



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**SERVICIO ECOSISTÉMICO DE REGULACIÓN DE UN  
PEDREGAL REMANENTE: CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA  
TIERRA**

**ORIENTACIÓN CIENCIAS  
AMBIENTALES**

**P R E S E N T A:**

**MARIEL ESTHER WALL GUZMÁN**



**DIRECTORA DE TESIS:  
DRA. MARÍA DEL PILAR ORTEGA LARROCEA  
2017**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX**



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**

Wall Guzmán Mariel Esther  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Ciencias de la Tierra  
309313908  
wallguzman@ciencias.unam.mx

**2. Tutor**

Dra. María del Pilar Ortega Larrocea  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Instituto de Geología  
mpol@geologia.unam.mx

**3. Presidente del jurado**

Dra. Silke Cram Heydrich  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Instituto de Geografía  
silkecram@igg.unam.mx

**4. Vocal**

Dr. Víctor Luis Barradas Miranda  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Instituto de Ecología  
vlbarradas@ecología.unam.mx

**5. Suplente 1**

Dr. Luis Zambrano González  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Instituto de Biología  
zambrano@ib.unam.mx

**6. Suplente 2**

Dr. Rodolfo Omar Arellano Aguilar  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
omararellano@ciencias.unam.mx

Servicio ecosistémico de regulación de un pedregal remanente: características térmicas  
99 p  
2017

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Dra. María del Pilar Ortega Larrocea por la dedicación en este proyecto, por su conocimiento, apoyo, comprensión y entusiasmo. Gracias por los consejos que forjaron parte de mi desempeño académico y que me servirán en un futuro.

A la M. en C. Iris Suárez Quijada por la ayuda otorgada en la calibración y programación de sensores y por la disposición de materiales y otros utensilios para llevar a cabo este proyecto.

Al Dr. Víctor L. Barradas Miranda por su orientación a lo largo del trabajo de tesis y por las imágenes infrarrojas tomadas para este trabajo.

A los miembros de mi jurado la Dra. Silke Cram Heydrich y al Dr. Luis Zambrano González por sus observaciones y comentarios que enriquecieron este trabajo

Al Dr. Oscar Escolero Fuentes por el préstamo de las dos estaciones meteorológicas.

Al P. de Biol. Emmanuel Zeno Lira por su ayuda en la descripción florística del sitio y en la descarga de datos de los sensores.

Al técnico administrativo Jonathan Montes de Oca Romero por el apoyo en la instalación de los sensores, así como en la descarga de los datos de éstos.

A las alumnas del taller de investigación de la Licenciatura en Ciencias de la Tierra, "Restauración de pedregales y valoración de servicios ecosistémicos en Ciudad Universitaria": Zeida Yini Hernández Roa, Carmen Arenas Castellanos y Alma Karen Alva Salazar por la ayuda en la descarga de datos de los sensores.

A la Lic. en Ciencias de la Tierra Mariana Pérez Miguel por su orientación en el uso del programa Surfer© 10 y en Statística 11.

Al Dr. Omar Arellano Aguilar por la orientación en la realización de la base de datos, parametrización de la información para su análisis y por los comentarios de revisión.

A la M. en C. Cecilia Lartigue Baca por la información proporcionada sobre el uso del agua de riego en Ciudad Universitaria.

Esta tesis fue financiada en el marco de los PAPIIT IT101812, IV200117, PAPIME-PEI108-915 de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM.

Este trabajo es un producto del taller de investigación de la Licenciatura en Ciencias de la Tierra: "Restauración de pedregales y valoración de servicios ecosistémicos en Ciudad Universitaria":

## DEDICATORIAS

Quiero dar gracias a Dios por bendecirme durante mi vida y darme esta vocación de ser protectora de su Creación.

Quiero agradecer a mis padres Maty y Salvador por guiarme y cuidarme en mi vida, por siempre creer en mí, los amo con todo mi corazón y ser.

A mis abuelos que inculcaron el amor al aprendizaje y a la superación para alcanzar mis metas.

A mi hermano Sergio por siempre estar conmigo y nunca dejarme sola, te quiero mucho hermanito.

A mi pareja Juan Pablo, por siempre estar conmigo codo a codo en las altas y bajas durante este tiempo, te amo.

A la familia García Yáñez por apoyarme y depositar su confianza en mí.

A cada uno de mis amigos, por darme soporte y ratos de felicidad.

***"... no podemos ganar la batalla por salvar a las especies y al medio ambiente sin forjar un vínculo emocional entre nosotros y la naturaleza, puesto que no lucharemos por la salvación de algo que no amamos."***  
***S. J. Gould, Some enchanted evening***

# ÍNDICE

II. Introducción .....	9
III. Marco teórico .....	10
3.1 Servicios ecosistémicos urbanos .....	10
3.2 Regulación de la temperatura urbana .....	11
3.3 Isla de calor urbana.....	12
3.4 Una reserva urbana, Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel .....	18
3.4.1 Servicios ecosistémicos de la REPSA .....	21
IV. Antecedentes.....	22
4.1 Isla de calor urbana en la Ciudad de México y el efecto de la vegetación.....	22
4.2 Ciudad Universitaria .....	24
V. Justificación .....	27
VI. Hipótesis .....	28
VII. Objetivo General.....	28
VIII. Sitio de estudio.....	29
IX. Materiales y método .....	32
9.1 Calibración de equipos .....	32
9.2 Instalación de sensores.....	32
9.3 Toma de datos.....	38
9.4 Caracterización microambiental en algunos micrositios dentro del Geopedregal	39
9.5 Diferencias térmicas entre el Geopedregal y su entorno urbanizado.....	40
9.5.1 Diferencias extremas de temperatura del aire entre un micrositio dentro del Geopedregal y fuera de él.....	40
9.5.2. Distribución de temperatura de recorridos a pie.....	41
9.5.3 Termografías .....	41
X. Resultados .....	42
10.1 Caracterización microambiental en algunos micrositios dentro del Geopedregal	42
10.2 Diferencias térmicas entre el Geopedregal y su entorno urbanizado.....	47
10.3 Diferencias extremas de temperatura del aire entre un micrositio dentro del Geopedregal y fuera de él.....	57
10.4 Distribución de temperatura de recorridos a pie.....	58
10.5 Termografías.....	61
XI. Discusión.....	64
XII. Conclusiones .....	74

<b>XIII. Literatura citada .....</b>	<b>76</b>
<b>XIV. Anexos.....</b>	<b>833</b>

## I. Resumen

La regulación de la temperatura es uno de los servicios ecosistémicos (SE) más importantes para la adaptación y mitigación al cambio climático. En la Ciudad de México existen áreas de conservación que aportan este tipo de beneficios, tal es el caso de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA), localizada en el campus de Ciudad Universitaria (C.U.) de la Universidad Nacional Autónoma de México. Existen estudios que demuestran la importancia de esta reserva urbana en la mitigación de calor; sin embargo, no hay información contundente sobre los relictos de pedregales que se encuentran distribuidos a lo largo de C.U. En el presente estudio se midieron variables microambientales como la temperatura y humedad del aire, rapidez y dirección del viento, y radiación solar de un pedregal remanente en proceso de restauración ecológica dentro de C.U., con el objetivo de evaluar las características térmicas dentro del sitio y de sus alrededores. Este trabajo se realizó a partir de junio de 2015 a mayo de 2016. Se instalaron 11 sensores de temperatura y humedad relativa, y dos estaciones meteorológicas en el sitio y alrededor de éste. También se realizaron recorridos a pie alrededor del sitio en días específicos durante las horas de máxima temperatura y se tomaron datos puntuales con una cámara infrarroja. Con esta información se generaron mapas de distribución de temperatura y de déficit de presión de vapor.

Los resultados arrojaron que los sitios más cálidos durante el día (15:00 h) en las tres épocas: húmeda, seca fría y seca cálida, se encuentran relacionados con la alta exposición solar recibida en las superficies cercanas como asfalto y pasto desprovisto de sombra. Las temperaturas medias más bajas están relacionadas a la sombra y a la humedad proporcionada por la vegetación circundante nativa como tepozanes robustos o fresnos en zonas adyacentes. Las máximas diferencias térmicas entre un punto dentro del sitio y alrededor de él fueron de  $4.8 \pm 0.2$  °C en época húmeda,  $5.8 \pm 0.3$  °C en época seca fría y  $2.8 \pm 0.4$  °C en la época seca cálida. En los recorridos se observaron diferencias en las zonas urbanizadas aledañas con una mayor temperatura del lado de la calle con alto tránsito vehicular y temperaturas bajas en la parte del estacionamiento con sombra. Las termografías muestran que las mayores



temperaturas superficiales corresponden a los sitios con asfalto y a los techos de los autos sin sombra.

Los resultados indicaron que algunos de los factores que influyen en la regulación de la temperatura de un pedregal remanente son: la cantidad de microambientes con estrato arbóreo, la exposición solar a éstos, el área y su cercanía a las áreas selladas y vialidades, la rapidez del viento, así como las áreas verdes adyacentes. Esta regulación también se verá modificada por el manejo que se dé al pedregal remanente en proceso de restauración, puesto que podría cambiar en el tiempo. Por esta razón se podrían identificar las zonas más vulnerables, para realizar acciones adecuadas para su recuperación.

**Palabras Clave:** microclima, regulación de la temperatura, isla de calor urbana, reserva urbana, Geopedregal.

## II. Introducción

Actualmente más de la mitad de la población mundial (54%) vive en áreas urbanas y se tiene estimado que para el año 2050 el 64% de la población mundial vivirá en éstas (UN, 2015). La urbanización tiene impactos positivos en el desarrollo económico y reducción de la pobreza. La densidad poblacional y comercio facilita el intercambio de conocimiento e información, el fomento a nuevas empresas e innovación tecnológica (UN, 2015). Sin embargo, existen efectos adversos como los cambios físicos en la superficie del suelo, la pérdida de la cubierta vegetal, la disminución de la infiltración y por lo tanto un menor reabastecimiento de las aguas subterráneas, además de producir altas emisiones de dióxido de carbono (Parlow, 2011).

Otra de las consecuencias es la isla de calor urbana (ICU), un fenómeno por el cual las regiones urbanas experimentan temperaturas más cálidas que sus alrededores rurales (Skoulika *et al.*, 2014). Se tiene documentado que la vegetación urbana, en especial aquella que se tiene en los parques o áreas verdes de diferentes tamaños, mitigan la ICU; considerándolas islas frías o pequeños oasis porque son más frescos y húmedos que sus alrededores (Barradas, 1991). El efecto de la ICU ya ha sido estudiado en la Ciudad de México, así como su mitigación por parte de áreas verdes (Jáuregui, 1975; Barradas, 1991; Ballinas, 2011)

La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA), bajo la protección de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se considera un relicto del matorral xerófilo de palo loco, ubicada al sur de la Ciudad de México. Pérez (2017) registró que esta zona de la ciudad se comporta como un punto frío, es decir que posee una temperatura menor en comparación a la zona urbanizada adyacente. Por esta razón es de suma importancia seguir conservando la extensión de la REPSA y tomar en cuenta la contribución de los pedregales remanentes en la temperatura de su entorno inmediato.

Asimismo se podrían utilizar como indicadores ambientales el número de áreas verdes, área de superficie edificada e isla de calor con el fin de evaluar la

sostenibilidad en la Ciudad de México y en la Ciudad Universitaria, UNAM, pudiendo ser integrados a los lineamientos de construcción sustentable de la institución.

### **III. Marco teórico**

#### **3.1 Servicios ecosistémicos urbanos**

Las ciudades o ecosistemas urbanos los podemos entender como un conjunto de sistemas interconectados: abióticos (atmósfera, litosfera, hidrosfera y pedosfera) y bióticos (muchas veces vistos como una biosfera interactiva más el mundo socioeconómico de la población, llamado antroposfera) (Marzluff *et al.*, 2008), los cuales poseen sus propias y únicas reglas de comportamiento, crecimiento y evolución (Alberti *et al.*, 2008).

Los ecosistemas urbanos al igual que otros ecosistemas, generan beneficios a sus habitantes, conocidos como servicios ecosistémicos urbanos (SEU). Son aquellos producidos directamente de estructuras ecológicas dentro de áreas urbanas o regiones periurbanas (Luederitz *et al.*, 2015). Éstos se dividen en cuatro rubros: soporte, culturales, provisión y regulación (MEA, 2005). El potencial para la generación de servicios ecosistémicos en las zonas urbanas es considerable, aunque frecuentemente no es apreciado (Pickett *et al.*, 2008).

Los SEU son generados por un conjunto diverso de usos de suelo, incluyendo parques, cementerios, campos de golf, ríos, lagos, estanques, jardines y patios, techos verdes, jardines verticales, campos deportivos, terrenos baldíos, zonas industriales y vertederos (Gómez-Baggethun y Barton, 2013; Haase *et al.*, 2014). Algunos de los SEU más importantes en las ciudades son: la provisión de alimentos (vegetales producidos en huertos urbanos o áreas periurbanas), la regulación del flujo de agua y la mitigación de la escorrentía, regulación de la temperatura urbana reducción del ruido, regulación de la calidad del aire, polinización y dispersión de

semillas, desarrollo recreativo y cognitivo (parques urbanos como centros de recreación) y avistamiento de animales (Gómez-Baggethun y Barton, 2013).

Algo que caracteriza a los SEU es su alta demanda y uso debido al gran número de beneficiarios locales inmediatos comparado por ejemplo con los Servicios Ecosistémicos (SE), generados en áreas rurales alejadas de áreas densamente pobladas (Elmqvist *et al.*, 2015).

### **3.2 Regulación de la temperatura urbana**

En las ciudades los SEU de regulación juegan un papel muy importante en el bienestar del ser humano. La regulación climática local, suministro de agua y recreación, son los tres servicios ecosistémicos más investigados (Haase *et al.*, 2014).

La vegetación urbana (incluyendo techos, paredes verdes, y parques) juega un papel muy importante en la regulación de la temperatura urbana (Yu y Hien, 2006), pues reduce la radiación solar transmitida a través de su dosel, disminuye la temperatura de la superficie debajo de ésta y enfría el aire a través de la evapotranspiración (Gartland, 2008; Wang *et al.*, 2014; Ballinas y Barradas, 2016a). Debido a esto, se forman las islas frías o efecto oasis en las ciudades (Barradas, 1991; Elmqvist *et al.*, 2015), las cuales mitigan el efecto de la ICU. El efecto de isla fría se puede dar tanto en el día como en la noche (Bowler *et al.*, 2010), esto dependerá de las características de las áreas verdes y de las propiedades de las zonas aledañas (Skoulika *et al.*, 2014).

El potencial de enfriamiento dado por algún tipo de área verde depende de:

- El tamaño y estructura del área verde, la mayoría de los estudios muestran que entre más grande sea, mayor será el potencial de enfriamiento (Barradas, 1991; Bowler *et al.*, 2010), sin embargo hay estudios que demuestran la importancia de áreas verdes pequeñas (Barradas, 1991; Thorsson *et al.*, 2007).
- El tipo de plantas y la frecuencia del riego.

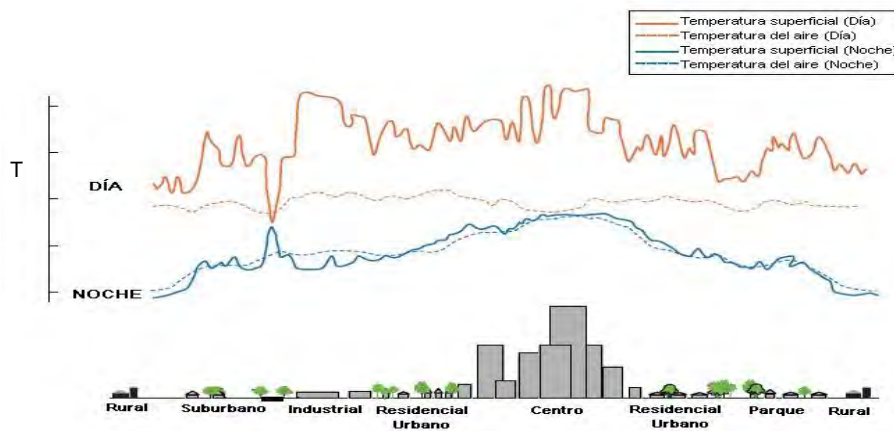
- Las propiedades del área urbana cercana y su densidad. Una gran densidad urbana y edificios altos pueden bloquear el flujo de aire frío para sus alrededores (Skoulika *et al.*, 2014).
- Condiciones locales del clima y la zona climática del estudio (Oliveira *et al.*, 2011).

El potencial de enfriamiento se puede medir a través de las diferencias de temperatura de la superficie o del aire entre el entorno urbano y el parque o el área verde ( $\Delta T_{u-p}$ ) (Chow *et al.*, 2011). Los valores positivos (negativos) indican que la temperatura del parque o área verde es menor (mayor) que la de sus alrededores.

### 3.3 Isla de calor urbana

La ICU es un rasgo característico del clima urbano y se puede encontrar en la mayoría de las ciudades del mundo (Fig. 1) (Kuttler, 2008; Parlow, 2011).

La ICU es causada por varios factores directamente atribuidos al cambio y uso de suelo, ya que produce una redistribución del balance energético superficial debido al incremento en la absorción de la radiación solar, altas emisiones de calor antropogénico (aunque algunas veces esta energía es muy baja como para considerarse) y decremento en la superficie de evapotranspiración en áreas urbanas (Oke, 1982).



**Figura 1.** Perfil térmico característico de una isla de calor (modificado de USEPA, 2008).

Para poder entender mejor las causas de la ICU es necesario tomar en consideración el balance energético urbano (Oke, 1978):

$$Q^* + Q_f + Q_e + Q_h + Q_s = 0 \text{ [W m}^{-2}\text{]} \quad (1)$$

donde  $Q^*$  es la radiación neta (energía disponible),  $Q_f$  es la energía generada por las actividades antropogénicas tales como la energía liberada por la combustión de los combustibles, industria, calefacción y aire acondicionado,  $Q_e$  es el flujo de calor latente (calor perdido por la evaporación de la superficie y/o cobertura vegetal),  $Q_h$  es flujo de calor sensible (calentamiento del aire) y  $Q_s$  es el calor almacenado en las superficies urbanas.

La radiación neta  $Q^*$  se define como la suma de (Oke, 1978):

- la radiación de onda corta ( $Q_{SW}$ ), que incluye la radiación solar entrante sin ser absorbida o dispersada (radiación directa) y la radiación difusa la cual es reflejada y dispersada por la superficie y la atmósfera y de,
- la radiación de onda larga ( $Q_{LW}$ ) emitida por la superficie y por la atmósfera.

Generalmente  $Q^*$  es mayor en las ciudades que en las áreas rurales, entendiendo áreas rurales como zonas con vegetación, suelo permeable y poco compacto, debido a muchos factores como (Landsberg, 1981):

- baja reflectancia (capacidad de un cuerpo de reflejar la luz) de los materiales urbanos (ejemplo: asfalto y tejados).
- Geometría urbana (disposición de los edificios entre las calles), pues el calor es capturado por las paredes de los edificios y se libera durante la noche probando el efecto de la ICU nocturna.
- Altos niveles de contaminación atmosférica reducen la radiación solar entrante e incrementa la radiación infrarroja emitida de la atmosfera a la tierra.

El calor sensible, latente y almacenado depende principalmente de los usos de suelo de la ciudad en comparación con las áreas rurales (Brazel y Quatrocchi, 2005).

El flujo de calor latente  $Q_e$  es transferido de la superficie a la atmósfera mediante la evaporación del agua en la superficie y la transpiración de la vegetación. La cantidad

de superficies húmedas se encuentra limitada en las ciudades debido a la construcción de edificios y sustitución de superficies permeables por superficies selladas como asfalto y pavimento (Barradas, 1987), reduciendo la evapotranspiración, debido a esto incrementa el calor almacenado durante el día y la liberación de este en la noche (Cleugh y Oke, 1986).

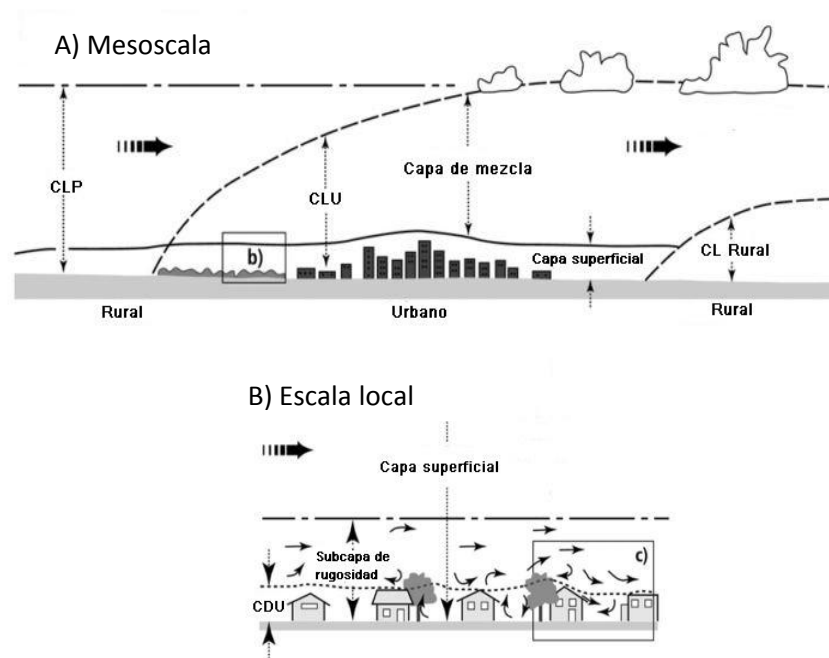
La adición o pérdida de energía de un cuerpo se percibe como un aumento o una disminución en su temperatura, a esto se le denomina calor sensible  $Q_h$ . La convección transporta calor hacia y desde la atmósfera tanto en forma de calor sensible y calor latente. La convección aumenta cuando la rapidez del viento es más alta, cuando las corrientes de aire se vuelven más turbulentas sobre superficies más rugosas y cuando las diferencias de temperatura entre la superficie y el aire son mayores (Gartland, 2008)

Un factor muy importante en el balance de energía es el calor almacenado  $Q_s$ , el cual depende de la capacidad calorífica y conductividad térmica de los materiales de construcción, la combinación de estas dos propiedades se llama difusividad térmica, valores altos de difusividad térmica indican que el calor alcanza profundamente una capa de material y la temperatura se mantiene constante. Valores bajos significan que una capa delgada de material es calentada y la temperatura tiende a fluctuar rápidamente. Las áreas rurales tienden a estar compuestas por materiales de baja difusividad térmica y las áreas urbanas tienen una alta difusividad. Esto incrementa el calor almacenado durante el día y su lenta liberación en la noche (Gartland, 2008).

La baja rapidez del viento también contribuye a la formación de la ICU, puesto que existe una menor convección y el calor es almacenado en los materiales. Por este motivo las ICU son más intensas en día despejado con vientos débiles. Generalmente las ciudades presentan vientos lentos en comparación a las áreas rurales, debido a que los edificios funcionan como barreras y desaceleran su rapidez hasta un 60% (Landsberg, 1981).

Diferentes tipos de islas de calor pueden ocurrir en distintas áreas y tiempo (Fig. 2) (USEPA, 2008):

- isla de calor de superficie la cual es causada por altas temperaturas superficiales,
- isla de calor del dosel urbano la cual sucede en la capa de aire donde las personas realizan sus actividades, desde la superficie y por debajo de los árboles y techos, e
- isla de calor de la capa límite urbana, ésta comienza desde la azotea de los edificios y por encima de las copas de los árboles y se extiende por arriba de la ciudad (Kuttler, 2008).



**Figura 2.** Características de la atmósfera urbana. Se muestra la capa límite planetaria (CLP), la capa límite urbana (CLU) y la capa límite rural (CLR) a nivel mesoescala. En B se muestra la Capa de Dosel Urbano (CDU) y la subcapa de rugosidad. Modificado de Brazel y Quatrocchi (2005).



Para identificar la ICU existen diferentes métodos (Gartland, 2008):

**Cuadro 1.** Métodos de identificación de Isla de Calor Urbana

<b>Método</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Estaciones meteorológicas automáticas	Se puede comparar entre estaciones rurales y urbanas y se estudia la tendencia de la ICU a través del tiempo.	Generalmente se encuentran en el techo de los edificios a distintas alturas. Éstas no reflejan las condiciones de la capa de dosel urbano.
Estaciones fijas	Se obtiene información de la capa de dosel urbano (1.5 m), así como la variabilidad temporal y espacial de la ICU.	No es económico si se quiere abarcar grandes extensiones debido a la cantidad de equipos ocupados. Son propensos a ser robados.
Recorridos	Es un método económico y abarca tanto pequeñas extensiones como grandes. Se puede realizar con un solo equipo.	No se puede registrar la temperatura de manera simultánea, las temperaturas usualmente se necesitan ajustar a una estación fija. El medio de transporte en el que se realice puede influir en las lecturas del equipo.
Percepción remota	Observación directa la temperatura superficial en grandes extensiones, ésta se puede relacionar espacialmente las características del terreno en una escala fina.	No se observa la temperatura de paredes o la presente debajo de la vegetación. Las imágenes satelitales no proveen de información continua. Los vuelos en avioneta no son económicos.
Modelación	Se puede entender mejor cómo se desarrollan las ICU. Estiman las maneras efectivas en la mitigación del ICU. Se puede modelar para un edificio, calle o región urbana.	Se necesita una cantidad considerable de datos de entrada. Se puede subestimar o sobrestimar los resultados. Pueden tener opciones limitadas al modelar ciertos aspectos.

Lee y col. (2009) combinaron estaciones fijas y recorridos en un distrito central de negocios en Seúl, para poder determinar la distancia de influencia de la temperatura de los parques respecto a sus alrededores. Estos investigadores instalaron sensores de temperatura y humedad relativa en cinco parques y realizaron recorridos en calles aledañas con distintos usos de suelo (comercial y residencial) en un radio aproximado de tres kilómetros. En Atenas, Skoulika y col. (2014), realizaron las mediciones de manera similar, instalando sensores de temperatura y humedad relativa dentro del parque y realizando recorridos alrededor de éste y además se comparó la temperatura del parque con las estaciones meteorológicas automáticas de la ciudad, localizadas en sitios con distinta cobertura vegetal.

En cambio, en Lisboa (Oliveira *et. al*, 2011) se utilizaron los recorridos para medir la temperatura dentro del parque en sitios soleados y con sombra, y para observar la influencia de la distancia del parque en la temperatura de sus alrededores.

Feyisa y col. (2014) midieron la temperatura del aire de nueve parques Adís Abeba y por medio de imágenes satelitales LANDSAT identificaron la influencia térmica de éstos en sus alrededores y la distancia máxima de enfriamiento.

La gran extensión de las ciudades y su heterogeneidad espacial son algunos de los problemas en la recopilación de los parámetros del balance energético, para esto se ha utilizado la percepción remota del infrarrojo térmico (IRT). El fundamento es que todos los objetos con una temperatura mayor al cero absoluto (-273 °C) emiten radiación electromagnética en la región de infrarrojo térmico, por lo que los sensores de IRT permiten la obtención de imágenes de radiación térmica de objetos sobre la superficie terrestre (Kuenzer y Dech, 2013).

Estas imágenes pueden ser obtenidas de satélites espaciales, medios aéreos como avionetas o drones y por medio de cámaras termográficas. A pesar de que las imágenes térmicas son de gran ayuda existe un problema relacionado con el tipo de materiales y patrones superficiales en los efectos climatológicos urbanos, incluida la ICU, este es un problema espacial. Una solución a éste es medir los atributos del espacio a una escala proporcional en la que el proceso se hace evidente (Brazel y Quatrocchi, 2005). Las cámaras termográficas pueden ser utilizadas para aplicaciones

de corto alcance, las imágenes resultantes se usan como ortofotos, mapas o como imágenes precisas en 2D y 3D para la ciudad o modelos de construcción (Kuenzer y Dech, 2013).

### **3.4 Una reserva urbana, Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel**

Creada en el año de 1983, la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) es considerada una reserva urbana. Se encuentra ubicada dentro del campus Ciudad Universitaria con un área de 237 ha, representando un tercio del total del campus (Lot y Camarena, 2009).

La REPSA es uno de los relictos del ecosistema del matorral xerófilo de *Pittocaulon praecox* (palo loco). Este ecosistema se originó tras la erupción del volcán Xitle y conos adyacentes hace 1670 años, cubriendo una extensión de 80 km<sup>2</sup>(8 000 ha) (Siebe, 2000). En los fragmentos remanentes que se encuentran a mayor altura existen algunos bosques de *Pinus*, *Abies* y *Quercus* y en las zonas medias y bajas predomina el matorral xerófilo.

A mediados del siglo XX, la comunidad vegetal comenzó a sufrir un proceso rápido de deterioro y fragmentación, debido al crecimiento urbano de la Ciudad de México (Soberón *et al.*, 1991; Carrillo-Trueba,1995),actualmente se tiene el registro de 2949.18 ha de pedregales incluyendo la REPSA y pedregales remanentes en Ciudad Universitaria, siendo el 36 por ciento de superficie total de afloramientos conservados del Pedregal de San Ángel (Lot y Camarena, 2009). Este matorral se caracteriza por la predominancia de formas de crecimiento arbustivas y herbáceas, muchas de las plantas que crecen en esta zona presentan adaptaciones fisiológicas y características morfológicas afines a las de los ecosistemas áridos (Castillo-Argüero *et al.*, 2007).

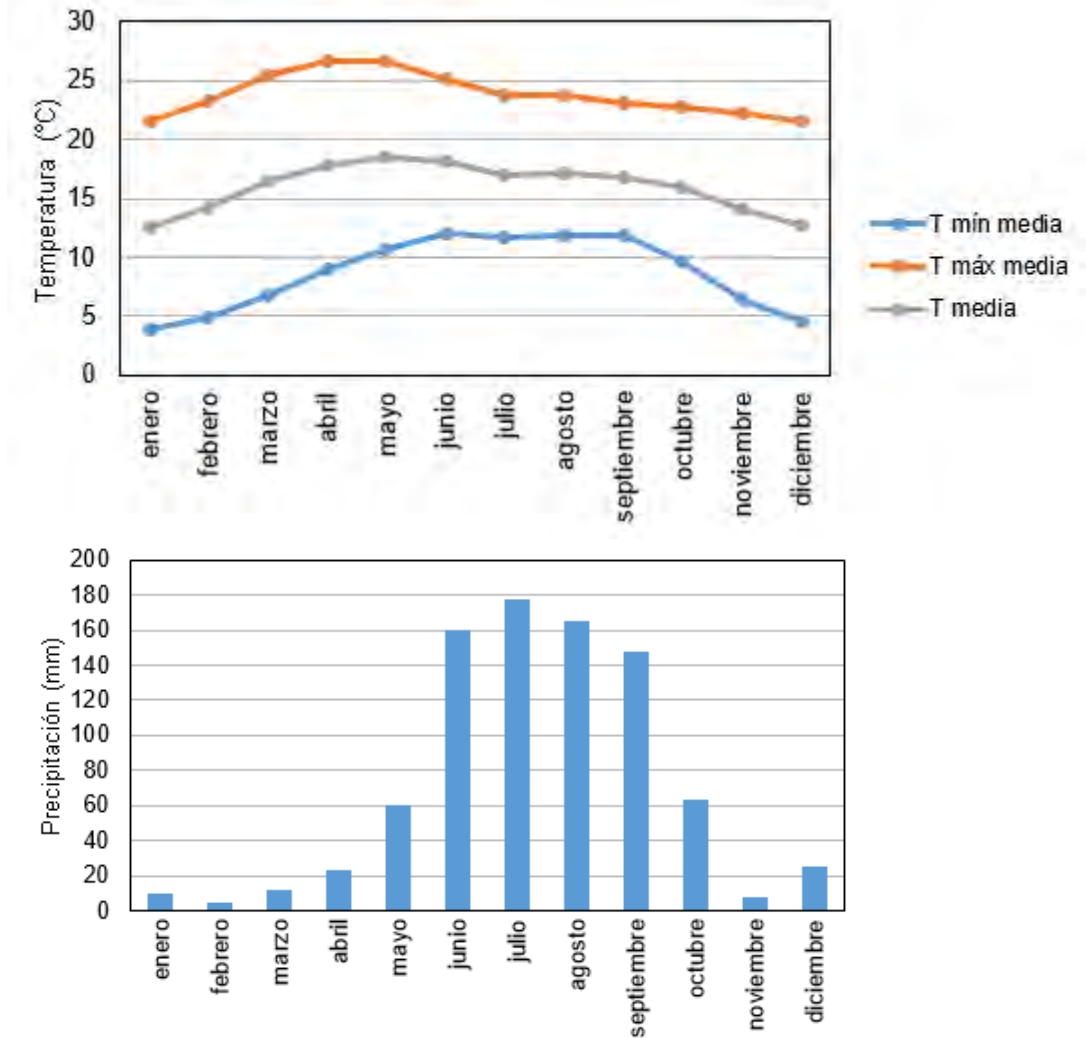
La heterogeneidad topográfica y las características anteriores juegan un papel importante para el mantenimiento de la diversidad de la REPSA (Castillo-Argüero *et al.*,2007), además que debido a su posición geográfica, a su marcada estacionalidad húmeda y seca, se considera como uno de los lugares con mayor biodiversidad de la cuenca del valle de México (Lot y Camarena, 2009). Al solidificarse la lava y gracias a

las diferencias de inclinación y a los accidentes del terreno original (Carrillo-Trueba, 1995), surgieron microambientes con características específicas como: temperatura, humedad relativa, pendiente, radiación solar, entre otras. Se clasifican en grietas, hondonadas, oquedades, planos, promontorios, paredes y cuevas (Castillo-Argüero *et al.*, 2007). Se tiene identificado que los sitios planos poseen suelo escaso o poco profundo y presentan una dominancia de plantas herbáceas, en cambio los sitios abruptos (como las hondonadas) presentan mayor profundidad de suelo y esto a su vez favorece el establecimiento de especies arbóreas (Cano-Santana, 1994).

El clima es templado subhúmedo, con régimen de lluvias en verano [Cb(w1) (w)]. La precipitación anual promedio es de 833 mm y se distinguen dos épocas, una húmeda (de junio a octubre) y otra seca (de noviembre a mayo) (Castillo-Argüero *et al.*, 2004). La temperatura media anual es 15.6 °C, ésta ha mostrado una ligera tendencia en aumento posiblemente por el efecto de la isla de calor característica de las grandes ciudades (Sánchez, 1990) (Fig. 3).

La REPSA está dividida en tres áreas núcleo: Poniente, Oriente y Suroriente que en su totalidad cubren un área de 171 ha y de 66 ha de área de amortiguamiento (Fig. 6). A pesar de existir esta área protegida aún hay partes del pedregal dentro de C.U. que no están bajo ninguna categoría de protección, denominados pedregales remanentes. Éstos funcionan como corredores biológicos en un ecosistema fragmentado, reservorios de biodiversidad, permiten infiltración de agua, captura de contaminantes, además que funcionan como áreas verdes que pueden regularse por sí mismas sin un mantenimiento costoso (SEREPSA, 2008). En el año de 2012 el área de estos pedregales remanentes era de 48 ha, el dato más reciente de 2014 indica que actualmente el área es de 46.5 ha (REPSA, 2017).

Esta reducción y una de las principales amenazas de estos espacios, se debe a la construcción de nueva infraestructura, conversión en áreas de jardinería o estacionamientos debido a que no se encuentran protegidos.



**Figura 3.** Precipitación y temperatura (mínima media, máxima media y media) registrada en el Observatorio Meteorológico del Colegio de Geografía de 1963 a hasta el 2016.

Datos extraídos de: <http://observatoriometeorologico.filos.unam.mx/2016/10/normales-climatologicas/>. Fecha de última consulta: 31/07/2017

### **3.4.1 Servicios ecosistémicos de la REPSA**

En los últimos años la REPSA ha sido objeto de diversos estudios en los cuales se han identificado cinco servicios de provisión, tres de regulación, cuatro culturales y tres de soporte (Nava *et. al*, 2009).

Dentro de los servicios de provisión se encuentra la gran cantidad de recursos genéticos representados en su alta biodiversidad y de especies ornamentales y medicinales.

En los servicios de regulación se identifica la regulación de la calidad y cantidad de agua, además de la alta infiltración debido a la permeabilidad del sustrato, la REPSA funciona también como un regulador microclimático (Barradas, 1999).

Se ha analizado la producción primaria neta aérea (Cano-Santana, 1994), la descomposición de la materia orgánica (Arango, 2006) y flujos de energía y cadenas tróficas como parte de los servicios de soporte (Cano-Santana, 1994).

Finalmente los servicios culturales identificados son entre ellos la investigación científica, la belleza escénica y recreación como el espacio escultórico y la zona cultural de Ciudad Universitaria.

Aún faltan por analizar otros servicios ecosistémicos como regulación de la calidad del aire, secuestro de carbono, captación de contaminantes y regulación hidrológica específicamente la cantidad de agua infiltrada para la recarga del acuífero, los cuales una vez cuantificados darán más oportunidades para conservar la cantidad total de superficie de la REPSA.

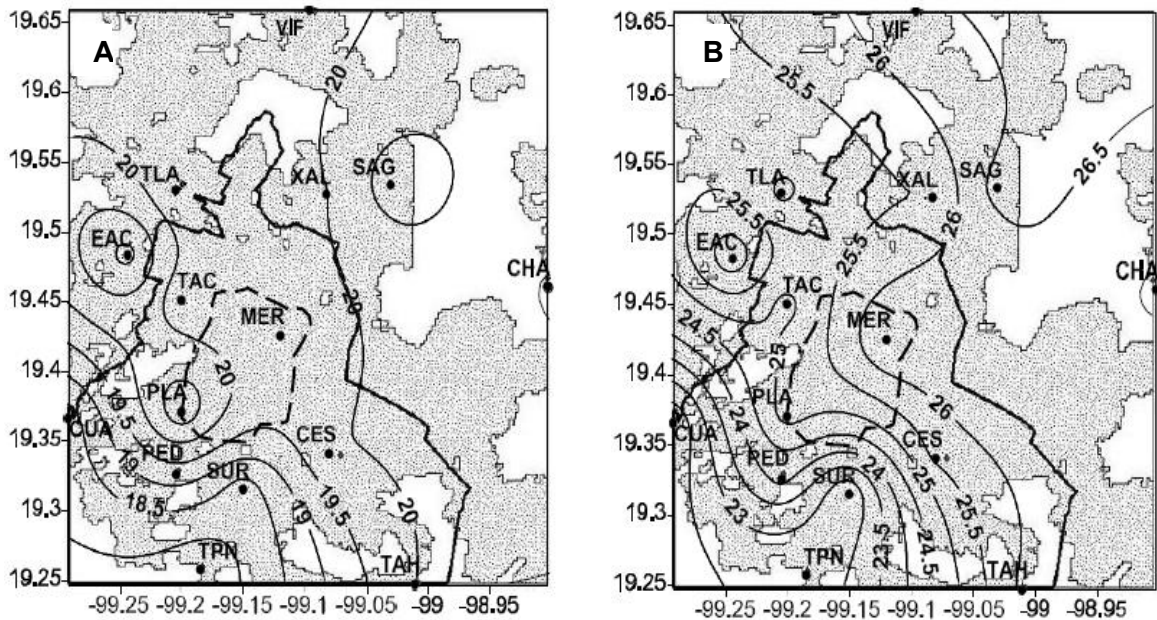
## **IV. Antecedentes**

### **4.1 Isla de calor urbana en la Ciudad de México y el efecto de la vegetación**

En 1997, Jáuregui comparó la temperatura de tres estaciones meteorológicas automáticas, representando el área urbana, una fue localizada en el Palacio de Minería cerca del centro histórico de la Ciudad de México y la otra en el Servicio Meteorológico Nacional y el área rural de Texcoco. Los resultados mostraron que la isla de calor nocturna fue más frecuente (75% del periodo examinado) que la ocurrida en el día (25%). La Intensidad máxima de la ICU fue de 7.8 °C observada en el mes de febrero. En la época húmeda las islas de calor tuvieron una frecuencia de 13% y una intensidad de 3-5 °C y en la tarde-noche la intensidad de la isla de calor fue de 4-5°C. En resultados registrados en el año 2009 por Ballinas (2011) también se observó la presencia de la ICU nocturna y durante el día con valores máximos a 10 °C (Ballinas, 2011).

Un estudio realizado por Ballinas (2011) de la ICU para el año 2010 se observa en el mes de enero un centro cálido situado en las cercanías de las estaciones: Cerro de la Estrella (CES), San Agustín (SAG), Villa de las Flores (VIF), ENEP-Acatlán (EAC) y Pedregal (PED), con diferencias de temperatura cerca de 3.5 °C, a las 6:00 h, mientras que a las 14:00 la zona cálida se reduce hacia el este con una diferencia de 2.5 °C. Para mayo se observa un centro cálido similar al de enero pero con valores más altos (Fig. 4).

Datos más recientes de las diferencias entre la zona rural y urbana, se observa que existe una disminución de éstas a través del tiempo, y que durante todas las temporadas (temporada húmeda, seca fría y seca cálida) se presentaron temperatura bajas al sur de la Ciudad de México, específicamente las estaciones del Centro de Ciencias de la Atmósfera y Pedregal (PED) (Pérez, 2017).



**Figura 4.** Isla de Calor Urbana a las 14:00 h en la ZMCM A) Enero 2010 y B) Mayo 2010. Tomado de Ballinas y Barradas (2016a).

Se ha investigado el potencial de enfriamiento respecto a sus alrededores en algunos parques de la ciudad, entre ellos se encuentra el Bosque de Chapultepec en el que se observó que su temperatura era 5 °C menor y poseía 20% más de humedad relativa (Jáuregui, 1975) que su alrededor urbano, sin embargo, debido a su extensión (428 ha) no representa el área de los parques más comunes en la ciudad. Otro estudio realizado por Barradas (1991) identificó diferencias de temperatura entre parques de diferentes áreas (9.9, 8.9, 3.0 y 1.9 ha) y sus alrededores, la diferencia más grande de temperatura fue de 3 °C y la menor de 0.4 °C. Los resultados indican que el tamaño de los parques, el flujo vehicular y la cantidad de superficies pavimentadas tienen un impacto directo en la disminución de la temperatura por parte de los parques y que la existencia de pequeñas islas húmedas contribuye a la disminución del efecto de la isla de calor en la ciudad.

Por otro lado, se ha estudiado entre las especies dominantes de árboles en la Ciudad de México cuáles son los árboles que pudieran mitigar la ICU, entre ellos se



encuentran *Liquidambar styraciflua* (Liquidámbar) y *Ligustrum lucidum* (Trueno) pues presentan altas tasas de evaporación en comparación a *Fraxinus uhdei* (Fresno) y *Eucalyptus camaldulensis* (Eucalipto), además que la sombra que éstos proveen podría aumentar su potencial de mitigación (Ballinas y Barradas, 2016b), sin embargo algunas de estas especies están catalogadas como exóticas.

Ballinas y Barradas (2016a) sugieren que se podría reemplazar a los árboles antiguos de la ciudad por árboles con altas tasas de transpiración, mayor índice de área foliar y coberturao diseñar arreglos de vegetación con alta transpiración, para así mitigar efectivamente la ICU. También se menciona que una simple reforestación en la ciudad no podría mitigar la ICU adecuadamente, pues se requiere seguir investigando las especies de árboles apropiados para este fin.

## **4.2 Ciudad Universitaria**

En 1980 se determinó el microclima de Ciudad Universitaria con datos del Observatorio Meteorológico del Colegio de Geografía del periodo 1963-1979, se compararon nueve estaciones meteorológicas cercanas a C.U. y se obtuvo que los factores que influyen en el microclima de este sitio son el área urbana, la vegetación, el relieve y la contaminación atmosférica (Ortiz, 1980).

Posteriormente se realizó un análisis de las variables meteorológicas que afectan al microclima de Ciudad Universitaria, utilizando datos del observatorio antes mencionado del periodo 1963-1983, los resultados muestran una tendencia de aumento en la temperatura media anual, máxima y mínima atribuido a la contaminación atmosférica, un decremento en la humedad relativa a causa de la pérdida de vegetación. Asimismo un incremento en la intensidad de las lluvias a lo que el autor infiere que en el futuro podría haber problemas de inundaciones. Así mismo se identificaron dos temporadas marcadas cálida (primavera-verano) y fría (otoño-invierno) (Sánchez, 1990).

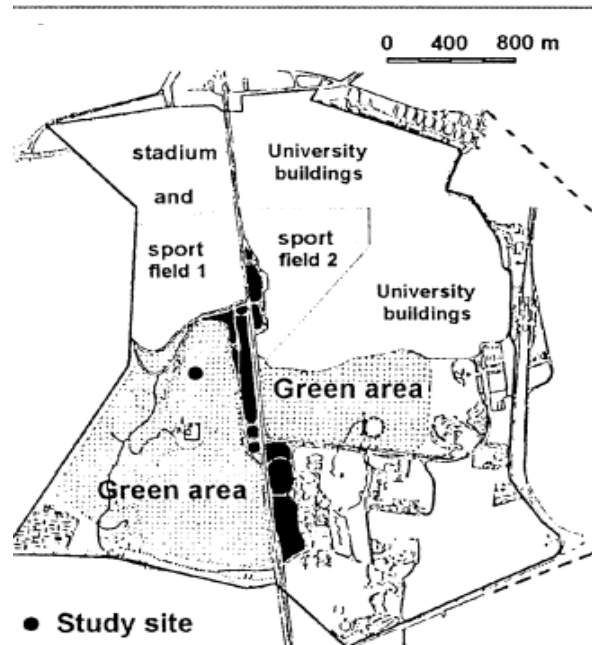
Fue en 1995 que se realizó un análisis del balance energético por Barradas y colaboradores (1999) en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, con

objetivo de determinar el aporte de las áreas con vegetación en la Ciudad de México (Fig. 5).

El área seleccionada se ubicó al Norte de la zona núcleo Poniente en un sitio plano, la toma de datos se realizó al término de la temporada seca (mayo) y al inicio de la temporada húmeda (junio-julio) en 1995. Durante la medición la rapidez del viento fue de 0.61 a 2.85 m/s en la época seca y de 0.17 a 3.01 m/s en la temporada húmeda, con una orientación predominante de NE hacia SE (19:00-08:00 hora local) y de NNE a ENE (09:00-18:00 hora local).

Los resultados arrojaron que la mayor parte de la energía disponible fue disipada por el calor sensible (69%) y por calor latente (25%) en la temporada seca. Durante la temporada húmeda  $Q_n$  fue disipada por calor latente ( $Q_e$ ) (70%) y por calor sensible ( $Q_h$ ) (27%). El cambio de la partición de la energía disponible de  $Q_h$  a  $Q_e$  de la temporada seca a la húmeda, es debido al inicio de la temporada húmeda y a la fenología del Pedregal. Sin embargo, hay suficiente agua disponible en la temporada seca para que  $Q_e$  disipe el 25% de la radiación neta diaria. La energía almacenada en el suelo fue alta en la época seca, debido a que la lava está expuesta porque las plantas no tienen hojas.

Se concluyó que el efecto del Pedregal en sus alrededores es importante ya que se comporta como un disipador de calor y fuente de humedad en la temporada húmeda cuando el clima es cálido y viceversa durante la temporada seca cuando el clima es frío.



**Figura 5.** Mapa del sitio de estudio (punto negro) en donde se realizaron las mediciones para el balance energético de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (Barradas *et. al*, 1999).

## V. Justificación

A pesar de que el área de conservación ha ido aumentando en el tiempo para la REPSA (Lot y Camarena, 2009), los pedregales remanentes (PR) que se encuentran dispersos por el campus de Ciudad Universitaria no poseen una protección por la legislación universitaria. Una consecuencia de la falta de regulación de los PR es la conversión de éstos en infraestructura urbana (edificios, caminos, estacionamientos, etc.), sin tomar en cuenta el impacto ambiental de las construcciones.

La REPSA al ser una reserva urbana proporciona SEU a los habitantes de la zona sur ciudad, los cuales han sido identificados cualitativamente, por lo que se requiere una determinación cuantitativa (Nava *et al.*, 2009).

La regulación de la temperatura es uno de los SEU más importantes para enfrentar las consecuencias del cambio climático en las ciudades (Grimm *et al.*, 2008). La valoración del SE de regulación de temperatura podría ayudar a tener una planificación y desarrollo urbano ordenado en C.U., tomando en cuenta el aporte de humedad y la disminución de la temperatura por parte de los PR.

Aunque variables meteorológicas como temperatura y humedad entre otras y el balance energético ya se han descrito para la REPSA (Ortiz, 1980; Sánchez, 1990; Barradas *et al.*, 1999), aún no se ha estudiado el impacto microclimático de los PR en sus alrededores urbanizados.

Este estudio dará una visión general sobre el papel que juegan estos PR en el microclima de sus alrededores, en especial de uno que se encuentra en restauración ecológica y protegido por un convenio universitario.

## **VI. Hipótesis**

Las características del entorno, del relieve y de la vegetación de un pedregal remanente en proceso de restauración tienen un impacto en la regulación de algunos componentes del microclima de sus alrededores como la temperatura y el comportamiento de ésta es distinto a lo largo del día y del año.

## **VII. Objetivo General**

Evaluar las características térmicas de un pedregal remanente en proceso de restauración ecológica (Geopedregal) y de sus alrededores a lo largo de un año en Ciudad Universitaria de la UNAM.

### **Objetivos particulares:**

- Realizar una caracterización microambiental de algunos micrositos dentro del Geopedregal.
- Analizar las diferencias térmicas entre el Geopedregal y su entorno urbanizado.
- Realizar mapas de distribución de temperatura y déficit de presión de vapor del Geopedregal y de su entorno urbanizado.

## VIII. Sitio de estudio

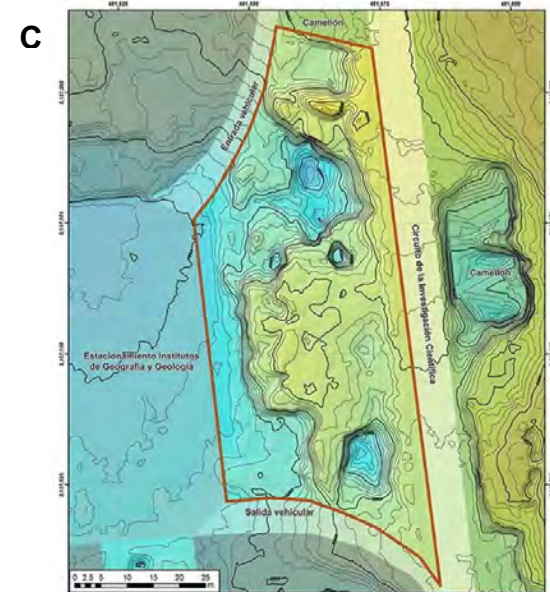
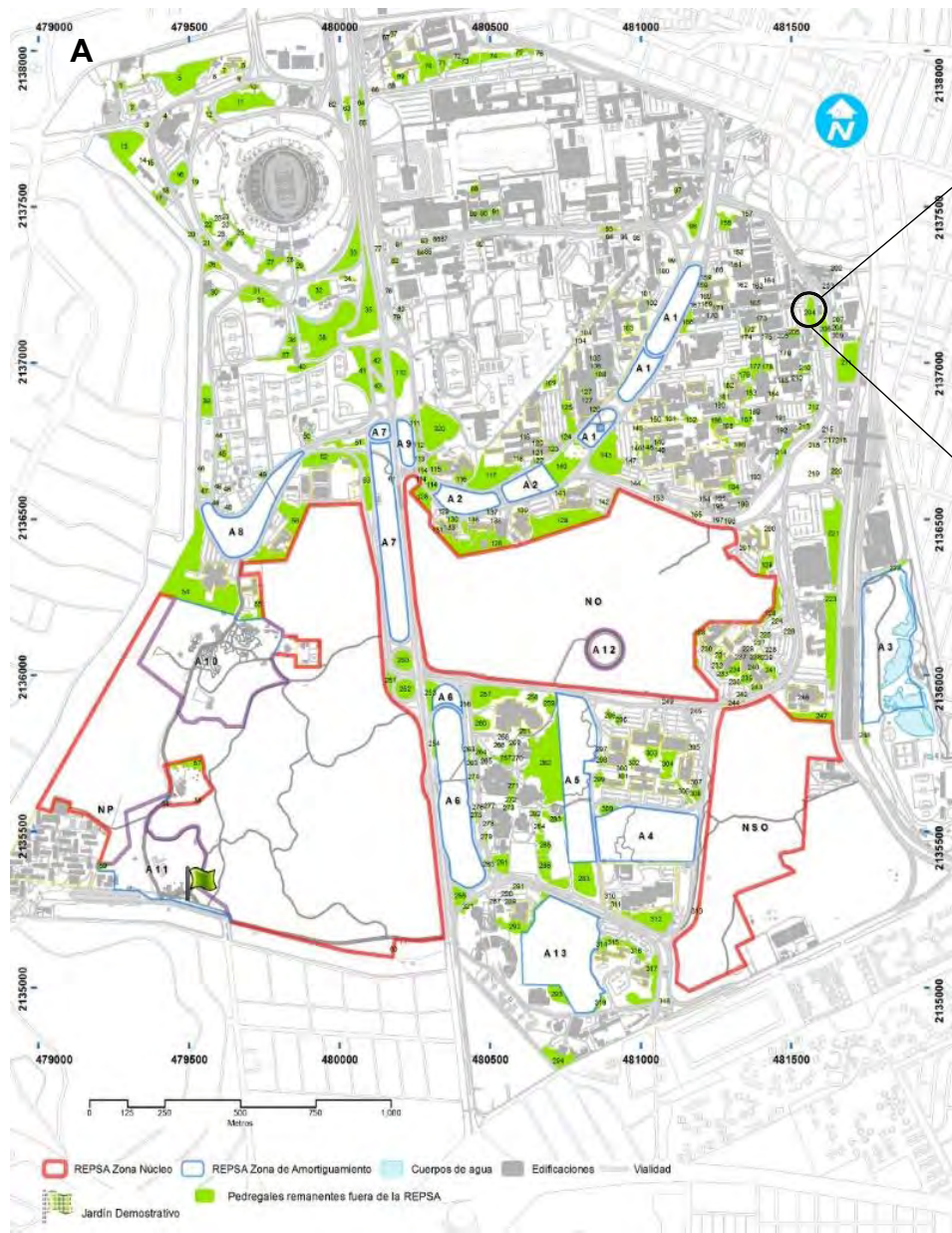
El Geopedregal forma parte del Programa de Adopción de Pedregales Remanentes (pedregal no. 204) (Zambrano *et al.*, 2016) y se encuentra sujeto a restauración ecológica bajo un proyecto de investigación cuyo objetivo es llevar a cabo la cuantificación y valoración de servicios ecosistémicos que éste ofrece. Este pedregal remanente fue adoptado por los Institutos de Geografía y Geología en abril del 2013, firmando un convenio de protección por tres años ante la coordinación de la Investigación Científica, éste ha sido renovado en 2016 como parte del compromiso entre los dos institutos para conservar este espacio.

El área del sitio es de 3052 m<sup>2</sup>, se encuentra localizado entre el estacionamiento de los Institutos de Geología y Geografía de la Ciudad Universitaria y el Circuito de la Investigación Científica (Fig. 6), con una orientación Norte-Sur. Está rodeado por los edificios del Anexo de Geografía al Noroeste, el Instituto de Geografía al Oeste, el Instituto de Geología y Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía al Suroeste.

El Geopedregal comparte vegetación nativa y todos los microambientes descritos para la REPSA, los microambientes identificados son: el sitio plano, que cubre la mayor extensión del sitio y se encuentra en la parte central de éste, una pared ubicada en la zona Noroeste, dos promontorios uno de ellos al Sur y otro al Norte, una hondonada central cerrada, una hondonada abierta con orientación al Este, grietas y oquedades de diferentes tamaños situadas en varias partes del sitio. De acuerdo con Valladares (2016) en el primer levantamiento de vegetación realizado en el sitio de estudio se encontró, que la especie arbórea más abundante fue *Buddleja cordata* con 22 individuos, distribuidos principalmente en hondonadas y en el sitio plano. La especie arbustiva más representativa fue *Bouvardia ternifolia* con 38 individuos concentrados principalmente en el sitio plano, esto realizado en el año 2012. También se ha identificado que la cobertura foliar de *Buddleja cordata* va desde 15 m<sup>2</sup> a 30 m<sup>2</sup> (Mendoza, 2016). En 2016 se estimó que de las 340 especies reportadas para la REPSA, el Geopedregal comparte 120, de éstas al menos 15 son especies invasoras

(Zeno, *com. pers.*, 2017). Tal es el caso del pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y pirúl (*Schinus molle*). La distribución y posible manejo del pasto kikuyo en el sitio ha sido descrita por Alcántara (2017), que corroboró que su distribución tiene una relación muy estrecha con la adición de materiales de desecho como cascajo a superficies de suelo nativo. El tipo de suelo que se encuentra en la zona de la periferia es un Tecnosol (FAO, 2007), proveniente de la actividad humana, muy común en áreas urbanas. Por otra parte hay zonas relativamente conservadas que poseen el suelo de la REPSA, descrito como un Leptosol lítico (Siebe *et al.*, 2016).

Ha habido estudios previos de variables microambientales como temperatura, humedad relativa e intensidad luminosa en ciertos microambientes dentro del sitio como en grietas, sitios planos y hondonadas (Valladares, 2016). Los valores de temperatura media reportados para el sitio plano en el año 2013 indicaron que el mes más cálido fue el de mayo con temperatura promedio de  $22.3 \pm 8.7^{\circ}\text{C}$ , una máxima de  $38.4^{\circ}\text{C}$  y mínima de  $3.5^{\circ}\text{C}$ , y el mes más frío el de marzo con una temperatura promedio de  $12.2 \pm 10.4^{\circ}\text{C}$ , con una máxima de  $38.9^{\circ}\text{C}$  y una mínima de  $-7.4^{\circ}\text{C}$ . En la hondonada fue  $20.3 \pm 6.5^{\circ}\text{C}$  como temperatura media en el mes de mayo, con una temperatura mínima de  $6.9^{\circ}\text{C}$  y máxima de  $37.5$  y en marzo  $12.1 \pm 8.2^{\circ}\text{C}$ , con una temperatura mínima de  $-3.8^{\circ}\text{C}$  y una máxima de  $35.2^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 6.** A) Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, se muestra en rojo zonas núcleo y en verde pedregales remanentes. Tomado de REPSA: <http://www.repsa.unam.mx/index.php/objetivosrepsa/conservacion/acciones-mitigacion/mit-rescate-pedregales> (Fecha de consulta 31/07/2017). B) Se observa en un círculo la ubicación del sitio de estudio (Geopedregal) (Google Earth, 2017), localizado en el campus de la Ciudad Universitaria de la UNAM, México D. F. Las líneas punteadas rojas, representan las mediciones móviles. C) Mapa de curvas de nivel del Geopedregal, realizado por Pablo Leautaud (2013).



## **IX. Materiales y método**

### **9.1 Calibración de equipos**

El protocolo que se utilizó para el registro de las diferentes variables ambientales, fue adaptado a las condiciones del sitio y ha sido el utilizado para identificar el impacto climático de áreas verdes en zonas urbanas (Barradas, 1991; Lee *et al.*, 2009; Oliveira *et al.*, 2011; Skoulika *et al.*, 2014). Las variables ambientales y el equipo de medición utilizado se describen en el cuadro 2. La intercalibración del equipo se realizó de acuerdo a la precisión y exactitud de los mismos en un cuarto de incubación a temperatura ( $24.6 \pm 0.2$  °C), humedad ( $23.5 \pm 0.1\%$ ) y fotoperiodo (16/8 h) constantes. Se seleccionaron los sensores con menores diferencias entre ellos después del registro por un periodo de 24 h (Anexo 1). Asimismo, se utilizaron dos estaciones meteorológicas (Pro 2 Plus, Davis Vantage, EUA) también calibradas en las mismas condiciones (cuadro 3) (Anexo 1).

Para los recorridos alrededor del sitio se utilizó un higrotermógrafo (11-661-8, Fisher Scientific, EUA) éste se calibró cubriéndolo con un lienzo húmedo y se esperó la lectura al 100 % de humedad relativa. Los recorridos se realizaron a pie alrededor del sitio en algunos días soleados y tuvieron una duración de aproximadamente 40-45 minutos, a la sombra de un paraguas a modo de abrigo termométrico, se empezaron y terminaron en el mismo punto. Para tomar las lecturas se esperó a que se equilibraran tomando de 0.5 a 1 min, para posteriormente ser registradas.

### **9.2 Instalación de sensores**

Se realizó un levantamiento preliminar de datos para observar las diferencias de temperatura y humedad relativa en un mismo microambiente y con ello, seleccionar los sitios donde se colocarían los sensores de manera permanente. Para estas mediciones, se seleccionó el sitio plano (Anexo 2) debido a la cobertura vegetal y exposición de la roca (Anexo 3). Para observar las características térmicas de los alrededores del Geopedregal, se colocaron sensores en la reja que lo rodea, de forma tal que cubrieran la mayor extensión posible, dependiendo de la proximidad al

pavimento y vegetación. Se instalaron tres sensores junto al circuito, con una separación entre ellos de 25 m. Otro sensor se colocó enfrente de un área verde cercana al circuito, dos sensores más en la entrada y salida del estacionamiento, dos en la reja junto al estacionamiento y uno dentro de éste (Fig. 7).

Con base a lo descrito por Santibáñez (2005) y Castillo-Argüero y col. (2007), se llevó a cabo la identificación de microambientes del Geopedregal, posteriormente se ubicó un sensor en una hondonada con poca vegetación y roca expuesta (en proceso de rehabilitación ecológica), con orientación al Este y uno en el sitio plano con roca expuesta y escasa vegetación (cuadro 4) (Fig. 7). Cada sensor se protegió contra la radiación solar directa con un techo de madera blanco. Una de las estaciones meteorológicas fue puesta en medio del Geopedregal en el sitio plano (Fig.8 C,D), en la parte más conservada y sin árboles altos, por último, la estación restante se colocó en una hondonada cerrada con vegetación abundante.

La altura a la que se instalaron los sensores de temperatura y humedad relativa, fue de 1.5 a 2 m, aunque recomendado por Oke (2006), por practicidad y para evitar el vandalismo se pueden colocar a una altura mayor, siempre y cuando se encuentre dentro del dosel urbano, puesto que esto no puede generar un gran error de medición.

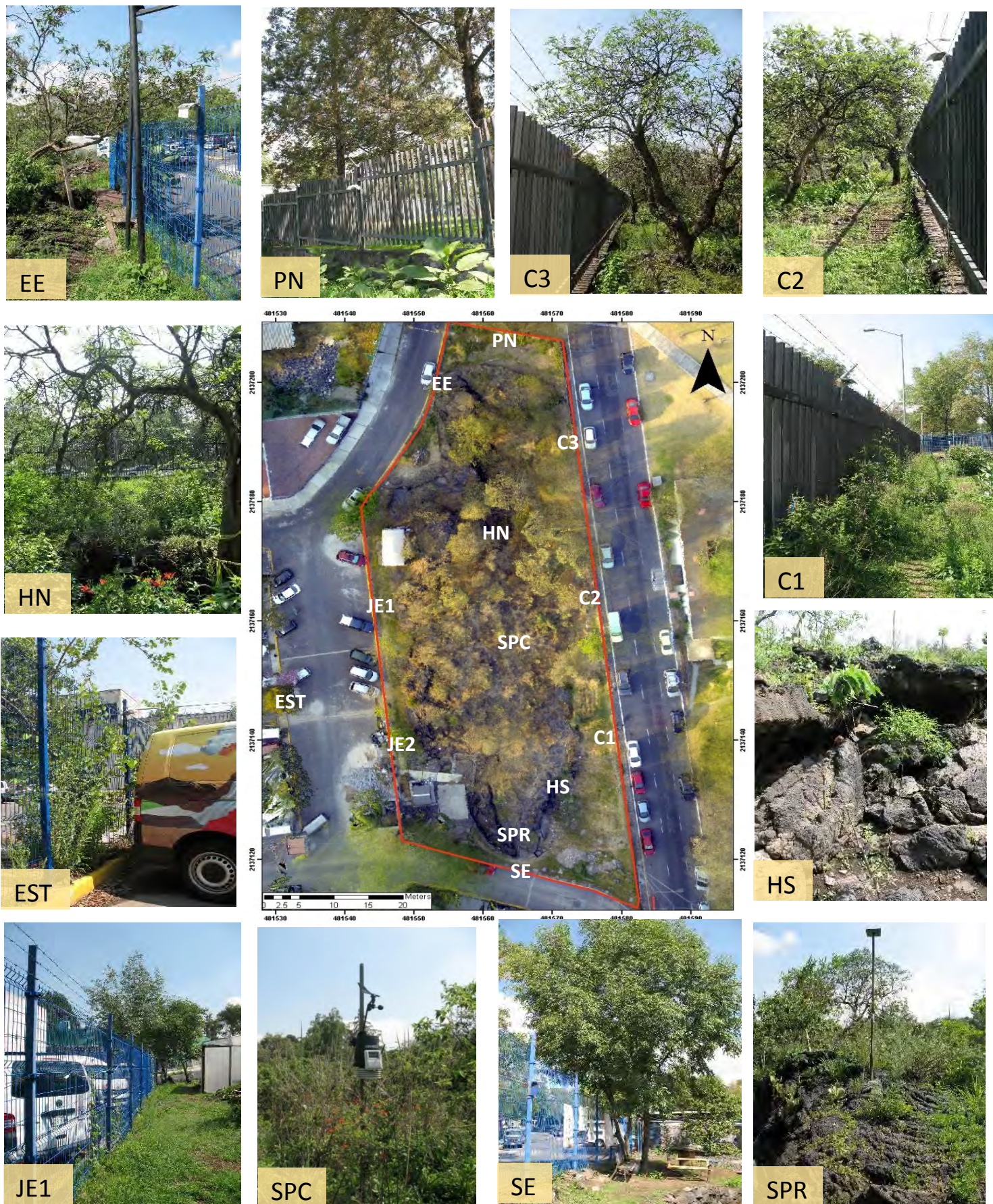
**Cuadro 2.** Equipos utilizados para el registro de variables ambientales

Sensor	Variable	Exactitud	Resolución	Intervalo de medición	Código de sensor	Corrección	
						°C	H.R.
HOBO UA-002-64 Pendant Temp/Light	Temperatura	T: ± 0.53 °C de 0° a 50 °C	0.14 °C a 25 °C	-20 a 70 °C	C1	-0.9	
					C3	-0.4	
					PN	-0.4	
					EE	-0.4	
HOBO U23-002 T/RH	Temperatura Humedad relativa	T: ± 0.21 °C de 0° a 50°C HR: ± 2.5 % de 10 a 90 % HR	T: 0.02°C a 25°C HR: 0.03%	T: 40 a 70 °C HR: 0-100% HR, -40 a 70 °C	C2	0	-2.9
					EST	0.1	1.7
					INV	0.2	-4.7
HOBO S-THB- M008	Temperatura Humedad relativa	T: ± 0.21 °C de 0 a 50 °C HR: ± 2.5 % de 10 a 90 % HR	T: 0.02 °C a 25 °C RH: 0.1% HR a 25 °C	T: -40 °C a 75 °C	M1	-0.2	0.3
					M2	0	1.4
					SP	0	-0.3
					HSV	-0.2	2.2

**Cuadro 3.** Variables medidas por las estaciones meteorológicas Davis Vantage Pro 2 Plus (Calibración ANEXO 1, cuadro 6)

Variable	Exactitud	Resolución	Intervalo de medición
Viento	Dirección del viento: 3 Rapidez del viento: > 1 m/s, 5 km/h ó 5%	Dirección del viento: 1 Rapidez del viento: 0.5 m/s; 1 km/h	Dirección del viento: 0 a 360° Rapidez del viento: 1.5 a 79 m/s, 5 a 282 km/h
Temperatura	0.5 °C	0.1 °C	-40 °C a +65 °C
Humedad relativa	3 % RH; 4 % sobre el 90 %	1%	0 a 100%
Radiación Solar	5 % en plena escala	1 W/m <sup>2</sup>	0 a 1800 W/m <sup>2</sup>
Precipitación	mayor de 4%	0.25 mm	a 999.9mm
Evapotranspiración	mayor de 5% o 0.25 mm	0.25 mm	Diario a 999.9 mm; Mensual y anual a 1999.9 mm





**Figura 7.** Ubicación de los sensores de acuerdo a los microambientes caracterizados en el sitio de estudio y su entorno urbanizado. Imagen adquirida por Peralta, 2015 con un vuelo aéreo en un dron. Fotografías de los sitios: Wall, 2016. C1: Circuito 1; C2: Circuito 2; C3: Circuito 3; PN: Promontorio Norte; EE: Entrada Estacionamiento; JE1: Junto Estacionamiento 1; JE2: Junto Estacionamiento 2; EST: Estacionamiento; SE: Salida Estacionamiento; SPR: Sitio Plano Restaurado; HS: Hondonada Sur; SPC: Estación Sitio Conservado; HN: Hondonada Norte.

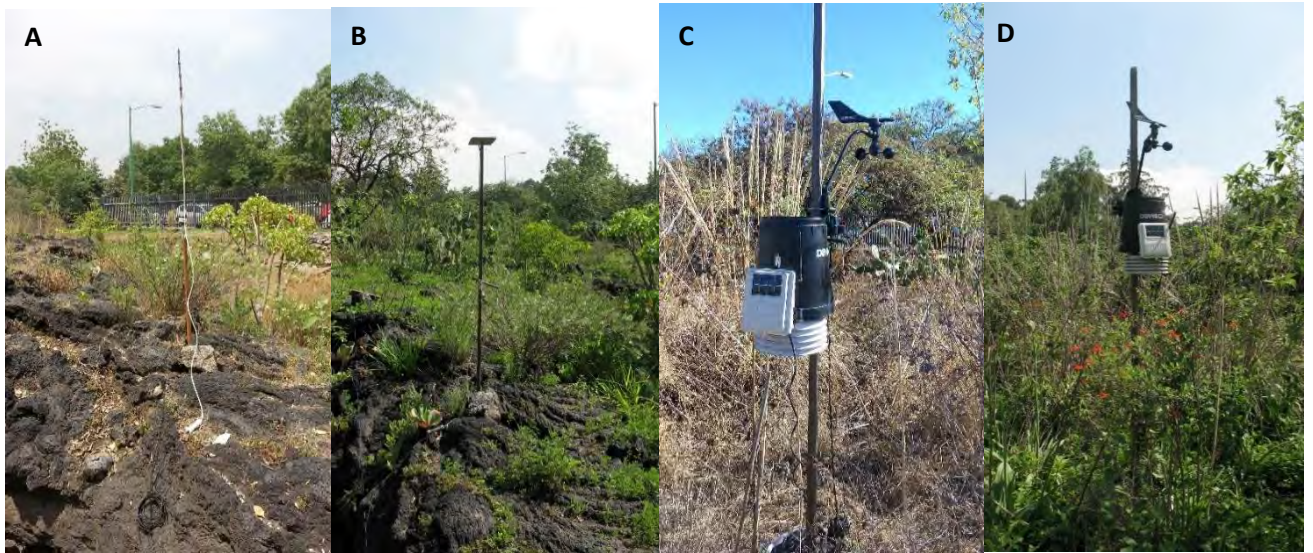


**Cuadro 4.** Altura y descripción de los micrositios donde se instaló el instrumental en el pedregal en restauración (Geopedregal).

Sensor	Descripción
C1: Circuito 1, ubicado junto al Circuito de la Investigación Científica	Altura: 2 m Vegetación: pasto kikuyo, herbáceas y arbustivas (ej. <i>Dahlia coccinea</i> e <i>Iresine</i> sp.). Sin estrato arbóreo.
C2: Circuito 2, ubicado junto al Circuito de la Investigación Científica	Altura: 2 m Vegetación: herbáceas y pasto kikuyo, algunas especies invasoras. Sustrato arbóreo cercano: <i>Buddleja cordata</i> : c.c.: 2.8 m Distancia: 4.4 m <i>Fraxinus uhdei</i> : c.c.: 2.6 m Distancia: 4.6 m
C3: Circuito 3, ubicado junto al Circuito de la Investigación Científica	Altura: 2 m Vegetación: Poco pasto kikuyo, mayormente herbáceas ( <i>Cissus cysoides</i> y <i>Oxalis divergens</i> ) Sustrato arbóreo cercano: <i>B. cordata</i> : c.c.: 4 m Distancia: 1.8 m
PN: Promontorio Norte, cercano a área verde contigua al Geopedregal	Altura: 2.5 m Vegetación: pasto kikuyo, estrato arbóreo: <i>Cupressus</i> (cedros). a) c.c.: 3.7 m, distancia: 3.4 m b) c.c.: 5.3 m, distancia: 2.5 m
EE: Entrada Estacionamiento, situado cercano a la pluma del estacionamiento de los Institutos de Geología y Geografía	Altura: 2 m Junto a asfalto Vegetación: pasto kikuyo, sustrato arbóreo: <i>B. cordata</i> c.c.: 2.3 m, distancia: 3.6
JE1: ubicado junto al estacionamiento de las camionetas del Instituto de Geografía.	Altura: 1.7 m Junto a asfalto Vegetación: pasto kikuyo, sustrato arbóreo: <i>F. uhdei</i> Distancia: 6 m c.c.: 3.5 m
JE2: ubicado junto al estacionamiento de las camionetas del Instituto de	Altura: 1.7 m Junto a asfalto Vegetación: pasto kikuyo y algunas herbáceas.

Geología.	
EST: Estacionamiento, situado en un extremo del estacionamiento de los Institutos de Geología y Geografía	Altura: 2.4 m Junto a asfalto Vegetación: cerca de una jardinera: 1x 1 m, con herbáceas y <i>Bauhinia</i> sp.
SE: ubicado frente al invernadero del Instituto de Geología y en la salida del estacionamiento.	Altura: 1.7 m Junto a asfalto Vegetación: pasto kikuyo y estrato arbóreo: <i>F. uhdei</i> c.c.: 4.1 m distancia: 5.1 m
SPR: Sitio Plano Restaurado, situado en la zona Sur del Geopedregal.	Altura: 1.7 m Roca expuesta, suelo somero Vegetación: algunas herbáceas como <i>Crotalaria pumila</i> , <i>Portulaca mexicana</i> , ambrosia y arbustivas como <i>Asclepiadina</i> , musgo poco abundante
HS: Hondonada Sur, situada en la zona Sureste del Geopedregal.	Altura: 1.6 m Roca expuesta Vegetación: pocas herbáceas, cerca de <i>Senna septentrionalis</i> y algunas enredaderas. *En proceso de rehabilitación
SPC: Sitio Plano Conservado, ubicada en la zona central del Geopedregal.	Altura del anemómetro: 2.1 m Altura del sensor de temperatura: 1.8 m Vegetación: herbáceas como <i>Manfreda brachystachya</i> , <i>Oxalis divergens</i> , <i>Dioscorea galeottiana</i> , <i>Ipomea violácea</i> , estrato arbustivo como <i>Bouvardia ternifolia</i> , <i>Montanoa tomentosa</i> y <i>Muhlenbergia robusta</i> .
HN: Hondonada Norte, situada al Norte del sitio.	Altura del anemómetro: 2 m Altura del sensor de temperatura: 1.8 m Roca expuesta, poco suelo Estrato herbáceo: <i>Commelina coelestis</i> , <i>Geranium seemannii</i> , <i>D. galeottiana</i> y estrato arbóreo <i>B. cordata</i> Distancia: 2 m c.c.: 3 m

\*c.c.: Cobertura de la Copa, \* Levantamiento realizado en la época húmeda



**Figura 8. Instrumentación de los sensores en el Geopedregal:** A, sensor en el sitio plano restaurado, época seca. B, sensor en el sitio plano restaurado, época húmeda. C, estación meteorológica en el sitio plano conservado, época seca. D, estación meteorológica en el sitio plano conservado, época húmeda. Fotos: Wall, 2015, 2016.

### 9.3 Toma de datos

Los datos de temperatura del aire, humedad relativa, rapidez y dirección del viento, radiación solar y precipitación, se recolectaron de junio del 2015 a mayo del 2016, al principio de la temporada húmeda y finales de la temporada seca. El registro de la temperatura del aire y de la humedad relativa se realizó cada 10 min a lo largo del día.

Con base en la temperatura mensual de la estación del sitio plano conservado, se clasificó el periodo de estudio en tres temporadas, época húmeda (junio a septiembre) que comprendió los meses con mayor precipitación y temporada seca la cual fue dividida en: fría (octubre a marzo) y cálida (abril y mayo), ésta fue dividida con base en las diferencias significativas de la temperatura en el sitio plano conservado.

La humedad ambiental se expresó en términos del déficit de presión de vapor (DPV) que fue calculado a partir de la temperatura ambiente y de la humedad relativa (HR) de la siguiente ecuación (Allen *et al.*, 2006):

$$DPV = e_s(1 - HR),$$

donde  $e_s$  es la presión de vapor de saturación (kPa), HR es la humedad relativa con valores de 0 a 1 y DPV está dada en kPa. La presión de vapor de saturación se obtuvo de la siguiente fórmula:

$$e_s = 0.6108 e^{\frac{17.27T}{T+237.3}}$$

donde T es la temperatura del aire (°C).

La información registrada se descargó semanalmente y se construyó una base datos en una hoja computacional (Excel, Windows 2010).

#### **9.4 Caracterización microambiental en algunos micrositios dentro del Geopedregal**

La caracterización microambiental fue realizada en los siguientes micrositios: hondonada Norte, hondonada Sur, sitio plano conservado y sitio plano restaurado.

Para realizar esta caracterización se utilizaron los promedios por hora en cada micrositio durante todos los días de las temporadas. Se tomó el periodo de día a partir del primer registro de radiación solar y como noche la ausencia de radiación solar. Se realizó un análisis de varianza unifactorial con un programa computacional (Statistica 10, StatSoft, EUA) para determinar diferencias significativas entre las variables medidas durante las diferentes épocas, posteriormente se aplicó una prueba de diferencia mínima significativa de Fisher (DMS) con una alfa de 0.05.



## 9.5 Diferencias térmicas entre el Geopedregal y su entorno urbanizado

Las condiciones atmosféricas consideradas para la identificación de diferencias térmicas entre el Geopedregal y su entorno fueron: cielo despejado, y rapidez del viento no mayor a 10 m/s. Se eliminaron todos los registros de los días lluviosos y nublados (Upmanis *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2009; Skoulika, *et al.*, 2014). Esta información se obtuvo de la estación meteorológica encontrada en el sitio plano del sitio y se verificó con la estación meteorológica del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, ubicada a una distancia de 200 m. Se consideraron días soleados con una radiación solar mayor de 500 W/m<sup>2</sup> durante las horas de máxima radiación solar. Se realizó un análisis de varianza unifactorial con un programa computacional (Statistica 10, StatSoft, EUA) para comparar los datos registrados en la temperatura mínima (7:00 h), en la temperatura máxima (15:00 h), en el día y la noche, durante las tres épocas, posteriormente se aplicó una prueba de diferencia mínima significativa de Fisher (DMS) con una alfa de 0.05. Así mismo con los resultados del análisis estadístico se realizaron mapas de distribución de la temperatura y del déficit de presión de vapor utilizando un programa computacional (Surfer© 8, Golden Software, EUA) el cual interpola y extrapola puntos a partir de una base de datos relacionada a un mapa base (Golden Software, 2012).

### 9.5.1 Diferencias extremas de temperatura del aire entre un micrositio dentro del Geopedregal y fuera de él

Para determinar las diferencias de temperatura del aire dentro del sitio y fuera de él, se seleccionaron dos sensores de temperatura con diferencias significativas entre ellos en las distintas épocas del año con la siguiente relación:  $\Delta T = T_p - T_g$ , donde  $T_p$  es la temperatura promedio de cada hora en la periferia del sitio y  $T_g$  es la temperatura promedio de cada hora dentro del Geopedregal.

### **9.5.2. Distribución de temperatura de recorridos a pie**

Se realizaron mapas de distribución de la temperatura utilizando los datos registrados en los recorridos, utilizando un programa computacional (Surfer© 8, Golden Software, EUA). Los datos se corrigieron al restar la temperatura inicial y final tomadas en el mismo punto, posteriormente este resultado se restó a todos los datos de temperatura del recorrido.

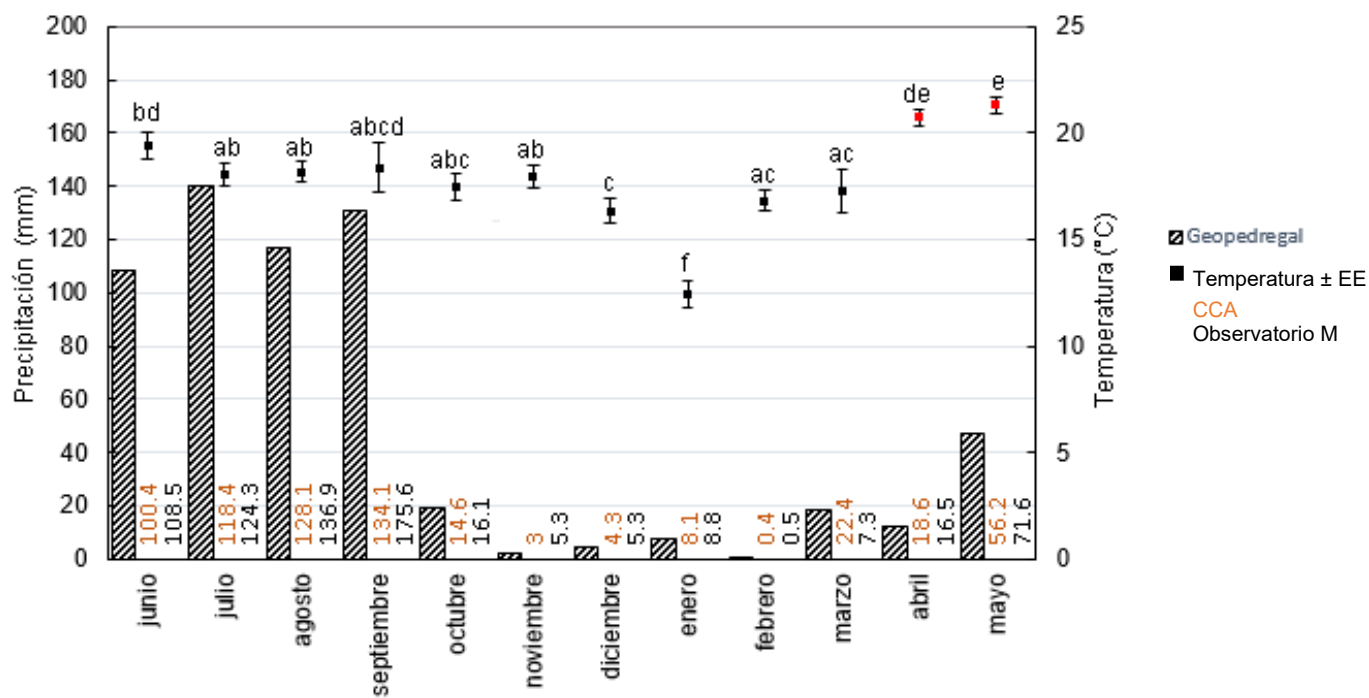
### **9.5.3 Termografías**

Adicionalmente, se tomaron termografías del sitio de estudio y del estacionamiento de Geología y Geografía adyacente en un día soleado de mayo de 2015 con una cámara térmica (PCE-TC 3 de PCE instruments, Alemania) desde el edificio del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía situado en la parte Sur del edificio a menos de 10 m del sitio, y a una altura de aproximadamente 12 m.

## X. Resultados

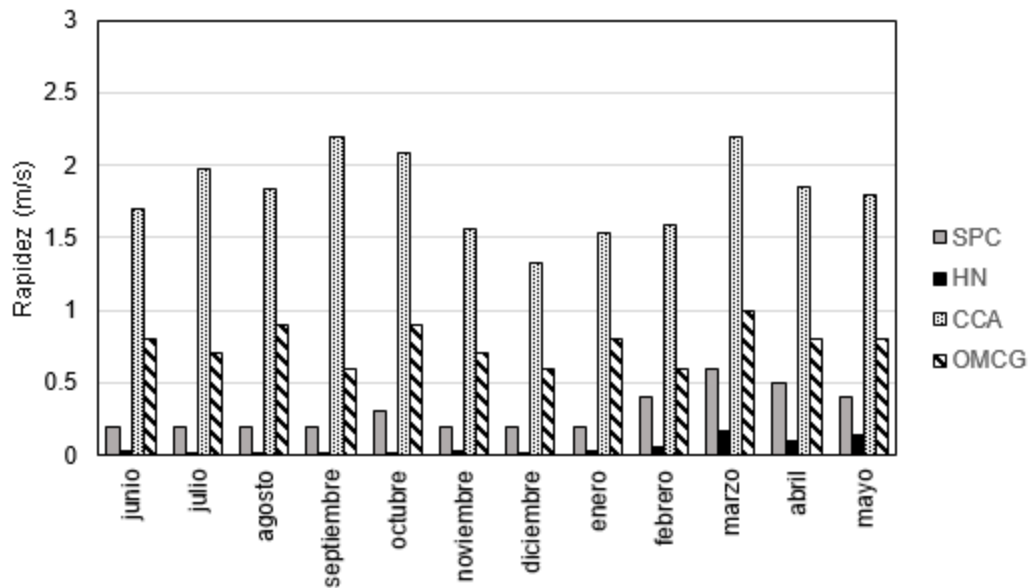
### 10.1 Caracterización microambiental en algunos micrositos dentro del Geopedregal

La temporada húmeda comprendió los meses de junio a septiembre y la temporada seca los meses de octubre a mayo. El mes con mayor precipitación fue julio del 2015 registrándose 140 mm de lluvia, mientras que el menor evento de precipitación se presentó en febrero del 2016 (0.4 mm). Se observaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en la temperatura del sitio plano conservado durante los meses ( $F(11,44629) = 511.3, p = 0.00$ ), el mes con menor temperatura fue enero del 2016 y los meses más cálidos fueron abril y mayo del 2016 (Fig. 9).



**Figura 9.** Registros de precipitación total mensual de junio del 2015 a mayo del 2016 en tres estaciones localizadas en Ciudad Universitaria: Geopedregal, Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) y Observatorio Meteorológico del Colegio de Geografía (Observatorio M) ubicado cerca de los campos deportivos, y temperatura del aire en el Geopedregal (sitio plano conservado). Las letras distintas en la temperatura indican diferencias entre ellas (LSD,  $\alpha = 0.05$ ).

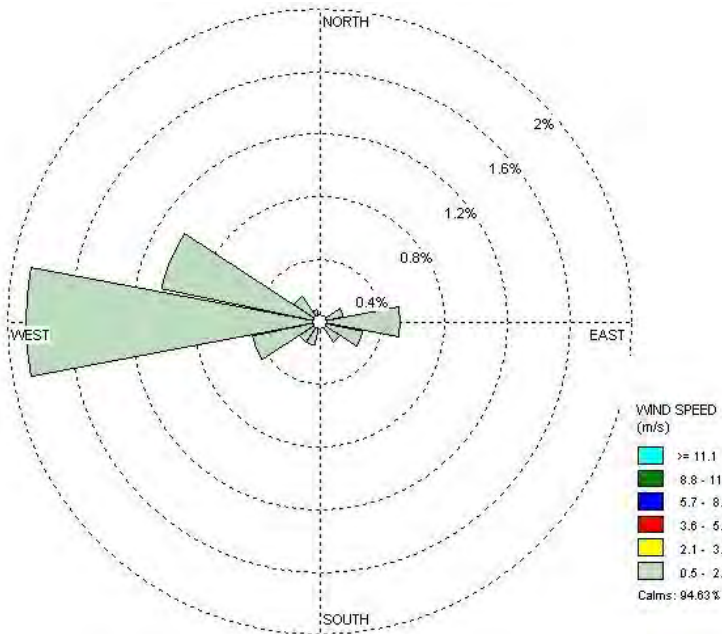
Para el Geopedregal en el sitio plano conservado la rapidez promedio del viento fue de 0.2 a 0.6 m/s, siendo marzo el mes con mayor rapidez promedio y con vientos máximos de 9.8 m/s. En la hondonada Norte se encontró rapidez promedio baja (0.005 a 0.165 m/s<sup>2</sup>) siendo septiembre el mes con menor valor y marzo con el mayor promedio. La rapidez promedio mayor entre los cuatro sitios fue observada en el CCA (Fig. 10).



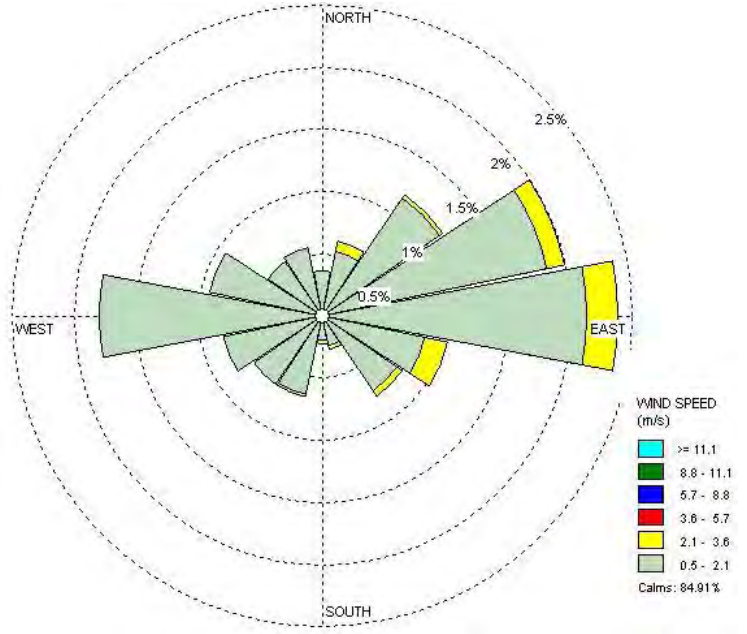
**Figura 10.** Rapidez promedio del viento registrada de junio del 2015 a mayo del 2016 en varias estaciones localizadas en Ciudad Universitaria de la UNAM: Geopedregal (en dos microambientes, sitio plano conservado y hondonada Norte), en el Centro de Ciencias de la Atmosfera (CCA) localizado a 200 m de éste y en el Observatorio Meteorológico del Colegio de Geografía (Observatorio M) ubicado cerca de los campos deportivos.

Los vientos menores a 0.5 m/s en el sitio plano conservado durante la época húmeda fue del 95 %, en la época seca fría fue el 85% y en la época seca cálida fue del 68 %, el porcentaje restante del total de los vientos se encuentran graficados en la figura 11, mostrando vientos mayores de 0.5 a 3.6 m/s. En la hondonada Norte la mayoría de los vientos fueron menores a 0.5 m/s, en la época húmeda fue un 99.8 % y en la época seca fría y cálida fue del 98 %.

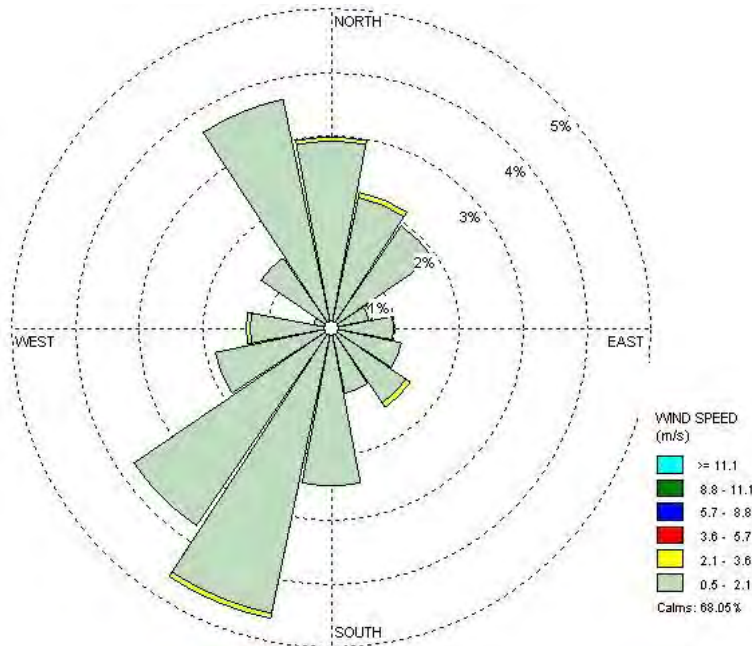
### Época húmeda



### Época seca fría



### Época seca cálida



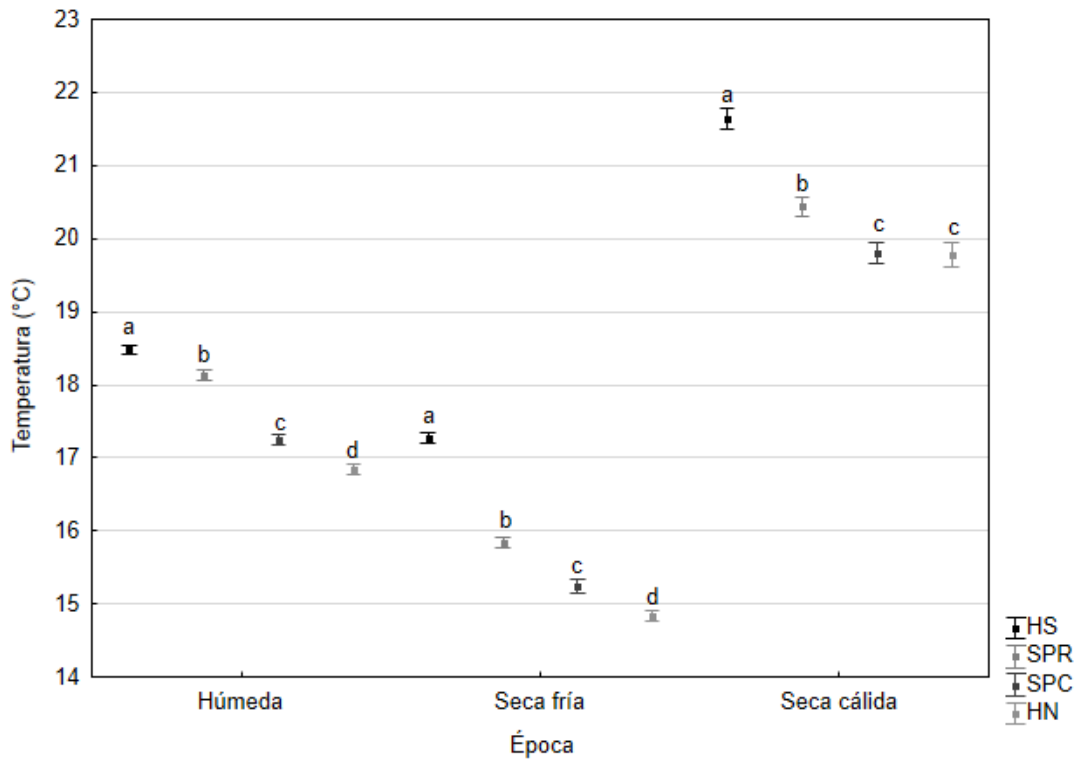
**Figura 11.** Gráficos que ilustran la dirección proveniente de la ráfaga y la rapidez del viento en las diferentes épocas del año registrados en el sitio plano conservado en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica (Geopedregal) dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM.

La radiación solar máxima registrada en el sitio plano conservado, en la época húmeda fue  $1023 \text{ W/m}^2$ , en la época seca fría ( $877 \text{ W/m}^2$ ) y en la época seca cálida ( $1101 \text{ W/m}^2$ ). La radiación solar máxima registrada en la hondonada Norte, en la época húmeda ( $957 \text{ W/m}^2$ ), en la época seca fría ( $760 \text{ W/m}^2$ ) y en la época seca cálida ( $1066 \text{ W/m}^2$ ).

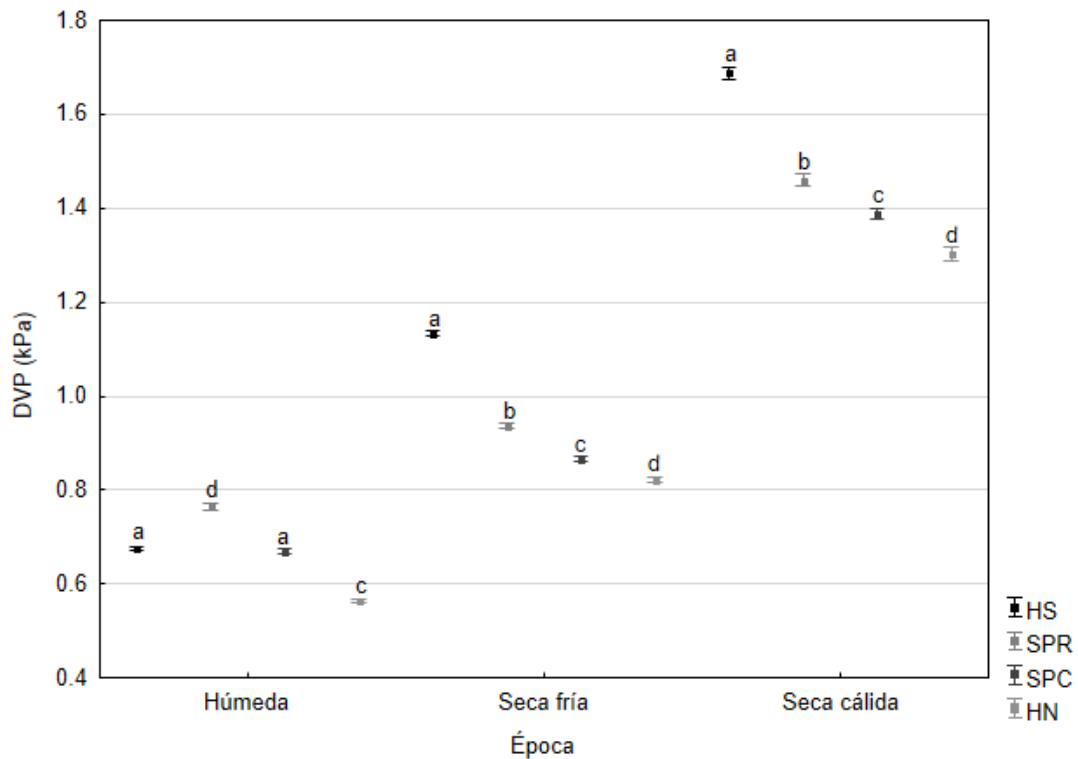
El análisis de varianza complementado con una prueba de diferencia mínima significativa de Fisher (DMS) arrojó los siguientes resultados que en esta sección se mencionan. La temperatura varió significativamente entre los microambientes en la época húmeda ( $F(3, 62429)=488, p<0.05$ ), en la época seca fría ( $F(3,95744)= 700.8, p<0.05$ ) y en la época seca cálida ( $F(3,31316)= 151.9, p<0.05$ ). No se encontraron diferencias significativas entre el sitio plano conservado y la hondonada Norte durante la época seca cálida (LSD,  $\alpha=0.05$ ) (Fig.12).

La temperatura media más alta durante las tres épocas se registró en la hondonada Sur y la temperatura media menor para la época húmeda y época seca fría se registró en la hondonada Norte. En la época seca cálida las temperaturas medias más bajas se registraron en hondonada Norte y en el sitio plano conservado. También se observó que las temperaturas menores para todos los sitios se registraron en época seca fría y las mayores en época seca cálida (Fig. 12).

Para el DPV se encontraron diferencias significativas en todos los microambientes en todas las épocas, en época húmeda ( $F(3,62429)=238.47, p<0.05$ ), en época seca fría ( $F(3,95744)= 703.6, p<0.05$ ) y en época seca cálida ( $F(3,31316)=156.44, p<0.05$ ), excepto en la hondonada Sur y en el sitio plano conservado durante la época húmeda (LSD,  $\alpha=0.05$ ) (Fig. 13). Los mayores valores de DPV se registraron en la hondonada Sur excepto en la época húmeda, en cambio en la hondonada Norte se presentaron los menores valores en todas las épocas.



**Figura 12.** Temperatura media registrada en tres temporadas, en cuatro microambientes de un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica (Geopedregal) en Ciudad Universitaria, UNAM. Las letras distintas en cada serie (húmeda, seca fría y seca cálida) indican diferencias entre cada microambiente (LSD  $\alpha=0.05$ ). Las barras muestran  $\pm$  E.E. (HS=hondonada Sur; SPR= sitio plano restaurado; SPC= sitio plano conservado, HN=hondonada Norte)



**Figura 13.** Déficit de presión de vapor medio registrado en tres temporadas, en cuatro microambientes de un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica (Geopedregal) dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM. Las letras distintas en cada serie (Húmeda, Seca Fría y Seca Cálida) indican diferencias entre cada microambiente (LSD  $\alpha = 0.05$ ). Las barras muestran  $\pm$  E.E. HS= hondonada Sur; SPR= sitio plano restaurado; SPC= sitio plano conservado; hondonada Norte= hondonada Norte.

## 10.2 Diferencias térmicas entre el Geopedregal y su entorno urbanizado

### Temperatura

#### *Época húmeda*

El análisis de varianza complementado con una prueba de diferencia mínima significativa de Fisher (DMS) mostró que durante la noche circuito 1 y hondonada Sur tuvieron diferencias significativas con el resto de los sitios, siendo circuito 1 la temperatura media (T media) más baja y hondonada Sur la más alta (LSD,  $\alpha=0.05$ ) (Fig. 14, A). También se presentaron diferencias significativas en el día ( $F(12,2386)=6.5$ ,  $p<0.05$ ) y en la noche ( $F(12,2388)=6.39$ ,  $p<0.05$ ) en todos los sitios. Las medias que no tuvieron diferencias significativas entre ellas durante el día fueron circuito 3, hondonada Sur y sitio plano conservado, siendo éstas parte de las medias más bajas registradas, mientras que las más altas y sin diferencias significativas entre ellas fueron la salida y junto al estacionamiento (LSD,  $\alpha=0.05$ ) (Fig. 14, B) (Anexo 4, fig.4).

Durante la temperatura mínima a las 7:00 h existieron diferencias significativas ( $F(12,187)=2.926$ ,  $p<0.05$ ) entre los sitios, excepto en circuito 1 con la Tmedia más baja y en hondonada Sur con la más alta (Fig. 14, C). Para la temperatura máxima 15:00 h se encontraron diferencias significativas ( $F(12,187)=17.12$ ,  $p<0.05$ ); excepto en la entrada del estacionamiento, en la parte media el mismo y junto a éste (JE1) (LSD,  $\alpha=0.05$ ) (Fig. 14, D) (Anexo 4, fig. 5).

#### *Época seca fría*

Durante la noche se hallaron diferencias significativas ( $F(12,5444)=7.85$ ,  $p<0.05$ ), registrándose en circuito 1 la menor T media y la mayor en hondonada Sur (Fig.15, A). Se encontraron diferencias significativas en el día ( $F(12,5114)=12.19$ ,  $p<0.05$ ) (LSD,  $\alpha=0.05$ ) para todos los sitios excepto circuito 3, salida estacionamiento, sitio plano restaurado y sitio plano conservado, siendo las menores T media registradas durante el día junto con la hondonada Norte (Fig.15, B) (Anexo. 4, fig.6).

A las 7:00 h no se encontraron diferencias significativas ( $F(12,428)=p>0.05$ ) entre los sitios (Fig.15, C), aunque si lo fueron para las 15:00 h ( $F(12,428)=21.28$ ,  $p<0.05$ ),

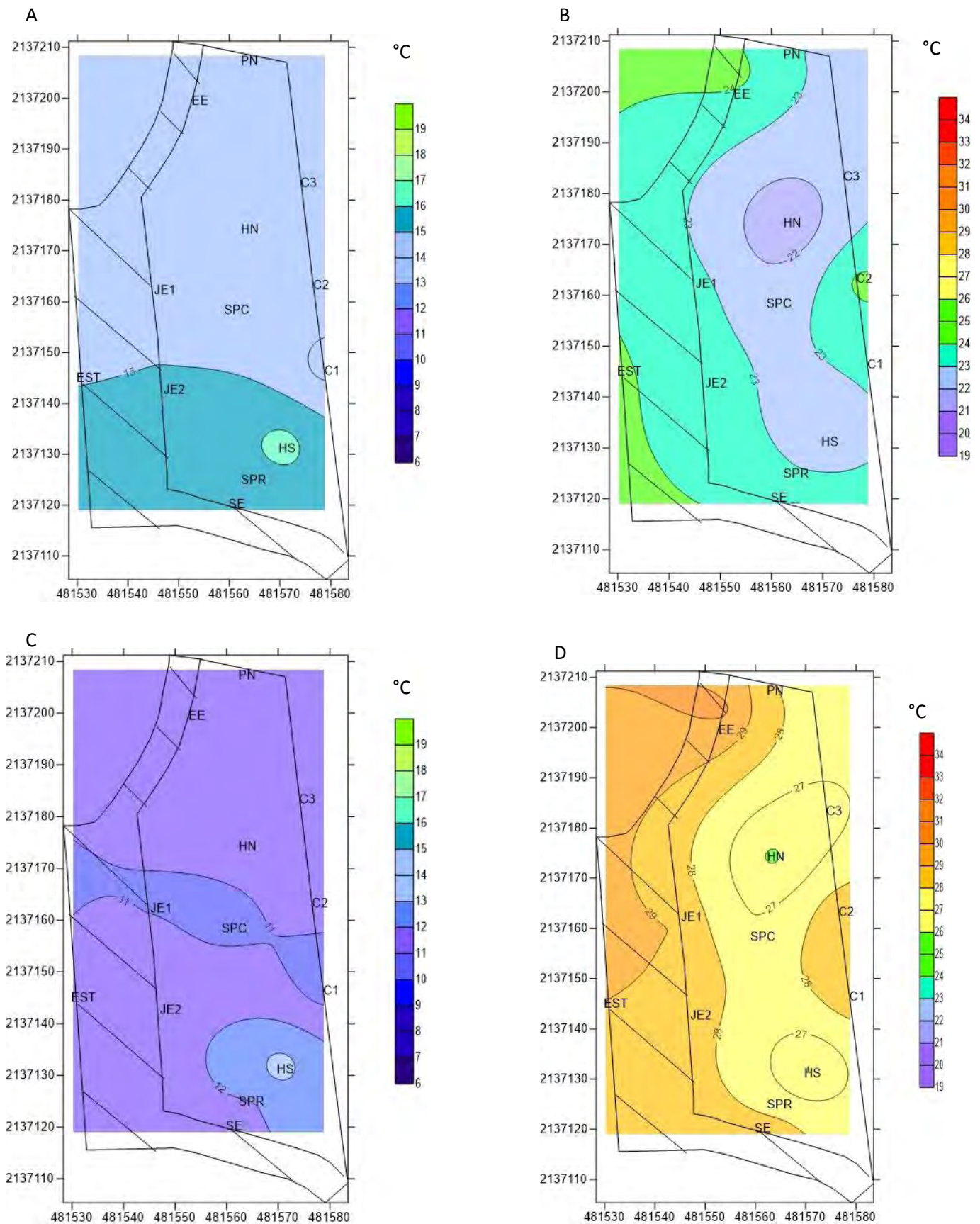


presentándose las T media (LSD,  $\alpha=0.05$ ) mayores en JE1 (junto al estacionamiento), promontorio Norte, hondonada Sur y entrada del estacionamiento (Fig.15, D) (Anexo 4, fig. 7).

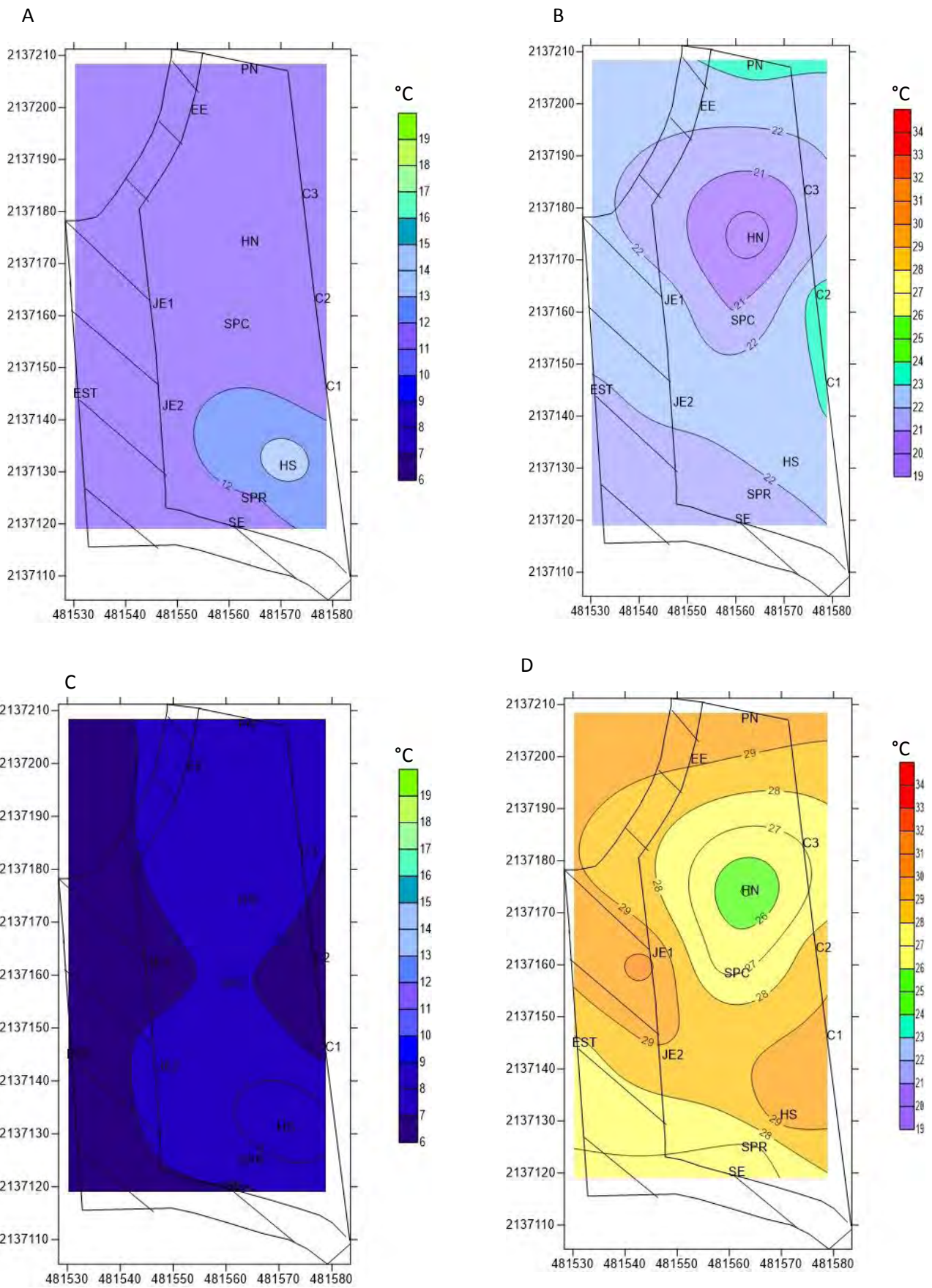
#### *Época seca cálida*

Durante la noche se encontraron diferencias significativas ( $F(12,3647)=9.42$ ,  $p<0.05$ ), teniendo la hondonada Sur la mayor T media registrada (Fig.16, A). También se encontraron diferencias significativas en el día ( $F(12,3983)=3.66$ ,  $p<0.05$ ), excepto en circuito 2 y hondonada Sur, siendo estas dos las mayores T media registradas, la menor T media registrada fue en el sitio plano conservado (Fig.16, B) (Anexo 4, fig. 8). A las 7:00 h se presentaron diferencias significativas ( $F(12,306)=3.53$ ,  $p<0.05$ ) siendo la hondonada Norte y hondonada Sur los sitios con la mayor T media (Fig.16, C). A las 15:00 h fueron encontradas diferencias significativas ( $F(12,306)=17.0$ ,  $p<0.05$ ) entre los sitios, excepto en la entrada del estacionamiento y junto al estacionamiento (JE1 y JE2), siendo junto con la hondonada sur los sitios con mayor T media (Fig.16, D). Los sitios con menor T media fueron la hondonada Norte, sitio plano conservado, sitio plano restaurado, circuito 3 y promontorio Norte (Anexo 4, fig. 9).

Estos resultados fueron plasmados en mapas de distribución de temperatura, los cuales se muestran a continuación.

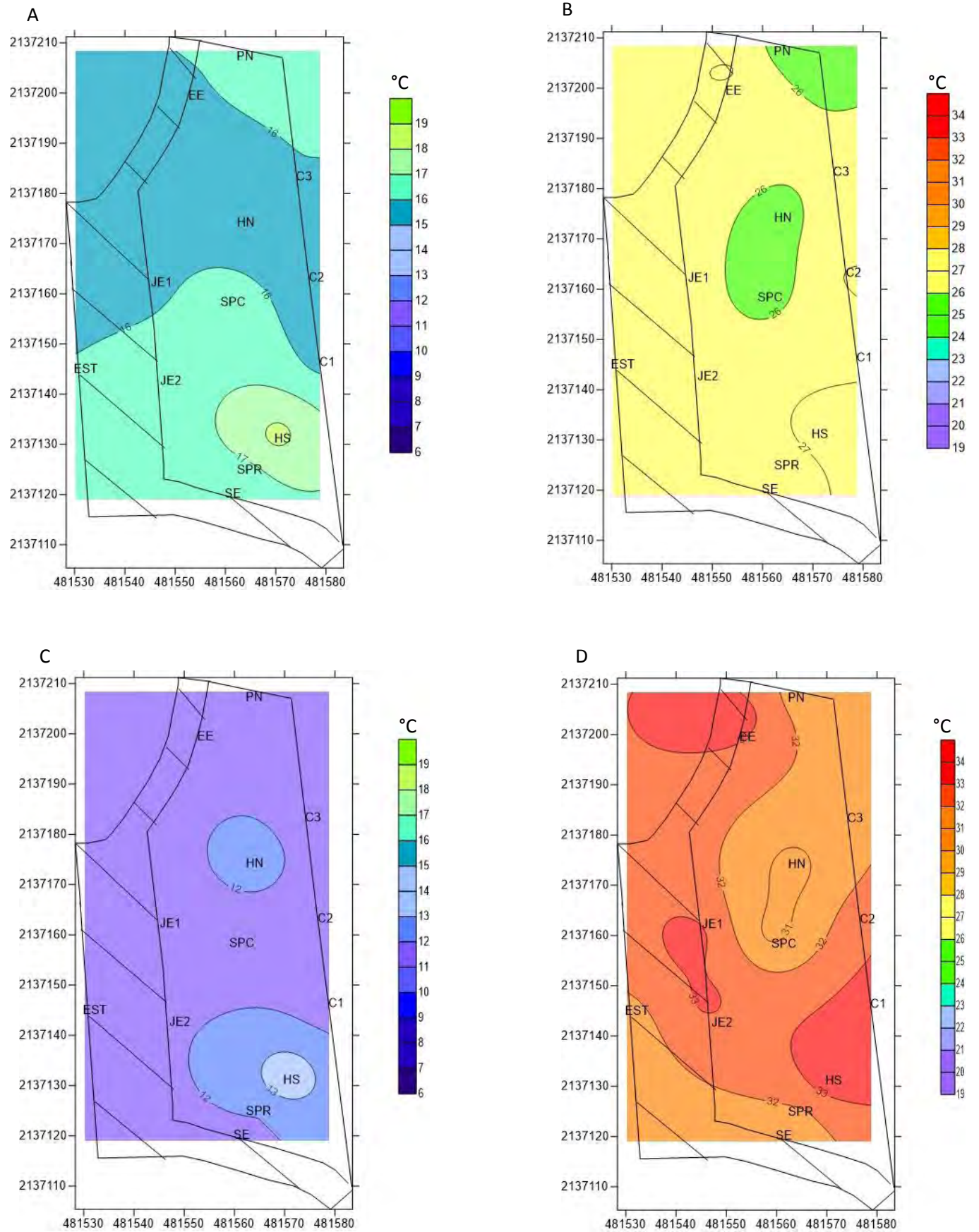


**Figura 14.** Distribución de la temperatura en la época húmeda (junio-septiembre) en el año 2015, A) noche, B) día, C) mínima y D) máxima, en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM C1=Circuito 1, C2=Circuito 2, C3= Circuito 3, PN= Promontorio Norte, EE= Entrada Estacionamiento, JE1= Junto a estacionamiento 1, JE2= Junto a estacionamiento 2, SE= Salida Estacionamiento, SPR= Sitio Plano Restaurado, HS= Hondonada Sur, SPC= Sitio Plano Conservado, HN= Hondonada Norte



**Figura 15.** Distribución de la temperatura en la época seca fría (octubre-marzo) en el año 2015 y 2016, A) noche, B) día, C) mínima y D) máxima, en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM. C1=Circuito 1, C2=Circuito 2, C3= Circuito 3, PN= Promontorio Norte, EE= Entrada Estacionamiento, JE1= Junto a estacionamiento 1, JE2= Junto a estacionamiento 2, SE= Salida Estacionamiento, SPR= Sitio Plano Restaurado, HS= Hondonada Sur, SPC= Sitio Plano Conservado, HN= Hondonada Norte





**Figura 16.** Distribución de la temperatura en la época seca cálida (abril-mayo) en el año 2016, A) noche, B) día, C) mínima y D) máxima, en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM. C1=Circuito 1, C2=Circuito 2, C3= Circuito 3, PN= Promontorio Norte, EE= Entrada Estacionamiento, JE1= Junto a estacionamiento 1, JE2= Junto a estacionamiento 2, SE= Salida Estacionamiento, SPR= Sitio Plano Restaurado, HS= Hondonada Sur, SPC= Sitio Plano Conservado, HN= Hondonada Norte

## **Déficit de presión de vapor**

### *Época húmeda*

El análisis de varianza complementado con una prueba de diferencia mínima significativa de Fisher (DMS) ( $\alpha=0.05$ ) arrojó los siguientes resultados:

No se encontraron diferencias significativas durante la noche ( $F(8,1636)=1.178$ ,  $p>0.05$ ) entre los micrositos (Fig.17, A), aunque sí durante el día ( $F(8,1634)=10.312$ ,  $p<0.05$ ), excepto en circuito 2 y junto al estacionamiento (JE1 y JE2) teniendo los más altos registros de DPV; por otra parte el menor DPV registrado fue en la hondonada Norte (Fig.17, B) (Anexo 5, fig. 10).

A las 7:00 h se encontraron diferencias significativas ( $F(8,128)=5.6152$ ,  $p<0.05$ ) entre los micrositos, presentándose en circuito 2 el valor medio de DPV más alto (Fig.17, C). También se presentaron diferencias significativas en todos los sitios a las 15:00 h ( $F(8,128)=12.224$ ,  $p<0.05$ ), en estacionamiento se registró el valor medio más alto y en hondonada Sur y hondonada Norte los valores medios más bajos (Fig.17, D) (Anexo 5, fig.11).

### *Época seca fría*

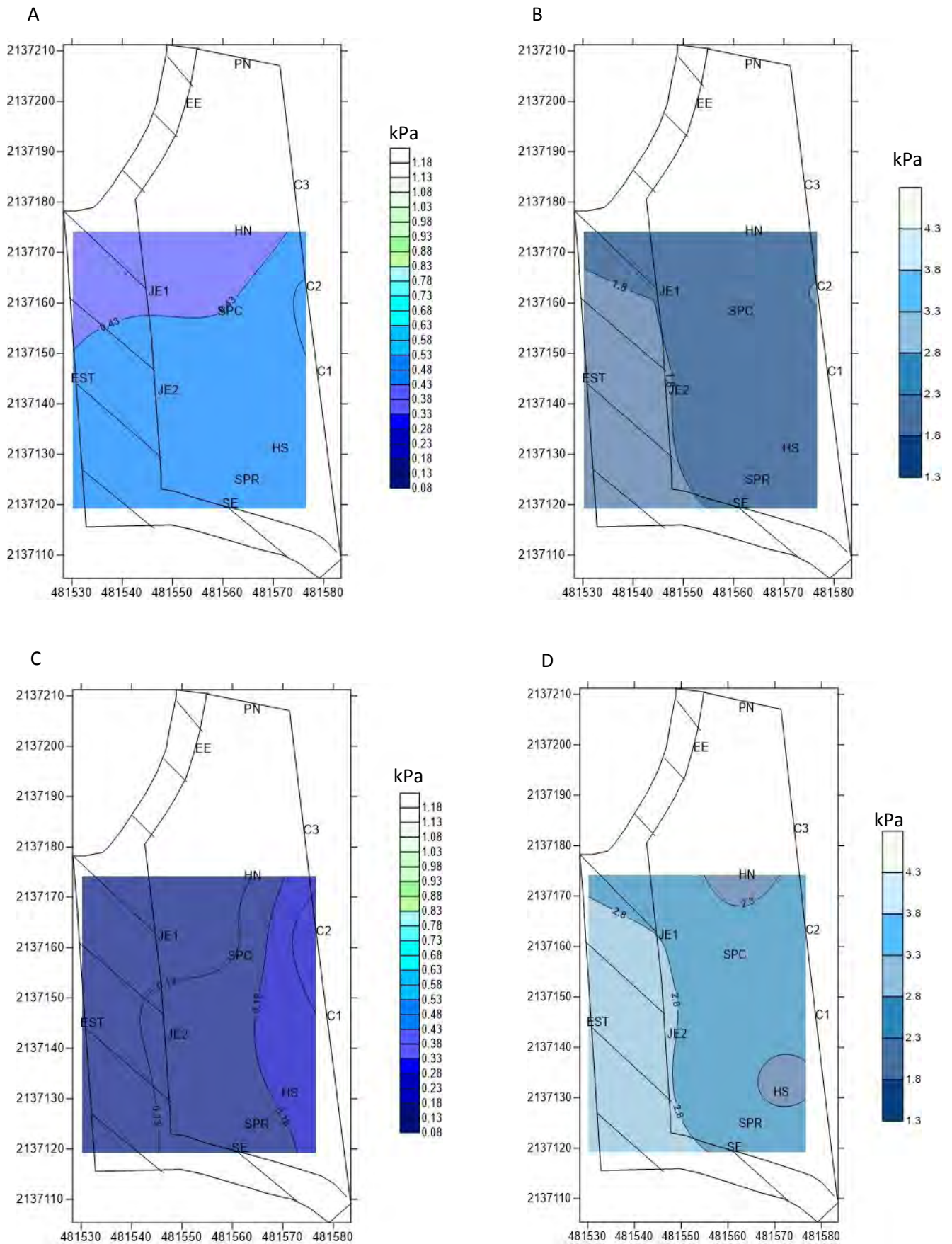
Se encontraron diferencias significativas durante la noche ( $F(8,3825)=11.846$ ,  $p<0.05$ ), presentándose en hondonada Sur el valor medio de DPV mayor (Fig.18, A). Así mismo durante el día ( $F(8,3597)=15.14$ ,  $p<0.05$ ), con excepción de sitio plano restaurado, salida del estacionamiento y estación sitio plano conservado, teniendo la hondonada Norte el valor medio de DPV menor (Fig. 18, B) (Anexo 5, fig. 12).

Se hallaron diferencias significativas a las 7:00 h ( $F(8,301)=10.324$ ,  $p<0.05$ ), el micrositio con mayor valor de DPV medio fue la hondonada Sur (Fig. 18, C). A las 15:00 h ( $F(8,301)=24.64$ ,  $p<0.05$ ) también se encontraron diferencias significativas, los sitios con valor medio más alto de DPV fueron junto al estacionamiento (JE1) y en la hondonada Sur; el valor medio menor de DPV se registró en la hondonada Norte (Fig. 18, D) (Anexo 5, fig.13).

### *Época seca cálida*

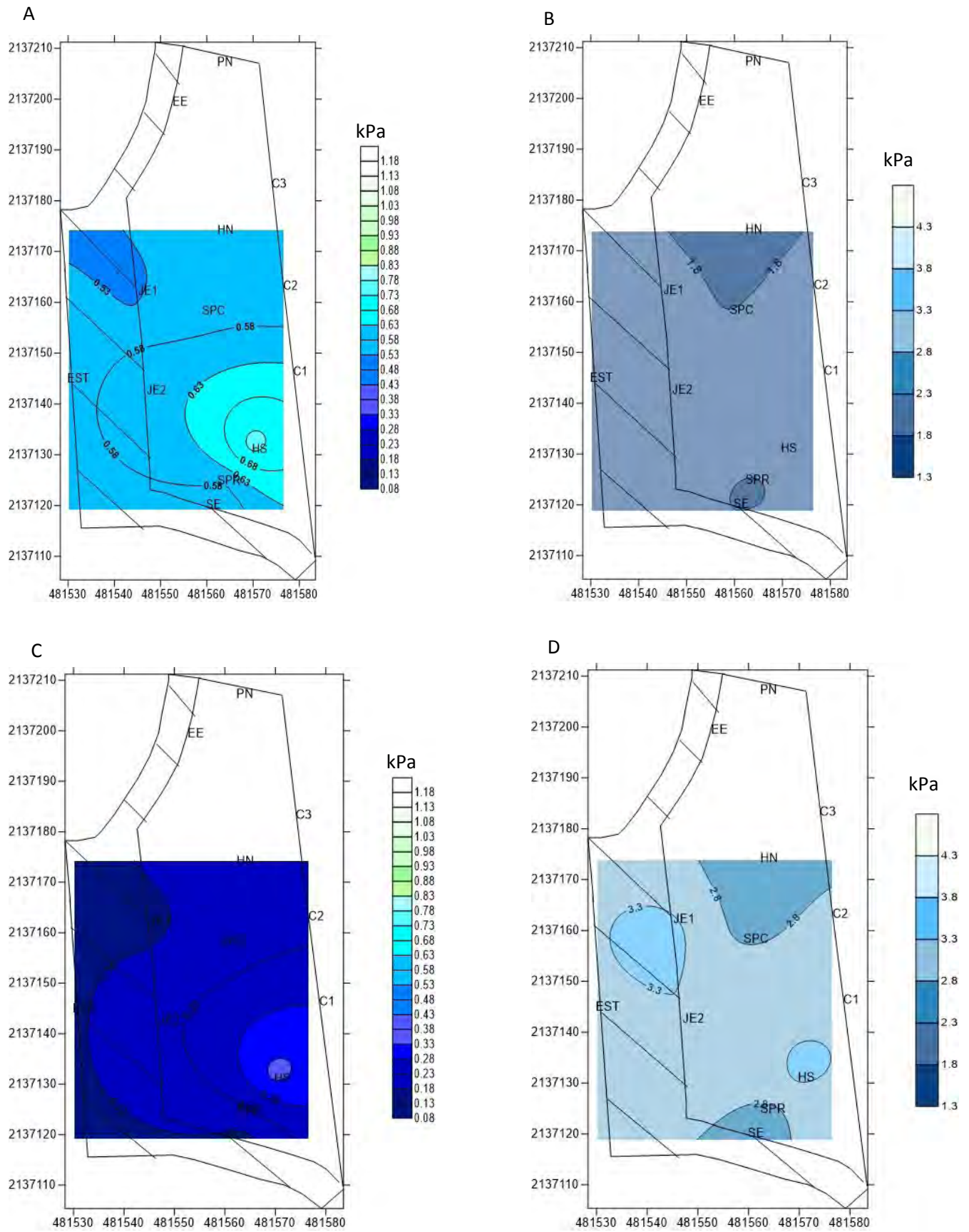
Se hallaron diferencias significativas en la noche ( $F(8,2527)=8.740, p<0.05$ ), presentando la hondonada Sur el mayor valor medio de DPV (Fig.19, A). En el día ( $F(8,2735)=4.26, p<0.05$ ) se encontraron diferencias significativas en todos los sitios exceptuando el sitio plano conservado y la hondonada Norte y entre circuito 2 y salida del estacionamiento (Fig.19, B) (Anexo 5, fig. 14). A las 7:00 h las diferencias ocurrieron en todos los sitios ( $F(8,211)=5.074, p<0.05$ ), siendo la hondonada Sur el micrositio con mayor valor medio de DPV (Fig.19, C). Así mismo, a las 15:00 h todos los sitios difieren ( $F(8,211)=7.69, p<0.05$ ) exceptuando la hondonada Sur y junto al estacionamiento (JE1); la hondonada Norte presentó el menor valor medio de DPV (Fig.19, D) (Anexo 5, fig. 15).

Estos resultados fueron plasmados en mapas de distribución de déficit de presión de vapor, los cuales se muestran a continuación.



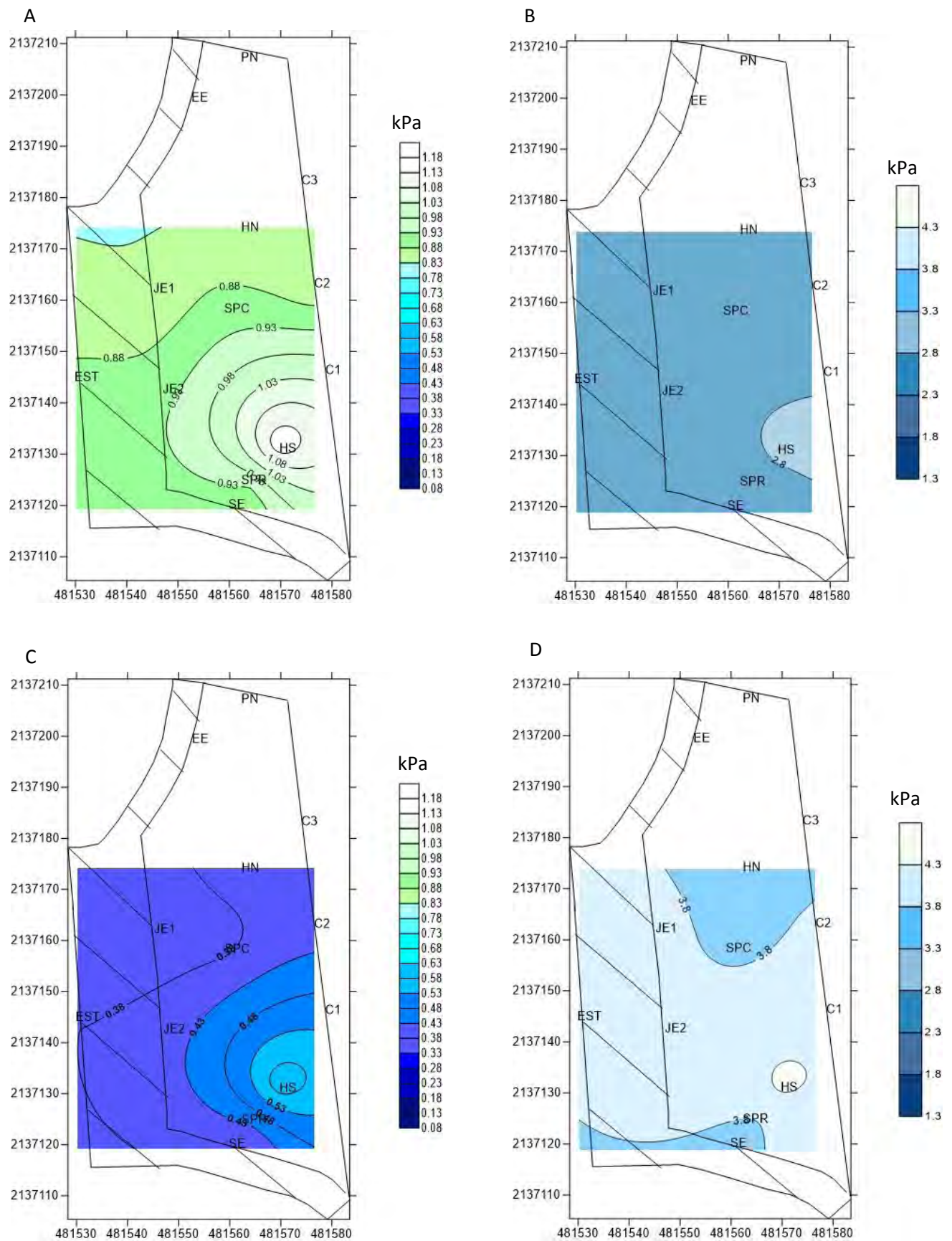
**Figura 17.** Distribución de déficit de presión de vapor en la época húmeda (junio-septiembre) en el año 2015, A) noche, B) día, C) mínima y D) máxima, en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM. C1=Circuito 1, C2=Circuito 2, C3= Circuito 3, PN= Promontorio Norte, EE= Entrada Estacionamiento, JE1= Junto a estacionamiento 1, JE2= Junto a estacionamiento 2, SE= Salida Estacionamiento, SPR= Sitio Plano Restaurado. HS= Hondonada Sur. SPC= Sitio Plano Conservado. HN= Hondonada Norte.





**Figura 18.** Distribución de déficit de presión de vapor en la época seca fría (octubre-marzo) en el año 2015 y 2016, A) noche, B) día, C) mínima y D) máxima, en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM..C1=Circuito 1, C2=Circuito 2, C3= Circuito 3, PN= Promontorio Norte, EE= Entrada Estacionamiento, JE1= Junto a estacionamiento 1, JE2= Junto a estacionamiento 2, SE= Salida Estacionamiento, SPR= Sitio Plano Restaurado, HS= Hondonada Sur, SPC= Sitio Plano Conservado, HN= Hondonada Norte



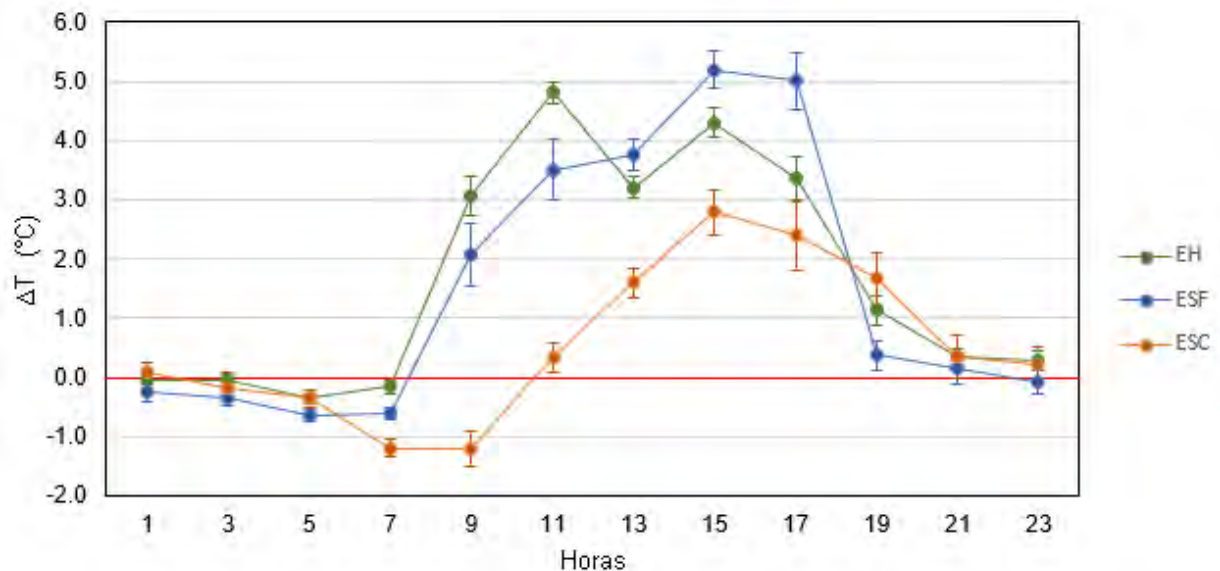


**Figura 19.** Distribución de déficit de presión de vapor en la época seca cálida (abril-mayo) en el año 2016, A) noche, B) día, C) mínima y D) máxima en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM..C1=Circuito 1, C2=Circuito 2, C3= Circuito 3, PN= Promontorio Norte, EE= Entrada Estacionamiento, JE1= Junto a estacionamiento 1, JE2= Junto a estacionamiento 2, SE= Salida Estacionamiento, SPR= Sitio Plano Restaurado, HS= Hondonada Sur, SPC= Sitio Plano Conservado, HN= Hondonada Norte

### 10.3 Diferencias extremas de temperatura del aire entre un micrositio dentro del Geopedregal y fuera de él

Con base en el análisis estadístico presentado al principio de este capítulo, los sensores seleccionados fueron Entrada Estacionamiento (EE) y hondonada Norte (HN). La diferencia máxima promedio de la temperatura en la época húmeda entre la entrada del estacionamiento y la hondonada Norte fue de  $4.8 \pm 0.2$  °C a las 11:00 h y la mínima diferencia fue  $-0.4 \pm 0.0$  °C a las 5:00 h, teniendo pocas diferencias al final del día (21-23 h) y al principio de éste (1:00-6:00 h) (Fig. 20). Las mayores diferencias en la época seca fría se registraron de 15:00 a 17:00 h, con un valor máximo promedio de  $5.8 \pm 0.3$  °C a las 15:00 h. Las diferencias mínimas se registraron de 5:00 a 7:00 h, siendo ésta de  $-0.6$  °C. En la época seca cálida las máximas diferencias medias se registraron de 15:00 a 17:00 h, con un valor de  $2.8 \pm 0.4$  °C a las 15:00 h, mientras que las diferencias mínimas medias se registraron de 7:00 a 9:00 h, con un valor de  $-1.2 \pm 0.1$  °C. Se aprecia que en esta época  $\Delta T$  perdura hasta las 9:00 h, algo que no sucede en las épocas anteriores (Fig. 20).

Los valores más altos de  $\Delta T$  (°C) de las tres épocas, se presentaron en la seca fría y los más bajos en la seca cálida. El aumento de la temperatura se observó gradualmente desde las primeras horas del día (7:00- 11:00 h), un punto máximo (12:00- 17:00 h) y un decremento de ésta al término del día (19:00-21:00 h) en todas las temporadas (Fig.20).



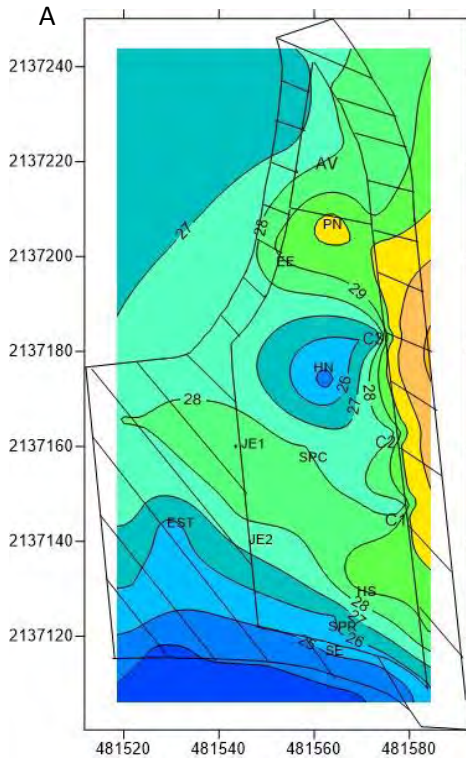
**Figura 20.** Diferencia de temperatura entre la entrada del estacionamiento y la hondonada Norte en época húmeda (EH), época seca fría (ESF) y época seca cálida (ESC) en el año 2015 y 2016, en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica dentro del campus de Ciudad Universitaria (Geopedregal) de la UNAM. Las barras muestran  $\pm 1$  error estándar.

#### **10.4 Distribución de temperatura de recorridos a pie**

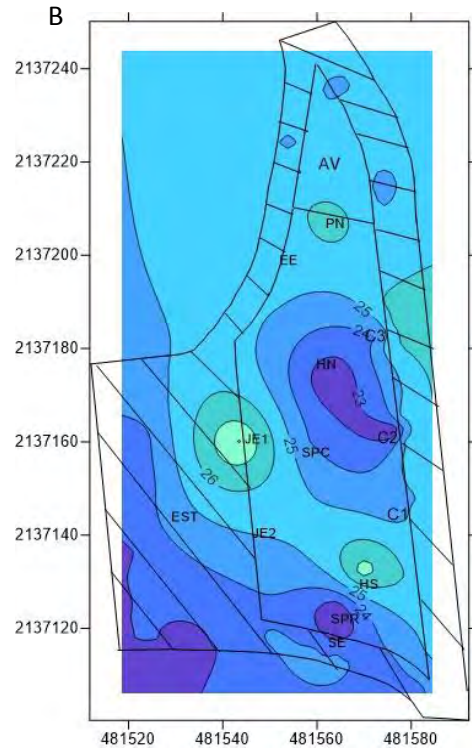
En la época seca fría, en la figura 21A se muestra un centro frío en la zona de la hondonada Norte y otro más formándose desde la salida del estacionamiento al centro de éste, también se puede observar un efecto de borde que va desde C3 a C1. En la figura 21B, se observa una zona fría que va desde la hondonada Norte hasta el sitio plano conservado. En la figura 21C, también se identifica un centro frío formado desde la hondonada Norte al sitio plano conservado, así como dos centros cálidos en la entrada del estacionamiento y en JE1, la figura 21D, tiene un comportamiento similar, sin embargo existe un centro cálido más que va desde la hondonada Sur a C2. En la figura 21E, se muestra una zona fría en hondonada Norte y sitio plano conservado. En toda la figura 21 se puede observar que la parte del estacionamiento y salida presentan temperaturas inferiores a las del circuito.

En la figura 22E, se observan dos centros cálidos, uno que se forma en hondonada Sur y otro en la entrada del estacionamiento, así como un tenue efecto de borde. En la época seca cálida, figura 22F, se puede observar solo un centro frío formado a partir de la hondonada Norte al sitio plano conservado, también se observa un efecto de borde en el área del circuito y altas temperaturas en la entrada del estacionamiento. La figura 22G tiene un comportamiento similar al anterior. En la figura 22H, se observan dos centros fríos uno en el estacionamiento y otro en la hondonada Norte, se puede ver también un efecto borde en el área del circuito.

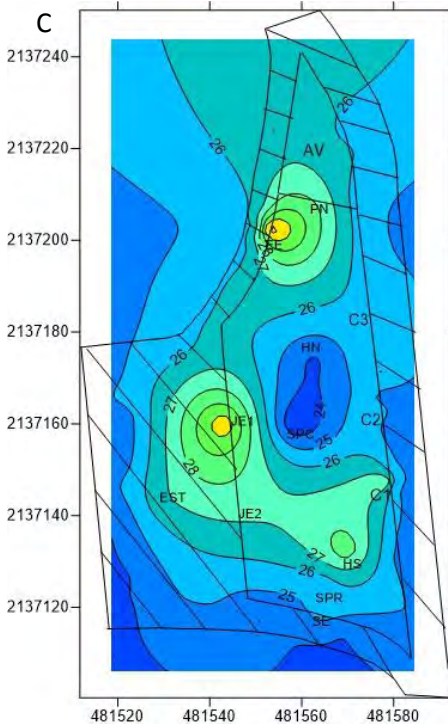




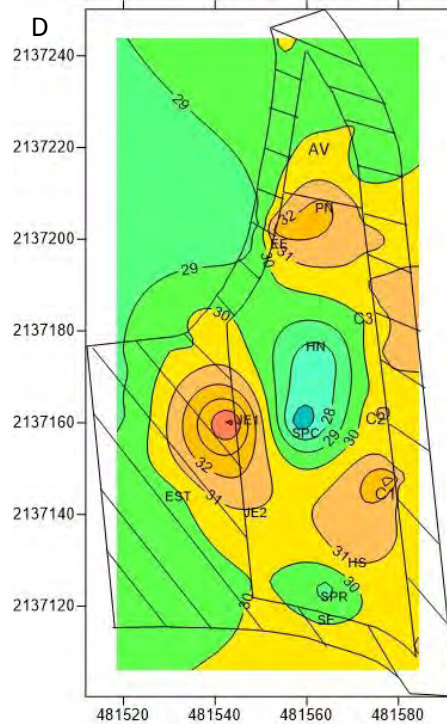
10 de noviembre 2015 (14 hl) ESF



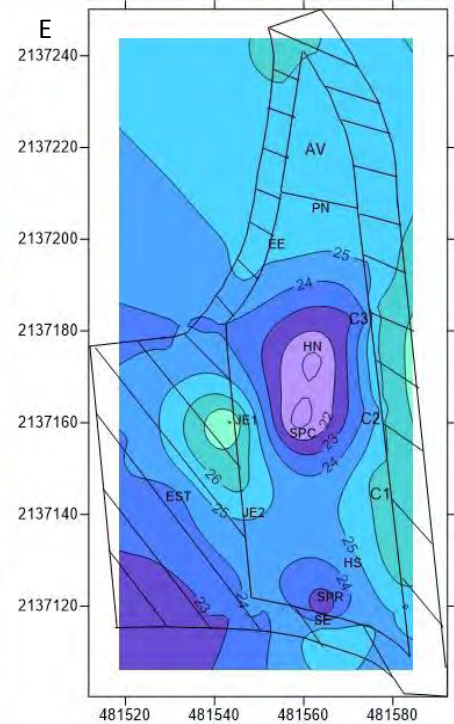
15 de enero 2016 (15 hl) ESF



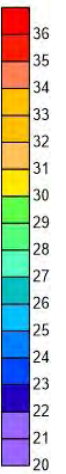
27 de enero 2016 (15 hl) ESF



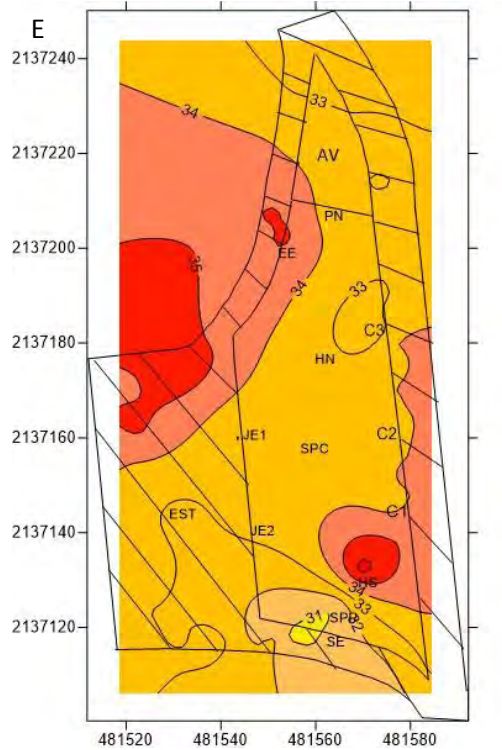
3 de febrero 2016 (15 hl) ESF



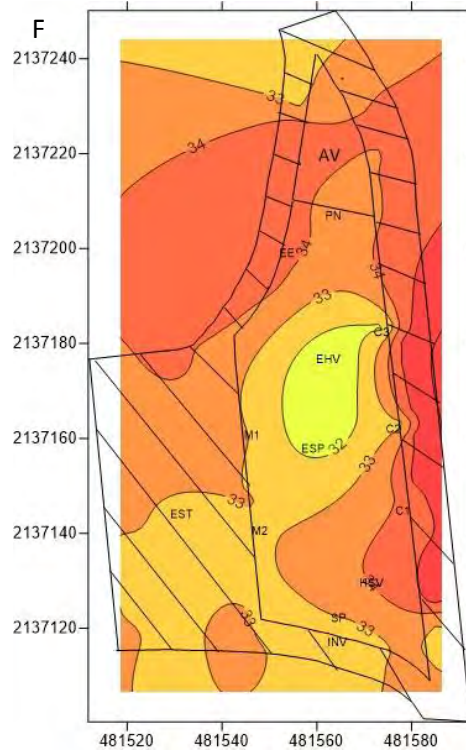
5 de febrero 2016 (15 hl) ESF



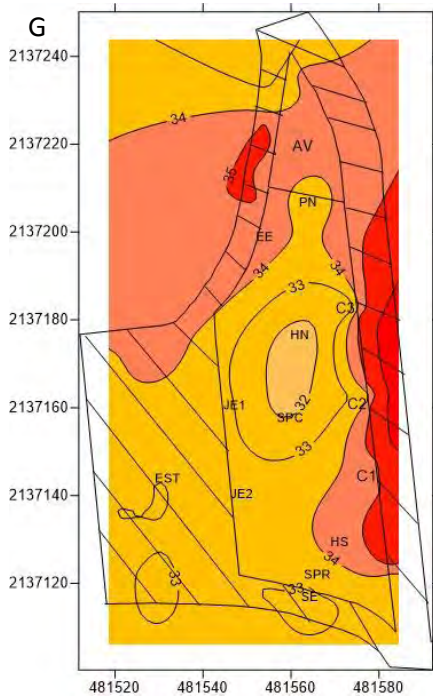
**Figura 21.** Distribución de la temperatura del aire registrada mediante recorridos en diferentes fechas en la época seca-fría, en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica (Geopedregal) dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM. Se muestra con líneas diagonales el área del estacionamiento a la derecha (EST) y el Circuito de la Investigación Científica (izquierda). AV (Área Verde). C1=Circuito 1, C2=Circuito 2, C3= Circuito 3, PN= Promontorio Norte, EE= Entrada Estacionamiento, JE1= Junto a estacionamiento 1, JE2= Junto a estacionamiento 2, SE= Salida Estacionamiento, SPR= Sitio Plano Restaurado, HS= Hondonada Sur, SPC= Sitio Plano Conservado, HN= Hondonada Norte



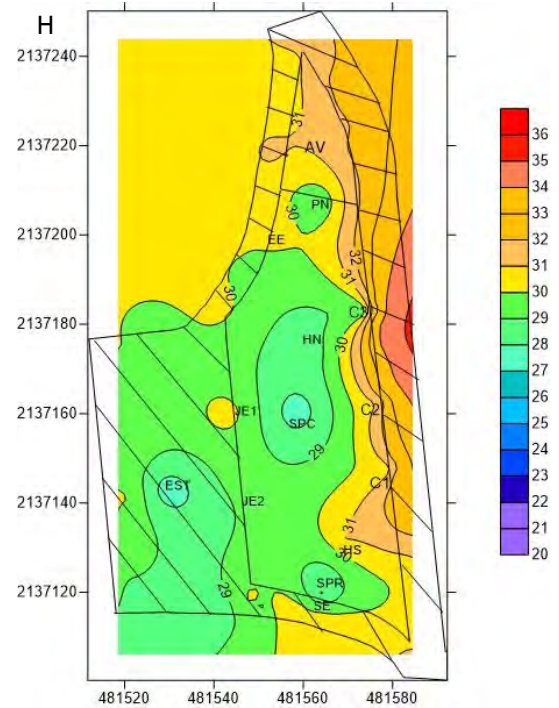
29 de marzo 2016 (15 hl) ESF



28 de abril 2016 (15 hl) ESC



29 de abril 2016 (15 hl) ESC



6 mayo 2016 (15 hl) ESF

**Figura 22.** Distribución de la temperatura del aire registrada mediante recorridos en diferentes fechas en la época seca-fría, en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica (Geopedregal) dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM. Se muestra con líneas diagonales el área del estacionamiento a la derecha (EST) y el Circuito de la Investigación Científica (izquierda). AV (Área Verde). C1=Circuito 1, C2=Circuito 2, C3= Circuito 3, PN= Promontorio Norte, EE= Entrada Estacionamiento, JE1= Junto a estacionamiento 1, JE2= Junto a estacionamiento 2, SE= Salida Estacionamiento, SPR= Sitio Plano Restaurado, HS= Hondonada Sur, SPC= Sitio Plano Conservado, HN= Hondonada Norte

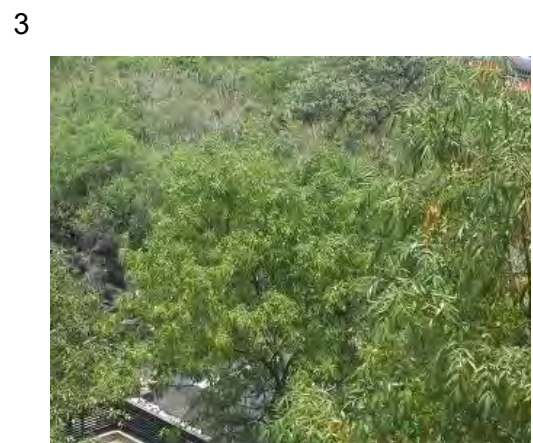
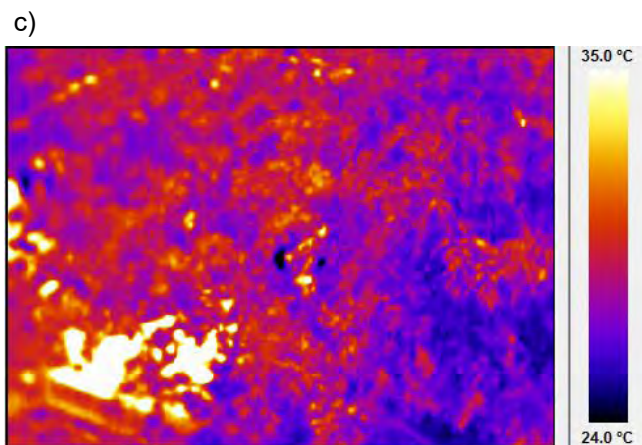
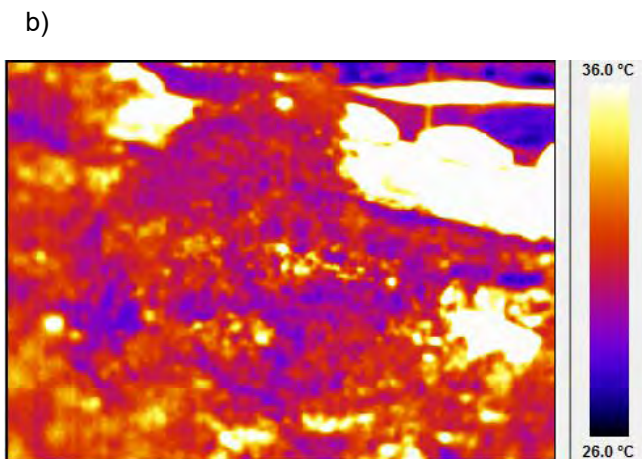
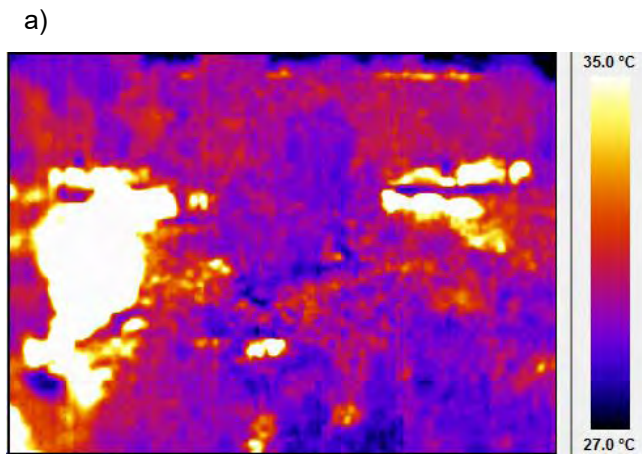
## 10.5 Termografías

En las figuras 23 y 24 se muestran termografías del sitio y de sus alrededores obtenidas con una cámara térmica, además de fotografías digitales.

La termografía de la figura 23a (cuyo aspecto real se muestra en la fotografía 1) muestra la entrada del estacionamiento de los Institutos de Geografía y Geología, en blanco se observa el pavimento de la entrada, el cual presenta la mayor temperatura captada al igual que los automóviles sobre el circuito (35 °C); el área Norte del área (en azul oscuro) presenta una menor temperatura debido a la cobertura arbolada (27 °C) y al efecto de la sombra; así mismo se observan segmentos de mayor temperatura dentro del Geopedregal (en blanco) las cuales pueden corresponder a porciones de roca expuesta. En la figura 23b (cuya imagen real se encuentra en la fotografía 2 a su derecha) al igual que en la anterior, se notan pequeños manchones (en naranja) entre la vegetación, teniendo ésta una temperatura aproximada a 26°C, mientras que los carros y el circuito (en blanco) nuevamente tienen la mayor temperatura con una diferencia de 10 °C (36°C). En la figura 23 c, correspondiente a la fotografía 3 a su derecha, en la zona Sur-Este del Geopedregal, la temperatura de la vegetación fue de 24 °C (en azul oscuro y morado) y una zona blanca correspondiente a la explanada de cemento localizada en la entrada del sitio de estudio. En la figura 24 d, correspondiente a la fotografía 4, se puede observar en blanco la parte delantera de una camioneta (con una temperatura de 41 °C) en el estacionamiento del Instituto de Geología y en tono azul oscuro y morado la vegetación circundante dentro del Geopedregal con temperaturas menores.

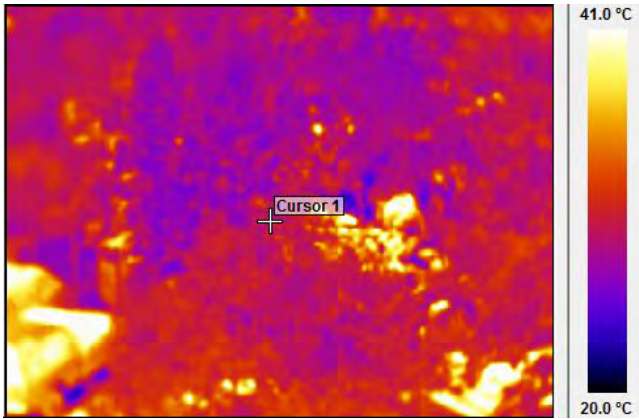
Las termografías e, f y g corresponden al estacionamiento de los Institutos de Geología y Geografía, en éstas se observa en blanco el techo de los automóviles que presentan las temperaturas más altas (aprox. 65 °C), después del pavimento en naranja y amarillo (aprox. 45 °C); los tonos en azul oscuro corresponden a la vegetación existente en el estacionamiento (Fig. 24 e, f y g). Para poder apreciar con mayor profundidad el conjunto de resultados presentados en esta sección, se elaboró un diagrama, reuniendo los puntos más importantes en este trabajo (Fig. 25).





**Figura 23.** Termografía y fotografías (Suárez, 2015) del pedregal sujeto a restauración ecológica (Geopedregal) el día 21 de mayo del 2015 alrededor de las 15 h, tomadas desde el edificio del Instituto de Geología, dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM. Se muestra en a) la entrada del estacionamiento de los Institutos de Geografía y Geología, a), una lateral del Geopedregal, junto al circuito de la investigación científica, (b) zona Sur-Este del Geopedregal. Del lado derecho de la termografía se indica la escala de la temperatura.

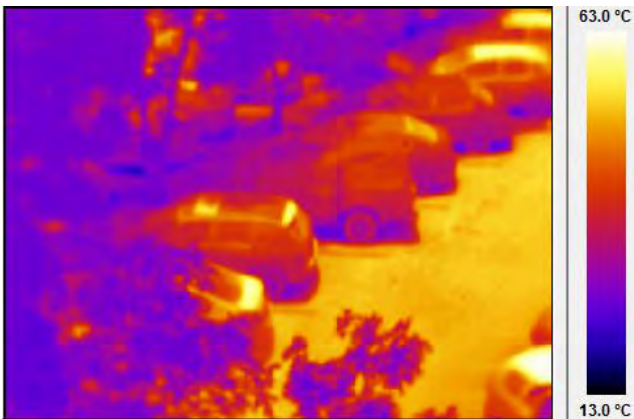
d)



4



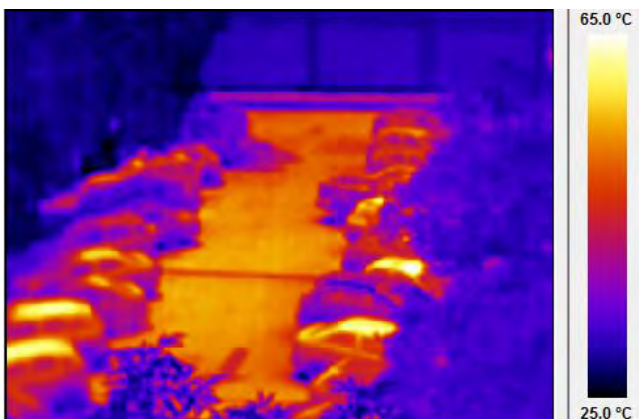
e)



f)

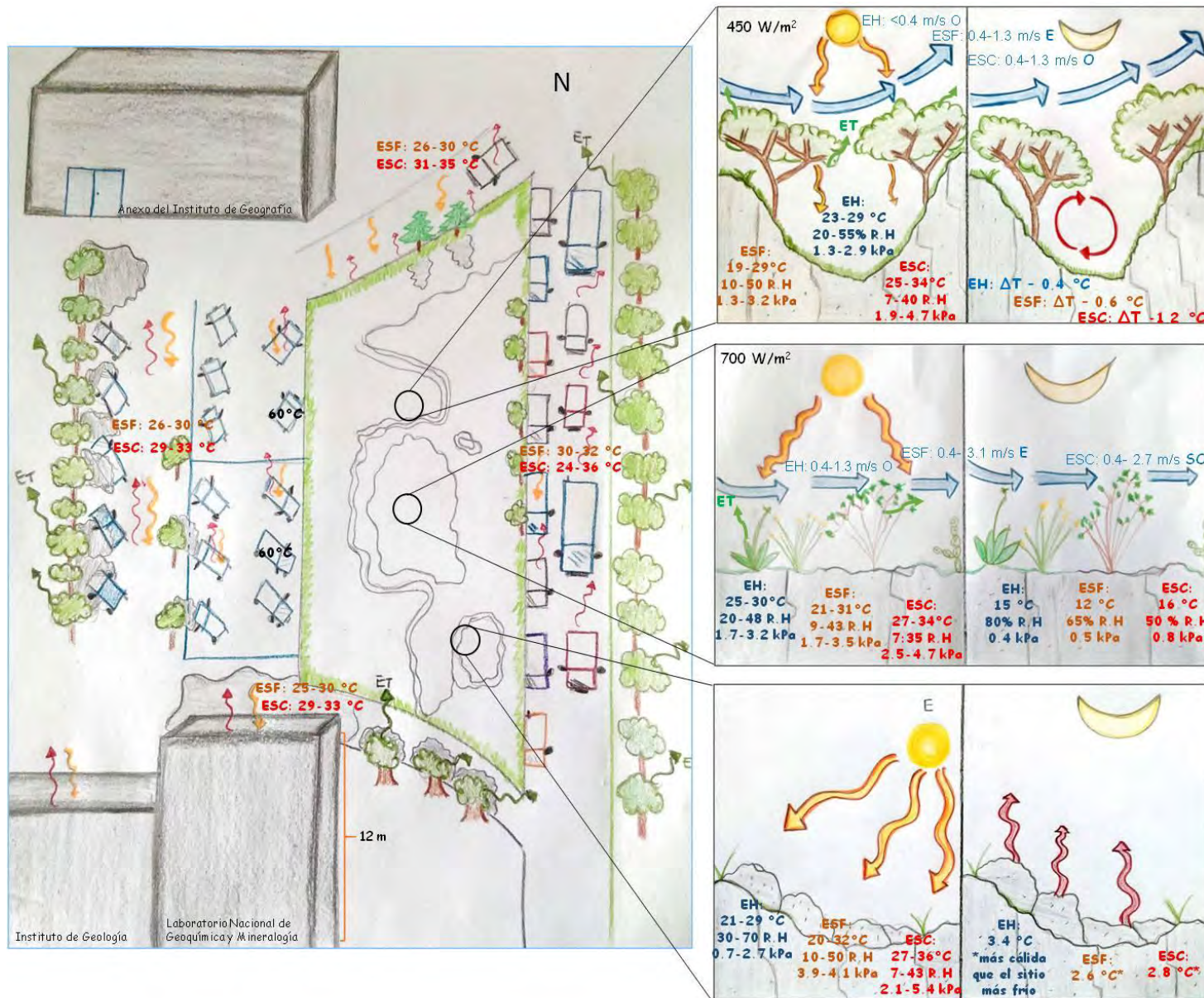


g)



**Figura 24.** Termografía del pedregal sujeto a restauración ecológica (Geopedregal), y fotografías (Suárez, 2015) el día 21 de mayo del 2015 alrededor de las 15 h, tomadas desde el edificio del Instituto de Geología, dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM. Se muestra en a) la entrada del estacionamiento de los Institutos de Geografía y Geología, a), una lateral del Geopedregal, junto al circuito de la investigación científica, (b) zona Sur-Este del Geopedregal. Del lado derecho de la termografía se indica la escala de la temperatura.





**Figura 25.** Diagrama de resumen de resultados. Se muestran los resultados en tres micrositios dentro del Geopedregal, A) Hondonada Norte, B) Sitio plano conservado y C) Hondonada Sur. Los valores presentados durante el día son los rangos de temperatura, humedad relativa, déficit de presión de vapor y velocidad del viento. El valor de radiación solar es la media registrada en cada uno de los micrositios. Las deltas presentadas en A) durante la noche, son las diferencias extremas entre la hondonada Norte y la entrada del estacionamiento. Los valores de temperatura en C) en la noche es la diferencia de la mínima temperatura y sitio más frío. Los valores en negro sobre los carros representan la temperatura superficial de éstos. Las cifras en naranja y rojo en el estacionamiento son los valores registrados en los recorridos.

## **XI. Discusión**

### **Caracterización microambiental en algunos micrositios dentro del Geopedregal**

Los registros de precipitación en el periodo de estudio en los tres sitios variaron en diferencias no mayores a 30 mm en algunos meses (figura 9) que pueden corresponder a variaciones en la sensibilidad, manejo y mantenimiento del equipo. La diferencias también pueden deberse a eventos de chubascos puntuales como los que se observan en el mes de septiembre en la estación del observatorio (OMCG) que es la más alejada del sitio de estudio y que muestra en la mayoría de los meses, una mayor precipitación que en el Geopedregal o en el CCA. Aún con ello, se corrobora que la temporalidad en el régimen climático registrada en este año coincide por lo descrito en la REPSA y en el compendio del Observatorio Meteorológico del Colegio de Geografía (OMCG) (Fig. 3), siendo mayo el mes más cálido y enero el más frío.

Por otro lado, se observaron diferencias en la rapidez del viento registradas entre el Geopedregal, el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) y el Observatorio Meteorológico del Colegio de Geografía (OMCG) y que se deben a la altura en la que se encuentran sus anemómetros respecto a la superficie (a 1.8 m, 21 y 10 m, respectivamente). Como se sabe, la rapidez del viento disminuye cerca de la superficie debido a la fricción superficial y a la pérdida de rapidez debido a los obstáculos como los edificios y otros objetos que se van encontrando a menor altura. Por esta razón, los anemómetros se colocan a una altura estándar de 10 m en las estaciones meteorológicas, aunque algunas veces la altura de referencia es muy baja dependiendo de los obstáculos cercanos (Oke, 2006).

Dentro del Geopedregal, en la hondonada Norte, se registró una rapidez promedio baja del viento en la mayoría de los meses, menor incidencia solar, menor temperatura y mayor humedad en comparación con el sitio plano conservado que se ubica en la zona central en este espacio. Al ser una depresión, permite la acumulación del sustrato y la formación de suelo, además favorece condiciones de mayor humedad y menor temperatura. Estas condiciones dan pie al desarrollo de vegetación arbórea como *Buddleja cordata*, en esta zona la cobertura y densidad de

esta especie es mayor que en el sitio plano conservado lo que conlleva a que el flujo de viento no sea homogéneo y la vegetación actúe como una barrera. En cambio las condiciones de los sitios planos, la mayor parte de la composición de su vegetación es del estrato arbustivo, en donde el basalto queda expuesto y recibe la radiación solar directa y la absorbe en forma de calor, este calor puede ser dispersado por el viento que en esta meseta posee mayor rapidez. Estos resultados coinciden con los reportados por Cano-Santana (1994) en la REPSA, que identificó el microclima de un sitio abrupto (las hondonadas) con alta humedad, temperatura diurna constante, baja rapidez del viento y baja radiación solar, en cambio para los sitios planos encontró que poseen una baja humedad, temperatura diurna variable, alta rapidez del viento y una alta radiación.

La cobertura vegetal que crece sobre el basalto, es un factor importante por el que la hondonada Sur en las temporadas secas, tanto frías como cálidas, tiene una temperatura más extrema que los otros sitios. Esto se debe a que la mayoría del follaje que se encuentra activo en la vegetación de este ecosistema se desarrolla principalmente en la temporada de lluvias y parte de éste se pierde en la época seca, pese a que haya presentes especies perennes como *Buddleja cordata* y *Verbesina virgata* (Cano-Santana, 1994). Sin embargo, el factor más importante es que en esta hondonada, como se aprecia en la figura 7, no existe un estrato arbóreo y se encuentra expuesta a una alta radiación. Un aspecto más que contribuye a que este sitio tenga una temperatura elevada es su orientación Este, ya que recibe la radiación del sol desde las primeras horas de la mañana hasta pasado el mediodía. A diferencia de la hondonada Norte que se encuentra completamente rodeada de vegetación y no se encuentra adyacente a la zona asfaltada. Cabe agregar que esta hondonada se encuentra en proceso de restauración ecológica, el cual incluye un manejo de especies invasoras y retiro de material ajeno al sitio como cascajo y elementos de material de construcción, esto a la larga podría influir en la regulación de la temperatura en el micrositio, al dejar desprovista la roca de vegetación y expuesta a la radiación solar.

Por tanto se observa que la orientación, ubicación y elementos circunscritos en la hondonada, así como el manejo que se le realiza en el proceso de restauración ecológica, influye de manera considerable en la regulación de la temperatura.

El comportamiento térmico estacional del sitio de estudio coincide con lo descrito por Barradas y col. (1999) en la medición del balance energético para la REPSA ( $Q^*$ ), donde en la época seca aumenta el calor almacenado por la roca ( $Q_s$ ), el flujo del calor sensible ( $Q_h$ ) es mayor en esta temporada y el calor latente ( $Q_e$ ) es mayor en la temporada húmeda, lo que implica que para la temporada seca, la temperatura del aire es alta y la humedad es menor, mientras que para la temporada húmeda con clima cálido hay una menor temperatura y mayor humedad. En la estación seca cálida se registraron mayores temperaturas y menor humedad para todos los sitios comparándolos con las épocas anteriores, mientras que para la estación húmeda, se registraron los mayores valores de humedad y en la estación seca fría los valores menores en la temperatura.

Algunos factores indirectos que influyen en la distribución de las especies como la profundidad del suelo y la pendiente así como la disponibilidad de luz impactan en el desarrollo de algunas como *Senecio praecox*, *Cheilantes myriophylla* y *Arracacia toluensis*; la variación en la profundidad del suelo en la temporada de lluvias afecta principalmente a *Rynchely trumrepens*, *Buddleia cordata* y *Muhlenbergia robusta* (Santibáñez, 2005). Todos estos elementos ocasionan que la cobertura vegetal se presente de manera muy heterogénea en los diferentes microambientes y por tanto, la regulación del microclima también se verá afectada.

### **Diferencias térmicas entre el Geopedregal y su entorno urbanizado**

La temporalidad descrita para el Pedregal de San Ángel (Barradas *et al.*, 1991) es la misma que se presenta en los alrededores de los pedregales remanentes, en donde se debe considerar a diferencia de lo que ocurre en la REPSA, las condiciones de manejo de áreas verdes adyacentes, si tienen o no riego y qué tipo de arbolado presentan. Las temperaturas medias ( $T_{media}$ ) durante las tres temporadas fueron menores en la época seca fría y mayores durante la época seca cálida. El efecto de temporalidad se puede observar en la variación de la  $\Delta T$  extremas donde la mayor

diferencia se dio en la época seca fría y la menor en la seca cálida. Asimismo, en los mapas de los recorridos se observa que la temperatura del circuito universitario es más alta en los días de la temporada seca cálida que en la fría. La influencia que tienen estas diferencias en la regulación de las temperaturas extremas, está relacionada con el tamaño de las áreas verdes (Barradas, 1991; Thorsson *et al.*, 2007; Bowler *et al.*, 2010). Esto se debe a que entre más grande sea una superficie con vegetación, será mayor su capacidad de regular la temperatura. Sin embargo, estas observaciones en zonas urbanizadas se han dado principalmente en áreas con vegetación homogénea, superficies con pasto y donde existe riego que influye en la evapotranspiración. En comparación con el sitio de estudio, el área que presenta no es homogénea, ni tampoco las superficies de relieve y vegetación, donde además el manejo constante por la restauración ecológica influye de alguna manera en el balance energético, por tanto la regulación de la temperatura en los pedregales remanentes no estará dada totalmente por la superficie total del sitio, sino de otros factores que se explicará más adelante.

Las variaciones de temperatura durante el día también fueron evidentes. Se observó que en la máxima temperatura varios sitios fueron cálidos durante las tres épocas como en la entrada del estacionamiento ubicado al Norte del sitio de estudio, el límite Oeste urbanizado en el estacionamiento (JE1), la parte sur límite entre el circuito exterior (C1) y la hondonada Sur aledaña a éste, excepto este último punto en la época húmeda, en donde prolifera la vegetación amortiguando la temperatura. Estas diferencias de temperatura están estrechamente relacionadas con la exposición solar que tienen los sitios. Los primeros tres sitios se encuentran cercanos al asfalto, pasto y herbáceas donde no hay cobertura de dosel o no hay sombras proyectadas. Varios autores (*e.g.* Potchter *et al.*, 2006; Huang *et al.*, 2008; Shashua-Bar *et al.*, 2009) han encontrado que el pasto cuando no está bajo un sombreado, disminuye ligeramente la temperatura del aire y tiene una alta demanda de agua comparado con aquel que se encuentra sombreado por árboles o por mallas. En este sentido, en los pedregales remanentes y en este pedregal en especial, las especies de pasto que se encuentran, son muy distintas ya que como se ve en el cuadro de descripción de la vegetación (cuadro 4) que se encuentra en los sitios de medición, hay pastos nativos y pastos

introducidos. La densidad en cobertura de los pastos nativos es menor que la de las especies introducidas más importantes como el pasto kikuyo (Alcántara, 2016). Dado que este pedregal está en situación de manejo constante, la poda del pasto kikuyo que crece alrededor del mismo, produjo que en periodos de tiempo el pasto fuera muy abundante en las zonas adyacentes a los sensores cercanos a la parte urbanizada y en ocasiones este pasto estuviera seco y sin manejo o podado completamente. Las especies de pastos nativos se distribuyen en los sitios planos donde la cobertura es mayor ya que crecen en macollos de diámetros diversos. De esta manera, tanto la cobertura vegetal como el tipo de materiales urbanos que se tiene son diferentes.

Como se mencionó en el marco teórico, la radiación absorbida por áreas con asfalto, concreto o suelo desnudo es relativamente alta debido a la alta capacidad calorífica y a la conductividad térmica de estos materiales, posteriormente esta radiación se manifiesta como energía térmica que provoca el calentamiento de la superficie y del ambiente circundante (Huang *et al.*, 2008). Este calentamiento de la superficie del asfalto se puede observar claramente en la termografía (Fig. 23a), donde las temperaturas superficiales más altas se encuentran cercanas a los sensores antes mencionados. Asimismo se puede apreciar la temperatura aproximada superficial de los autos (Fig. 24, b) que se encuentran en el estacionamiento contiguo al Geopedregal, los cuales coinciden con los sensores ubicados en la zona Oeste de estacionamiento (JE1 y JE2) que presentan también temperaturas elevadas. A lo largo del año, existe siempre un parque vehicular estacionado de manera casi permanente durante el día alrededor de este pedregal y la absorción y emisión de calor que generan los vehículos, así como el tipo de asfalto que predomina en ciudad universitaria que es de color oscuro, hace que el calor almacenado en las superficies urbanas sea muy alto. El tamaño en superficie del parque vehicular y de la superficie de asfalto que rodea al Geopedregal también es muy distinta (ver figs. 21, 22 y 23). De ahí que en la parte Este se encuentren más automóviles estacionados y mayor superficie de árboles, que en la parte Oeste, perteneciente al Circuito de la Investigación Científica, el cual también presenta automóviles y tiene un movimiento constante de éstos durante las horas laborales.

Por otro lado, las menores temperaturas registradas a las 15:00 h y durante el día en los micrositios al Sureste del Geopedregal, la salida del estacionamiento, sitio plano restaurado, al Norte en el sitio adyacente al circuito exterior (C3), el promontorio Norte (PN) y la hondonada Norte, se encuentran relacionadas a la sombraproporcionada, por el arbolado adyacente y por la humedad misma que se genera en la estación húmeda. A excepción del promontorio Norte que durante la estación seca fría, se observó un aumento en la temperatura en este horario, debido a que en esos meses del año estaba más expuesto al sol. Esto también ocurre en otros puntos adyacentes a la salida del estacionamiento y en el sitio plano restaurado durante esta temporada.

Todos estos procesos que reflejan el comportamiento promedio a lo largo de muchas mediciones durante las diferentes temporadas, se pudieron confirmar en algunas áreas de los recorridos (Figs. 21 y 22) donde existen zonas de sombra por árboles y algunas partes de sombra del edificio Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía ubicado en la parte a la salida del estacionamiento. Se pudo apreciar que tienen menor temperatura en comparación al área del circuito exterior, el cual no tiene la influencia de la zona de amortiguamiento contigua relacionada a proyecciones de sombra y aporte de humedad.

En contraste a lo que se observa en el entorno urbanizado del Geopedregal, Hwang y col. (2015) estudiaron diez parques con diferentes estructuras en Singapur durante el periodo más caliente y seco del año. Los autores observaron que sitios con asfalto con parches de sombra eran 10 °C más calientes que áreas con asfalto bajo la sombra de árboles, por lo que concluyeron que la sombra continua si tenía un efecto significativo en la regulación constante de la temperatura. Sin embargo, el efecto de los árboles no siempre se prevé como preponderante en el impacto del amortiguamiento de la temperatura: Oliveira y col. (2011) en un parque en Lisboa, Portugal notaron que las calles alrededor de un parque que tenían árboles ya fueran pocos o muchos, no disminuían considerablemente la temperatura en la sombra. La calle con más árboles también tenía el mayor tránsito vehicular, lo que podría explicar la diferencia de los resultados por el calor generado por estas emisiones, aunque el

calor generado por el flujo vehicular es pequeño en comparación con la radiación solar.

Se ha estudiado también el efecto ocasionado por la sombra de los edificios en las ciudades, dado que la sombra que proveen disminuye la radiación solar directa, lo que provoca que las superficies no retengan calor, sin embargo, existe un riesgo, ya que edificios muy altos provocan un aumento en la turbulencia del aire y esto a su vez genera una sensación térmica no agradable en los transeúntes (Emmanuel *et al.*, 2007). De acuerdo con lo observado en los recorridos (14:00 h y 15:00 h), la sombra proyectada sobre el estacionamiento del edificio del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía y la de los árboles presentes en el estacionamiento y la evapotranspiración durante toda la época seca, tiene un efecto positivo en la temperatura de éste a pesar de que el parque vehicular regularmente es constante y se encuentra estacionado. La rapidez del viento puede influir también en este comportamiento. En este mismo horario, cercano a las 15:00 h, se observó un efecto de borde (Fig. 21, A, D, E; Fig. 22, F, G, I) entre el circuito y el Geopedregal, éste también se identifica en las diferencias de temperatura superficial (fig. 36, B), este efecto es consecuencia de las altas temperaturas superficiales y del aire, además de que en esa hora se registra el mayor tránsito vehicular de la zona.

En general, se observa que el relieve y la vegetación asociada tiene consecuencias importantes en el gradiente de temperaturas en el Geopedregal donde existen algunos parches de temperaturas altas como en las orillas y en zonas de roca expuesta. Lo que se destaca es que en la circunferencia y en otros puntos, existen zonas que son menos cálidas comparadas con la entrada del estacionamiento o con el circuito de la investigación científica (sitio plano restaurado y C3). Esto demuestra que el sellado del suelo en la superficie urbana impacta considerablemente en el balance energético del sistema (Scalenghe y Marsan, 2009). Esto se podría revertir con superficies de suelo sin sellar que tuvieran un manejo de área verde como el camellón adyacente o el área verde al Norte. Ya ha sido ya demostrado que los suelos sin sellar son variables importantes en la mitigación de la ICU (Kłysik y Fortunio, 1999; Ali-Toudert y Mayer 2007; Takebayashi y Moriyama, 2007).



El arbolado y la vegetación perenne ejerce un efecto constante como se ve en las termografías, ya sea regulando la humedad o generando sombra. A las 7:00 h en todas las temporadas se observaron temperaturas más altas en comparación al resto de los sitios en la hondonada Sur que tiene una exposición alta a la radiación solar. Estas temperaturas se extienden horas después, lo que se explica ya que el basalto tiene una alta difusividad térmica (Gartland, 2008) provocando que se absorba el calor durante el día y posteriormente sea liberado en la noche. El cambio de valor en  $\Delta T$  entre la hondonada Norte y la entrada del estacionamiento, permitió observar el comportamiento de estas variaciones diurnas, donde las principales diferencias (valores negativos) ocurren en las primeras horas de la mañana. La cobertura vegetal está también reteniendo calor, mientras que durante la tarde (15:00 h) el efecto de la sombra de los árboles es positivo al disminuir la radiación solar. En consecuencia, aumenta la evapotranspiración pero en las primeras horas de la mañana impide el enfriamiento, esto también se ha visto en vegetación de climas cálidos (Taha *et al.*, 1991; Potchter *et al.*, 2006). Además que en la hondonada Norte durante la época seca cálida, este calor es retenido hasta las 9:00-10:00 h en comparación con las otras épocas donde esto sucede hasta las 7:00h.

Con base en los resultados presentados en este trabajo, es importante resaltar las ventajas de conservar los pedregales remanentes en lugar de sustituirlos por áreas verdes, entre las que se encuentran la ausencia de riego de estos sitios. Se demuestra que la falta de aporte de agua al sistema en la temporada seca, a diferencia de algunas áreas verdes que si presentan riego durante todo el año, no es un impedimento para que regule la temperatura. Debido a que existen algunas partes dentro del Geopedregal que son puntos cálidos como la hondonada Sur, se recomienda que para amortiguar este efecto se le pueda dar un manejo al camellón que se encuentra enfrente de éste, en el que se pueda añadir vegetación capaz de reducir la temperatura o proporcionar a futuro un arbolado de especies nativas que puedan disminuir este impacto.

Si bien dentro de Ciudad Universitaria existen áreas verdes y algunos pedregales remanentes que poseen elementos arbóreos como fresnos, eucaliptos, pirules y

jacarandas entre otros, que también contribuyen de manera importante a disminuir la ICU dentro de CU, se debe ponderar que los pedregales remanentes cumplen diversos servicios ecosistémicos que las áreas verdes no proveen. Dada la historia de manejo de áreas verdes que existe en el campus y la recreación que prestan este tipo de espacios, se debe procurar que ambos espacios coexistan en el campus. Los pedregales remanentes no pueden sustituir la totalidad de las áreas verdes, sin embargo, se debe evitar la degradación de los mismos y procurar la sustitución de los árboles exóticos por vegetación nativa del ecosistema del Pedregal de San Ángel.

La heterogeneidad microambiental que predomina en los pedregales remanentes deberá considerarse no sólo en la diagnosis de su capacidad de amortiguar la isla de calor urbana que se genera a nivel mesoescala, sino también a microescala junto con los factores relacionados como: a) su tamaño, b) su entorno urbanizado, es decir, qué tanta superficie asfaltada adyacente tienen a éstas, c) la orientación de los micrositos que tienen y los edificios en su entorno que influyen en el viento que reciben, d) el parque vehicular si es permanente o relativamente fijo y su exposición al tráfico, e) la cobertura vegetal en función a su manejo (especies exóticas vs. nativas y dentro de éstas, especies arbustivas y su cobertura) y f) el arbolado o cercanía a áreas verdes que influyen directamente en su capacidad de regulación.

## XII. Conclusiones

- Se encontró que el relieve de este pedregal influye de manera considerable en la regulación térmica a lo largo de las estaciones. Los principales factores que se encontraron que ejercían un efecto en la regulación térmica fueron los sitios cerrados, es decir los microambientes como las hondonadas que suelen tener un estrato arbóreo mayor que en un sitio plano, la cobertura vegetal y la cantidad de especies perennes de estrato arbustivo, la exposición solar de ciertos microambientes y su orientación junto con la rapidez del viento, la cercanía de superficies selladas y vialidades.
- Se registró una radiación solar y rapidez del viento menor, en la hondonada Norte en comparación con el sitio plano conservado, debido a la cobertura arbórea existente en este microambiente.
- Los sitios más cálidos encontrados durante las tres épocas fueron los alrededores de la zona urbanizada con estacionamiento y junto al circuito universitario que poseen una alta exposición solar, una mayor superficie de suelo sellado, un parque vehicular, una vegetación escasa y ausencia de sombra.
- Los sitios con menores temperaturas durante las temporadas fueron la hondonada Norte, la salida del estacionamiento, el sitio plano restaurado en la zona Sur del Geopedregal, que están influenciados por la sombra de la vegetación, como tepozanes de gran envergadura.
- Las diferencias de temperatura entre la hondonada Norte y la entrada del estacionamiento durante la época húmeda fueron de casi 5 °C a las 11:00 h, en época seca cercanos a 6 °C a las 15:00 h y en época seca cálida de aproximadamente 2 °C a la misma hora. La diferencia mínima se registró durante época seca cálida. Después de la 1:00 h se registraron diferencias negativas en todas las temporadas, lo que indica que la vegetación retiene el calor durante la noche.
- En los recorridos se constató que las mayores temperaturas se presentan en el Circuito de la Investigación Científica en comparación al estacionamiento de los

Institutos y del Geopedregal, generando un efecto de borde entre el circuito y el Geopedregal, visto parcialmente con la cámara infrarroja.

- Las características térmicas de este pedregal remanente en proceso de restauración con su entorno urbanizado, demuestran la importancia de conservar los pedregales remanentes en lugar de reemplazarlos por áreas verdes o por espacios urbanizados.

### **XIII. Literatura citada**

- Alberti, M., Marzluff, J., Shulenberger, E., Bradley, G., Ryan, C., Zumbrunnen, C. (2008). Integrating Humans into Ecology: Opportunities and Challenges for Studying Urban Ecosystems. En J. Marzluff, W. Endlicher, G. Bradley, U. Simon, E. Shulenberger, M. Alberti, C. Zumbrunnen, C. Ryan (Edits.), *Urban Ecology: An International Perspective on the Interaction Between Humans and Nature* (págs. 143-158). New York: Springer Verlag.
- Alcántara, P. (2017). Distribución geográfica y estimación de la abundancia relativa de una especie exótica e invasora en el Pedregal de San Ángel, Distrito Federal, México. Tesis de licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía, UNAM. 96 pp.
- Ali-Toudert, F. H. (2007). Effects of asymmetry, galleries, overhanging fac, ades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Sol. Energy*, 81, 742–754.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Food & Agriculture Org.
- Arango, Á. (2006). Heterogeneidad espacial y dinámica de la descomposición de hojarasca de cuatro especies abundantes en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Pp. 78.
- Ballinas, M. (2011). Mitigación de la isla de calor urbana : estudio de caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. UNAM, México, D.F. Tesis de maestría. Centro de Ciencias de la Atmósfera-Instituto de Ecología.
- Ballinas, M., Barradas, V. (2016a). The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model. *Journal of Environment Quality*, 45(1), 157-166.
- Ballinas, M., Barradas, V. (2016b). Transpiration and stomatal conductance as potential mechanisms to mitigate the heat load in Mexico City. *Urban Forestry & Urban Greening*, 20, 152-159.
- Barradas, V. (1987). Evidencias del efecto Isla Térmica en Jalapa, Veracruz, México. *Geofísica*, 26, 125-135.
- Barradas, V. (1991). Air temperature and humidity, and human comfort index of some city parks of Mexico City. *International Journal of Biometeorology* , 35: 24-28.

- Barradas, V., Tejeda-Martínez, A., Jáuregui, E. (1999). Energy balance measurements in a suburban vegetated area in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 33(24), 4109-4113.
- Brazel, A., Quatrocchi, D. (2005). Urban Climatology. En: Oliver, J. E. (Ed.), *Encyclopedia of World Climatology* (págs. 766-779). Netherlands: Springer Verlag.
- Bowler, E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155.
- Cano-Santana, Z. (1994). Flujo de energía a través de *Sphenarium purpurascens* (Orthoptera: Acrididae) productividad primaria neta aérea en una comunidad xerófita. México: Tesis doctoral en Ecología, Posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México. 198 p.
- Cano-Santana, Z., Meave, J. (1996). Sucesión primaria en derrames volcánicos: El caso del Xitle. 41, pp. 58-68.
- Carrillo-Trueba, C. (1995). El Pedregal de San Ángel. UNAM, México, D.F.
- Castillo-Argüero, S., Romero-Romero, M., Martínez-Orea, Y., Guadarrama, P., Sánchez, I., Núñez, O. (2004). Dinámica y conservación de la flora del matorral xerófilo de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 74, 51-75.
- Castillo-Argüero, S. M.O., Romero-Romero, M., Guadarrama, P., Núñez, O., Sánchez, I., Meave, J.A. (2007). La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: aspectos florísticos y ecológicos. Facultad de Ciencias, UNAM, México, D.F.: Departamento de Ecología y Recursos Naturales.
- Chow, W., Pope, R., Martin, C., Brazel, A. (2011). Observing and modeling the nocturnal park cool island of an arid city: Horizontal and vertical impacts. *Theoretical and Applied Climatology*, 103 (1), 197-211.
- Cleugh, H., Oke, T. (1986). Suburban-rural energy balance comparisons in summer for Vancouver, BC. *Boundary Layer Meteorology*, 36, 351-369.
- Elmqvist, T., Setälä, H., Handel, S. N., van der Ploeg, S., Aronson, J., Blignaut, J. N., . . . de Groot, R. (2015). Benefits of restoring ecosystem services in urban areas. *Current Opinion In Environmental Sustainability*, 14, 101-108.
- Emmanuel, R., Rosenlundb, H., Johansson, E. (2007). Urban shading – a design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka. *Int. J. Climatol.*, 27, 1995-2004.

- FAO. Food and Agriculture Organization. (2007). IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Feyisa, G.L., Dons, K., Meilby, H. (2014). Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa. *Landscape and Urban Planning*, 123, 87-95.
- Gartland, L. (2008). *Heat islands : understanding and mitigating heat in urban areas*. London: Sterling, VA : Earthscan,2008.
- Golden Software. (2002). *Surfer 8, User's Guide*. Golden, Colorado.
- Gómez-Baggethun, E., Barton, D. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 86, 235-245.
- 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, 756-760.
- Haase, D., Larondelle, N., Andersson, E., Artmann, M., Borgstrom, S., Breuste, J., . . . Elmqvist, T. (2014). A quantitative review of urban ecosystem service assessments: Concepts, models, and implementation. *AMBIO*, 43(4), 413-433.
- Huang, L., Li, J., Zhao, D., Zhu, J. (2008). A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China. *Building and Environment*, 43, 7-17.
- Jáuregui, E. (1975). Microclima del bosque de Chapultepec. *Investigaciones Geográficas*, 6, 63-72.
- Kłysik, K. F. (1999). Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Łódź, Poland. *Atm. Environ*, 33, 3885–3895.
- Kuenzer, C., Dech, S. (2013). Theoretical Background of Thermal Infrared Remote Sensing. En C. Kuenzer, S. Dech (Edits.), *Thermal Infrared Remote Sensing. Sensors, Methods, Aplications* (págs. 1-26). Netherlands: Springer.
- Kuttler, W. (2008). Urban Climate. En J. Marzluff, W. Endlicher, G. Bradley, U. Simon, E. Shulenberger, M. Alberti, C. ZumBrunnen, C. Ryan (Edits.), *Urban Ecology: an international perspective on the interaction between humans and nature* (págs. 233-248). New York: Springer Verlag.
- Landsberg, H. E. (1981). *The urban climate* . New York: Academic Press.
- Lee, S. H., Lee, K. S., Jin, W. C., Song, H. K. (2009). Effect of an urban park on air temperature differences in a central business district area. *Landscape and Ecological Engineering*, 5(2), 183-191.
- Lot, A., Camarena, P. (2009). El Pedregal de San Ángel de la Ciudad de México: Reserva ecológica urbana de la Universidad Nacional. En A. Lot, Z. Cano-

- Santana (Edits.), Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel (págs. 19-25). UNAM, México, D.F.: Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Coordinación de la Investigación Científica.
- Lot, A., Pérez, M., Gil, G., Rodríguez, S., Camarena, P. (2012). La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: Atlas de Riesgos. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Luederitz, C., Brink, E. L., Gralla, F., Hermelingmeier, V., Meyer, M., Niven, L., Rau, A.-L. a. (2015). A review of urban ecosystem services: six key challenges for future research. *Ecosystem Services*, 14, 98-112.
- Marzluff, J., Endlicher, W., Bradley, G., Simon, U., Shulenberger, E., Alberti, M., ZumBrunnen, C., Ryan, C. (2008). An introduction to Urban Ecology as an interaction between humans and nature. En J. Marzluff, W. Endlicher, G. Bradley, U. Simon, E. Shulenberger, M. Alberti, C. ZumBrunnen, C. Ryan. (Edits.), *Urban Ecology: An International Perspective on the Interaction Between Humans and Nature* (págs. vii- xi). New York: Springer Verlag.
- Mendoza, J. (2015). Evaluación de contaminantes foliares y producción de biomasa aérea en *Buddleja cordata* Kunth en la Ciudad Universitaria de la UNAM, México D. F. Tesis de licenciatura en Biología. FES Zaragoza. 87 pp.
- MEA. Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press.
- Nava, M., Jujnovsky, J., Salinas-Galicia, R., Álvarez-Sánchez, J., Almeida-Leñero, L. (2009). Servicios ecosistémicos. En A. Lot, Z. Cano-Santana (Edits.), *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel* (págs. 51-60). UNAM, México, D.F: Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Coordinación de la Investigación Científica.
- Oke, T. (1978). *Boundary layer climates*. London: Methuen.
- Oke, T. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal Of The Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24.
- Oke, T. (2006). Towards better scientific communication in urban climate. *Theor. Appl. Climatol*, 84, 179-190.
- Oke, T., Zeuner, G., Jáuregui, E. (1992). The surface energy balance in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 26 B(4), 433-444.
- Oliveira, S., Andrade, H., Vaz, T. (2011). The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. *Building and Environment* (46) 11, 2186–2194.



- Ortíz, M. L. (1980). El Microclima de Ciudad Universitaria, D.F. Tesis de licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México. Pp. 132.
- Parlow, E. (2011). Urban Climate. En J. B. Niemela, Urban ecology : patterns, processes, and applications (págs. 32-44). Oxford: Oxford University Press.
- Pérez, M. (2017). Distribución de monóxido de carbono, su relación con la isla de calor urbana y la temperatura del aire en la Ciudad de México. México: Tesis de licenciatura en Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. Pp.79.
- Pickett, S., Cadenasso, M., Grove, J., Nilon, C., Pouyat, R., Zipperer, W., Costanza, R. (2008b). Urban Ecological Systems: Linking Terrestrial Ecological, Physical, and Socioeconomic Components of Metropolitan Areas. En J. Marzluff, W. Endlicher, G. Bradley, U. Simon, E. Shulenberg, M. Alberti, C. ZumBrunnen, C. Ryan (Edits.), Urban Ecology: An International Perspective on the Interaction Between Humans and Nature (págs. 99-122). New York: Springer Verlag.
- Potchter, O., Cohen, P., Bitan, A. (2006). Climatic behavior of various urban parks during hot and humid summer Mediterranean city of Tel Aviv. Israel. Int. J. Climatol., 26, 1695–1711.
- REPSA. Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Rescate de pedregales remanentes. Recuperado el 31 de julio de 2017 de: <http://www.repsa.unam.mx/index.php/objetivosrepsa/conservacion/acciones-mitigacion/mit-rescate-pedregales>
- Rzedowski, J. (1954). Vegetación del Pedregal de San Ángel. 73. Licenciatura en Biología. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN.
- Sánchez, J. (1990). Análisis de algunas variables meteorológicas y su área de influencia, en Ciudad Universitaria, D.F., durante el periodo 1963-1983. 103. México: Tesis de Licenciatura en Geografía. Colegio de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Pp. 103.
- Santibáñez, G. (2005). Caracterización de la heterogeneidad ambiental en la Reserva del Pedregal de San Ángel. México, D.F: Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. 67 p.
- Scalenghe, R. Marsan, F.A. (2009). The anthropogenic sealing of soils in urban areas. Landscape and Urban Planning, 20, 1-10.
- SEREPSA. Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. (2008). Manual de Procedimientos. Programa de Adopción de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. UNAM, México: Secretaría Ejecutiva REPSA, Coordinación de la Investigación Científica.

- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., Erell, E. (2009). The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Land. Urban Plan.*, 92, 179–186.
- Siebe, C. (2000). Age and archaeological implications of Xitle volcano, southwestern Basin of Mexico-City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 104, 45-64.
- Siebe, C., P.E. Mendoza-Hernández, S.M. Juárez-Orozco, L. Vázquez-Selem y S. Cram. (2016). Consecuencias de la actividad volcánica del Xitle y el disturbio antrópico sobre las propiedades del suelo y la diversidad vegetal del Parque Ecológico de la Ciudad de México en el Ajusco medio. En: *La biodiversidad en la Ciudad de México*, Vol. I. CONABIO/SEDEMA, México, pp. 75-91.
- Skoulika, F., Santamourisa, M., Kolokotsa, D., Boemi, N. (2014). On the thermal characteristics and the mitigation potential of a medium size urban park in Athens, Greece. *Landscape and Urban Planning* (123), 73–86.
- Soberón, J., De la Cruz-Rosas, M., Jimenez, C. (1991). Ecología hipotética de la Reserva del Pedregal. *Ciencia y desarrollo*, 99, 25-38.
- Taha, H., Akbar, H., Rosenfeld, A. (1991). Heat Island and Oasis Effects of Vegetative Canopies: Micro-Meteorological Field-Measurements. *Theor. Appl. Climatol*, 44, 123-138.
- Takebayashi, H. M. (2007). Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Build. Environ*, 42, 2971–2979.
- Thorsson, S., Honjo, T., Lindberg, F., E. I., Lim, E. M. (2007). Thermal comfort and outdoor activity in Japanese urban public places. *Environment and Behavior*, 39(5), 660-684.
- USEPA. United States Environmental Protection Agency. (2008). *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*. EPA Office of Atmospheric Programs, Climate Protection Partnerships Division. Recuperado: 31/07/2017, de: <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>
- UN. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2015). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*. (ST/ESA/SERA/366).
- Upmanis, H., Eliasson, I., Lindqvist, S. (1998). The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Goteborg, Sweden). *International Journal of Climatology*, 18(6), 681-700.
- Valladares, K. (2016). Papel de los hongos micorrizógenos arbusculares en servicios de regulación en un pedregal sujeto a restauración ecológica en la Reserva del Pedregal de la UNAM. Posgrado en Ciencias Biológicas. UNAM. 96 pp.

- Wang, Y., Bakker, F., de Groot, R., Wörtche, H. (2014). Effect of ecosystem services provided by urban green infrastructure on indoor environment: A literature review. *Building and Environment*, 77, 88-100.
- Yu, C., Hien, W. N. (2006). Thermal benefits of city parks. *Energy & Buildings*, 38(2), 105-120.
- Zambrano, L., Rodríguez, S., Pérez M., Gil, G., Camarena, P., Lot, A. (2016). *La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: Atlas de riesgos*. 2 ed. Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, UNAM. 52 pp.

## XIV. Anexos

### ANEXO 1. Intercomparación de sensores

**Cuadro 1.** Promedio y desviación estándar ( $\sigma$ ) de los sensores intercomparados.

Sensor*	Temperatura(°C)		Humedad relativa (%)		Corrección	
	Promedio	$\sigma$	Promedio	$\sigma$	°C	H.R%
C1	23.5	0.1	-	-	-0.9	-
C2	<b>22.6</b>	0.1	45.4	0.6	0	-2.9
C3	23.0	0.2	-	-	-0.4	-
PN	23.0	0.1	-	-	-0.4	-
EE	23.0	0.2	-	-	-0.4	-
EST	22.5	0.2	40.7	2.1	0.1	1.7
M1	22.8	0.2	<b>42.2</b>	0.6	-0.2	0.3
M2	<b>22.6</b>	0.2	41.1	0.6	0	1.4
INV	22.4	0.2	47.2	2.5	0.2	-4.7
SP	<b>22.6</b>	0.2	<b>42.7</b>	0.6	0	-0.3
HSV	22.8	0.2	40.3	0.6	-0.2	2.2

\*Ver características en Cuadro 2.

Las cifras en negritas se tomaron como referencia para realizar la corrección en los sensores, en el caso de la humedad relativa se hizo un promedio entre las dos cifras.

### **Cuadro 2. Calibración de estaciones meteorológicas Davis Vantage Pro Plus 2**

	T (°C)	H.R. (%)	Corrección
Sensor HOBO T/H.R. (EST)	22.0±0.4	39.7±1.9	-
Estación Sitio plano	22.3±0.6	41.4±1.1	-0.3
Estación Hondonada	21.7±0.3	42.3±1.6	0.3

## ANEXO 2. Prueba con sensores en microambientes del Geopedregal



Fig. 1. Sitio grieta



Fig. 2. Sitio plano, bajo el tepozán



Fig. 3. Sitio con arbustos y hierbas

### Cuadro. 3. Resultados de la primera prueba

	Sitio plano (Grieta)		Sitio plano (Tepozán)		Sitio plano (Arbustos y hierbas)	
	T °C	H.R %	T °C	H.R %	T °C	H.R %
Promedio	24.7±2.9	21.5±2.5	25.6±0.8	18.9±2.1	27.5±1.0	18.2±2.7
Máximo	29.5	25.3	27.0	22.8	28.9	26.9
Mínimo	21.0	15.7	24.1	15.4	25.1	15.3

### ANEXO 3. Selección de material de protección solar

Se llevó a cabo una comparación entre dos sensores de temperatura y humedad relativa cubiertos con un recipiente blanco, hecho de plástico con orificios en su superficie y dos sensores de temperatura y humedad relativa sin cubrir con el fin de escoger el mejor material para la protección solar directa, durante dos días en un horario de 1 a 4 pm.

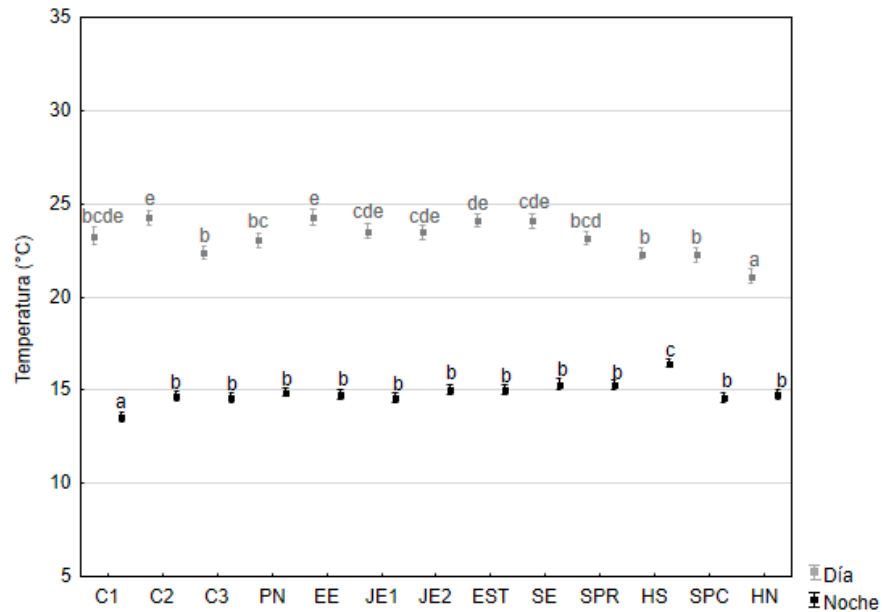
**Cuadro 4.** Diferencias entre sensores cubiertos y descubiertos. Primer día y segundo día

	Sensor descubierta 1		Sensor cubierta 1		Sensor descubierta 2		Sensor cubierta 2	
	Día 1	Día 2	Día 1	Día 2	Día 1	Día 2	Día 1	Día 2
T °C promedio	21.2±3.3	21.1±2.1	21.2±3.3	21.5±2. 5	21.0±3 .3	20.9±2 .0	21.6±3. 8	22.1±2 .5
T °C Máxima	27.8	24.1	27.8	25.1	27.5	23.7	29.1	25.7
T °C Mínima	16.3	16.9	16.3	16.9	15.6	16.8	16.4	17
H.R % Promedio	53.4±23.7	51.9±17. 5	53.4±23. 7	43.3±12 .0	52.1±2 5.1	48.6±1 5.4	-	-
H.R % Máxima	82.6	88.0	82.6	75.0	84.4	87.9	-	-
H.R % Mínima	24.7	38.7	24.7	33.7	22.4	37.1	-	-

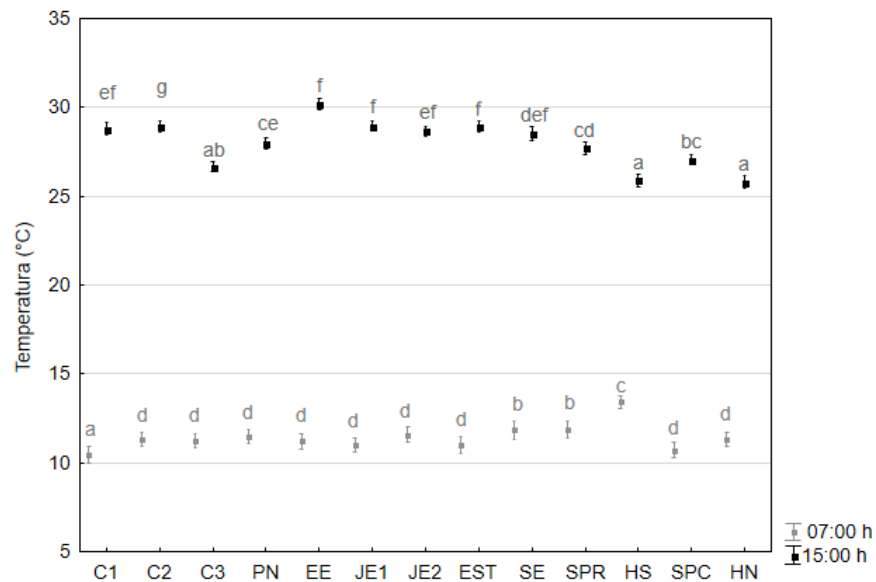
\*El sensor no registró humedad relativa

## ANEXO 4. Gráficas de temperatura media en micrositos del Geopedregal y alrededores

### Época húmeda



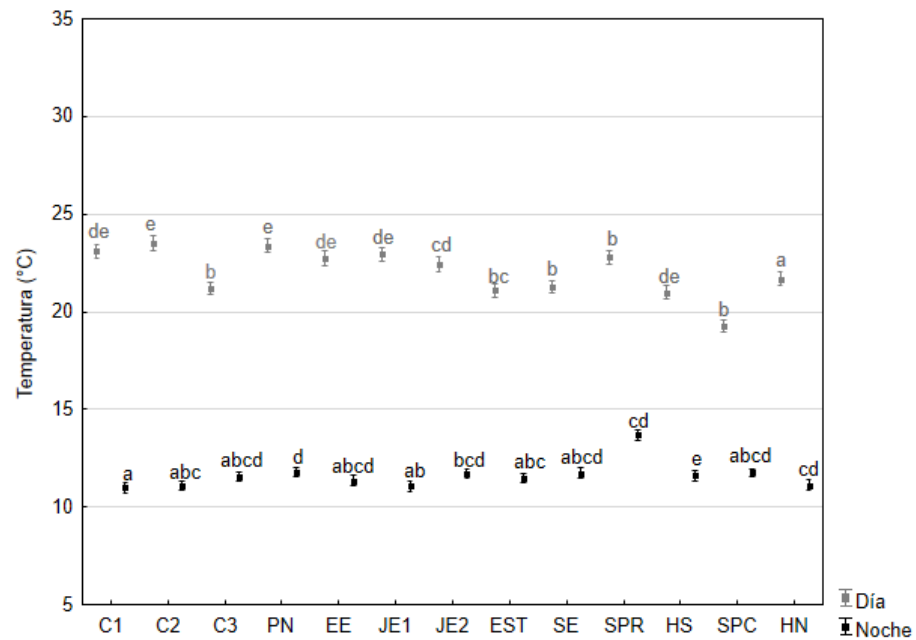
**Figura 4.** Temperatura media durante el día y la noche registrada por varios sensores en el año 2015 durante la época húmeda (junio-septiembre), en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica (Geopedregal) dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM. Las letras distintas en cada serie indican diferencias entre ellas (LSD  $p < 0.05$ ). Las barras muestran el error estándar.



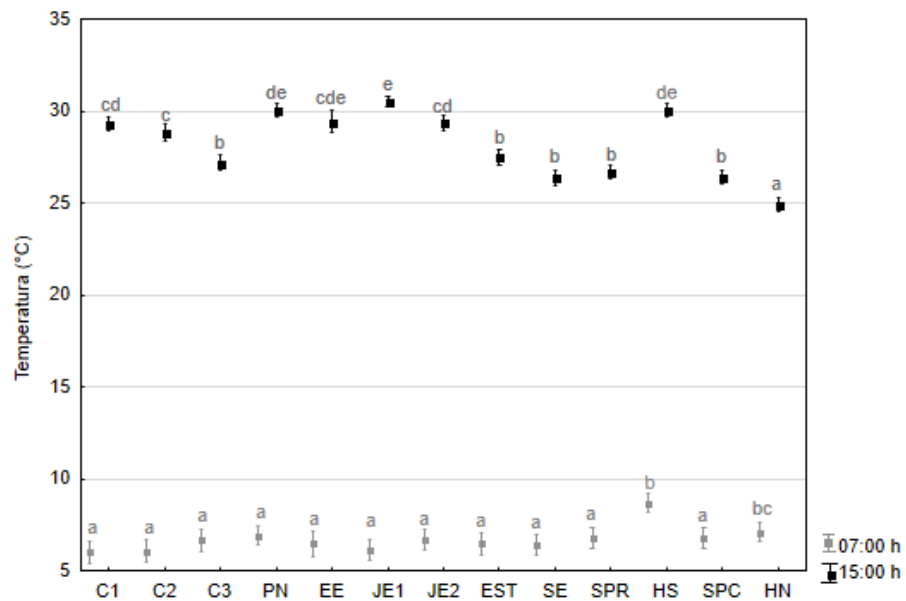
**Figura 5.** Temperatura media a las 7:00 h y 15:00 h, registrada por varios sensores durante la época húmeda (junio-septiembre) en el año 2015, en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica (Geopedregal) en Ciudad Universitaria, UNAM. Las letras distintas en cada serie sobre las medias indican diferencias entre ellas (LSD  $p < 0.05$ ). Las barras muestran el error estándar. C1=Circuito 1, C2=Circuito 2, C3= Circuito 3, PN= Promontorio Norte, EE= Entrada Estacionamiento, JE1= Junto a estacionamiento 1, JE2= Junto a estacionamiento 2, SE= Salida Estacionamiento, SPR= Sitio Plano Restaurado, HS= Hondonada Sur, SPC= Sitio Plano Conservado, HN= Hondonada Norte



## Época seca fría

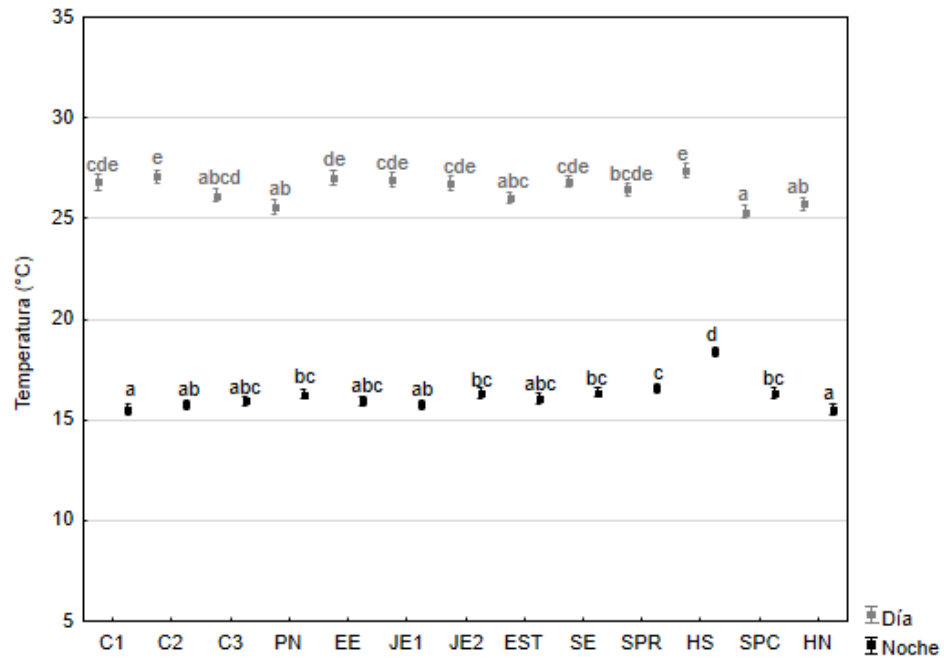


**Figura 6.** Temperaturas medias durante el día y la noche registrada por varios sensores en el año 2015-2016 durante la época seca fría (octubre-marzo) en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica (Geopedregal) dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM. Las letras distintas en cada serie indican diferencias entre ellas (LSD  $p < 0.05$ ). Las barras muestran el error estándar.

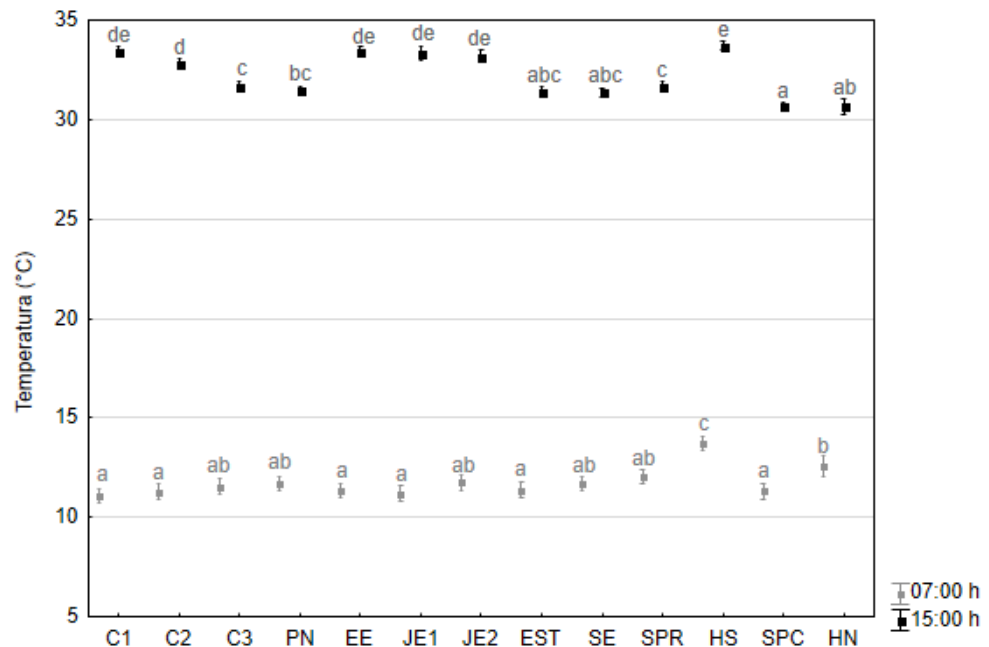


**Figura 7.** Temperatura media a las 7:00 h y 15:00 h registrada por varios sensores en el año 2015-2016 durante la época seca fría (octubre-marzo), en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica (Geopedregal) dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM. Las letras distintas en cada serie sobre las medias indican diferencias entre ellas (LSD  $p < 0.05$ ). Las barras muestran el error estándar. C1=Circuito 1, C2=Circuito 2, C3= Circuito 3, PN= Promontorio Norte, EE= Entrada Estacionamiento, JE1= Junto a estacionamiento 1, JE2= Junto a estacionamiento 2, SE= Salida Estacionamiento, SPR= Sitio Plano Restaurado, HS= Hondonada Sur, SPC= Sitio Plano Conservado, HN= Hondonada Norte

## Época seca cálida



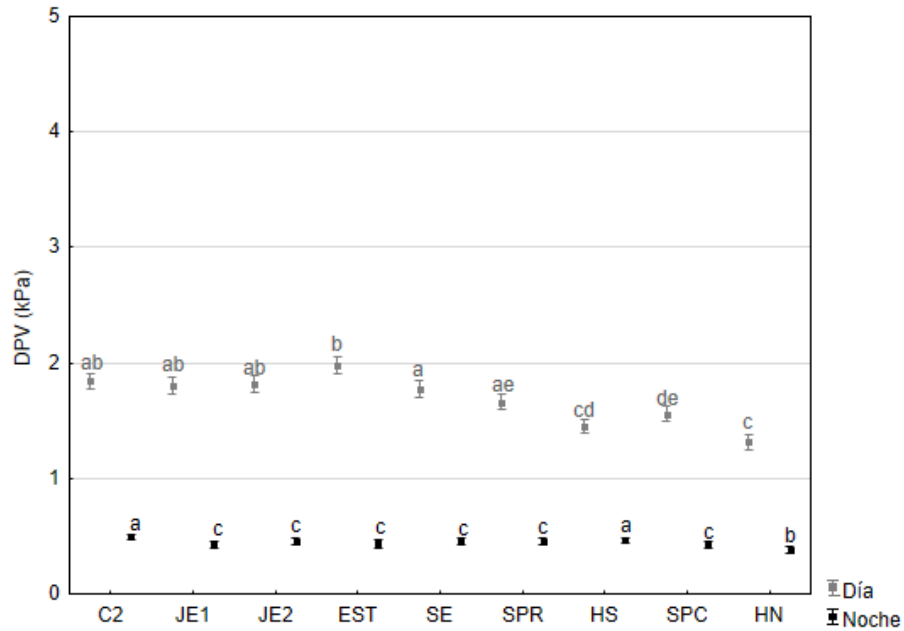
**Figura 8.** Temperatura media durante el día y la noche registrada por varios sensores en el año 2016 durante la época seca cálida (abril-mayo, en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM). Las letras distintas en cada serie indican diferencias entre (LSD  $p < 0.05$ ). Las barras muestran el error estándar.



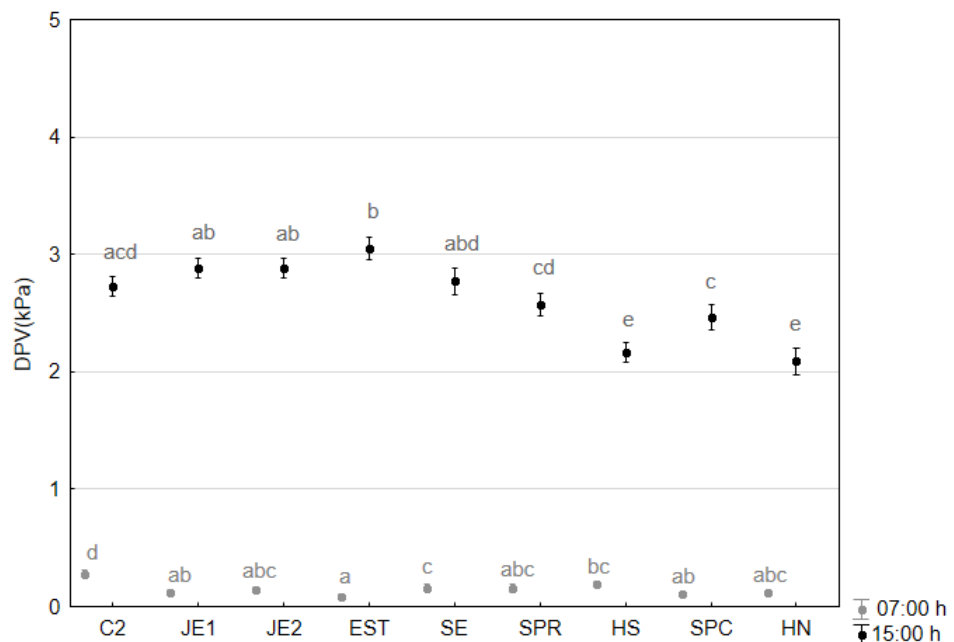
**Figura 9.** Temperatura media a las 7:00 h y 15:00 h de sensores durante la época seca cálida (abril-mayo) en el año 2016, en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM. Las letras distintas en cada serie sobre las medias indican diferencias entre ellas entre (LSD  $p < 0.05$ ). Las barras muestran el error estándar. C1=Circuito 1, C2=Circuito 2, C3= Circuito 3, PN= Promontorio Norte, EE= Entrada Estacionamiento, JE1= Junto a estacionamiento 1, JE2= Junto a estacionamiento 2, SE= Salida Estacionamiento, SPR= Sitio Plano Restaurado, HS= Hondonada Sur, SPC= Sitio Plano Conservado, HN= Hondonada Norte

## Anexo 5. Gráficas de déficit de presión de vapor medio en micrositos del Geopedregal y alrededores

### Época húmeda

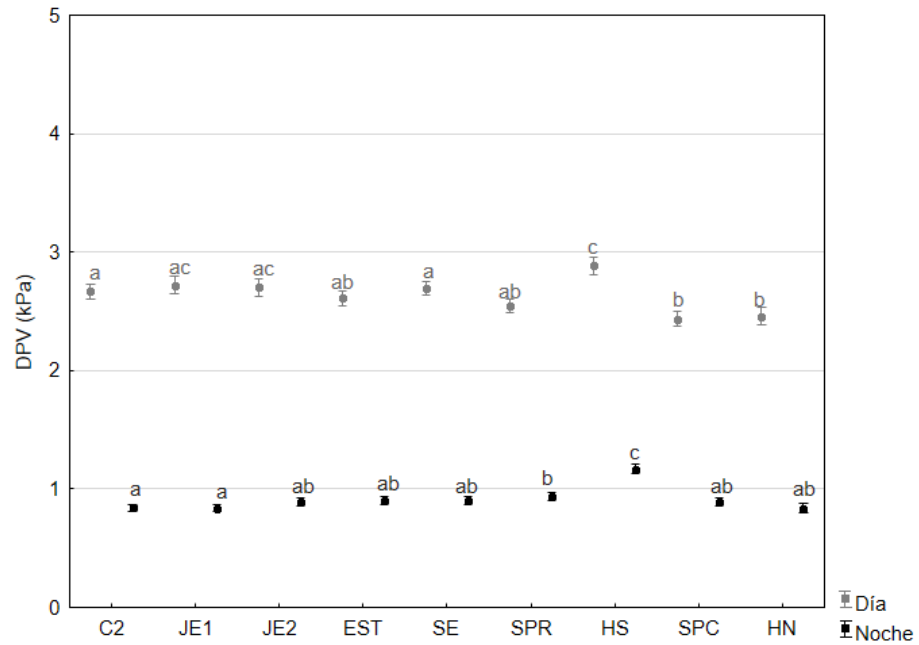


**Figura 10.** Déficit de presión de vapor mediodurante el día y la noche registrada por varios sensores en el año 2015 durante la época húmeda (junio-septiembre), en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica (Geopedregal) dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM. Las letras distintas en cada serie indican diferencias entre ellas (LSD  $p < 0.05$ ). Las barras muestran el error estándar.

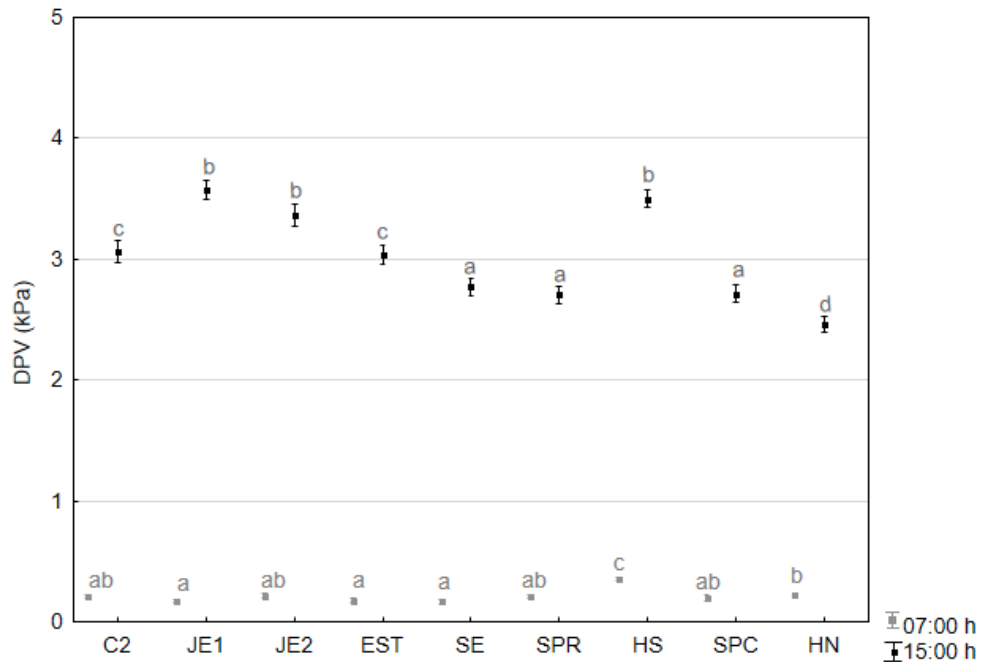


**Figura 11.** Déficit de presión de vapor media a las 7:00 h y 15:00 h, registrada por varios sensores durante la época húmeda (junio-septiembre) en el año 2015, en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica (Geopedregal) en Ciudad Universitaria, UNAM. Las letras distintas en cada serie sobre las medias indican diferencias entre ellas (LSD  $p < 0.05$ ). Las barras muestran el error estándar. C1=Circuito 1, C2=Circuito 2, C3= Circuito 3, PN= Promontorio Norte, EE= Entrada Estacionamiento, JE1= Junto a estacionamiento 1, JE2= Junto a estacionamiento 2, SE= Salida Estacionamiento, SPR= Sitio Plano Restaurado, HS= Hondonada Sur, SPC= Sitio Plano Conservado, HN= Hondonada Norte

## Época seca fría

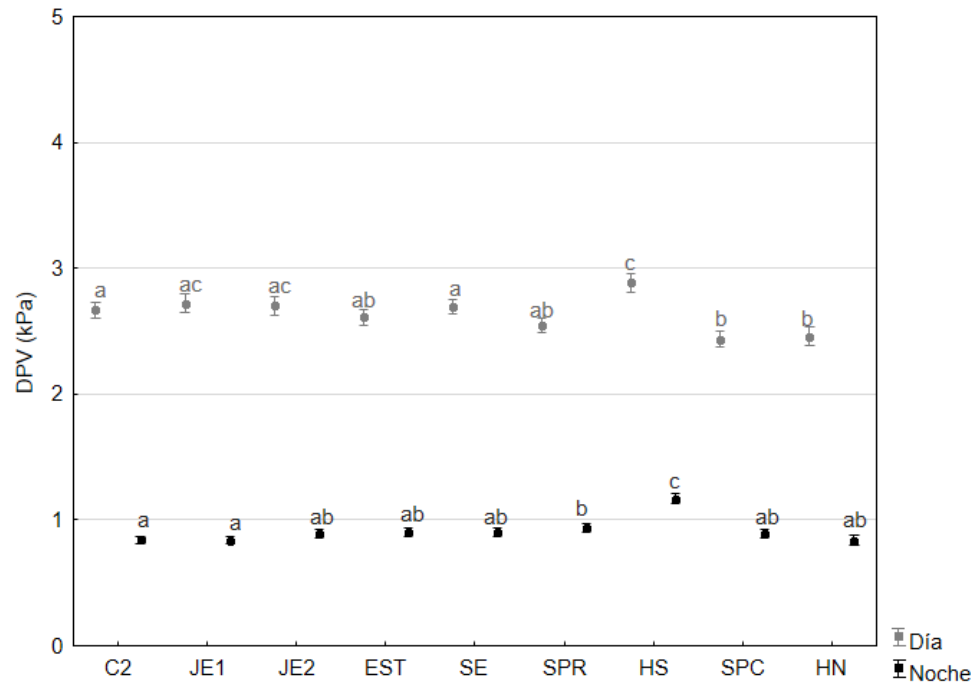


**Figura 12.** Déficit de presión de vapor medio el día y la noche registrada por varios sensores en el año 2015-2016 durante la época seca fría (octubre-marzo) en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica (Geopedregal) dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM. Las letras distintas en cada serie indican diferencias entre ellas (LSD  $p < 0.05$ ). Las barras muestran el error estándar.

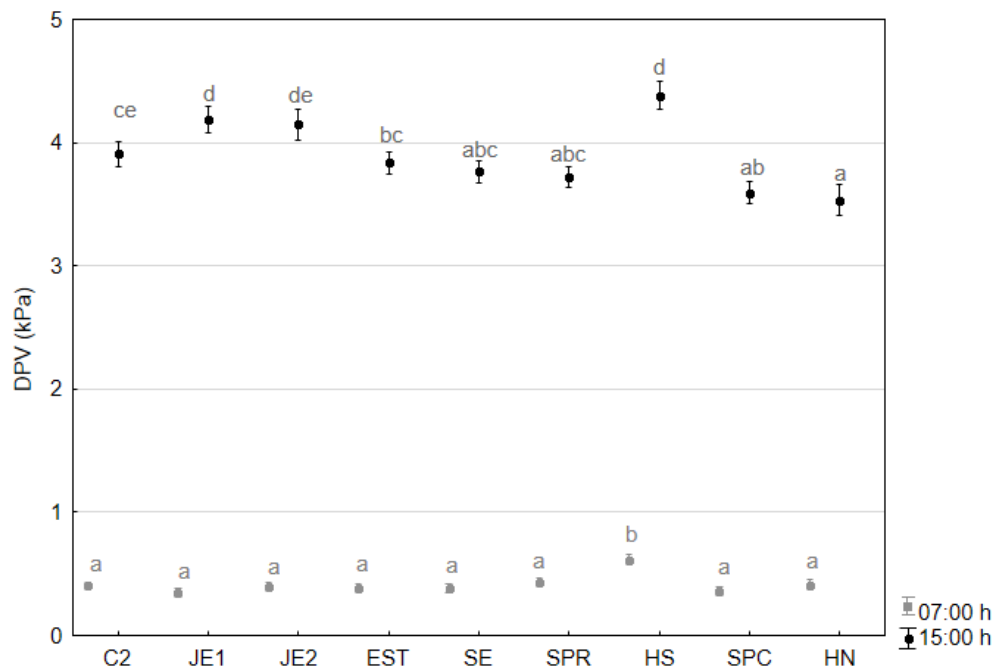


**Figura 13.** Déficit de presión de vapor media a las 7:00 h y 15:00 h registrada por varios sensores en el año 2015-2016 durante la época seca fría (octubre-marzo), en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica (Geopedregal) dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM. Las letras distintas en cada serie sobre las medias indican diferencias entre ellas (LSD  $p < 0.05$ ). Las barras muestran el error estándar. C1=Circuito 1, C2=Circuito 2, C3=Circuito 3, PN= Promontorio Norte, EE= Entrada Estacionamiento, JE1= Junto a estacionamiento 1, JE2= Junto a estacionamiento 2, SE= Salida Estacionamiento, SPR= Sitio Plano Restaurado, HS= Hondonada Sur, SPC= Sitio Plano Conservado, HN= Hondonada Norte

## Época seca cálida



**Figura 14.** Déficit de presión de vapor mediodurante el día y la noche registrada por varios sensores) en el año 2016 durante la época seca cálida (abril-mayo, en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM. Las letras distintas en cada serie indican diferencias entre (LSD  $p < 0.05$ ). Las barras muestran el error estándar.



**Figura 15.** Déficit de presión de vapor media a las 7:00 h y 15:00 h de sensores durante la época seca cálida (abril-mayo) en el año 2016, en un pedregal remanente sujeto a restauración ecológica dentro del campus de Ciudad Universitaria, UNAM. Las letras distintas en cada serie sobre las medias indican diferencias entre ellas entre (LSD  $p < 0.05$ ). Las barras muestran el error estándar. C1=Circuito 1, C2=Circuito 2, C3= Circuito 3, PN= Promontorio Norte, EE= Entrada Estacionamiento, JE1= Junto a estacionamiento 1, JE2= Junto a estacionamiento 2, SE= Salida Estacionamiento, SPR= Sitio Plano Restaurado, HS= Hondonada Sur, SPC= Sitio Plano Conservado, HN= Hondonada Norte

## ANEXO 6. Tablas de resultados de varianza

### Caracterización microambiental en el Geopedregal

#### Temperatura

##### Época húmeda

Efecto	Grados de libertad	°C SS	°C MS	°C F	°C p
Intercepción	1	19410935	19410935	1026479	0.00
Sensor	3	27686	9229	488	0.00
Error	62429	1180546	19		
Total	62432	1208232			

##### Época seca fría

Efecto	Grados de libertad	°C SS	°C MS	°C F	°C p
Intercepción	1	23656812	23656812	597336.8	0.00
Sensor	3	83268	27756	700.8	0.00
Error	95744	3791827	40		
Total	95747	3875096			

##### Época seca cálida

Efecto	Grados de libertad	°C SS	°C MS	°C F	°C p
Intercepción	1	12646733	12646733	309716.5	0.00
Sensor	3	18606	6202	151.9	0.00
Error	31316	1278734	41		
Total	31319	1297341			

#### DPV

##### Época húmeda

Efecto	Grados de libertad	DPV SS	DPV MS	DPV F	DPV p
Intercepción	1	27695.67	27695.67	65272.72	0.00
Sensor	3	303.55	101.18	238.47	0.00
Error	62429	26489.06	0.42		
Total	62432	26792.61			

##### Época seca fría

Efecto	Grados de libertad	DPV SS	DPV MS	DPV F	DPV p
Intercepción	1	83565.08	83565.08	126843.0	0.00
Sensor	3	1390.66	463.55	703.6	0.00

Error	95744	63076.82	0.66		
Total	95747	64467.48			

### Época seca cálida

Efecto	Grados de libertad	DPV SS	DPV MS	DPV F	DPV p
Intercepción	1	64670.47	64670.47	48366.70	0.00
Sensor	3	627.53	209.18	156.44	0.00
Error	31316	41872.20	1.34		
Total	31319	42499.74			

### Diferencias de temperatura y déficit de presión de vapor entre el Geopedregal y su entorno urbanizado

#### Época húmeda

##### Día

Efecto	Grados de libertad	°C SS	°C MS	°C F	°C p
Intercepción	1	1279993	1279993	49003.31	0.000000
Sensor	12	2050	171	6.54	0.000000
Error	2386	62324	26		
Total	2398	64373			

##### Noche

Efecto	Grados de libertad	°C SS	°C MS	°C F	°C p
Intercepción	1	529133.3	529133.3	46717.46	0.000000
Sensor	12	867.9	72.3	6.39	0.000000
Error	2388	27047.1	11.3		
Total	2400	27915.0			

##### 7:00 h

Efecto	Grados de libertad	°C SS	°C MS	°C F	°C p
Intercepción	1	25908.09	25908.09	9308.083	0.000000
Sensor	12	97.73	8.14	2.926	0.000961
Error	187	520.50	2.78		
Total	199	618.23			



**15:00 h**

Efecto	Grados de libertad	°C SS	°C MS	°C F	°C p
Intercepción	1	155780.5	155780.5	96873.45	0.00
Sensor	12	330.3	27.5	17.12	0.00
Error	187	300.7	1.6		
Total	199	631.0			

**20:00 h**

Efecto	Grados de libertad	°C SS	°C MS	°C F	°C p
Intercepción	1	81981.12	81981.12	15786.42	0.000000
Sensor	12	30.06	2.51	0.48	0.923335
Error	187	971.12	5.19		
Total	199	1001.18			

**Época seca fría****Día**

Efecto	Grados de libertad	°C SS	°C MS	°C F	°C p
Intercepción	1	2479108	2479108	51898.18	0.00
Sensor	12	7331	611	12.79	0.00
Error	5114	244289	48		
Total	5126	251620			

**Noche**

Efecto	Grados de libertad	°C SS	°C MS	°C F	°C p
Intercepción	1	733261.6	733261.6	28997.59	0.000000
Sensor	12	2382.7	198.6	7.85	0.000000
Error	5444	137662.4	25.3		
Total	5456	140045.1			

**7:00h**

Efecto	Grados de libertad	°C SS	°C MS	°C F	°C p
Intercepción	1	22385.41	22385.41	1918.402	0.000000
Sensor	12	191.45	15.95	1.367	0.178415
Error	428	4994.24	11.67		
Total	440	5185.69			

**15:00 h**

Efecto	Grados de libertad	°C SS	°C MS	°C F	°C p
Intercepción	1	347732.8	347732.8	69381.42	0.00
Sensor	12	1279.6	106.6	21.28	0.00
Error	428	2145.1	5.0		
Total	440	3424.7			

**20:00 h**

Efecto	Grados de libertad	°C SS	°C MS	°C F	°C p
Intercepción	1	160059.6	160059.6	24457.60	0.000000
Sensor	12	170.3	14.2	2.17	0.012413
Error	428	2801.0	6.5		
Total	440	2971.3			

**Época seca cálida****Día**

Efecto	Grados de libertad	°C SS	°C MS	°C F	°C p
Intercepción	1	2781214	2781214	80736.63	0.000000
Sensor	12	1512	126	3.66	0.000017
Error	3983	137206	34		
Total	3995	138718			

**Noche**

Efecto	Grados de libertad	°C SS	°C MS	°C F	°C p
Intercepción	1	954854.1	954854.1	59702.94	0.00
Sensor	12	1807.4	150.6	9.42	0.00
Error	3647	58328.0	16.0		
Total	3659	60135.4			

**7:00 h**

Efecto	Grados de libertad	°C SS	°C MS	°C F	°C p
Intercepción	1	43615.17	43615.17	12172.58	0.000000
Sensor	12	151.70	12.64	3.53	0.000064
Error	306	1096.42	3.58		

Total	318	1248.12			
-------	-----	---------	--	--	--

### 15:00 h

Efecto	Grados de libertad	°C SS	°C MS	°C F	°C p
Intercepción	1	328415.0	328415.0	187150.8	0.00
Sensor	12	359.0	29.9	17.0	0.00
Error	306	537.0	1.8		
Total	318	896.0			

### 20:00 h

Efecto	Grados de libertad	°C SS	°C MS	°C F	°C p
Intercepción	1	174965.7	174965.7	35535.01	0.000000
Sensor	12	185.9	15.5	3.15	0.000303
Error	306	1506.7	4.9		
Total	318	1692.6			

## DPV

### Época húmeda

#### Día

Efecto	Grados de libertad	DPV SS	DPV MS	DPV F	DPV p
Intercepción	1	4667.980	4667.980	5631.063	0.000000
Sensor	8	68.388	8.549	10.312	0.000000
Error	1634	1354.536	0.829		
Total	1642	1422.924			

#### Noche

Efecto	Grados de libertad	DPV SS	DPV MS	DPV F	DPV p
Intercepción	1	320.7553	320.7553	1995.122	0.000000
Sensor	8	1.5148	0.1894	1.178	0.308694
Error	1636	263.0193	0.1608		
Total	1644	264.5342			

**7:00 h**

Efecto	Grados de libertad	DPV SS	DPV MS	DPV F	DPV p
Intercepción	1	3.166452	3.166452	344.8255	0.000000
Sensor	8	0.412503	0.051563	5.6152	0.000004
Error	128	1.175394	0.009183		
Total	136	1.587897			

**15:00 h**

Efecto	Grados de libertad	DPV SS	DPV MS	DPV F	DPV p
Intercepción	1	935.0257	935.0257	6663.943	0.000000
Sensor	8	13.7208	1.7151	12.224	0.000000
Error	128	17.9598	0.1403		
Total	136	31.6806			

**20:00 h**

Efecto	Grados de libertad	DPV SS	DPV MS	DPV F	DPV p
Intercepción	1	183.1121	183.1121	723.5404	0.000000
Sensor	8	0.4421	0.0553	0.2183	0.987143
Error	128	32.3940	0.2531		
Total	136	32.8360			

**Época seca fría****Día**

Efecto	Grados de libertad	DPV SS	DPV MS	DPV F	DPV p
Intercepción	1	13106.61	13106.61	12085.09	0.00
Sensor	8	131.37	16.42	15.14	0.00
Error	3597	3901.04	1.08		
Total	3605	4032.42			

**Noche**

Efecto	Grados de libertad	DPV SS	DPV MS	DPV F	DPV p
Intercepción	1	1287.819	1287.819	7734.592	0.000000
Sensor	8	15.779	1.972	11.846	0.000000
Error	3825	636.867	0.167		
Total	3833	652.647			

**7:00 h**

Efecto	Grados de libertad	DPV SS	DPV MS	DPV F	DPV p
Intercepción	1	13.91283	13.91283	1431.396	0.000000
Sensor	8	0.80281	0.10035	10.324	0.000000
Error	301	2.92565	0.00972		
Total	309	3.72846			

### 15:00 h

Efecto	Grados de libertad	DPV SS	DPV MS	DPV F	DPV p
Intercepción	1	2716.134	2716.134	13246.99	0.00
Sensor	8	40.421	5.053	24.64	0.00
Error	301	61.716	0.205		
Total	309	102.137			

### 20:00 h

Efecto	Grados de libertad	DPV SS	DPV MS	DPV F	DPV p
Intercepción	1	581.7180	581.7180	4805.332	0.000000
Sensor	8	2.8684	0.3586	2.962	0.003321
Error	301	36.4381	0.1211		
Total	309	39.3065			

## Época seca cálida

### Día

Efecto	Grados de libertad	DPV SS	DPV MS	DPV F	DPV p
Intercepción	1	18873.15	18873.15	13815.23	0.000000
Sensor	8	46.60	5.83	4.26	0.000042
Error	2735	3736.32	1.37		
Total	2743	3782.92			

### Noche

Efecto	Grados de libertad	DPV SS	DPV MS	DPV F	DPV p
Intercepción	1	2098.729	2098.729	6195.300	0.000000
Sensor	8	23.687	2.961	8.740	0.000000
Error	2527	856.050	0.339		
Total	2535	879.737			

### 7:00 h

Efecto	Grados de libertad	DPV SS	DPV MS	DPV F	DPV p
Intercepción	1	37.50698	37.50698	1224.057	0.000000

Sensor	8	1.24374	0.15547	5.074	0.000009
Error	211	6.46536	0.03064		
Total	219	7.70910			

**15:00 h**

Efecto	Grados de libertad	DPV SS	DPV MS	DPV F	DPV p
Intercepción	1	3316.292	3316.292	13037.09	0.000000
Sensor	8	15.645	1.956	7.69	0.000000
Error	211	53.673	0.254		
Total	219	69.318			

**20:00 h**

Efecto	Grados de libertad	DPV SS	DPV MS	DPV F	DPV p
Intercepción	1	823.3317	823.3317	2385.147	0.000000
Sensor	8	8.3730	1.0466	3.032	0.003020
Error	211	72.8353	0.3452		
Total	219	81.2083			