material de relleno se alcance la capa de suelo orgánico y la fertilización, entendida como el enriquecimiento del suelo expuesto por medio de nutrientes y materia orgánica. (Van Der Hammen et al., 2008). Bajo estas condiciones, el suelo va a requerir la implementación de abonos, enmiendas orgánicas y de microorganismos por lo que es fundamental determinar si el ecosistema tiene la capacidad de recuperarse de forma natural o si es necesaria una recuperación asistida. Además, la aplicación de enmiendas incrementa la disponibilidad de nutrientes, contribuye a estabilizar el pH, neutraliza elementos tóxicos y aumenta la capacidad de retención de humedad (Hausman et al., 2007; Meza, 2024; Van Der Hammen et al., 2008).

La caracterización climatológica basada en registros de precipitación, temperatura, evapotranspiración y balances hídricos son esenciales para diseñar estrategias de restauración que respondan a la variabilidad hídrica y climática local, anticipando escenarios de disponibilidad de agua y riesgo de sequía o inundación. Es fundamental restaurar la capacidad de almacenamiento y retención de agua del humedal, priorizando la rehabilitación de microdepresiones y zonas de retención natural, lo que permitiría amortiguar los efectos de años secos y aprovechar los excedentes en años húmedos. El cálculo de la evapotranspiración real y potencial, junto con el balance hídrico, indica la necesidad de mantener coberturas vegetales densas para reducir la pérdida de agua por evaporación y mejorar la dinámica hídrica.

La dinámica hídrica se rige por una serie de factores, entre los que se destacan las condiciones climáticas, la precipitación y el flujo de agua que entra y sale. Las características geomorfológicas influyen en el flujo, determinando la funcionalidad hidrológica del humedal (Bergkamp & Orlando, 1999; Kadykalo & Findlay, 2016; Tovar Ardilla & de la Hoz Cuartas, 2020). La alteración de las direcciones de flujo superficial y subsuperficial que interrumpen la conectividad hídrica interna; sugieren la necesidad de restaurar la conectividad vertical y horizontal del agua subterránea del Humedal de Ciudad Jardín. La restitución del microrelieve mediante técnicas de bioingeniería y modelación hidráulica, prácticas que han demostrado ser efectivas para restablecer la funcionalidad hidrológica en humedales urbanos degradados ([Pérez et al., 2012](#)); ([Gimena, 2011](#)). La conectividad hídrica interna y externa, asegura que los flujos superficiales y subsuperficiales respondan a la dinámica natural lo que es clave para la sostenibilidad a largo plazo. De acuerdo con los lineamientos propuestos, la remoción mecánica del estrato de relleno antrópico y la exposición del suelo orgánico permitirán restablecer parcialmente la profundidad efectiva y mejorar la estructura del suelo en el corto plazo. En esta fase temprana, se prevén mejoras en la porosidad, aireación y retención de humedad del sustrato, especialmente tras la incorporación de enmiendas orgánicas provenientes del procesamiento de los residuos mediante pacas biodigestoras. A mediano y largo plazo, la estabilización del suelo enriquecido con abonos y microorganismos permitirá consolidar la fertilidad y la capacidad de soporte para la revegetación, promoviendo el establecimiento de especies propias de humedales y la progresiva recuperación de la estructura y funciones ecológicas. En este horizonte temporal, se espera un aumento en la productividad primaria, la mejora del ciclo de nutrientes y la reactivación de la biota del suelo, lo que potenciará los procesos de retención hídrica, filtración y amortiguación de contaminantes. Asimismo, la adecuada gestión y reutilización de los residuos inorgánicos como subbase o elementos de infraestructura ligera reducirá la presión antrópica sobre el

ecosistema, contribuyendo a la resiliencia del humedal y al restablecimiento de su integridad ecológica a largo plazo.

La recuperación gradual de la dinámica hídrica en el corto plazo, reactivará los flujos superficiales y subsuperficiales, mejorando la circulación del agua y favoreciendo su retención temporal en el vaso del humedal. En el mediano plazo, el restablecimiento del gradiente hidrológico y la reconexión entre las zonas de recarga y descarga estabilizarán la distribución espacial del agua, incrementando la capacidad de almacenamiento y permitiendo la reaparición de zonas con distintos niveles de humedad. En el largo plazo, la recuperación integral de la dinámica hídrica permitirá que el humedal restablezca su régimen de inundación y funcional, asegurando condiciones hidrológicas estables que fortalezcan la resiliencia del ecosistema y su capacidad de regulación frente a eventos climáticos extremos.

El enfoque a partir de la infraestructura verde-azul (BGI) se considera el más respetuoso con la naturaleza, ya que aprovecha los beneficios de los ecosistemas urbanos y los procesos hidrológicos naturalizados para reducir riesgos, al tiempo que actúa como una herramienta estratégica de adaptación y mitigación del cambio climático (Corduan & Kühn, 2024; Lamond & Everett, 2019). Los SUDS son un conjunto de soluciones implementadas en áreas urbanas para retener las aguas de lluvia el mayor tiempo posible, minimizando inundaciones y mejorando la calidad de la escorrentía superficial generada por el desarrollo urbanístico (Instituto Distrital de Gestión de Riesgo y Cambio Climático, 2021). Estas a su vez se han consolidado como una solución ideal para la gestión de las aguas pluviales y control de inundaciones, pues se caracterizan por ser depresiones poco profundas cuyo propósito es la detención, infiltración y evacuación lenta de la escorrentía superficial. Su diseño, busca la captura y almacenamiento temporal del aumento de las precipitaciones y se compone de una capa de cobertura vegetal en la parte superior, seguida de un sustrato orgánico (o medio de crecimiento), un material de drenaje permeable y tubería de desagüe la cual se conecta a una red de alcantarillado o a cuerpos de agua cercanos (Guzmán Ramírez & Díaz Correa, 2022; Instituto Distrital de Gestión de Riesgo y Cambio Climático, 2021; Vijayaraghavan et al., 2021). Los pavimentos permeables ayudan a reducir riesgos de inundación y a mantener un balance más estable en el régimen hídrico del ecosistema (Instituto Distrital de Gestión de Riesgo y Cambio Climático, 2021; Montalbán & Rodríguez, 2024). Es importante considerar sus limitaciones, pues no se recomiendan en áreas con arrastre de grandes volúmenes de sedimentos ni zonas de alto tráfico, además, de requerir un mantenimiento periódico para evitar que herbáceas invasoras obstruyan los espacios,

comprometiendo su funcionalidad. Es fundamental realizar limpiezas de las juntas cada que se requiera y revisar la permeabilidad de los adoquines, ya que con el tiempo la acumulación de sedimentos puede reducir la capacidad de infiltración (Instituto Distrital de Gestión de Riesgo y Cambio Climático, 2021). Dentro de los tipos de pavimentos permeables, los de adoquín se consideran una de las mejores opciones para andenes y jardines, pues permiten la infiltración del agua a través de las juntas entre las piezas. Los humedales artificiales se consideran una de las herramientas de drenaje urbano sostenible (SUDS) más empleadas en la gestión de la escorrentía, ya que combinan una alta eficiencia en la reducción de diferentes tipos de contaminantes con una buena relación costo-beneficio además de contribuir al aumento de la biodiversidad y mantener una notable estabilidad frente a las variaciones en la carga de contaminantes (Arce Cardona, 2018; Peña Guzmán & Lara Borrero, 2012).

En conjunto, estos lineamientos proponen una restauración del Humedal Ciudad Jardín basada en la recuperación de la geoforma y dinámica hídrica. En el corto plazo, permitirá reactivar la circulación natural del agua siguiendo la microtopografía del humedal, favoreciendo el restablecimiento del gradiente hidrológico entre las zonas de recarga y descarga. Este proceso inicial se reflejará en una mayor capacidad de retención y almacenamiento temporal de aguas pluviales, así como en la reaparición de microambientes con diferentes niveles de humedad. A mediano y largo plazo, la recuperación de la conectividad vertical y horizontal, junto con la reconfiguración del microrelieve mediante técnicas de bioingeniería y modelación hidráulica, permitirán la consolidación de un régimen hidrológico más estable y resiliente. Se espera que el humedal recupere progresivamente su capacidad de amortiguación de inundaciones y regulación de caudales, además de sostener la coexistencia de zonas permanentes, semipermanentes y efímeras que aumentan la heterogeneidad espacial y funcional del ecosistema.

AGRADECIMIENTOS

Mi especial agradecimiento, en primera instancia al personal técnico (Contratistas) de la Corporación Autónoma Regional del Cauca que apoyaron las labores técnicas en campo. A la profesora Natalia Aguirre, Directora de la Maestría en Restauración Ecológica de la Pontificia Universidad Javeriana - sede Cali - por su aportes a la construcción del documento. A la profesora Selene Torres, quien ha participado activamente en la construcción de la propuesta de recuperación del humedal Ciudad Jardín y ha adelantado las diferentes revisiones al documento definitivo. Finalmente, a los biólogos Mateo López Victoria y Rodrigo Garzón Fernández, evaluadores del trabajo por sus acertados comentarios.

LITERATURA CITADA

- Benayas, J. M. R., Newton, A. C., Diaz, A., & Bullock, J. M. (2009). Enhancement of Biodiversity and Ecosystem Services by Ecological Restoration: A Meta-Analysis. *Science*, 325(5944), 1121–1124. <https://doi.org/10.1126/science.1172460>
- Brander, L. M., Florax, R. J. G. M., & Vermaat, J. E. (2006). The Empirics of Wetland Valuation: A Comprehensive Summary and a Meta-Analysis of the Literature. *Environmental & Resource Economics*, 33(2), 223–250. <https://doi.org/10.1007/s10640-005-3104-4>
- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., Farber, S., & Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26, 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>
- Cui, L., Li, W., Zhao, X., Zhang, M., Lei, Y., Zhang, Y., Gao, C., Kang, X., Sun, B., & Zhang, Y. (2016). The relationship between standing vegetation and the soil seed bank along the shores of Lake Taihu, China. *Ecological Engineering*, 96, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.03.040>
- Davidson, N. C. (2014a). How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 65(10), 934. <https://doi.org/10.1071/MF14173>
- Davidson, N. C. (2014b). 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/10.1071/MF14173>
- Erwin, K. L. (2009). Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world. *Wetlands Ecology and Management*, 17(1), 71–84. <https://doi.org/10.1007/s11273-008-9119-1>
- Fitzgerald, M., Gonzalez, K., Funk, J. L., Whitcraft, C. R., & Allen, B. J. (2021). Recovering ecosystem functions in a restored salt marsh by leveraging positive effects of biodiversity. *Ecosphere*, 12(8). <https://doi.org/10.1002/ecs2.3664>
- Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K., & Dixon,

K. W. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*, 27(S1). <https://doi.org/10.1111/rec.13035>

Instituto Distrital de Gestión de Riesgo y Cambio Climático. (2021). *LINEAMIENTOS PARA EL DESARROLLO DE ESTRUCTURAS: SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS)*. https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/anexo13_0.pdf

Mao, D., Wang, Z., Wu, J., Wu, B., Zeng, Y., Song, K., Yi, K., & Luo, L. (2018). China's wetlands loss to urban expansion. *Land Degradation & Development*, 29(8), 2644–2657. <https://doi.org/10.1002/ldr.2939>

Meli, P., Rey Benayas, J. M., Balvanera, P., & Martínez Ramos, M. (2014). Restoration Enhances Wetland Biodiversity and Ecosystem Service Supply, but Results Are Context-Dependent: A Meta-Analysis. *PLoS ONE*, 9(4), e93507. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093507>

Mitsch, W. J., Bernal, B., & Hernandez, M. E. (2015). Ecosystem services of wetlands. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 11(1), 1–4. <https://doi.org/10.1080/21513732.2015.1006250>

Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands* (John Wiley & Sons, Ed.; 5th ed.).

Moreno-Mateos, D., Meli, P., Vara-Rodríguez, M. I., & Aronson, J. (2015). Ecosystem response to interventions: lessons from restored and created wetland ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 52(6), 1528–1537. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12518>

Moreno-Mateos, D., Power, M. E., Comín, F. A., & Yockteng, R. (2012). Structural and Functional Loss in Restored Wetland Ecosystems. *PLoS Biology*, 10(1), e1001247. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001247>

Nahlik, A. M., Kentula, M. E., Fennessy, M. S., & Landers, D. H. (2012). Where is the consensus? A proposed foundation for moving ecosystem service concepts into practice. *Ecological Economics*, 77, 27–35.

- Rowland, J. (2024). Restored and created tidal marshes recover ecosystem services over time. *Environmental and Sustainability Indicators*.
- Spieles, D. J. (2022). Wetland Construction, Restoration, and Integration: A Comparative Review. *Land*, 11(4), 554. <https://doi.org/10.3390/land11040554>
- Suding, K., Higgs, E., Palmer, M., Callicott, J. B., Anderson, C. B., Baker, M., Gutrich, J. J., Hondula, K. L., LaFevor, M. C., Larson, B. M. H., Randall, A., Ruhl, J. B., & Schwartz, K. Z. S. (2015). Committing to ecological restoration. *Science*, 348(6235), 638–640. <https://doi.org/10.1126/science.aaa4216>
- Wortley, L., Hero, J., & Howes, M. (2013). Evaluating Ecological Restoration Success: A Review of the Literature. *Restoration Ecology*, 21(5), 537–543. <https://doi.org/10.1111/rec.12028>
- Xu, X., Chen, M., Yang, G., Jiang, B., & Zhang, J. (2020). Wetland ecosystem services research: A critical review. *Global Ecology and Conservation*, 22, e01027. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01027>
- Zedler, J. B., & Kercher, S. (2005). WETLAND RESOURCES: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability. *Annual Review of Environment and Resources*, 30(1), 39–74. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144248>
- Zhao, Q., Bai, J., Huang, L., Gu, B., Lu, Q., & Gao, Z. (2016). A review of methodologies and success indicators for coastal wetland restoration. *Ecological Indicators*, 60, 442–452. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.07.003>