



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**Efecto de la humedad y propiedades hidrofísicas del
sustrato en la conectividad y respuesta hidrológica de
azoteas verdes extensivas, Ciudad de México.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciada en Ciencias de la Tierra

P R E S E N T A:

Melissa López Portillo Purata



DIRECTOR DE TESIS:

Dra. Lyssette Elena Muñoz Villers

Ciudad Universitaria, Ciudad de México

2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno
López Portillo
Purata
Melissa
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Ciencias de la Tierra
414002122
2. Datos de la tutora
Dra.
Lyssette Elena
Muñoz
Villers
3. Datos del sinodal 1
Dra.
Ortega
Guerrero
Beatriz
4. Datos del sinodal 2
Dra.
Prado
Pano
Blanca Lucía
5. Datos del sinodal 3
Dra.
Rivera
Cárdenas
Claudia Inés
6. Datos del sinodal 4
Dra.
López
Espinoza
Erika Danaé
7. Datos del trabajo escrito
Efecto de la humedad y propiedades físicas del sustrato en la conectividad y respuesta hidrológica de azoteas verdes extensivas, Ciudad de México.
53 pp
2019

Agradecimientos

Al proyecto “Evaluación del desempeño de azoteas verdes en la retención de escurrimientos y contaminantes: caso Ciudad de México”, financiado por PAPIIT-UNAM (No. IN104619) a cargo de la Dra. Lyssette Elena Muñoz Villers.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera por la beca de Apoyo para Titulación y Obtención de Grado mediante un Fondo Especial de Ingresos Extraordinarios del Centro de Ciencias de la Atmósfera.

Al Jardín Botánico de la UNAM por los permisos para trabajar en sus instalaciones.

A la Dra. Lyssette por todas las sesiones, correcciones, enseñanzas, paciencia y el apoyo en todo momento para realizar este trabajo. Además de las pláticas y las risas.

A Eréndira por la compañía en campo, las enseñanzas y compartirme parte de su trabajo.

A las doctoras que revisaron mi tesis, por el tiempo para leerla y corregirla.

A mi familia, que les debo todo, por ser el mejor ejemplo y darme amor y apoyo ante todo.

A mis amigos que amo tanto, por las interminables porras y ánimos, por estar siempre ahí.

Índice general

Índice de figuras	1
Índice de tablas	2
Resumen	3
1. Introducción	4
1.1 Cambio global y el recurso agua en ciudades	4
1.1.1 El caso de la Ciudad de México	5
1.2 Azoteas verdes	6
1.2.1 Tipos	6
1.2.2 Beneficios	7
1.2.3 Dinámica hidrológica	8
1.3 Objetivos del trabajo	9
1.3.1 General	9
1.3.2 Particulares	9
1.4 Sobre este proyecto	10
2. Marco Teórico	11
2.1 Componentes del ciclo hidrológico	11
2.1.1 Precipitación	11
2.1.2 Evapotranspiración	11
2.1.3 Tasa de infiltración	11
2.1.4 Propiedades hidrofísicas del suelo	12
2.1.5 Humedad en suelo	14
2.1.5.1 Humedad gravimétrica y volumétrica	14
2.1.5.2 Retención de agua	14
2.1.6 Esguerrimiento superficial	15
2.1.6.1 Flujo superficial por exceso de infiltración	15
2.1.6.2 Flujo superficial por exceso de saturación	15
2.1.7 Flujo subsuperficial	15
3. Metodología	16
3.1 Área de estudio	16
3.1.1 Jardín Botánico en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA)	16
3.1.2 Descripción de las azoteas	17

3.2 Instrumentación y medición de variables hidrometeorológicas	17
3.2.1 Precipitación	17
3.2.1.1 Separación de eventos	18
3.2.2 Escurrimiento	18
3.3 Medición de propiedades hidrofísicas del suelo	19
3.3.1 Humedad en suelo	19
3.3.1.1 Calibración de sensores de humedad	20
3.3.2 Tasa de infiltración	22
3.4 Colecta de muestras del sustrato y análisis en laboratorio	23
3.5 Análisis de datos	26
3.5.1 Selección de eventos precipitación-escurrimiento	26
3.5.2 Mecanismos de generación de escurrimiento en las azoteas verdes	26
4. Resultados	28
4.1 Precipitación	28
4.2 Coeficiente de escurrimiento (Q/P)	28
4.3 Parámetros fisicoquímicos del sustrato	29
4.4 Humedad en el sustrato	29
4.4.1 Calibración por tratamientos	29
4.4.2 Calibración experimental contra ecuaciones genéricas	32
4.5 Respuesta y conectividad hidrológica	34
4.5.1 Generación de escurrimiento por exceso de infiltración	34
4.5.2 Generación de escurrimiento por exceso de saturación	35
5. Discusión	41
5.1 Humedad en el sustrato: calibración experimental contra ecuaciones genéricas	41
5.2 Efecto de la pendiente en los patrones de humedad y escurrimiento	42
5.3 Mecanismos dominantes de generación de escurrimiento	43
6. Conclusiones	45
Referencias	46
Anexos	48
I. Calibración de sensores de humedad y ajuste de peso seco	48
II. Parámetros fisicoquímicos del sustrato	48

Índice de figuras

Figura 1. Grado de presión por región hidrológico-administrativa, 2015. Tomado del Atlas del Agua en México, 2016, CONAGUA.	5
Figura 2. Estructura común de capas en una azotea verde. Tomado de Getter y Rowe (2016).	7
Figura 3. REPSA en la Ciudad Universitaria. Fuente: SEREPSA (2016).	16
Figura 4. Ubicación de los sensores de capacitancia en la AVEcp.	20
Figura 5. Ubicación de los sensores de capacitancia en la AVEsp.	20
Figura 6. (A) moldes a utilizar con malla y sensor; y (B) tratamientos acomodados.	22
Figura 7. Esquema del infiltrómetro utilizado. Imagen tomada de Gómez-Tagle (2008)	23
Figura 8. (A) muestra de CC-PMP en cilindro de acero inoxidable; y (B) muestras empaquetadas y numeradas.	24
Figura 9. Procesamiento de muestra compuesta antes de ser empacada.	25
Figura 10. Serie de humedad AVEcp calibrada de acuerdo a los tres tratamientos.	31
Figura 11. Serie de humedad AVEsp calibrada de acuerdo a los tres tratamientos.	32
Figura 12. AVEcp: comparación entre los promedios de las calibraciones propuestas por el manual y la calibración realizada experimentalmente.	33
Figura 13. AVEsp: comparación entre los promedios de las calibraciones propuestas por el manual y la calibración realizada experimentalmente.	33
Figura 14. Tasas de infiltración (k_{fs} [mm hr ⁻¹]) de cada azotea en diagramas de caja.	35
Figura 15. Eventos de precipitación seleccionados para la AVEcp.	37
Figura 16. Eventos de precipitación seleccionados para la AVEsp.	38
Figura 17. Promedios de humedad volumétrica de ambas azoteas vs. precipitación en el período observado.	39
Figura 18. Áreas de contribución a la generación de escurrimiento por exceso de saturación en la AVEcp.	39
Figura 19. Áreas de contribución a la generación de escurrimiento por exceso de saturación en la AVEsp.	40

Índice de tablas

Tabla 1. Valores de referencia de concentración (%) de materia orgánica según la NOM-021-RECNAT-2000.	13
Tabla 2. Tipos de suelo según densidad aparente.	13
Tabla 3. Rango y categorías de valores de porosidad en el suelo.	13
Tabla 4. Valor promedio de la intensidad máxima y promedio de precipitación por resolución estudiada.	28
Tabla 5. Estadísticos básicos referentes al Índice de Precipitación Antecedente a 7 días.	28
Tabla 6. Valores promedio (\pm DE), máximo y mínimo de Q/P para ambas azoteas.	29
Tabla 7. Ecuaciones de calibración de sensores de humedad de cada tratamiento y su respectivo R^2 .	30
Tabla 8. Valores de humedad volumétrica ($\Theta\%$) máximos, mínimos y promedio obtenidos a partir de las calibraciones.	31
Tabla 9. Eventos de precipitación seleccionados.	34
Tabla 10. Valores promedio, máximo y mínimo de Kfs obtenidos en ambas azoteas.	34
Tabla 11. Eventos de precipitación que cumplen con los criterios.	36
Tabla 12. Eventos de precipitación seleccionados.	37
Tabla 13. Parámetros fisicoquímicos del sustrato.	48

Resumen

Con las tendencias de cambio climático actuales, se prevén severas crisis económicas y ambientales, incluyendo afectaciones a la salud humana, amenazas a la seguridad alimentaria y a las reservas de agua, mucho antes de lo previsto. Es por ello que el conocimiento e implementación de nuevas tecnologías que permitan contrarrestar estos efectos es de gran importancia. Entre éstas se encuentran las azoteas verdes, con múltiples beneficios sociales y ambientales, sobre todo en lo que respecta al manejo y gestión de los recursos hídricos en las ciudades. Se ha comprobado que las azoteas verdes pueden retrasar y disminuir significativamente los volúmenes y picos de escurrimiento por lluvias, evitando encharcamientos e inundaciones. Además, favorecen la reincorporación del agua al ciclo hidrológico, evitando que ésta se contamine en su paso hacia los desagües. No obstante, la información que se tiene sobre su dinámica y respuesta a patrones de precipitación en regiones tropicales es aún muy escasa. Por tanto, el presente trabajo tuvo como finalidad ampliar dicho conocimiento mediante el análisis de los patrones de infiltración y humedad en el sustrato de dos azoteas verdes extensivas con diferente pendiente (2 grados: AVEsp y 15 grados: AVEcp) en la Ciudad de México, identificando los mecanismos dominantes de generación de escurrimiento en respuesta a eventos de precipitación. Para ello, se utilizaron datos de precipitación, escurrimiento y humedad en el sustrato durante la época de lluvias de 2017 (mayo - noviembre). La serie de humedad fue calibrada experimentalmente con el fin de obtener los contenidos de agua volumétricos verdaderos. Además, se realizaron ensayos de infiltración y se colectaron muestras para determinar las propiedades hidrofísicas y profundidad del sustrato en ambas azoteas. Los resultados mostraron un coeficiente de escurrimiento (Q/P) mayor en la AVEcp (0.39 ± 0.35) comparado con la AVEsp (0.35 ± 0.39), sin ser estadísticamente diferentes. Sin embargo, se observó que el mecanismo dominante de generación de escurrimiento pluvial fue distinto para cada una de ellas; mientras que en la AVEcp dominó la generación de escurrimiento por exceso de saturación, en la AVEsp el escurrimiento fue en su mayoría producido por flujos subsuperficiales. Debido a las altas tasas de infiltración registradas en la superficie del sustrato de ambas azoteas, la generación de escurrimiento por exceso de infiltración no fue un mecanismo observado. Por último, comparando los datos de humedad calibrados utilizando tanto las ecuaciones genéricas como las ecuaciones experimentales desarrolladas en este trabajo, se pudo evaluar la subestimación de los valores reales de humedad hasta en un 57% por parte de las calibraciones genéricas. Esto implica que de no haberse realizado la calibración específica, los resultados en términos de los mecanismos de generación de escurrimiento habrían sido completamente diferentes. Por tanto, el realizar las calibraciones específicas no sólo proporcionó mayor precisión al estudio, sino que también pueden ser utilizadas como referente para trabajos futuros en azoteas verdes en la Ciudad de México.

Palabras clave: precipitación-escurrimiento, humedad en suelo, tasa de infiltración, hidrología tropical, azoteas verdes, ciudades

1. Introducción

1.1 Cambio global y el recurso agua en ciudades

Vivimos en un planeta en constante cambio, sin embargo, durante las últimas décadas se han observado y estudiado diversos fenómenos que indican que la presión que ejercemos como especie humana, ha acelerado y modificado sus ciclos naturales. Se estima que, debido a actividades antropogénicas, la temperatura promedio a nivel global se ha elevado 1 °C con respecto a niveles pre-industriales (aprox. 1850), con un rango entre 0.8 °C y 1.2 °C según sea la región (IPCC, 2018). Como consecuencia de esto, el ciclo del agua se ha modificado, registrándose con mayor frecuencia tormentas, sequías, inundaciones, incendios y ondas de calor, todo a niveles nunca antes vistos (Grimm et al., 2008; IPCC, 2018).

Ante tales repercusiones y considerando que el aumento promedio en la temperatura ha sido únicamente de 1 °C a nivel global, es posible entender la fragilidad del sistema Tierra y sus componentes. De acuerdo con el último reporte del IPCC, con la tendencia actual de calentamiento global, se prevén severas crisis económicas y ambientales, incluyendo afectaciones a la salud humana, amenazas a la seguridad alimentaria y a las reservas de agua, mucho antes de lo previsto. Según dicho reporte, con tan sólo 0.5 °C de aumento sobre el grado antes mencionado, se espera un incremento en las temperaturas extremas en diversas regiones, así como en la frecuencia, intensidad y/o cantidad de las precipitaciones. Se pronostica también un incremento de temperatura de hasta 3 °C en los sistemas terrestres y un mayor número de días calurosos, especialmente en los trópicos.

Los ecosistemas acuáticos (epicontinentales, de transición y oceánicos) son de enorme importancia para nuestra sociedad puesto que de ellos depende la generación de muchas materias primas, además de proveer protección y amortiguamiento ante desastres naturales. Los cambios que se producen en estos y en el ciclo hidrológico son difíciles de cuantificar por su gran magnitud, extensa distribución y por la calidad de datos que, hablando específicamente de precipitación y respuesta hidrológica en cuencas, fuera del hemisferio Norte, son muy escasos. Además, los riesgos en cuanto a los fenómenos meteorológicos extremos y el cambio general en su frecuencia e intensidad, no están distribuidos equitativamente en el planeta. El reporte del IPCC (2018) especifica que las áreas más vulnerables son las costas y deltas de ríos, que se verán afectados por el aumento del nivel del mar y la salinización de los acuíferos, así como ciudades en altas montañas y áreas que en la actualidad ya son calurosas, sobrepobladas o económicamente pobres.

1.1.1 El caso de la Ciudad de México

La Ciudad de México, y más específicamente la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), es el claro ejemplo de un área de gran vulnerabilidad ante el

cambio climático global; es una metrópoli sobrepoblada, con aproximadamente 22 millones de habitantes, en alta montaña, con problemas de escasez de agua, contaminación del aire, con altas temperaturas debido a la isla de calor y numerosas inundaciones durante la época de lluvias.

Construida sobre el lecho de un lago, es de las capitales más lluviosas del mundo con aproximadamente 900 mm de precipitación promedio anual (INEGI, 2015) y que, sin embargo, enfrenta un gran problema con el recurso agua, esto es que durante la mitad del año hay escasez y en la otra mitad severas inundaciones. A nivel nacional, el suministro promedio de agua disminuyó de 18,000 m³/hab/año en 1950 a aproximadamente 3,692 m³/hab/año para el año 2017. El grado de presión sobre los recursos hídricos, que se obtiene al dividir la extracción del recurso entre el agua renovable o disponibilidad, es de 19.5%, categorizado como bajo (CONAGUA, 2016). Cabe destacar que el tener dichos indicadores a nivel nacional enmascara las variaciones a nivel regional, como puede verse en la **Fig. 1**, donde se observa que para la ZMVM el grado de presión rebasa el 100%, con una disponibilidad de tan solo 182 m³/hab/año (Fondo Metropolitano del Valle de México, 2011).

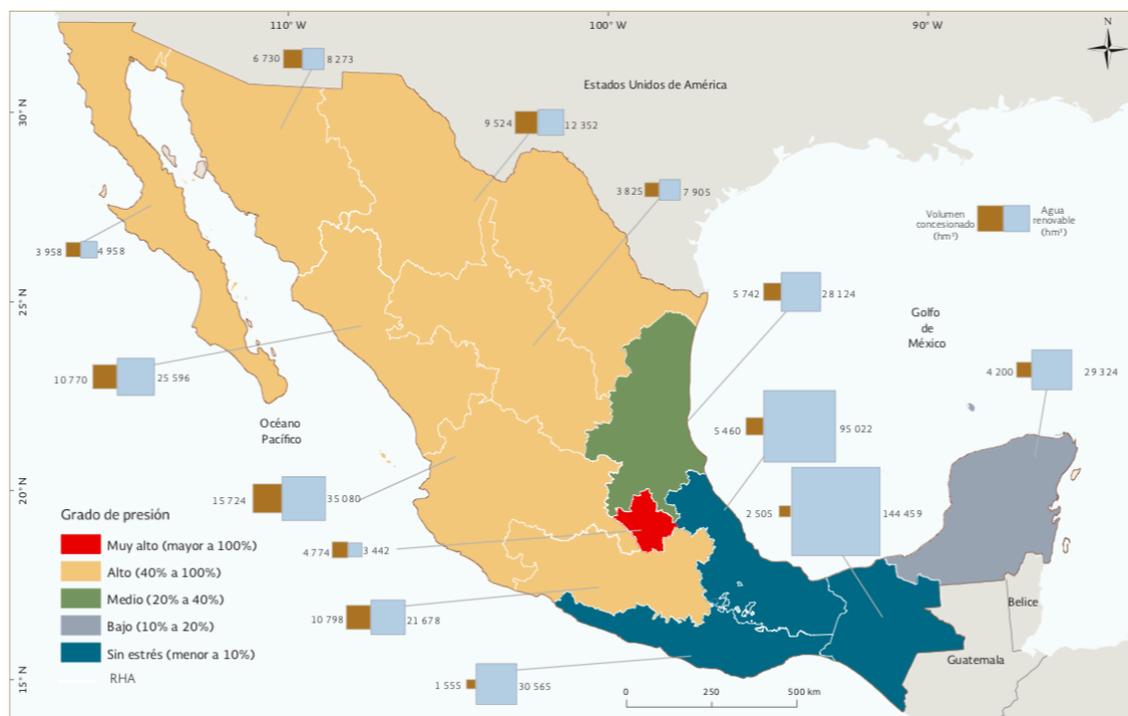


Figura 1. Grado de presión por región hidrológico-administrativa, 2015. Tomado del Atlas del Agua en México, 2016, CONAGUA.

El agua utilizada en la ZMVM proviene en un 68.9% del acuífero subyacente, sobreexplotado en un 50% por encima de su tasa de reposición, 23.7% proviene del sistema Lerma-Cutzamala y el 7.4% restante del caudal de aguas superficiales en la cuenca (Fondo Metropolitano del Valle de México, 2011).

Además, la metrópoli no cuenta con un sistema de reciclaje de aguas residuales a gran escala ni de recolección de aguas pluviales, ejerciendo aún más presión sobre el acuífero. A lo anterior puede sumarse la inmensa y cada vez mayor área de superficies impermeables, sobre las cuales el agua que precipita escurre sin poder infiltrarse y recargar al acuífero, contaminándose en su curso con aceites, metales pesados, sales, pesticidas y desperdicios animales (Getter y Rowe, 2006). Estas alteraciones al ciclo hidrológico se agravan con los efectos del cambio climático, alimentando un ciclo de retroalimentación positivo en donde más calor y sequías generan mayor evapotranspiración y más demanda de agua, ocasionando una mayor presión a los deteriorados reservorios que abastecen la región. No es la primera vez que una capital mundial en la que se ha invertido tanto y de la que dependen tantas personas, se ve en riesgo por su crecimiento desmesurado y sin planeación.

Ante el escenario actual de cambio global y la subsecuente alteración del ciclo hidrológico, son cada vez más necesarias tecnologías flexibles e innovadoras que provean resiliencia urbana. Ya hay ciudades donde se han desarrollado tecnologías como infraestructura verde, planeación de uso de suelo sostenible y programas de manejo y tratamiento de aguas pluviales y de desecho (IPCC, 2018). Una posible alternativa para combatir la problemática climática actual es la naturación de azoteas que, dependiendo cómo sea efectuada, puede tener una gran cantidad de beneficios ecológicos, hidrológicos y sociales.

1.2 Azoteas verdes

1.2.1 Tipos

Las azoteas verdes son sistemas diseñados para ser unidades del paisaje similares a aquellas encontradas en un ambiente natural (Getter y Rowe, 2006). La gran mayoría tienen un arreglo de capas (**Fig. 2**), comenzando por una membrana antiraíz instalada directamente sobre el techo impermeabilizado de una edificación; una capa de drenaje que permite la escorrentía de agua; una malla filtro que evita el lavado del sustrato; una capa opcional de un material que retenga agua; el sustrato y la vegetación. Esta estructura de capas ha sido implementada y estudiada en diversas regiones y climas en todo el mundo (Oberndorfer et al., 2007) y la elección de los componentes depende del propósito del proyecto y la capacidad de carga del edificio (Getter y Rowe, 2006).

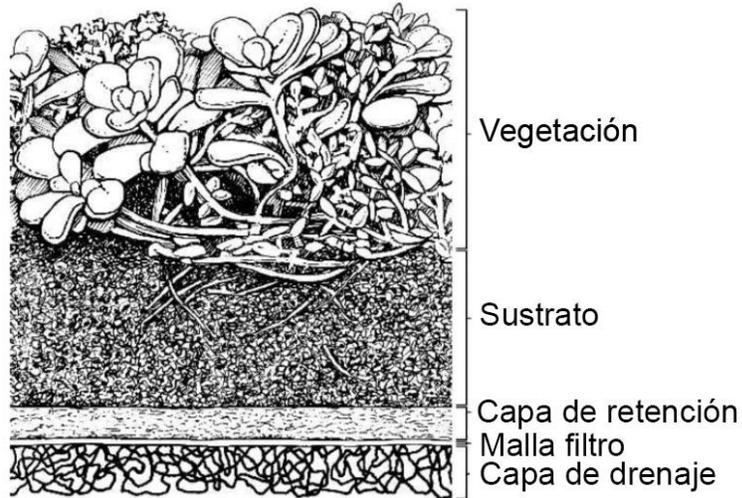


Figura 2. Estructura común de capas en una azotea verde. Tomado de Getter y Rowe (2016).

Actualmente existen dos tipos de azoteas verdes: intensivas y extensivas. Las principales características que las distinguen son la profundidad del sustrato y la vegetación que ésta puede sostener, sin embargo, su finalidad, requerimientos estructurales, mantenimiento, costo y tipo de sustrato son otras características que las diferencian. De manera general, las azoteas intensivas requieren un alto nivel del mantenimiento pues pueden soportar árboles, arbustos y huertos de gran tamaño, necesitando un sustrato medio mayor a 15.2 cm y buscando ser funcionales y estéticas. Por lo anterior, suelen ser más pesadas (290 a 970 kg/m²) y de costos más elevados.

Por otro lado, las azoteas verdes extensivas tienen profundidades de sustrato menores a 15.2 cm cubiertas por plantas herbáceas, pastos, musgos y suculentas como especies asociadas (Getter y Rowe, 2006). Estas plantas suelen poseer adaptaciones que les permiten sobrevivir a condiciones de estrés y de preferencia, se busca vegetación nativa adaptada al clima del lugar y que requiere bajo o nulo mantenimiento. Este tipo de azoteas suelen ser meramente funcionales debido a sus múltiples beneficios (explicados más adelante) y a su baja necesidad de mantenimiento y riego, además de ser mucho más ligeras en peso (70 a 170 kg/m²) que las intensivas.

1.2.2 Beneficios

Las azoteas verdes son alternativas que incrementan la resiliencia urbana debido a sus múltiples beneficios. De acuerdo con Oberndorfer (2007), existen tres categorías principales de estos: gestión de aguas pluviales, conservación de energía y provisión de hábitat urbano. Entre los beneficios que se adjudican a estas últimas dos categorías se encuentran el aumento en la duración de las membranas impermeabilizantes de los techos; ahorro energético en edificios al amortiguar las variaciones de temperatura; reducción de ruido, mitigación del

efecto de isla de calor y de la contaminación del aire. También funcionan como parches de biodiversidad, actuando como hábitat para diferentes especies.

En términos hidrológicos, se pueden mencionar tres principales beneficios de las azoteas verdes: reincorporación del agua a su ciclo mediante la evapotranspiración, reducción del volumen de escurrimiento por evento de tormenta y retraso del mismo a los sistemas de drenaje pluvial. La presencia de plantas y su medio permite que el agua que precipita regrese a la atmósfera por diferentes caminos: evaporándose al quedarse en la superficie de las plantas o en la columna del sustrato y transpirándose al llegar a sus estomas después de transportarse a través del continuo suelo-planta; promoviendo condiciones más amigables para especies de flora y fauna, al aumentar los niveles de humedad en el entorno inmediato.

Por otro lado, al retenerse grandes volúmenes de agua (hasta 60-100% de lo precipitado, como se menciona adelante) generados por eventos de precipitación, el escurrimiento final que llega al suelo es bastante menor, es decir, ocurre una reducción del volumen de escurrimiento pluvial. Getter (2006) menciona en su trabajo que Kolb (2004) reporta que aproximadamente el 45% del agua precipitada es reincorporada al ciclo hidrológico a través de la evapotranspiración y, de acuerdo con varios autores, las azoteas verdes pueden reducir el escurrimiento entre un 60% y un 100%, según las características del sistema de naturación (Getter et al., 2006). El agua que no se retiene en el sustrato o se regresa a la atmósfera, se drena a través de las capas que componen el sistema, atrasando los picos de escurrimiento posteriores a un evento de tormenta. Este retraso puede prevenir encharcamientos y en mayor escala inundaciones, además de evitar problemas en el sistema de drenaje y mitigar el poder erosivo de los volúmenes de agua ocasionados por el escurrimiento. De acuerdo a Getter (2006), las azoteas verdes pueden retrasar el escurrimiento entre 95 minutos y 4 horas en promedio, lo cual es bastante significativo comparado con la respuesta casi inmediata de las azoteas convencionales.

Cabe mencionar que, aunque las azoteas verdes reducen y retrasan el escurrimiento y promuevan la reincorporación de agua a su ciclo natural, estos sistemas no contribuyen en resolver el problema asociado a la recarga de mantos acuíferos en áreas urbanas.

1.2.3 Dinámica hidrológica

Los beneficios ambientales que proveen las azoteas verdes son resultado de su funcionamiento como ecosistemas (Oberndorfer et al., 2007), por lo cual son dinámicas y con composición que varía con el tiempo. Sus servicios ecosistémicos dependen principalmente de la vegetación, el sustrato y las capas/membranas que las componen. Mientras que las plantas hacen sombra, interceptan e incorporan el agua a la atmósfera mediante la transpiración, el sustrato es esencial para

sostener la vegetación y contribuir a la retención de agua y humedad (Getter y Rowe, 2006).

Al tomar a las azoteas naturadas como unidades del paisaje o ecosistemas aislados o a escala, se puede mencionar que éstas también tienen ciclos y dinámicas hidrológicas bien establecidas. Así, en ellas ocurre interceptación por parte de la vegetación; evapotranspiración en el conjunto suelo-planta-atmósfera; escurrimiento superficial y subsuperficial; y almacenamiento de agua en suelo y vegetación. De hecho, los beneficios previamente mencionados se explican mediante los flujos de agua y energía que suceden en éstas; por ejemplo, durante el verano o días de calor intenso, tienen la capacidad de amortiguar las variaciones de temperatura a través de la evapotranspiración (Oberndorfer et al., 2007).

Dentro de la dinámica hidrológica de las azoteas verdes, la retención de agua juega un papel fundamental en su funcionamiento como amortiguadoras ante eventos de precipitación. Una vez que esta retención llega a su máxima capacidad, comienza un proceso denominado escurrimiento, caracterizado por flujos verticales y horizontales de agua, que puede originarse por diferentes mecanismos como serán explicados más adelante. El entender los patrones y mecanismos de generación de escurrimiento, sus áreas de contribución y cómo diferentes componentes actúan sobre él, es de gran importancia para conocer a mayor profundidad su ciclo hidrológico y potencializar las funciones y servicios de las azoteas verdes como alternativas urbanas ante el cambio global (Oberndorfer et al., 2007). Con base en lo anterior, este trabajo tiene la intención de generar información científica relevante que contribuirá a entender la hidrología de azoteas verdes en ambientes urbanos tropicales, con énfasis en la Ciudad de México, en donde el conocimiento existente al respecto es aún muy escaso (cf. Arellano-Leyva 2017).

1.3 Objetivos del trabajo

1.3.1 General

Este trabajo busca examinar los patrones de infiltración y humedad en el sustrato de dos azoteas verdes extensivas con distinto grado de inclinación, para identificar los mecanismos dominantes de generación de escurrimiento en respuesta a la precipitación.

1.3.2 Particulares

De manera particular, los objetivos son:

- A partir de los contenidos volumétricos de agua medidos en el sustrato durante la época de lluvias en ambas azoteas, realizar una calibración de sensores de capacitancia ECH2O para obtener los valores verdaderos según las características de los sustratos.

- Examinar los patrones de humedad en los sustratos de las azoteas y determinar si la pendiente es un factor que pudiese explicar las variaciones temporales y espaciales observadas.
- Identificar los patrones de generación de escurrimiento en ambas azoteas a partir de las características de los eventos de precipitación, la humedad en suelo, la tasa de infiltración y las propiedades hidrofísicas del sustrato.

1.4 Sobre el proyecto

Este trabajo utilizó datos de precipitación, humedad en el sustrato y escurrimiento de dos azoteas verdes extensivas, los cuales fueron colectados por la M.en C. Eréndira Alejandra Arellano-Leyva durante la época de lluvias de 2017, como parte de su proyecto doctoral titulado “ La influencia de la pendiente y profundidad de sustrato de azoteas verdes extensivas (AVEs) en la evapotranspiración y escurrimiento pluvial a nivel estacional”, el cual a su vez está inscrito en el marco del proyecto PAPIIT “Evaluación del desempeño de azoteas verdes en la retención de escurrimientos y contaminantes: caso Ciudad de México”

2. Marco Teórico

2.1 Componentes del ciclo hidrológico

Se refiere a la circulación de agua en la Tierra, el ciclo hidrológico comprende una serie de procesos de almacenamiento y transporte recirculatorio permanente de masas de agua en sus diferentes fases (líquida, sólida y gaseosa), accionado principalmente por la energía proveniente del sol y la gravedad terrestre. Los procesos de interés para este trabajo se describen a continuación.

2.1.1 Precipitación

Cualquier forma en la que el agua contenida en la atmósfera precipita sobre la superficie terrestre (lluvia, nieve, granizo). Una de las maneras de cuantificar este componente, según lo que se busque, es mediante el cálculo de la intensidad de precipitación, medida en mm hr^{-1} , que hace referencia al volumen o cantidad precipitada (mm) por unidad de tiempo (hr). Esto permite identificar eventos de tormenta y monitorear el comportamiento general a diferentes escalas temporales.

2.1.2 Evapotranspiración

La evapotranspiración es un componente sumamente complejo e importante del ciclo hidrológico, y representa la interconexión y equilibrio de los flujos de agua en el continuo suelo-planta-atmósfera. Es resultado de la combinación de dos procesos: evaporación y transpiración. La evaporación es un proceso físico en el que ocurre un cambio de fase del agua, transformándose de líquida a gaseosa para su reincorporación a la atmósfera, en la superficie de cuerpos de agua, suelo y vegetación. Por otro lado, la transpiración hace referencia a un proceso físico y biológico en el que agua fluye del suelo a través de las raíces hacia el cuerpo de las plantas, hasta llegar a los estomas, donde se realiza el intercambio gaseoso con el entorno (Goyal, 2013).

La evapotranspiración es uno de los componentes que más ha resultado afectado por el crecimiento desmesurado de las urbes y el cambio de uso de suelo. Su equilibrio es delicado y cambia significativamente según la cobertura vegetal y la disponibilidad de agua en el suelo.

2.1.3 Tasa de infiltración

Se denomina infiltración al proceso mediante el cual el agua que ingresa a la superficie del suelo se desplaza a través de éste en sus primeras capas. Para conocer la tasa de infiltración (mm hr^{-1}) de determinado suelo en campo, es necesario realizar una serie de ensayos. En este trabajo, se siguió el método descrito por Gómez-Tagle et al (2008), utilizando un infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo. La base teórica de este método es que a medida que se satura un suelo, la tasa de infiltración instantánea decrece en el tiempo hasta que se alcanza una constante conocida como infiltración básica, determinada por

la conductividad hidráulica saturada del suelo K_s (Gómez-Tagle et al. 2008). Dicha constante corresponde a la velocidad a la que se infiltra el agua en un sustrato completamente saturado. Se abrevia como K_{fs} cuando las pruebas son realizadas directamente en campo, como es el caso.

2.1.4 Propiedades hidrofísicas del suelo

Cuando se habla de suelo, se hace referencia a aquella capa delgada que recubre la Tierra y puede albergar vida. De acuerdo con Chesworth (2008), el suelo es el más complejo de todos los materiales geológicos, resultado de múltiples interacciones y retroalimentaciones entre la litósfera, la atmósfera, la hidrósfera y la biósfera. Se compone de minerales, materia orgánica, agua y aire; su formación se remonta a los inicios de nuestro planeta, siendo renovado constantemente a través de la desintegración de las rocas que componen la corteza terrestre por los efectos del intemperismo (acción del agua, viento y cambios de temperatura).

El suelo tiene diferentes propiedades físicas, biológicas y químicas según su composición, determinada por el material parental que le dio origen, los elementos presentes en el ambiente, el tipo de vida que lo habita o rodea, el clima, relieve y su edad. Sus partículas tienen dos orígenes principales: mineral y orgánico; y según cómo éstas se agregan o juntan, dejando espacios o no, se determina la organización y estructura del suelo.

Dada la importancia de la presencia y cantidad de agua en el suelo para la determinación de su estructura, identificación y respuesta a estímulos ambientales, existen determinadas propiedades del suelo denominadas “hidrofísicas”, que representan la relación entre las propiedades físicas del suelo y el agua. Éstas pueden conocerse a través de análisis en campo o en laboratorio y son descritas a continuación:

Materia orgánica (MO): fracción del suelo compuesta por organismos vegetales y animales vivos o muertos. Una vez que la MO se descompone, ocurre una reincorporación de nutrientes que es nuevamente aprovechable por las formas de vida que habitan el suelo. Por esto, es un factor determinante de fertilidad en suelos, además, tiene una gran capacidad de retención de agua, ayudando a mantenerla disponible en el ambiente. Cabe destacar que la cantidad de MO varía sustancialmente dependiendo el tipo de suelo que se tenga, no obstante, son pocos los suelos que no la contengan. De acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, los tipos de suelo se pueden identificar en los siguientes según sus valores de referencia de concentración de MO (%):

Tabla 1. Valores de referencia de concentración (%) de materia orgánica según la NOM-021-RECNAT-2000.

Concentración	Suelos volcánicos (%)	Suelos no volcánicos (%)
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 - 6.0	0.6 - 1.5
Medio	6.1 - 10.9	1.6 - 3.5
Alto	11.0 - 16.0	3.6 - 6.0
Muy alto	> 16.1	> 6.0

Densidad real (DR): determinada por la relación entre el peso de las partículas sólidas y su volumen, sin tomar en cuenta el volumen de poros.

Densidad aparente (DA): densidad del suelo calculada a partir del peso de un suelo y su volumen, sin importar el espacio ocupado por poros. En la NOM-021-RECNAT-2000 se establecen los siguientes tipos de suelo de acuerdo a la densidad aparente que poseen:

Tabla 2. Tipos de suelo según densidad aparente.

Tipo de suelo	g/cm³
Orgánicos y volcánicos	< 1.00
Minerales:	
- Arcillosos	> 1.00 y < 1.19
- Francosos	> 1.20 y < 1.32
- Arenosos	> 1.32

Porosidad: fracción del suelo que en su disposición normal está ocupada por aire y/o agua. Es dependiente de parámetros como textura, estructura, materia orgánica, entre otros; y su reducción implica pérdida de aireación del suelo, disminución de la capacidad de infiltración de agua y complica la penetración de raíces, repercutiendo en diversas propiedades físicas. El cálculo de porosidad se hace a través de la siguiente ecuación:

$$Porosidad = \left(\frac{Densidad\ real - Densidad\ aparente}{Densidad\ real} \right) * 100 \quad \text{Ec. [1]}$$

Y de acuerdo a Flores (2010), su interpretación es la siguiente:

Tabla 3. Rango y categorías de valores de porosidad en el suelo.

Porosidad total (%)	Interpretación
<30	Muy baja
30 - 40	Baja
40 - 50	Media
50 - 60	Alta
> 60	Muy alta

Peso suelo seco (PSS): secado a 105 °C en horno hasta perder todo el contenido de agua y conseguir un peso constante.

2.1.5 Humedad en suelo

Cantidad de agua por volumen de sustrato. La capacidad de cada suelo para retener agua dependerá de su textura y estructura, su contenido de materia orgánica y mineral, la presencia y profundidad de raíces y el aporte por lluvia o riego (FAO, 2015). La humedad en suelo no es constante, puesto que varía en tiempo y espacio dependiendo de la incidencia solar, entradas por precipitación y consumo de agua de la vegetación.

2.1.5.1 Humedad gravimétrica y volumétrica

De acuerdo con Gardner (1986), la humedad puede ser expresada según su peso (contenido gravimétrico) o su volumen (contenido volumétrico), a partir de las siguientes ecuaciones:

$$W(\%) = \frac{Psh - Pss}{Pss} \times 100 \quad \text{Ec. [2]}$$

donde $W(\%)$ representa el porcentaje gravimétrico de humedad; Psh el peso del suelo húmedo (g) y Pss el peso del suelo seco al horno (g).

En caso de conocer la densidad aparente del suelo (Da) en g/cm^3 , que puede ser calculado a partir de la ecuación [2], es posible expresar la humedad gravimétrica como humedad volumétrica ($\Theta\%$) siguiendo la ecuación [3].

$$Da = \frac{Pss}{Vol.de\ la\ muestra} \quad \text{Ec. [3]}$$

$$\Theta(\%) = \frac{W(\%) \times Da}{\rho_w} \quad \text{Ec. [4]}$$

Donde ρ_w es la densidad del agua.

2.1.5.2 Retención de agua

Edafológicamente hablando, existen tres puntos de interés de humedad del suelo, los cuales están regidos por el potencial mátrico del suelo (ψ_m), que a su vez son resultado de la acción conjunta de las fuerzas de adsorción y capilaridad ejercida entre las partículas del agua y el suelo (Bustamante 1986):

- I. Capacidad de campo: cantidad máxima de agua que puede ser retenida por un suelo a una tensión de 0.33 bar o después de haber drenado libremente por gravedad durante un lapso de 24 hrs.
- II. Punto de marchitez permanente: límite de tensión a 15 bar hasta el cual las plantas pueden extraer agua del suelo.

- III. Agua aprovechable para las plantas: rango de agua retenida entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, referente al agua que las plantas pueden disponer.

2.1.6 Escurrimiento superficial

Se denomina escurrimiento superficial al flujo horizontal o direccionado del agua que circula sobre una superficie. Este proceso se verá influenciado por diferentes parámetros como vegetación, tipo de sustrato, pendiente y condiciones meteorológicas (Soulis et al., 2017) y se origina, como se mencionó previamente, por tres mecanismos diferentes: exceso de infiltración, exceso de saturación o una combinación de estos.

2.1.6.1 Flujo superficial por exceso de infiltración

Generado cuando la intensidad de la precipitación excede la tasa de infiltración del sustrato, provocando que el agua que no pudo infiltrarse, drene horizontalmente sobre la superficie. Sus principales causas son el relieve o la microtopografía y las características propias del suelo (tipo de cubierta, porosidad, grado de compactación)

2.1.6.2 Flujo superficial por exceso de saturación

Asociado al contenido de humedad en suelo, se genera cuando el sustrato se satura de agua al alcanzar o rebasar su capacidad de campo tras un evento de precipitación. Como todos los espacios libres entre los poros se encuentran ocupados por agua, es imposible que más agua penetre en la columna, generando un escurrimiento superficial en la horizontal. Se ve influenciado por la profundidad del suelo y su antecedente de humedad.

2.1.7 Escurrimiento subsuperficial

Una vez que comienza un evento de precipitación, el agua que se infiltra al sustrato viaja lateralmente entre las capas de éste hasta llegar al cauce o punto de drenaje. Este tipo de escurrimiento es más lento que el superficial y puede aflorar para formar parte de éste, o bien, puede percolar más en profundidad y contribuir al flujo subterráneo.

3. Metodología

3.1 Área de estudio

3.1.1 Jardín Botánico en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA)

El presente trabajo se desarrolló en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA)(Fig. 3), decretada en 1983 como “zona ecológica inafectable”. La REPSA comprende una superficie de 237.3 hectáreas y se ubica en el campus Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en la Ciudad de México (19°18'21” - 19°20'11” Norte y 99°10'15” - 99°12'4” Oeste). De acuerdo a la SEREPSA (2013), el sitio de estudio se encuentra a una altitud promedio de 2,300 m s.n.m., y posee un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, [Cb(w1)w] siguiendo la clasificación climática de Köeppen, modificado por García (1964). Su temperatura media anual es de 15.6 °C y la precipitación media anual es de 833 mm, observándose una época de lluvias entre los meses de junio a octubre y una época de secas de noviembre a mayo.

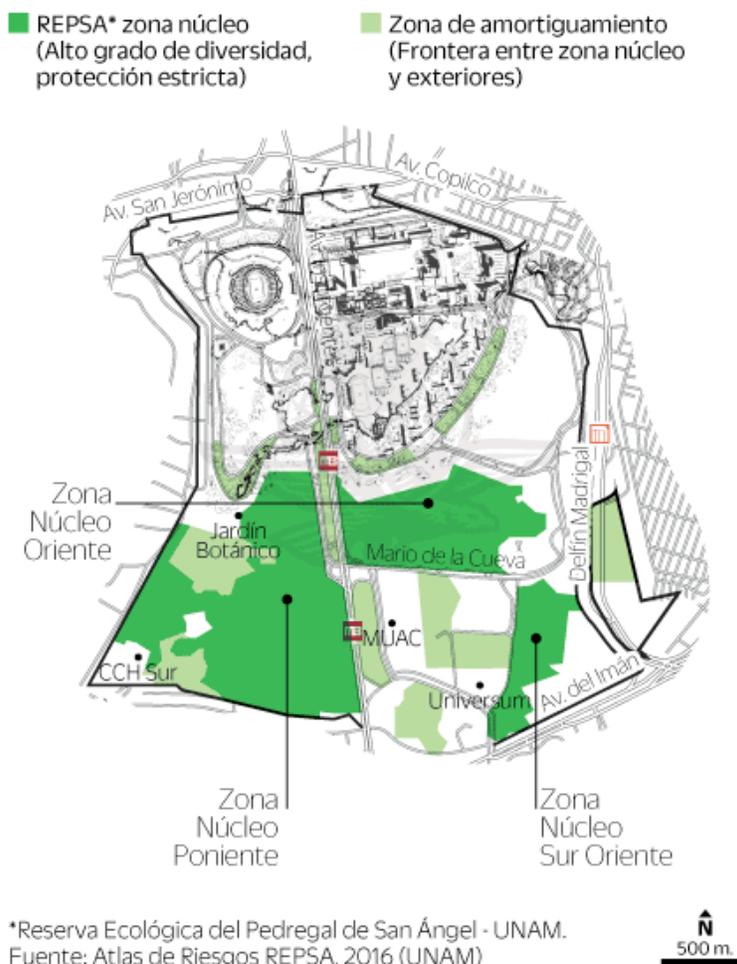


Figura 3. REPSA en Ciudad Universitaria, UNAM. Fuente: SEREPSA (2013).

3.1.2 Descripción de las azoteas

El área de estudio consistió en dos azoteas verdes extensivas (AVEs) ubicadas en el Jardín Botánico (**Fig. 3**) del Instituto de Biología de la UNAM, localizado en zona de amortiguamiento de la REPSA. El estudio se llevó a cabo durante la época de lluvias de 2017, en el periodo comprendido del 21 de mayo al 21 de noviembre.

Específicamente, las dos AVEs estudiadas se encuentran en el área de colecciones del Jardín Botánico y fueron instaladas en 1999 bajo la dirección del Biólogo Jerónimo Reyes, como un “prototipo promovido por el gobierno local y el Jardín Botánico” (Vázquez, 2013). De acuerdo con Arellano Leyva (2017), éstas se encuentran elevadas a 3.40 m de altura y cuentan con un sistema de capas compuesto por una capa impermeable, una carpeta asfáltica sellada, un sistema de drenaje, una membrana anti-raíz, una capa sustrato de aproximadamente 10 cm (compuesto por tepojal, fibra de coco, composta y suelo de tipo Andosol) y la vegetación, que alcanza 1.5 m en ciertos individuos. Para poder ser de bajo mantenimiento y resistir a condiciones de baja disponibilidad de agua, la vegetación en las azoteas se compone de especies propias de la REPSA (xerófilas), con dominancia de crasuláceas, cactáceas y agaváceas.

Las azoteas se encuentran a unos metros de distancia y se diferencian entre sí por su pendiente: la azotea verde con menor pendiente (AVEsp) tiene 2° de inclinación y aproximadamente 37 m² de área, con 8.0 m de largo y cerca de 4.6 m de ancho, sin ser un rectángulo regular. La azotea con pendiente (AVEcp) tiene 15° de inclinación y mide 7.70 m de largo y 4.80 m de ancho, alcanzando de igual modo los 37 m² de superficie.

3.2 Instrumentación y medición de variables hidrometeorológicas

3.2.1 Precipitación

En el periodo de estudio, la precipitación fue medida con un pluviómetro de balancín HOBO (Onset, EUA) con resolución de 0.2 mm, colocado a 1.30 m sobre el nivel de las azoteas (4.7 m sobre el suelo). Los intervalos de medición fueron de 5 minutos y se registraron utilizando un almacenador de datos Onset. La descarga de datos se realizó cada 2 semanas, aproximadamente. A partir de ello, se construyó una serie de precipitación del período concatenando dichos archivos en el software de acceso libre Python, versión 3.7.1 en el Jupyter Notebook 5.6.0 de Anaconda Navigator.

Una vez obtenida la serie completa, se utilizó la función “resample” de Python para remuestrear las series a intervalos regulares de 30 y 60 minutos. Dicha función opera haciendo acumulados de precipitación en las resoluciones antes mencionadas.

Con la finalidad de poder elegir eventos de precipitación-escurrimiento considerando las condiciones de humedad antecedente, se calculó la precipitación

antecedente a 7 días (AP 7 [mm], por sus siglas en inglés) sumando los mm de lluvia precipitados durante 7 días previos al evento de precipitación a analizar.

3.2.1.1 Separación de eventos

Se identificó manualmente cada evento de precipitación registrado durante el período estudiado a una resolución de 5 minutos. Un evento de precipitación fue definido como aquel con un registro mínimo de 0.2 mm y 6 horas de separación con respecto a otro evento. Se registró la fecha y hora de cada uno, así como su duración en minutos y horas, la precipitación total (P ; mm), la intensidad promedio (I_{prom} ; mm hr⁻¹) y la intensidad máxima (I_{max} ; mm hr⁻¹); esto mismo se repitió en las resoluciones de 30 y 60 minutos.

La I_{prom} de cada evento se obtuvo haciendo un promedio de la precipitación (mm) registrada por la duración del evento (horas). A su vez, para la I_{max} , se identificó el registro más alto de precipitación por cada resolución y se multiplicó por el número de veces que fuera necesario para alcanzar una duración de una hora. Es decir, la resolución máxima a 5 minutos se multiplicó por 12, la de 30 minutos por 2 y la de una hora se mantuvo intacta; de este modo, se obtuvieron valores en mm hr⁻¹

3.2.2 Escurrimiento

Cada AVE fue equipada por un sistema de tuberías que conduce el agua a un tanque colector marca Rotomex con capacidad de 1100 L, el cual a su vez cuenta con un limnógrafo y un barómetro, ambos modelo 3001 (Solinst, Canadá Ltd.) con 2.5 mm y 0.05% kPa de precisión, respectivamente, registrando la generación de escurrimiento por evento de precipitación cada minuto durante el periodo del 21 de mayo al 21 de noviembre de 2017. Para más información referirse al trabajo de Arellano Leyva (2017). A su vez, se realizaron mediciones manuales de la altura de la columna de agua, utilizando una cinta métrica colocada en la parte exterior de los tanques, buscando corroborar el volumen de escurrimiento colectado.

De igual modo que para la precipitación, se remuestrearon las series de datos registradas cada 5 minutos por el limnógrafo y el barómetro. Una vez obtenidas las series se calculó el escurrimiento (Q) por evento siguiendo la metodología de Arellano Leyva (2017) :

1. Se obtuvo la altura real de las mediciones de la columna de agua mediante la compensación de fluctuaciones entre los registros del barómetro y el limnógrafo, haciendo:

$$\begin{aligned} & \text{Registros del limnógrafo (mm) - registros del barómetro (mm)} \\ & = \text{altura de la columna de agua (m)} \end{aligned}$$

2. Se realizó una conversión para obtener dicha altura en centímetros para estar en las mismas unidades que los registros realizados manualmente con la cinta métrica.
3. A partir de correlaciones entre los datos de la cinta métrica (cm) y la altura de la columna de agua (cm), se obtuvieron ecuaciones con las que se corrigieron los datos de la columna de agua.
4. Los datos corregidos fueron transformados a litros mediante la ecuación de calibración del tanque colector establecida previamente por Arellano Leyva (2017).
5. Finalmente, los valores obtenidos de columna de agua (L) fueron transformados a mm utilizando el área de cada azotea.

3.3 Medición de propiedades hidrofísicas del suelo

3.3.1 Humedad en suelo

Cada AVE fue equipada con una red de 14 sensores de capacitancia tipo 10 HS (Decagon, EUA) colocados diagonalmente en el sustrato a una profundidad de 5 cm (**Fig. 4 y 5**). Para registrar los contenidos volumétricos de agua (VWC) en el sustrato a una resolución de 5 minutos, se utilizaron tres registradores automáticos de datos Em50 de Decagon. Como ambas azoteas cuentan con una cobertura vegetal desarrollada, la exposición a la radiación solar no fue igual para todos los sensores, por tanto, algunos sensores quedaron bajo el dosel de algunas plantas y otros más expuestos.

Al igual que en la precipitación, las series de datos de humedad fueron descargadas de los registradores cada 2 semanas aproximadamente, y se concatenaron en Python para obtener las series de tiempo durante el período de estudio (21 de mayo al 21 de noviembre de 2017). Una vez que se obtuvo una serie completa a una resolución de 5 minutos por azotea, se realizaron las correcciones necesarias para que ésta no tuviera saltos o huecos, consiguiendo curvas continuas que posteriormente fueron llevadas a otras resoluciones y calibradas con ecuaciones calculadas empíricamente (ver próxima sección).



Figura 4. Ubicación de los sensores de capacitancia en la AVEcp.



Figura 5. Ubicación de los sensores de capacitancia en la AVEsp.

3.3.1.1 Calibración de sensores de humedad

Los datos crudos provenientes de los sensores de humedad requieren de una calibración específica de acuerdo al tipo de suelo con el que se está trabajando. El manual de los sensores sugiere diferentes ecuaciones, no obstante, para obtener los contenidos de humedad del sustrato más cercanos a los valores reales, se

llevó a cabo un experimento para hallar la ecuación de calibración específica según cada azotea y condición del sustrato. Así, siguiendo la metodología de Flores (2016), se hizo lo siguiente:

1. Se identificaron tres condiciones de sustrato en cada azotea; suave, compacto y mezcla, que fueron removidos procurando perturbar en la menor medida posible la estructura del suelo. Para esto, se utilizó un contenedor de plástico (estilo tupper) de medidas 35.9 cm x 19.7 cm x 12.4 cm como molde, cuya base fue recortada para poder enterrarse en el sustrato (**Fig. 6**). Una vez que el molde se insertaba por completo en el área a extraer, fue necesario escarbar por los costados exteriores de éste para introducir la base del molde y sacar la muestra. Cada una fue colocada en un recipiente igual al molde, previamente perforado para facilitar la evaporación del sustrato y la introducción de un sensor de capacitancia como aquéllos que se instalaron en las azoteas. Además, se colocó una capa de malla para evitar la pérdida de sustrato a través de los agujeros.
2. Una vez que se tuvieron las 6 muestras correspondientes a las tres condiciones de sustrato para las dos azoteas, se acomodaron de tal modo que fuera posible moverlas fácilmente para poder pesarlas (**Fig. 6**). Además, se introdujo de manera horizontal un sensor de capacitancia por muestra que se dejó registrando durante una semana para acoplarse a cada condición de sustrato.
3. Una vez que los sensores hicieron el suficiente contacto con el sustrato, el día 30 de abril de 2018 se tomaron los pesos de cada contenedor con sustrato, malla y sensor. Posteriormente, se saturó cada muestra utilizando de 5 a 6 L de agua y se dejaron secar por aproximadamente 48 horas.
4. A partir del día 02 de mayo de 2018 y hasta el día de 7 del mismo mes, se realizaron dos mediciones diarias de peso (kg) por cada muestra, una por la mañana (cerca de las 9 hrs) y la otra por la tarde (alrededor de las 16 hrs). Después del día 8 de mayo y hasta el 1 de junio, sólo se realizó una medición por día por la mañana (10:00 hr). Una vez que la variación de peso fue mínima entre mediciones, se redujo la frecuencia a cada 3 días, terminando el experimento el día 29 de junio de 2018. Para poder concluir el experimento, se graficaron los datos de humedad (RC) contra el peso (Kg) y se verificó que las muestras ya hubieran perdido cerca del 40% de su peso con respecto al valor medido en condiciones de saturación.
5. Posteriormente, se calcularon los valores de humedad volumétrica ($\Theta\%$) siguiendo las ecuaciones [2] y [4], utilizando la densidad aparente (g/cm^3) y el peso seco de la muestra (g) obtenidos en laboratorio y tomando la medición experimental como el valor del peso húmedo (g), restándole el peso (g) del contenedor con la malla y el sensor. Para esto, se seleccionaron los valores de humedad (RC) correspondientes a 5 minutos antes de tomar el respectivo peso (Kg), con la finalidad de tener la relación correcta, obteniendo aproximadamente 47 pares de datos de RC vs. Peso por todo el período de medición.
6. Para obtener las ecuaciones de calibración de cada muestra, se buscaron las curvas con el mejor ajuste para la relación $\Theta\%$ vs. RC. Para más detalle revisar el Anexo I.

7. Finalmente, se corrigieron los valores de humedad registrados por los sensores de acuerdo al tipo de sustrato en el que se encontraran (suave, compacto o mezcla) utilizando las curvas de calibración obtenidas.



Figura 6. (A) moldes a utilizar con malla y sensor; y (B) tratamientos acomodados.

Una vez que se obtuvieron las series de datos calibradas con las ecuaciones experimentales, se calibraron las mismas series crudas con las ecuaciones propuestas por las versiones 1 y 3 del manual de usuario de los sensores 10 HS de Decagon utilizados, con la finalidad de hacer una comparación entre calibraciones. Las ecuaciones propuestas mencionadas son genéricas desarrolladas para suelos minerales y son las siguientes:

$$\text{VWC}(\text{m}^3/\text{m}^3) = 1.17 \times 10^{-9} * (\text{RC})^3 - 3.95 \times 10^{-6} * (\text{RC})^2 + 4.90 \times 10^{-3} * (\text{RC}) - 1.9 \quad \text{Ec. [5]}$$

$$\text{VWC}(\text{m}^3/\text{m}^3) = 3.13\text{E}^{-7} * \text{RC}^2 - 1.47\text{E}^{-4} * \text{RC} - 5.82\text{E}^{-2} \quad \text{Ec. [6]}$$

3.3.2 Tasa de infiltración

Para conocer la tasa de infiltración de cada azotea, se realizaron 15 ensayos de infiltración por azotea en la superficie del sustrato utilizando un infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo (Gómez-Tagle et al., 2008).

Las pruebas realizadas en campo durante el mes de diciembre de 2017 consistieron en:

1. Seleccionar los puntos y tipos de sustrato a saturar en cada una de las azoteas.
2. Instalación del equipo (**Fig. 7**), colocando el reservorio principal (B) lo más horizontal y estable posible y clavando el anillo de acero (F) hasta alcanzar el nivel del suelo.
3. Asegurarse que la válvula de paso (E) estuviera cerrada y que, una vez recargado de agua el reservorio principal, el tapón de éste estuviera bien puesto y el tubo de burbujeo (C) colocado 10 cm por fuera del tapón.
4. Con reloj en mano marcando la hora en formato hh:mm:ss, se liberó la válvula de paso y mientras una persona indicaba cada que la columna de agua disminuiera en 5 cm, la otra anotaba la hora exacta en que sucedía.
5. Los pasos 3 y 4 eran equivalentes a una recarga del reservorio, y se repitieron las veces que fueran necesarias hasta que se alcanzara una constante de tiempo en la tasa de infiltración instantánea.

En total, se realizaron entre 2 y 4 recargas del reservorio principal por cada ensayo de infiltración y a partir de ello se calculó el valor de K_{fs} siguiendo el método de Gómez-Tagle (2008).

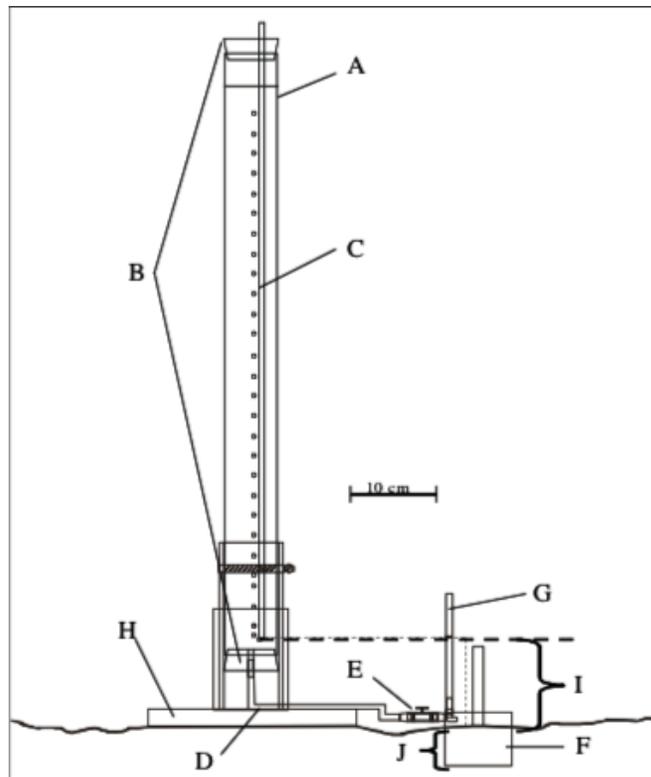


Figura 7. Esquema del infiltrómetro utilizado. Imagen tomada de Gómez-Tagle (2008)

3.4 Colecta de muestras del sustrato y análisis en laboratorio

Durante los meses de abril y octubre de 2017, muestras de sustrato fueron colectadas para su análisis en el Laboratorio de Suelos del Instituto de Ecología (INECOL) en Xalapa, Veracruz. En total por azotea, se enviaron 12 muestras para

conocer la humedad a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), correspondientes a tres del tratamiento compacto y tres del suave y sus duplicados; seis muestras para determinar densidad aparente (DA), de igual modo tres y tres; dos muestras compuestas de 500 g para materia orgánica (MO) y densidad real (DR); y tres muestras más de 500 g para el cálculo de peso seco (PSS), una por molde utilizado para la calibración.

Para CC y PMP, la extracción en campo se llevó a cabo utilizando cilindros de acero inoxidable de 5 cm de diámetro y 2 cm de altura (**Fig. 8**) siguiendo los pasos:

1. Identificación del sustrato: se buscaron tres secciones en cada azotea cuyo sustrato fuera suave y tres de compacto, y en cada una de esas secciones se sacaron dos muestras, considerando a una de éstas como duplicado de la otra.
2. Una vez seleccionado el sitio, se deshirió cortando a ras cualquier planta, dejando la superficie del sustrato lo más limpia posible.
3. Con ayuda de un martillo de cabeza de goma, se clavó cada cilindro en el sustrato, procurando no perturbar la estructura del suelo.
4. Para retirar cada muestra, fue necesario escarbar toda la periferia del cilindro y cortar raíces que evitaran el retiro del cilindro. Para asegurar la parte inferior de cada muestra, se introdujo una espátula para sacar la muestra entera siguiendo la disposición original del sustrato.
5. Cada cilindro se envolvió con aluminio y fue nombrado con su correspondiente clave (**Fig. 8**).



Figura 8. (A) muestra de CC-PMP en cilindro de acero inoxidable; y (B) muestras empaquetadas y numeradas.

En total 24 muestras fueron colectadas. Para determinar los valores de CC y PMP en laboratorio, se utilizaron membranas de presión siguiendo a su vez el método AS-06 [NOM-021-RECNAT-2000] establecido. En éste, se aplican distintas succiones a las muestras colocadas dentro de una olla de presión con una lámina de agua destilada; el contenido de humedad obtenido a las presiones de 0.33 y 15 bar serán la humedad a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), respectivamente. Para más información, revisar la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Para la densidad aparente (DA) se utilizaron anillos de acero inoxidable de 5 x 5 cm, repitiendo el mismo proceso enunciado anteriormente, pero sin extraer duplicados. Su determinación fue a través del método AS-03 utilizando parafina, donde un terrón de la muestra es secado al horno a una temperatura de 105° C y cubierto con una capa de parafina derretida a 60° C; con estos parámetros se obtienen la masa del suelo y su volumen, teniendo los datos necesarios para el cálculo de densidad.

Las muestras compuestas para conocer materia orgánica y densidad real (entre otros parámetros) se colectaron tomando entre 150-175 g de sustrato de los mismos tres puntos de donde se sacaron las muestras de DA, buscando tener 500 g correspondientes a cada tratamiento (compacto y suave). La tierra fue cernida con colador para evitar que grandes raíces o rocas se fueran en la bolsa (**Fig. 9**). La determinación de materia orgánica se realizó con base en el método AS-07 de Walkley y Black, mientras que para la densidad real se utilizó un picnómetro y el método AS-04, ambos descritos en la NOM-021-RECNAT-2000.



Figura 9. Procesamiento de muestra compuesta antes de ser empacada.

Las muestras del peso seco (PSS) fueron extraídas directamente de los contenedores utilizados para el experimento de la calibración de sensores. Los valores de PSS se obtuvieron secando a horno las muestras a 105° C durante el tiempo necesario hasta alcanzar un peso constante.

Por último, se realizaron 12 mediciones de profundidad de sustrato por azotea. Las mediciones buscaron abarcar cada uno de los cuadrantes, realizándose con una regla metálica y un mazo, seleccionando el punto de medición a una cercanía aproximada no mayor a 10 cm del sensor de humedad más cercano del cuadrante.

3.5 Análisis de datos

3.5.1. Selección de eventos precipitación-escorrimento

Para poder relacionar el escurrimiento (Q) con su respectivo evento de precipitación (P) y generar una serie de datos confiable, se definieron los siguientes criterios:

- A. Ambas variables debían de tener la totalidad de sus datos.
- B. Los eventos en los que el volumen de agua acumulada por escurrimiento rebasó el 90% de la altura del tanque colector no fueron tomados en cuenta.

Con la base de datos de precipitación-escorrimento obtenida, se calculó el coeficiente de escurrimiento (Q/P), referente a qué proporción de lo precipitado se observó como escurrimiento. Asimismo, se realizaron pruebas estadísticas para comparar los coeficientes de escurrimiento entre las azoteas.

3.5.2 Mecanismos de generación de escurrimiento en las azoteas verdes

Para evaluar la generación de escurrimiento superficial por exceso de infiltración, se compararon los datos de precipitación, específicamente de intensidad de lluvia (mm hr^{-1}) a las tres resoluciones estudiadas (5, 30 y 60 minutos), con los datos obtenidos de K_{fs} en campo (mm hr^{-1}). Para ello, se analizaron únicamente los eventos de precipitación iguales o mayores a 5 mm, pues a partir de esta cantidad se observó la generación de escurrimiento, siendo 53 de los 112 eventos de lluvia registrados en el período de estudio.

Se realizó una gráfica con valores de (mm hr^{-1}) en el eje horizontal, trazando líneas verticales correspondientes a las intensidades máximas y medias de precipitación por cada una de las resoluciones y en el mismo espacio, se graficaron dos gráficas de cajas (una por cada azotea) con los datos de conductividad hidráulica del suelo (K_{fs}). Esta gráfica indica el potencial de infiltración en condiciones de saturación en mm hr^{-1} de cada azotea y si es capaz de absorber las precipitaciones máximas y medias de cada una de las resoluciones por los distintos eventos analizados.

Por otra parte, para evaluar si hubo generación de escurrimiento superficial por exceso de saturación, se seleccionaron cuatro diferentes arreglos de eventos de lluvia y precipitación antecedente para examinar las distintas respuestas de las azoteas e identificar sus áreas de contribución en la generación de escurrimiento.

Los criterios que se utilizaron fueron:

- A. Tamaño del evento:
 - a. Menor o igual a 9.3 mm (promedio de la precipitación total de todos los eventos).
 - b. Mayor o igual al doble del valor promedio (18.6 mm).
- B. Antecedente de precipitación a 7 días (API 7 [mm]):
 - 1. Menor o igual a 39.5 mm (promedio).
 - 2. Mayor o igual a 80.0 mm (doble del valor promedio).
- C. Que se haya generado escurrimiento.
- D. Que se cumpla para ambas azoteas.

Siguiendo estos criterios, se comparó la serie calibrada de humedad en sustrato contra el valor de capacidad de campo por azotea y por tratamiento. Si la humedad en el sustrato era mayor que el valor a capacidad de campo y existía un escurrimiento asociado al evento de precipitación, entonces se consideró que el mecanismo por exceso de saturación sí tuvo lugar en la generación de escurrimiento.

Para visualizar gráficamente este proceso, se representó a cada azotea como una cuadrícula de 12 (4 x 3) secciones. Ya que ambas azoteas miden cerca de 37 m² y fueron divididas en 12 cuadrantes, se consideró cada cuadrante como un área de aproximadamente 3.1 m². Se realizó un programa en Python para indicar si se rebasó la capacidad de campo en el punto máximo de humedad observado en el sustrato durante los eventos de precipitación seleccionados, marcando las secciones en donde sí. Al rebasarse la capacidad de campo en estas secciones, se pudieron distinguir cuáles fueron las áreas de contribución en la generación de escurrimiento de cada azotea simplemente multiplicando el número de secciones por el área equivalente de 3.1 m².

Por último, en aquellos casos donde la intensidad de lluvia no sobrepasó la tasa de infiltración y la humedad del sustrato no rebasó el valor de capacidad de campo, pero sí hubo registro de escurrimiento en las azoteas, se consideró que la generación de éste podía atribuirse a flujos subsuperficiales (> 5 cm en el sustrato, en este caso).

4. Resultados

4.1 Precipitación

Durante el periodo estudiado (21 de mayo al 21 de noviembre del 2017), se registró una precipitación total de 1033.4 mm distribuida en 112 eventos, con una duración promedio por evento de 265 minutos (ca. 4.5 hrs). El evento con la mayor cantidad de precipitación tuvo lugar el 18 de agosto de 2017, registrando un total de 52.8 mm. En la Tabla 4 pueden encontrarse las intensidades máximas y promedio de la lluvia a las tres resoluciones analizadas. En la Tabla 5 se presentan los valores mínimo, máximo y promedio de la precipitación antecedente a 7 días (AP 7 [mm]).

Tabla 4. Valor promedio de la intensidad máxima y promedio de precipitación por resolución estudiada.

Resolución (minutos)	5	30	60
Intensidad máxima (mm hr ⁻¹)	21.17	8.64	5.56
Intensidad promedio (mm hr ⁻¹)	2.99	2.08	1.69

Tabla 5. Estadísticos básicos referentes a la precipitación antecedente a 7 días.

Estadístico	AP 7 [mm]
Mínimo	0
Máximo	153.20
Promedio	39.51

4.2 Coeficiente de escurrimiento (Q/P)

Los resultados mostraron que hubo 60 y 79 eventos en los que se generó escurrimiento en la AVEcp y AVEsp, respectivamente, cuyos valores promedio, máximo y mínimo de coeficiente de escurrimiento se reportan en la Tabla 6. Cabe mencionar que en 5 eventos de precipitación fuerte se registró desbordamiento de los tanques colectores en ambas azoteas, por lo que esos eventos no se consideraron en el análisis, como se explicó en la sección **3.5.2**.

De manera general, puede verse que la AVEcp presenta un coeficiente de escurrimiento promedio mayor que el de la AVEsp (0.39 ± 0.35 contra 0.35 ± 0.39), no obstante, pruebas estadísticas mostraron que no hay diferencias significativas entre ambas azoteas ($p = 0.89$).

Tabla 6. Valores promedio (\pm DE), máximo y mínimo de Q/P para ambas azoteas.

	Q/P AVEcp	Q/P AVEsp
Promedio	0.39 \pm 0.35	0.35 \pm 0.39
Máximo	0.97	1.08
Mínimo (> 0)	0.02	0.05

4.3 Parámetros fisicoquímicos del sustrato

De los análisis de sustrato en laboratorio se obtuvo que, en general, la AVEcp registró las mayores densidades aparentes (0.85 g/cm^3) y reales (2.45 g/cm^3) comparado con la AVEsp (0.63 g/cm^3 y 2.25 g/cm^3 , respectivamente). A su vez, la AVEsp presentó los porcentajes más altos de materia orgánica (15.3%) y porosidad (72.3%), mientras que los valores obtenidos para la AVEcp fueron, respectivamente, 12.3% y 65.6%. Para más información sobre los parámetros obtenidos en laboratorio, referirse a la Tabla 13 en el Anexo II.

A nivel de tratamientos se obtuvo el mismo comportamiento en ambas azoteas, es decir, los sustratos compactos fueron los que reportaron las mayores densidades reales y aparentes, mientras que los sustratos suaves presentaron los porcentajes más altos de materia orgánica y porosidad. De todos los tratamientos, el compacto de la AVEcp registró la mayor densidad aparente con 0.91 g/cm^3 , por el contrario el tratamiento suave de la AVEsp reportó el valor promedio más bajo con 0.52 g/cm^3 . Por otro lado, el tratamiento suave de la AVEsp obtuvo los mayores porcentajes de materia orgánica (15.63 %) y porosidad (74%) y el compacto de la AVEsp los menores (10.8 % y 63.6%, respectivamente). De manera general, los tratamientos suave en la AVEsp y compacto en la AVEcp obtuvieron, respectivamente, los valores más altos y más bajos de los parámetros estudiados, mientras que los tratamientos suave en la AVEcp y compacto en la AVEsp mostraron siempre valores intermedios.

La profundidad del sustrato fue ligeramente mayor en la AVEsp con 13.2 cm en promedio, comparado con 10.3 cm en la AVEcp. La mayor profundidad se encontró en la AVEsp con 15.6 cm, mientras que la menor de 6.6 cm fue registrada en la AVEcp.

4.4 Humedad en el sustrato

4.4.1 Calibración por tratamientos

A partir del procedimiento descrito en la sección 3.3.1.1 se obtuvieron las ecuaciones de calibración por cada tratamiento en las azoteas verdes estudiadas que se reportan en la Tabla 7. En éstas, y corresponde a los valores calibrados de humedad volumétrica ($\Theta\%$) y x a los datos crudos registrados por cada sensor.

Tabla 7. Ecuaciones de calibración de sensores de humedad de cada tratamiento y su respectivo R². Se reporta para ambas azoteas: con pendiente (AVEcp) y sin pendiente (AVEsp).

Tratamiento	Ecuación	R ²
AVEcp compacto	$y = -84.9 + 0.183x + -4.33E-05x^2$	0.988
AVEcp mezcla	$y = -64.2 + 0.139x + -2.58E-05x^2$	0.988
AVEcp suave	$y = -79.2 + 0.146x + -2.58E-05x^2$	0.985
AVEsp compacto	$y = -104 + 0.199x + -5.88E-05x^2$	0.996
AVEsp mezcla	$y = 0.0763x + -47.5$	0.988
AVEsp suave	$y = 4.38 + -0.0173x + 3.63E-05x^2$	0.997

Una vez corregidos los datos, se obtuvieron los valores reales de humedad volumétrica ($\Theta\%$) reportados en la Tabla 8; también se reportan los valores de CC y PMP (%) obtenidos en laboratorio. Puede verse que los valores de CC y PMP para la AVEsp fueron mayores que los de la AVEcp, no obstante, los valores de $\Theta\%$ observados en la AVEcp fueron en promedio mayores comparado con la AVEsp (Tabla 8).

En las Figuras 10 y 11 se presentan las series de humedad corregidas utilizando las ecuaciones de calibración por tratamiento en ambas azoteas, así como las líneas de CC y PMP promedio por azotea. Puede verse que la $\Theta\%$ en la AVEcp rebasó el valor de CC en todos los casos durante el período estudiado, estando por debajo del PMP únicamente durante la canícula (a finales de junio), así como al comienzo y final del periodo estudiado. Esto quiere decir que hubo generación de escurrimiento por exceso de saturación en prácticamente todo el período estudiado en todas las porciones de la azotea. Por el contrario, en la AVEsp la mayoría de los valores de humedad se ubicaron en el rango de humedad de agua aprovechable por las plantas y por debajo del PMP; sólo en un par de eventos de lluvia, la humedad rebasó el valor de CC (Fig. 11). Esto significa que el aporte al escurrimiento por exceso de saturación no fue un mecanismo dominante en esta azotea, sugiriendo que la generación de escurrimiento podía atribuirse casi totalmente a flujos subsuperficiales entre los 5 y 10 cm de profundidad.

En ambos casos se observa que los valores más altos de $\Theta\%$ correspondieron a los tratamientos compactos, mientras que los valores más bajos fueron observados en los tratamientos suaves (Figs. 10 y 11).

Tabla 8. Valores de humedad volumétrica (Θ %) máximos, mínimos y promedio obtenidos a partir de las calibraciones.

Tratamiento	Θ min (%)	Θ máx (%)	Θ prom (%)	PMP (%)	CC (%)
AVEcp compacto	20.63	91.42	69.25	25.55	36.6
AVEcp mezcla	16.82	82.33	66.11	28.59	39.93
AVEcp suave	9.47	80.78	52.63	31.63	43.27
AVEsp compacto	8.91	63.39	51.02	53.01	61.68
AVEsp mezcla	7.66	66.11	42.31	42.35	55.66
AVEsp suave	10.22	55.26	35.64	31.70	49.64

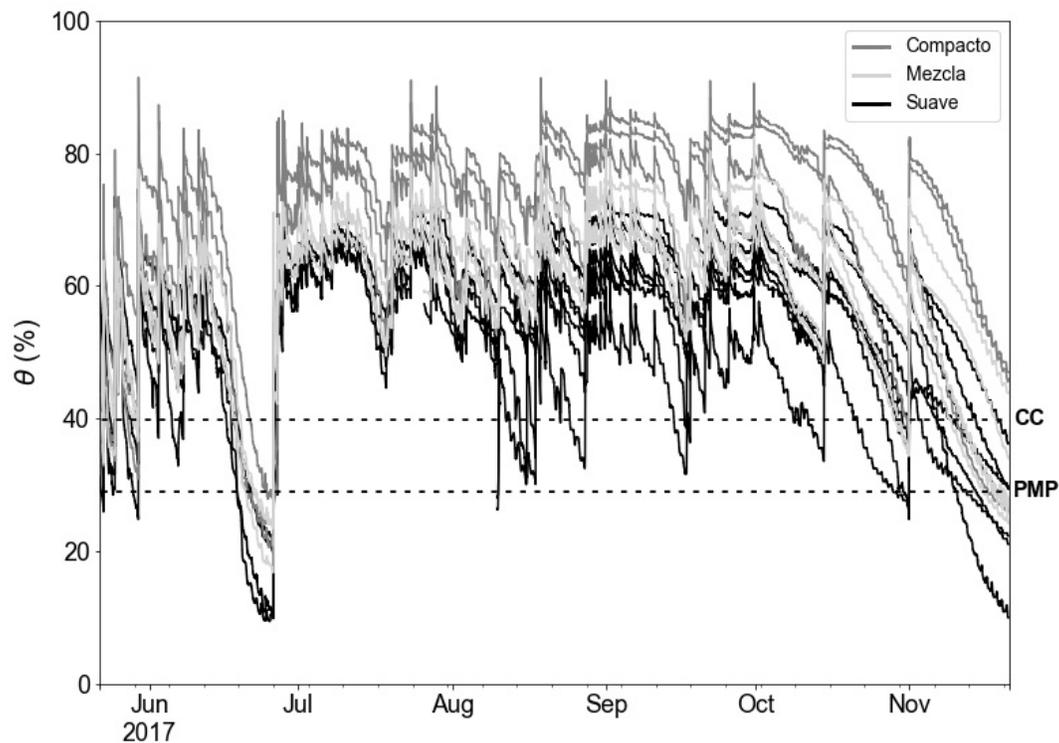


Figura 10. Serie de humedad AVEcp calibrada de acuerdo con los tres tratamientos.

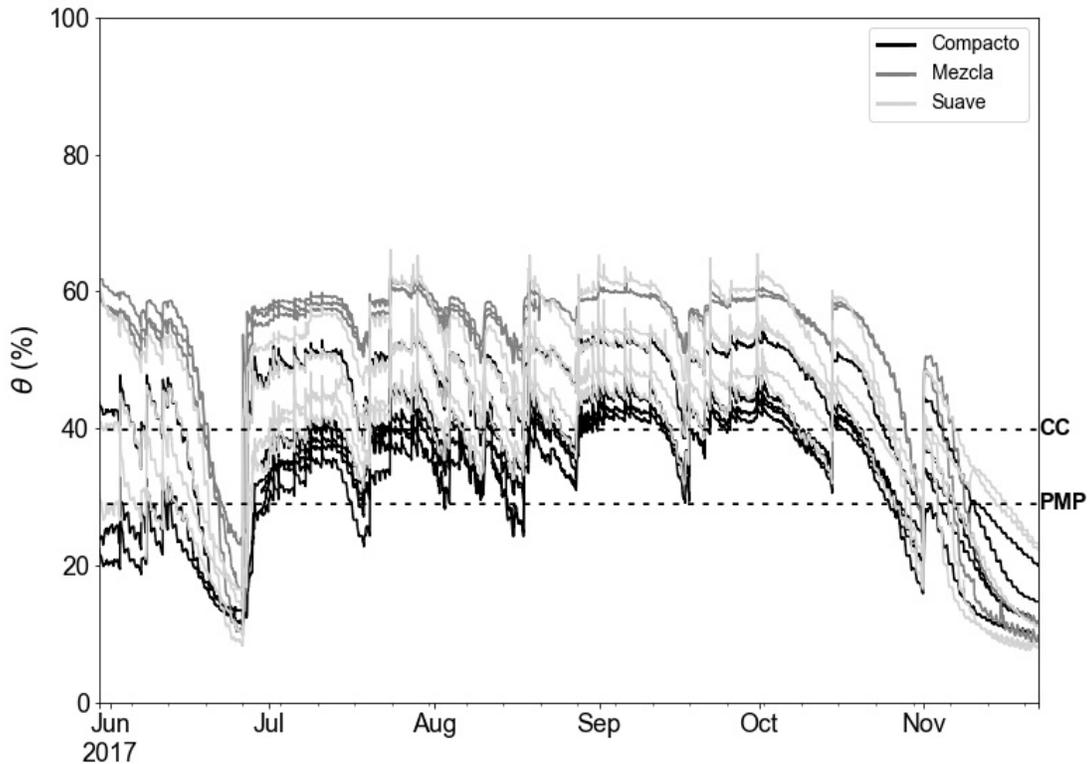


Figura 11. Serie de humedad AVEsp calibrada de acuerdo con los tres tratamientos.

4.4.2 Calibración experimental contra ecuaciones genéricas

En la comparación de calibraciones (**Figs. 12 y 13**) se obtuvo que en ambas azoteas, los valores más altos de $\theta\%$ fueron los de la calibración realizada como parte de este trabajo, seguido de aquéllos de la versión 3 (**Ec. 5**) del manual de equipo y como valores más bajos los de la versión 1 (**Ec. 6**) del mismo manual. Puede verse que en la AVEcp (**Fig. 12**) hay un incremento de casi el doble entre los valores de $\theta\%$ de la calibración experimental contra los valores de las ecuaciones genéricas, teniendo una diferencia de $\theta\% = 10$ entre las ecuaciones genéricas V1 y V3 y de $\theta\% = 30$ entre la ecuación obtenida experimentalmente y la V3. Esto quiere decir que de haberse utilizado las ecuaciones genéricas, los valores de humedad en el sustrato de la AVEcp se habrían subestimado entre un 43 y 57%.

Por otro lado, la AVEsp (**Fig. 13**) presentó un comportamiento más gradual entre calibraciones, es decir, la diferencia entre los valores de $\theta\%$ obtenidos a través de las versiones de calibración V1 y V3 del manual fue similar a la diferencia entre la versión V3 y la calibración realizada experimentalmente, aumentando $\theta\% = 10$ entre cada una de las tres. En este caso, de haberse utilizado las ecuaciones genéricas, se habrían subestimado los valores de humedad entre un 20 y un 40%.

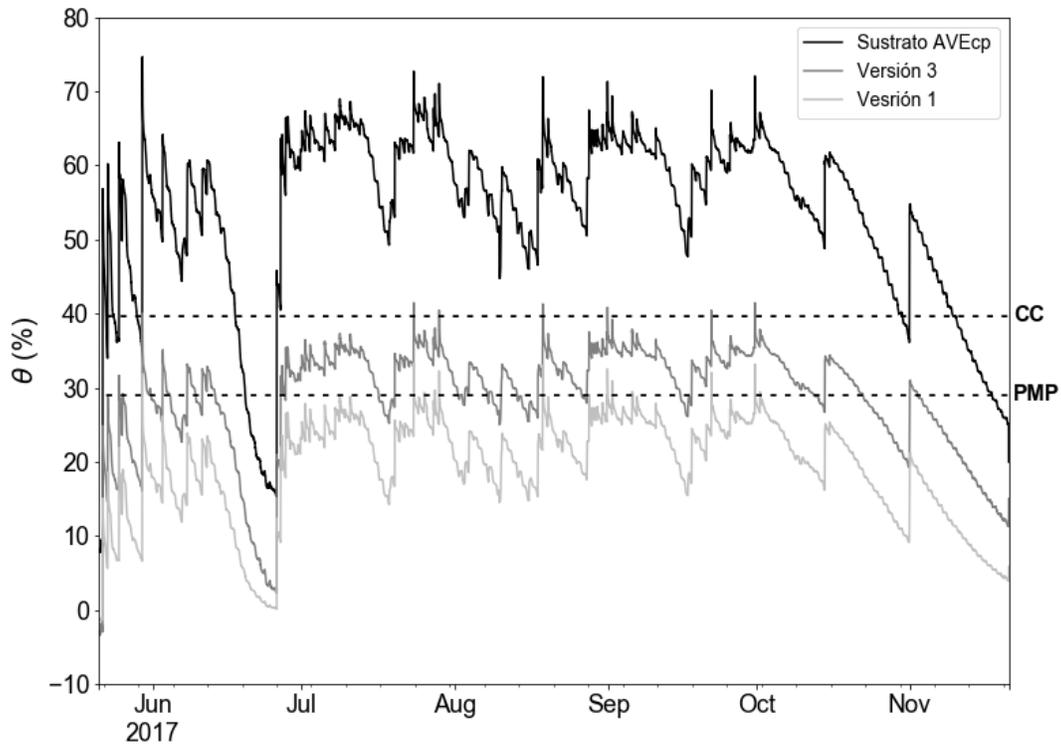


Figura 12. AVEcp: comparación entre los promedios de las calibraciones propuestas por el manual y la calibración realizada experimentalmente.

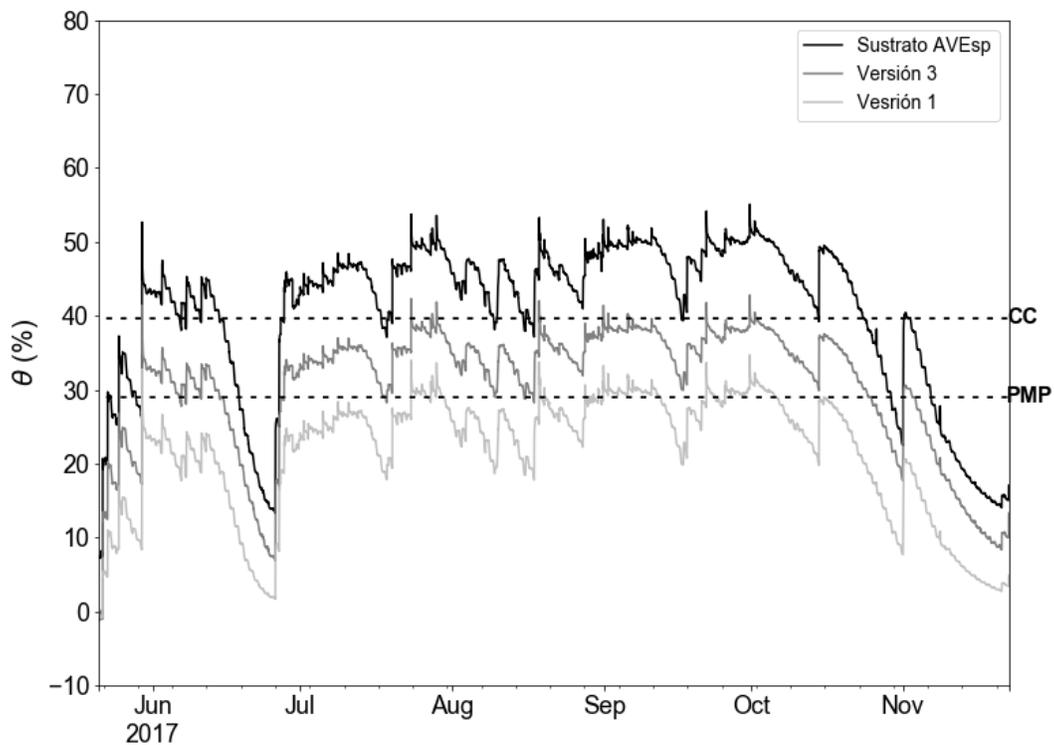


Figura 13. AVEsp: comparación entre los promedios de las calibraciones propuestas por el manual y la calibración realizada experimentalmente.

4.5 Respuesta y conectividad hidrológica

4.5.1 Generación de escurrimiento por exceso de infiltración

En la Tabla 9 se presentan los eventos de precipitación que se utilizaron para contrastar la capacidad de infiltración de los sustratos en ambas azoteas. Es notorio que a medida que la resolución de la lluvia fue disminuyendo, la intensidades máxima y promedio lo hicieron también.

En la Tabla 10 se reportan los valores de K_{fs} obtenidos en las pruebas realizadas con el infiltrómetro en campo. Puede verse que en todos los casos, la tasa de infiltración en la AVEcp es aproximadamente el doble que la observada en la AVEsp. Esto mismo se refleja en la Figura 14, donde además se muestra que hubo una mayor variabilidad en las tasas de infiltración en la AVEcp. También se observa que para ambas azoteas, ninguna de las intensidades de lluvia a las distintas resoluciones rebasó la tasas de infiltración de los sustratos, lo cual sugiere que la generación de escurrimiento superficial por exceso de infiltración no tuvo lugar en las AVEs estudiadas.

Tabla 9. Eventos de precipitación seleccionados.

Resolución (minutos)	Eventos ≥ 5 mm; $n = 53$		
	5	30	60
Intensidad máxima (mm hr ⁻¹)	39.03	16.64	10.70
Intensidad promedio (mm hr ⁻¹)	4.38	3.59	3.03

Tabla 10. Valores promedio (\pm DE), máximo y mínimo de K_{fs} obtenidos en ambas azoteas.

Azotea	AVEsp	AVEcp
K_{fs} promedio (mm hr ⁻¹) \pm DE	394.48 \pm 548.72	744.73 \pm 302.50
K_{fs} mínima (mm hr ⁻¹)	57.84	111.96
K_{fs} máxima (mm hr ⁻¹)	992.04	2374.01

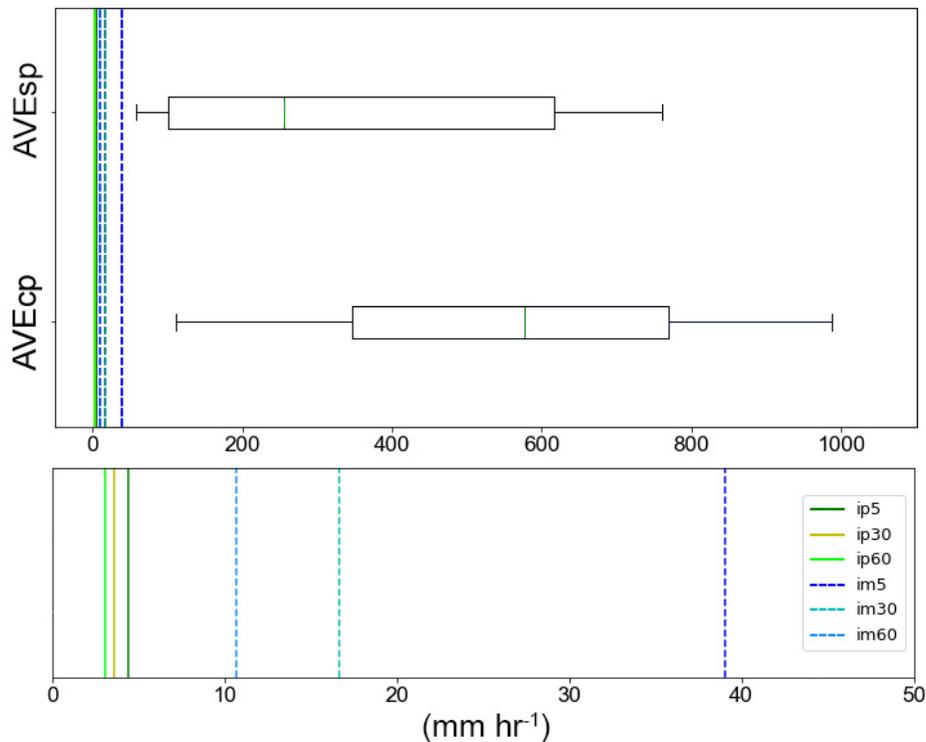


Figura 14. En la figura superior se muestran las tasas de infiltración en diagramas de caja (k_{fs} [mm hr^{-1}]) de cada azotea; en la figura inferior se muestran las líneas aumentadas, donde las continuas representan las intensidades de precipitación a las tres resoluciones estudiadas (5, 30 y 60 minutos) y las punteadas las intensidades máximas a esas mismas resoluciones.

4.5.2 Generación de escurrimiento por exceso de saturación

Siguiendo los criterios descritos en la sección 3.5.1, se encontraron 17 eventos que cumplieron con las restricciones de cantidad de precipitación y antecedente de humedad (a_1 , a_2 , b_1 ó b_2) analizados. Primeramente, el coeficiente de escurrimiento (Q/P) de los 17 eventos seleccionados no difirió significativamente de una distribución normal. Entre azoteas, las pruebas estadísticas no sugirieron diferencias ($p = 0.78$). Los valores promedio (\pm DE) fueron 0.56 ± 0.24 para la AVEcp y de 0.57 ± 0.33 para la AVEsp. En las Tablas 11 y 12 se resume la información de estos eventos.

Para evaluar las áreas de contribución a la generación de escurrimiento por exceso de saturación en ambas azoteas, se analizaron cada uno de estos eventos de forma independiente, obteniéndose los resultados que se presentan a continuación.

A cantidades bajas de precipitación (≤ 9.3 mm) y antecedentes de precipitación bajos ($AP \leq 39.51$ mm) (categoría a_1), se registraron los valores más bajos de Q/P en ambas azoteas, con 0.3 mm para la AVEcp y 0.26 mm en la AVEsp. El área de contribución promedio en la AVEsp fue de 6.2 m^2 equivalente al

16.8% de su superficie total, mientras que en la AVEcp fue de 34.1 m², equivalente al 92.2% de su superficie.

A cantidades bajas de precipitación (≤ 9.3 mm) y antecedentes de precipitación altos ($AP \geq 80$ mm) (categoría a2), se encontraron valores similares de Q/P para ambas azoteas, siendo ligeramente mayor en un 10% en la AVEsp con respecto a la AVEcp. Las áreas de contribución fueron de 6.2 m² (16.8% de su superficie total) para la AVEsp y de 34.1 m² (92.2% del área total) para la AVEcp.

A cantidades altas de precipitación (≥ 18.6 mm) y antecedentes de precipitación bajos ($AP \leq 39.51$ mm) (categoría b1), se obtuvo un Q/P mayor (10%) en la AVEcp con respecto a la AVEsp. Las áreas de contribución resultaron ser exactamente las mismas en promedio que en la categoría anterior.

A cantidades altas de precipitación (≥ 18.6 mm) y antecedentes de precipitación altos ($AP \geq 80$ mm) (categoría b2), se obtuvieron los mayores valores de Q/P , con 0.85 mm en la AVEcp y 0.96 mm en la AVEsp. De igual modo, el área de contribución fue el mayor en promedio observado en la AVEsp con 9.3 m², equivalente al 25.1%, mientras que en la AVEcp el área de contribución permaneció constante como en todos los casos anteriores (34.1 m²; 92.2% de su superficie).

Tabla 11. Eventos de precipitación que cumplen con los criterios.

Tipo	No. de eventos	Q/P promedio AVEcp	Q/P promedio AVEsp
a1	3	0.30	0.26
a2	4	0.50	0.60
b1	6	0.54	0.45
b2	4	0.85	0.96

Para ejemplificar lo anterior, se seleccionaron y graficaron cuatro eventos (uno por categoría) que cumplieran con los criterios designados (Tabla 12). Los eventos seleccionados se muestran en las Figuras 15 y 16; en ellas puede verse que para la AVEcp, el valor de CC fue rebasado para los 4 eventos de precipitación seleccionados, mientras que en la AVEsp el valor de CC fue rebasado por cinco sensores como máximo.

Tabla 12. Eventos de precipitación seleccionados.

Tipo	Período (inicio y fin)	Duración (h)	Precipitación total (mm)	AP 7 (mm)	Q/P AVEcp	Q/P AVEsp
a1	15/10/17 18:10 15/10/17 19:45	1.6	5	29.8	0.43	0.40
a2	01/09/17 08:45 01/09/17 09:45	1	1.4	135.6	0.50	0.74
b1	30/09/17 02:30 30/09/17 17:20	14.8	30.2	39.4	0.89	1.0
b2	28/07/17 19:35 28/07/17 20:15	0.66	25.6	106.4	0.89	0.98

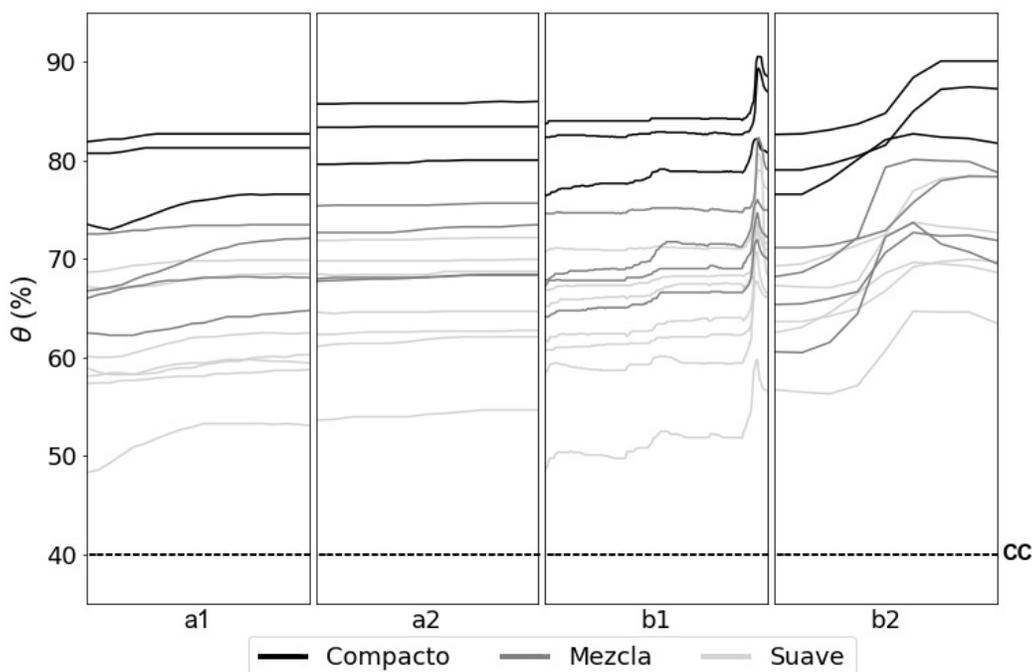


Figura 15. Eventos de precipitación seleccionados para la AVEcp.

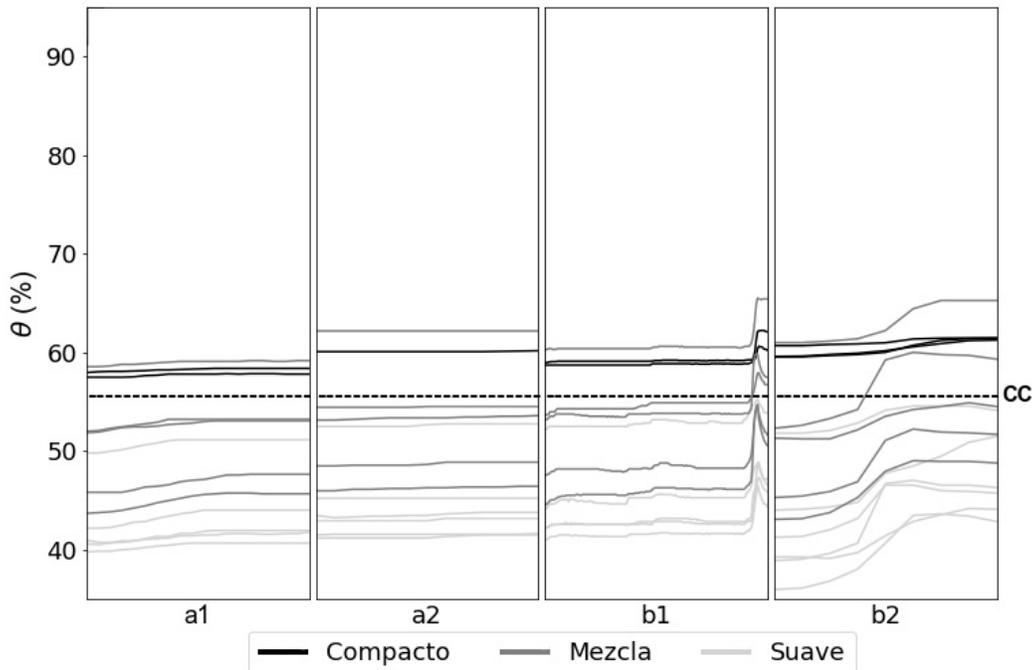


Figura 16. Eventos de precipitación seleccionados para la AVEsp.

En la Figura 17 se despliegan los promedios de $\theta\%$ obtenidos por azotea junto con los eventos de precipitación registrados durante el período estudiado. En general, se observa que la AVEcp es más responsiva, registrando los valores más altos y con picos más pronunciados comparado con la AVEsp para los mismos eventos de precipitación. Asimismo, la AVEcp registró en promedio los mayores contenidos de humedad volumétrica (53.6%) comparado con la AVEsp (40%) durante el período observado.

En las Figuras 18 y 19 se muestran las azoteas divididas en 12 cuadrantes, y en marca de agua sobre éstos se indica cuáles de ellos rebasaron el valor de CC, actuando como áreas de contribución en la generación de escurrimiento superficial por exceso de saturación. Para el caso de la AVEcp, la azotea reaccionó en su totalidad a todos los eventos de precipitación seleccionados, esto quiere decir que en el 100% de los casos seleccionados, hubo un área de contribución de 34.1 m². Es importante mencionar que no consideró los 37 m² de la superficie total de la azotea pues hubo un cuadrante que no tuvo sensor y no se pudo tomar en cuenta (Figura 18).

En la Figura 19 se muestra un evento de precipitación por cada tipo de evento seleccionado (a1, a2, b1 y b2) en la AVEsp, y claramente se percibe que para esta azotea hubo más dinámica en las áreas de contribución: de acuerdo con las áreas sombreadas, en los casos de eventos a1 y a2, únicamente dos cuadrantes reaccionaron rebasando la CC, con un área de contribución de 6.2 m². En cuanto a los eventos b1 y b2 graficados, se obtuvieron 15.5 y 12.4 m², respectivamente. De los 17 eventos seleccionados, el 47% de las veces el área de

contribución fue de 6.2 m², el 23.5% de 12.4 m², el 11.8% no se generaron áreas de contribución y lo restante son casos puntuales de 3.1, 12.4 y 15.5 m².

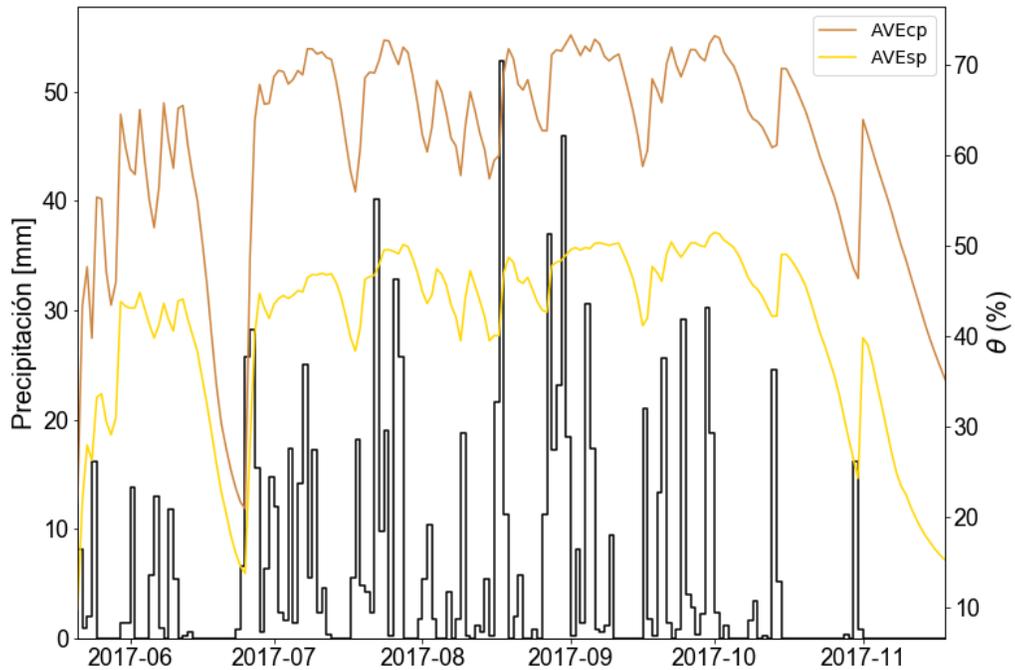


Figura 17. Promedios de humedad volumétrica de ambas azoteas vs. precipitación en el período observado.

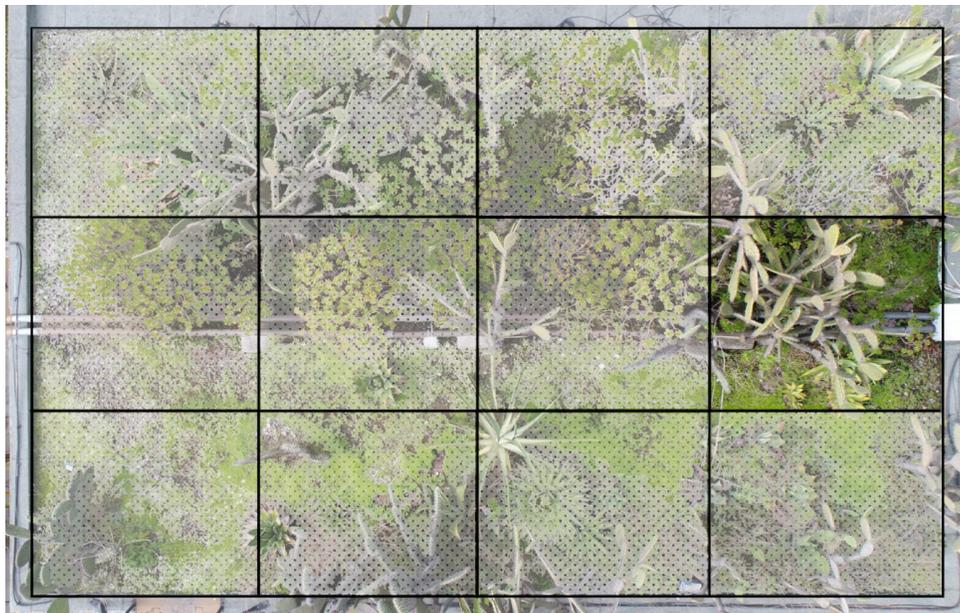


Figura 18. AVEcp; en marca de agua se destaca cuáles cuadrantes de la azotea rebasaron la capacidad de campo durante los eventos de precipitación seleccionados.



Figura 19. AVEsp; en marca de agua se destaca cuáles cuadrantes de la azotea rebasaron la capacidad de campo durante los eventos de precipitación seleccionados

5. Discusión

5.1 Humedad en el sustrato: calibración experimental contra ecuaciones genéricas

Los resultados de la calibración experimental realizada a los sensores de humedad en los distintos tratamientos de sustrato, mostraron aumentos en los contenidos volumétricos de humedad ($\Theta\%$) entre 43-57% para la AVEcp y entre 20-40% para la AVEsp, comparado con los valores utilizando las ecuaciones genéricas.

Al respecto, este es el primer trabajo que realiza una calibración específica del sustrato utilizado en la gran mayoría de las azoteas verdes extensivas en la Ciudad de México, por tanto los resultados obtenidos pueden ser utilizados como referencia para estudios futuros. La variación entre las calibraciones específicas y la sugerida por el manual recae en que esta última fue desarrollada para suelos minerales, mientras que el sustrato aquí estudiado es una fórmula creada específicamente para azoteas verdes extensivas, con alto contenido de roca porosa (tepojal) y materia orgánica (fibra de coco y composta). De hecho, en el manual de usuario de los sensores de capacitancia ECH2O se especifica que, debido a la complejidad de cada suelo, los valores de contenido volumétrico de agua (VWC) deben ser contrastados con otros métodos a pesar de tener mediciones precisas de la permitividad dieléctrica. Con respecto a la variación de los contenidos de humedad entre azoteas y demás propiedades medidas, cabe destacar que aunque en un inicio ambas azoteas poseían el mismo tipo de sustrato, la influencia de la vegetación, los factores hidrometeorológicos, el manejo e incluso la presencia de personas y animales, ha hecho que durante los 20 años que llevan instaladas, su estructura y propiedades del suelo en general diverjan. Además, al ser objetos de investigación, se les ha retirado y reemplazado volúmenes de sustrato en diferentes ocasiones.

Es importante también mencionar que de no haberse realizado esta calibración experimental, los resultados obtenidos habrían sido muy distintos, pues, como puede observarse en las Figuras 12 y 13, los valores de $\Theta\%$ habrían sido menores y habrían rebasado el valor de CC sólo en algunos eventos de precipitación en la AVEcp y para la AVEsp, la humedad se habría mantenido siempre por debajo del PMP. Por consiguiente, las áreas de contribución de la AVEcp hubieran disminuido drásticamente y en el caso de la AVEsp, no habrían, puesto que nunca se habría rebasado el valor de CC. Por último, al no rebasarse el valor de humedad a CC en las azoteas, se habría descartado también al exceso de saturación como mecanismo de generación de escurrimiento superficial, atribuyendo absolutamente todo el volumen de drenaje pluvial a la generación de flujos subsuperficiales.

En suelos de bosques en el noroeste del Pacífico, Czarnomski y colaboradores (2005) realizaron un estudio para comparar la exactitud y precisión de tres instrumentos diseñados para medir contenidos de agua en estos suelos,

entre ellos los sensores de capacitancia ECH2O utilizados en las AVEs estudiadas. Para esto, realizaron calibraciones específicas que compararon con las ecuaciones sugeridas por los fabricantes (Decagon, en este caso). Al comparar, encontraron que para los tres dispositivos investigados, las calibraciones estándar no predecían con exactitud los valores de humedad en suelo, por lo que una calibración específica resultó necesaria para aumentar la exactitud de los datos calibrados. Además, reportaron que para el caso específico del ECH2O, la ecuación genérica proporcionada por el manual de Decagon (sin especificar cuál versión), subestima los valores de $\theta\%$ entre 8% y 12% con respecto a las calibraciones específicas. Si bien las calibraciones específicas de este trabajo resultan subestimadas en un mayor rango (hasta 57%), es importante mencionar que el estudio realizado por Czarnomski (2005) se realizó en suelos forestales, por tanto las propiedades fisicoquímicas e hídricas de suelo pueden ser muy diferentes a los sustratos aquí estudiados.

5.2 Efecto de la pendiente en los patrones de humedad y escurrimiento

Los resultados mostraron mayores contenidos de humedad volumétrica en la AVEcp ($\theta\% = 53.6$ en promedio) comparado con la AVEsp ($\theta\% = 40$ en promedio) durante el período observado. En cuanto a coeficientes de escurrimiento (Q/P), la AVEcp registró valores promedio mayores que los observados en la AVEsp (0.39 ± 0.34 vs. 0.35 ± 0.39 , respectivamente); no obstante, pruebas estadísticas sugirieron no diferencias significativas entre ambas azoteas.

Revisando la literatura se encuentra que las opiniones están divididas acerca de la influencia de la pendiente en el drenaje de agua en respuesta a eventos de precipitación. Por un lado, Mentens (2005) señala, a partir de un estudio realizado en Bélgica, que características como la edad de las azoteas y la pendiente no se relacionan significativamente con el escurrimiento, mientras que la cantidad de precipitación, la estructura de capas y la profundidad del sustrato sí explica en gran medida los volúmenes de retención de agua, y consecuentemente de escurrimiento. En dicho estudio se analizaron 18 publicaciones y se especifica que las pendientes estudiadas eran de hasta 45° para azoteas verdes extensivas y menores a 10° en azoteas verdes intensivas. En esta misma línea, Getter (2007) menciona que Schade (2000) y Liesecke (1998) mostraron que pendientes de azoteas entre 2 y 58% tienen muy poca influencia en la retención para azoteas, según estudios realizados en Alemania. Por otra parte, estudios de Bengtsson (2005) realizados en Suecia indican que el almacenamiento de agua en azoteas verdes está determinada por la profundidad del sustrato, la humedad a capacidad de campo de éste y las condiciones de humedad en suelo previas a los eventos de lluvia, lo cual es congruente con los resultados de este estudio.

Por otro lado, autores como VanWoert (2005), Oberndorfer (2007) y Getter (2007) describen que según sus trabajos realizados en EUA y Canadá, la máxima capacidad de almacenamiento (y menor escurrimiento) se consigue con la combinación de menores pendientes y mayores profundidades, asegurando que

los factores determinantes en la capacidad de almacenamiento o la generación de escurrimiento son la profundidad del sustrato, la pendiente, el tipo de vegetación y los patrones de precipitación. En este sentido, los resultados de este trabajo mostraron que para las dos azoteas verdes extensivas estudiadas, la AVEsp, con menor pendiente (2°) y mayor profundidad de sustrato (13.2 cm), presentó un valor promedio menor de Q/P (0.35), traducido como una retención mayor (65%), mientras que la AVEcp, con mayor pendiente (15°) y menor profundidad de sustrato (10.3 cm), reportó un valor promedio de Q/P de 0.39, equivalente a 61% de retención de agua, lo cual coincide con lo encontrado en la literatura.

5.3 Mecanismos dominantes de generación de escurrimiento

Primeramente, los resultados mostraron que las tasas de infiltración de agua en las azoteas estudiadas fueron lo suficientemente altas para no ser rebasadas por las intensidades máximas de lluvia a las distintas resoluciones observadas, por tanto la generación de escurrimiento superficial por exceso de infiltración es un mecanismo hidrológico que no ocurre y que puede ser descartado con toda confianza. Por otro lado, se observó que un 92.2% del área de la AVEcp contribuyó a la generación de escurrimiento superficial por exceso de saturación, rebasando para todos los eventos analizados la humedad a capacidad de campo, y siendo esto cerca de cinco veces mayor que el promedio del área de contribución (18.9%) registrado en la AVEsp. Lo anterior significa que el mecanismo dominante de generación de escurrimiento es diferente para ambas azoteas, teniendo al exceso de saturación como principal mecanismo en la AVEcp y al escurrimiento por flujos subsuperficiales en la AVEsp.

Yang y colaboradores (2015) realizaron una serie de experimentos y simulaciones para estudiar la generación de escurrimiento por exceso de saturación y exceso de infiltración en azoteas verdes, concluyendo que si bien ambos procesos participan en la generación de escurrimiento, el exceso de infiltración tiene un aporte mínimo a la generación de escurrimiento, siendo dominante el exceso de saturación, lo cual cumple parcialmente con lo encontrado en este trabajo. Excluyendo el estudio de Yang et al. (2015), puede decirse que la literatura existente sobre generación de escurrimiento en azoteas verdes menciona únicamente al exceso de saturación como mecanismo de generación de escurrimiento. Además, Bengtsson (2005) reporta que mientras la humedad en suelo se mantenga por debajo de la CC, hay pocas posibilidades de que ocurra drenaje superficial, como ocurrió en la AVEsp.

Mentens (2005) y Czemieli (2010) mencionan que la generación de escurrimiento y su magnitud dependen de diversos factores, entre ellos la estructura de capas y las propiedades físicas del sustrato. Hümman (2011) afirma que estas últimas son un factor crucial en la generación de escurrimiento, por tanto, las diferencias en los patrones dominantes de generación de escurrimiento de las azoteas estudiadas podrían explicarse mediante dichas propiedades. Por ejemplo, Hümman (2011) reporta que a mayor porosidad y materia orgánica en suelo, la conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) aumenta, disminuyendo la

generación de escurrimiento. Esto mismo puede verse en los resultados, donde la AVEsp presentó mayores valores de porosidad (72.3%), materia orgánica (15.3%), tasa de infiltración ($744.73 \pm 302.50 \text{ mm hr}^{-1}$) y retención de agua (65%) con respecto a la AVEcp (65.6%, 12.3%, $394.48 \pm 548.72 \text{ mm hr}^{-1}$ y 61%, respectivamente). Por lo tanto, las diferencias observadas entre los mecanismos de generación de escurrimiento en las azoteas estudiadas podrían ser explicadas a través de sus disimilitudes en las propiedades hidrofísicas y fisicoquímicas de los sustratos.

6. Conclusiones

Este trabajo es el primero en evaluar el efecto de la humedad y las propiedades hidrofísicas del sustrato en la conectividad y respuesta hidrológica de azoteas verdes extensivas en la Ciudad de México. Se determinaron los mecanismos dominantes de generación de escurrimiento y se realizaron calibraciones específicas a sensores de humedad para obtener los contenidos de agua volumétricos verdaderos del sustrato. De esta forma, se generó conocimiento nuevo en cuanto a la hidrología de azoteas verdes, lo cual puede servir como un referente para futuros trabajos, aumentando así sus capacidades de aprovechamiento y beneficios.

Los resultados mostraron diferencias en los contenidos de agua volumétricos, entre azoteas, con 14% más de humedad promedio en la AVEcp comparado con la AVEsp. También se observaron diferencias en los coeficientes de escurrimiento (0.39 ± 0.34 en la AVEcp contra 0.35 ± 0.39 en la AVEsp), sin ser significativamente diferentes. Así, puede decirse que la pendiente jugó un pequeño rol en la generación de drenaje pluvial, no obstante, puede que sí fuese un factor importante en establecer la variación espacial y temporal de la humedad en el sustrato observada en las azoteas.

Los mecanismos de generación de escurrimiento fueron diferentes para ambas azoteas, siendo los dominantes el drenaje por exceso de saturación en la AVEcp y el drenaje por flujo subsuperficial en la AVEsp. Esta diferencia se atribuye principalmente a las propiedades hidrofísicas y fisicoquímicas que caracterizan al sustrato de las azoteas.

Si bien las ecuaciones de calibración estándar sugeridas por el manual de usuario facilitan la corrección de los datos crudos y dan un primer valor de los contenidos de agua en el sustrato, realizar calibraciones específicas permitió corregir los valores para obtener los porcentajes de humedad verdaderos, evitando así la subestimación de hasta un 57% de la humedad en los sustratos.

Para finalizar, personalmente considero que la implementación de azoteas verdes extensivas en la Ciudad de México y en otras grandes urbes traería consigo múltiples beneficios. Su instalación tendría que considerarse desde la planificación de nuevos edificios o, en su defecto, ser acompañada por revisiones estructurales y la respectiva aprobación de expertos en el tema. Creo también que el que sean alternativas exitosas dependerá de su diseño: procurando que se introduzcan especies nativas del lugar, se asegurará que resistan las condiciones climáticas y sean de bajo o nulo mantenimiento. Además de utilizar el sustrato específico, permitiendo el retraso de escurrimiento, sin comprometer la estructura de los edificios por su peso. Por último, sostengo firmemente que dada la situación climática actual, es necesario continuar realizando investigación básica y aplicada en estos sistemas con el fin de proveer información científica que permita emprender acciones en lo inmediato en beneficio del ambiente y sociedad.

Referencias

Arreola Flores, A. (2016). **Análisis de la dinámica del agua en un suelo de bosque de niebla de montaña baja en el centro de Veracruz**. Tesis de maestría. Instituto de Ecología A.C., Xalapa, Ver., 69 pp.

Arellano Leyva, E.A. (2017). **Efecto de la naturación en la generación de escurrimiento por lluvias en azoteas**. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 60 pp.

Bengtsson, L., Grahn, L. & Olsson, J. (2005). **Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden**. *Hydrology Research*, 36(3), pp. 259-268.

Bustamante Heliodoro (1986). **Potencial del Agua del Suelo**. Revista Facultad Nacional de Agronomía, vol. XXXIX - No. 2. Colombia.

Chesworth, W. (2008) **Encyclopedia of soil science**. Dordrecht (Holanda), editorial Springer. 901 pp.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2016). **Atlas del Agua en México 2016**. Versión digital disponible en www.gob.mx/conagua.

Czarnomski, N., Moore, G., Pypker, T., Licata, J. & Bond, B. (2005). **Precision and accuracy of three alternative instruments for measuring soil water content in two forest soils of the Pacific Northwest**. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(8), pp.1867-1876.

Czemiel Berndtsson, J. (2010). **Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review**. *Ecological Engineering*, 36(4), pp. 351-360.

FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). **Los suelos almacenan y filtran agua**. Infografía disponible en: <http://www.fao.org/soils-2015/es>. Recuperado el 27 de noviembre del 2018.

Gardner, W.H. (1986). *Water content*, in: Klute, A., Campbell, G.S., Jacson, R.D., Mortland, M.M., Nielsen, D.R. (eds.), **Methods of Soil Analysis**. Part I, ASA and SSSA, Madison, WI, USA, pp. 493-544.

Getter, K., Rowe, D. & Andresen, J. (2007). **Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention**. *Ecological Engineering*, 31(4), pp. 225-231.

Gómez-Tagle, A., Gómez-Tagle, R., Batlle-Sales, J., Zepeda Castro, H., Guevara Santamaría, M., Maldonado L, S. y E. Pintor. (2008) **Conductividad hidráulica saturada de campo: uso de un infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo**. *Terra Latinoamericana*, vol. 26, núm. 4, pp. 287-297.

Goyal, M.R. & E. W., Harmsen. (2013). **Evapotranspiration: Principles and Applications for Water Management**. CRC Press, Canadá. Pp. 628 (xxi).

Grimm, N.B., Faeth, S.H., Golubiewski, N.E., Redman C.L., Wu, J., Bai X. & Briggs, J.M. (2008). **Global Change and the Ecology of Cities**. *Science*, 319 (5864), pp. 756-760.

Hümann, M., Schüller, G., Müller, C., Schneider, R., Johst, M. & Caspari, T. (2011). **Identification of runoff processes – The impact of different forest**

types and soil properties on runoff formation and floods. *Journal of Hydrology*, 409(3-4), pp. 637-649.

Mentens, J., Raes, D. & Hermy, M. (2006). **Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?**. *Landscape and Urban Planning*, 77(3), pp.217-226.

Murillo Illanes, M. (2010). **El escurrimiento superficial: métodos para su estimación en conservación de suelos.** Ministerio de desarrollo rural y tierras. La Paz, Bolivia. Pp. 42.

Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R.R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K.K. & Rowe, B. (2007) **Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services.** *BioScience*, 57(10), pp.823-833.

Soulis, K.X., Ntoulas, N., Nektarios, P.A. & Kargas G. (2017). **Runoff reduction from extensive green roofs having different substrate depth and plant cover.** Elsevier. *Ecological Engineering*, 102, pp.80-89.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2002). **NOM-021-RECNAT-2000.** Diario Oficial, segunda sección.

SEREPSA (Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica Pedregal de San Ángel). (2013). **Portal oficial de la Reserva Ecológica Pedregal de San Ángel.** Coordinación de la Investigación Científica, UNAM. Ciudad Universitaria, Ciudad de México. Fecha de creación: 4-sep-2013. Disponible en Internet: <http://www.repsa.unam.mx>. Recuperado el 19 de noviembre del 2018.

Fondo Metropolitano del Valle de México (UNAM) (2011). **Programa de ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México.** Disponible en: <http://www.economia.unam.mx/cedrus/descargas/POZMVM.pdf>.

VanWoert, N., Rowe, D., Andresen, J., Rugh, C., Fernandez, R. & Xiao, L. (2005). **Green Roof Stormwater Retention: Effects of Roof Surface, Slope, and Media Depth.** *Journal of Environment Quality*, 34(3), p.1036.

Vázquez, S. (2013). **Un laboratorio al aire libre.** El Faro, núm. 147. Recuperado el 19 de noviembre del 2018, de http://elfaro.cic.unam.mx/wp-content/uploads/2018/03/elfaro_147.pdf.

Viessmann, W., Lewis, G., & J. Knapp. (1989). **Introduction to hydrology.** Harper & Row Publishers, New York, United States.

Yang, W., Li, D., Sun, T. & Ni, G. (2015). **Saturation-excess and infiltration-excess runoff on green roofs.** *Ecological Engineering*, 74, pp.327-336.

Anexos

I. Calibración de sensores de humedad y ajuste de peso seco

Para realizar la calibración de los sensores de humedad por cada tratamiento, fue necesario encontrar las curvas de mejor ajuste de los datos de humedad volumétrica ($\Theta\%$) contra peso (g). Para esto, los datos de peso del sustrato (g) recopilados durante el experimento fueron pasados a unidades de humedad gravimétrica (W%) y humedad volumétrica ($\Theta\%$) siguiendo las ecuaciones [2] y [4] de este trabajo. Debido a que cada tratamiento pesaba entre 3.5 y 4.5 kg, fue necesario tomar 500 g de cada uno para ser enviados al Laboratorio de Análisis de Suelos del Instituto de Ecología (INECOL) en Xalapa y así obtener el valor de peso seco por muestra. Para la obtención del peso seco se realizó lo siguiente:

1. Debido al tiempo entre la toma de muestra de 500 g y los resultados de laboratorio, no se tomó el último registro de peso como el final, puesto que no se había perdido por completo la humedad de los tratamientos. Así, se asignó un peso a considerarse como el peso que se podría haber alcanzado durante el tiempo transcurrido por tratamiento de acuerdo a la tendencia de las diferencias en la pérdida de peso diaria.
2. Una vez obtenido dicho peso teórico, se consideró que de ese peso se habían tomado los 500 g y se hizo un cálculo simple para obtener la proporción representada por dicha cantidad, así, si se obtuvieron 492.72 g de peso seco, se consideró que por cada 500 g de dicha muestra se obtendría la misma cantidad, haciendo:
 - a. $4,085 \text{ g} / 500 \text{ g} = 8.17$
 - b. $8.17 * 492.72 \text{ g} = 4,025.52 \text{ g} = \text{Peso seco.}$
3. Ya con el peso seco, se calcularon las humedades volumétricas (%) y gravimétrica (%) en Python siguiendo los siguientes pasos:
 - a. Se promediaron los tres valores de densidad aparente (D_a) obtenidos en laboratorio correspondientes a cada tratamiento.
 - b. Se realizaron los cálculos de W(%) y Θ (%) con las ecuaciones [2] y [4].
 - c. Una vez obtenidos todos los valores, se construyó una base de datos por cada tratamiento conteniendo los datos de Fecha-tiempo, peso (g), humedad en Raw Counts (RC), humedad gravimétrica (%) y humedad volumétrica (%) y se exportó en un archivo *.csv.
4. Utilizando los valores de humedad volumétrica ($\Theta\%$) y humedad (RC), se realizaron gráficas de dispersión con ajuste de curva, consiguiendo así las curvas de calibración reportadas en la Tabla 7.

II. Parámetros fisicoquímicos del sustrato

Tabla 13. Parámetros fisicoquímicos del sustrato en las azoteas verdes estudiadas.

Parámetro	AVEcp			AVEsp		
	Suave	Compacto	Promedio	Suave	Compacto	Promedio
DA (g/cm ³)	0.78	0.91	0.85	0.52	0.73	0.63
MO (%)	13.8	10.8	12.3	15.63	14.86	15.3
DR (g/cm ³)	2.4	2.5	2.45	2	2.48	2.25
Porosidad (%)	67.5	63.6	65.6	74	70.56	72.3