

Los límites y la cartografía

Armando Peralta Higuera y Jorge Prado Molina

Instituto de Geografía,
Universidad Nacional Autónoma de México
aperalta@igg.unam.mx

La primera invasión: un evento extraordinario

En 1983 se creó la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel en Ciudad Universitaria (REPSA) a iniciativa de un grupo de investigadores (Álvarez *et al.*, 1982), con el fin de proteger los últimos vestigios de un ecosistema único en el mundo, de gran riqueza biológica y que se encuentra al borde de la extinción. Éste se caracteriza por una comunidad de matorral xerófilo a la que Rzedowski (1954) llamó *Senecionetum praecosis*, debido a la abundancia del “palo loco” (*Senecio praecox*), que da al paisaje de la zona un aspecto muy peculiar. El *Senecionetum* se desarrolló sobre el conjunto de formaciones basálticas que hoy conocemos como el Pedregal de San Ángel, y que se originaron por la solidificación de los flujos de lava que derramó la erupción del volcán Xitle hace aproximadamente 1,670 años (Siebe, 2000). La lava cubrió el poblado de Copilco y el centro urbano y ceremonial de Cuicuilco, que a la sazón era asiento de una de las culturas más desarrolladas del período formativo tardío mesoamericano, obligando a sus habitantes a desplazarse hacia otros rumbos del Altiplano. Los derrames cubrieron una superficie de unos 70 km² al suroeste del Valle de México, sobre parte de las delegaciones Magdalena-Contreras, Álvaro Obregón, Tlalpan y Coyoacán, en el Distrito Federal. El evento provocó la desaparición de las comunidades vegetales y los terrenos agrícolas, la evacuación o aniquilación de las poblaciones animales, una modificación permanente de los suelos y alteró el ambiente lacustre. La lava solidificada conformó una capa de basalto de espesor

variable, cuya superficie muestra las formas caprichosas creadas por el avance del fluido y cubre los laberintos formados por innumerables tubos de lava, dando lugar a un territorio accidentado, con características radicalmente distintas a las del entorno. Aún cuando no ocurrió un aislamiento geográfico en sentido estricto, la desaparición total de la flora y la fauna, junto con el establecimiento de condiciones muy diferentes a las del entorno, confirieron a la zona algunos de los rasgos característicos de una isla, en la que se originó un proceso de sucesión primaria. El paisaje rocoso fue gradualmente modificado por los efectos del intemperismo, los derrumbes, la acumulación de sedimentos, la formación de suelos y su colonización por poblaciones de plantas y animales provenientes de los alrededores. Los derrames descienden desde una altura de 3,000 metros SNMM en la parte media del volcán Ajusco, donde se encuentra el Xitle, hasta los 2,240 metros en la parte lacustre del Valle, por lo que es posible encontrar un intervalo relativamente amplio de condiciones de temperatura, humedad y pendiente, que dieron lugar a distintas comunidades vegetales (Rzedowski, 1954, Cano-Santana y Meave, 1996, Castillo-Argüero *et al.*, 2004).

Entre ellas se encuentra el matorral xerófilo, que se desarrolló en la parte baja de los derrames, entre los 2,240 y 2,500 metros de altura y que ocupaba originalmente una superficie aproximada de 40 km². La asociación más conspicua en este matorral era la dominada por *Senecio praecox*, que fue descrita por Rzedowski en 1954 cuando caracterizó la flora del Pedregal. A mayores altitudes, el

matorral cambiaba gradualmente su composición y se entremezclaba con otras comunidades, como lo ejemplifica la presencia actual de algunas de ellas dominadas por *Agave salmiana*, encino y tepozán, en la Reserva Ecológica Lomas del Seminario. Desafortunadamente ya no es posible conocer toda la diversidad biológica, ni el tipo y distribución espacial de las asociaciones vegetales que se desarrollaron en el matorral xerófilo, puesto que la mayor parte ha desaparecido irremediamente (figura 1).

La segunda invasión: un ecosistema único

El *Senecionetum* debe su carácter único a la gran heterogeneidad geomorfológica del terreno, que se expresa en forma de masas rocosas, cortes abruptos, grietas, cavernas, planicies y depresiones rellenas de sedimentos. El microrrelieve que resulta de esta configuración, ha dado lugar a una gran variedad de ambientes locales, con diversas condiciones de suelo, humedad, temperatura, exposición al viento y al sol. En ellos, se ha desarrollado un mosaico de hábitats y asociaciones de especies que pueden variar significativamente a lo largo de unos cuantos metros, formando unidades relativamente pequeñas. Es decir, que detrás de una descripción genérica, en realidad el matorral de palo loco está formado por numerosos parches, con grandes variaciones en composición florística y estructura (Cano-Santana, 1994 citado en Castillo-Argüero *et al.*, 2004).

Otra característica relevante del Pedregal, es la coexistencia de especies que ordinariamente se encuentran en condiciones climáticas o altitudinales distintas, dando lugar a asociaciones inusuales y a una diversidad significativamente mayor que la de la otros matorrales xerófilos de México (Castillo-Argüero *et al.* 2004). Aún cuando el clima de la zona es templado, el régimen de precipitación y la altitud favorecen la presencia de otros tipos de vegetación; varias especies de matorral xerófilo se establecieron de modo dominante, debido a la limitada capacidad de retención de humedad de los suelos someros y del sustrato rocoso, que en la temporada seca produce condiciones análogas a las de zonas áridas o semiáridas. Esto, junto con la ya mencionada heterogeneidad del terreno, da lugar a este ecosistema definido como ma-

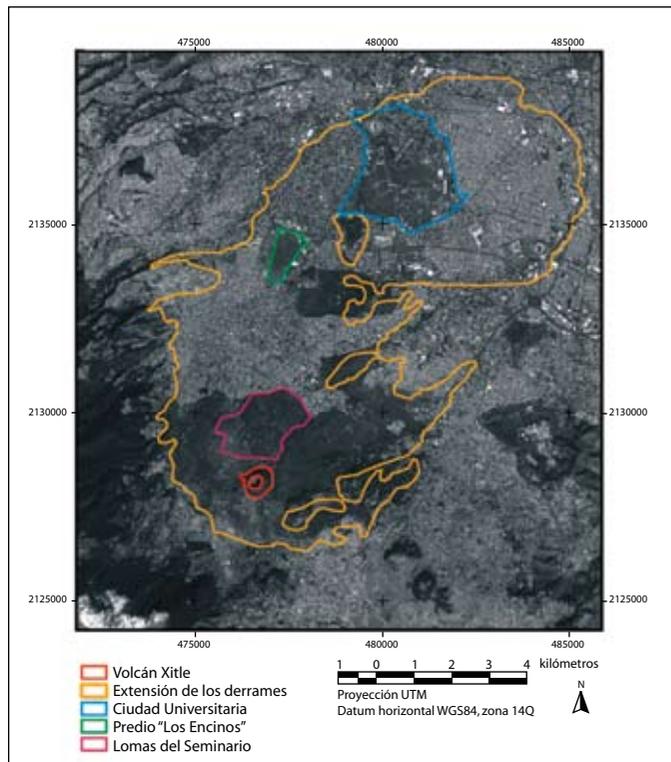


Figura 1. Extensión aproximada de los derrames del volcán Xitle y ubicación de los remanentes del Pedregal que conservan sus ecosistemas característicos.

torral xerófilo, pero en el que la mayoría de las especies son características de condiciones de temperatura, humedad y altitud sorprendentemente diversas.

La tercera invasión: el desarrollo

Hasta mediados del siglo XX el Pedregal de San Ángel era considerado un territorio inaccesible, inhóspito e inadecuado para cualquier uso humano, que numerosas referencias y mapas describen de modo despectivo como malpaís, por lo que se mantuvo despoblado y relativamente inalterado. Sin embargo, los criterios de desarrollo dominantes a partir de la década de 1950, acompañados de un desconocimiento abrumador sobre su importancia ecológica y ambiental, impulsaron una "conquista" de este territorio como alternativa para la expansión de la Ciudad de México, que fue encabezada por la construcción del fraccionamiento Jardines del Pedregal, el anillo periférico y la misma Ciudad Universitaria (CU). Esta incompreensión se manifestó también en otras decisiones, como la de realizar una

extracción ilimitada de piedra para la construcción en la Ciudad de México y la elección del sitio para ubicar la Planta de Asfalto que abastece al Distrito Federal, que es una instalación altamente contaminante. El proceso fue impulsado principalmente a través de iniciativas institucionales, que mas adelante tendrían como efecto colateral, la proliferación de invasiones y asentamientos irregulares, resultado de la feroz competencia por los recursos territoriales. Durante el último tercio del siglo XX, no obstante las dificultades técnicas que plantea la construcción sobre un terreno rocoso, irregular y con abundantes cavidades subterráneas, prácticamente toda la parte baja de los derrames fue ocupada por nuevas colonias y vialidades. Esto eliminó casi totalmente y de manera irreversible al ecosistema del *Senecionetum*, y provocó también la pérdida de importantes bienes culturales arqueológicos, algunos de los cuales fueron utilizados como material de construcción, a pesar de su buen estado de conservación y evidente valor. Paradójicamente, el paisaje creado por un evento natural catastrófico, fue a su vez destruido en un tiempo muy corto por otro proceso -éste de origen social- que también se perfila como catastrófico y de mayores consecuencias. Los últimos remanentes del matorral que aún tienen una extensión relevante para su conservación, se encuentran en tres sitios principales: en parte de la Reserva Ecológica Lomas del Seminario, ubicada en las faldas del volcán Ajusco, donde comparte 7.28 km² con otras asociaciones vegetales; en el predio particular "Los Encinos" colindante con el Periférico (0.71 km²) y en la parte sur de la Ciudad Universitaria, que no ha sido ocupada por instalaciones y que se encuentra protegida desde 1983 (1.71 km²). Fuera de estas zonas, sólo existen fragmentos aislados en la zona arqueológica de Cuicuilco, en partes del Bosque de Tlalpan, así como en predios aislados en las colonias que se ubican en las faldas del Ajusco y en el fraccionamiento Jardines del Pedregal, en los que pueden encontrarse ejemplares de la vegetación original.

Creación de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel en Ciudad Universitaria

En 1982 un grupo de investigadores universitarios planteó la necesidad urgente de conservar los remanentes del matorral y aportó tanto la información

científica como los argumentos necesarios para sustentar la creación de una reserva ecológica (Álvarez *et al.*, 1982). Como resultado de esta iniciativa, en 1983 la Universidad Nacional Autónoma de México declaró "zona ecológica inafectable" a una superficie de 124.5 ha, que protegía dos grandes fragmentos que se encontraban en su ámbito de decisión y cuya extensión refleja la importancia que se concedió a la conservación del ecosistema (Rivero-Serrano, 1983). La cláusula Segunda del acuerdo dice a la letra: "*En dicha zona por su importancia natural se desarrollará la preservación y la reintroducción de la flora y la fauna, que por sus características le son exclusivas, para que únicamente sea utilizada en actividades académicas y de investigación, funciones esenciales de la Universidad, además de contribuir al mejoramiento del medio ambiente del sur de la Ciudad de México: no pudiendo destinarse a fines distintos.*" Asimismo, determinó la creación de un Comité Asesor, formado por científicos universitarios reconocidos, y colocó en la Coordinación de la Investigación Científica la responsabilidad de aplicar los programas de conservación y reintroducción de especies, con la participación del Instituto de Biología, el entonces Centro de Ecología, la Facultad de Ciencias y la Facultad de Arquitectura.

En la figura 2 se muestran los dos polígonos que se encuentran separados por la Avenida de los Insurgentes, evidenciando la fragmentación del matorral dentro de los terrenos universitarios, pero ambos son relativamente extensos y se mantiene cierta continuidad espacial dentro de ellos, aspectos que son importantes para sostener el funcionamiento del ecosistema. Esta acción dio lugar a un incremento en los estudios sobre la ecología, flora y fauna del Pedregal y al desarrollo de reuniones académicas frecuentes. Sin embargo, la definición de los límites de la nueva reserva tenía algunas deficiencias. En el texto de este primer acuerdo (Rivero-Serrano, 1983), las zonas fueron descritas a partir de la longitud de las colindancias y la superficie de cada una, siguiendo el uso de los documentos legales, en los que se hace referencia a calles y predios adyacentes. En general, el texto de este tipo de descripción no siempre aporta información detallada sobre la forma del predio y debe apoyarse en un plano ó croquis anexo para definirlo con precisión. Sin embargo, es común que no se de importancia a la calidad de esta cartografía auxiliar, ya que se considera que su forma es inequívocamente determinada por los terrenos y vialidades



Figura 2. Delimitación de la Reserva del Pedregal de San Ángel, a través del acuerdo de 1983, con una superficie de 124.5 hectáreas. Los dos polígonos se designaron como “zona ecológica inafectable.” (Plano: Dirección General de Obras y Conservación, UNAM).

a su alrededor. Entre las referencias utilizadas en este caso, se encontraban algunos rasgos físicos localizables, como el límite de la Ciudad Universitaria (CU) ó algunos de sus circuitos, lo que no daba lugar a la ambigüedad. Pero también se mencionaban varias colindancias con rasgos aún no existentes, identificados como “vialidades futuras” y “áreas libres de futuro desarrollo”. Para determinar la posición de estos rasgos, era preciso consultar los planes de desarrollo de la CU, que establecen los criterios para el crecimiento de la infraestructura y especifican la construcción de algunas obras, proporcionando descripciones y planos más o menos precisos. Así,

en el caso de las “vialidades futuras”, los límites podían ser determinados con cierta claridad, pero una parte importante del perímetro de la nueva REPSA colindaba con “áreas libres de futuro desarrollo”, que presentaban un problema peculiar. La mayoría de estas áreas se ubicaban en zonas de matorral bien conservado, y originalmente estaban consideradas en los planes como territorio disponible para el crecimiento de las instalaciones, aunque sin un uso específico. Con el acuerdo, una parte de ellas fue incorporada a la Reserva, pero el resto se mantuvo como reserva territorial, de modo que la nueva línea divisoria se ubicaba ahora en algún lugar dentro

del “Área libre de futuro desarrollo” original. En consecuencia, la condición expresada verbalmente de que la Reserva colindara con el “área libre” se cumpliría para cualesquiera que fueran la posición y la forma de la línea divisoria, constituyendo una referencia circular, a menos que se especificara la ubicación exacta de la línea, indicando las coordenadas de los vértices, o bien especificando distancias y ángulos medidos a partir de puntos bien ubicados, cosa que no se menciona en el texto. La única noción clara sobre la ubicación espacial de estas colindancias, se encontraba en un plano de localización que acompañaba al acuerdo, en el que se mostraba el contorno de los dos terrenos, pero no se especificó la fuente de la que se obtuvo ni la escala real del original, que no pudo ser localizado. Al ser ésta la única referencia para ubicar y medir la posición física de los límites, la escala del plano adquiere enorme relevancia, porque determina la precisión con la que esto puede lograrse; en este caso particular, encontramos que la medición de distancias en los ejemplares disponibles del plano, que eran copias de escala muy pequeña, puede tener un error cercano a los diez metros. Aparentemente no se realizaron levantamientos topográficos específicos para ubicar los linderos en el terreno y crear el plano, y tampoco se produjo una memoria técnica. Como resultado, algunos límites de la Reserva parecían estar superpuestos a aquellos que resultarían de la construcción de infraestructura y a la manera en que se interpretarían el acuerdo o el plano de localización. Paradójicamente, el acuerdo daba valor legal a estos límites ambiguos y hacía obligatoria su observancia. En ese momento, esto no representaba un problema relevante debido a que no había conflictos de propiedad con terceros; la Universidad podía crear una zonificación dentro de sus terrenos, utilizar las partes resultantes para la construcción de alguna de sus dependencias o atribuirles usos específicos, con base en criterios bien razonados y acordados por sus integrantes. Es decir que la Reserva, más que un predio perfectamente definido, era una decisión de manejo que expresaba la voluntad de proteger al ecosistema. Pero los efectos de la imprecisión en su delimitación, que fueron acarreados en modificaciones sucesivas, se manifestarían más adelante. Desde su creación, la Reserva se ha incrementado y reestructurado en cuatro ocasiones mediante sendos acuerdos, que buscaron conciliar el objetivo de conservación ecológica con las necesidades de crecimiento de la Universidad, a través de la incorporación de nuevas áreas, la creación de zonas de amortiguamiento y la redistribución del área núcleo.

Segundo acuerdo

En 1990 se incrementó la extensión total de la Reserva Ecológica a 146.8 hectáreas (Sarukhán, 1990). Se definieron por primera vez dos zonas núcleo que ocupaban 115 hectáreas y zonas de amortiguamiento que sumaban 31.8 hectáreas y que se consideraban como parte de la Reserva. La zona poniente fue reestructurada para incorporar una parte en su extremo norte, así como una extensa zona de matorral razonablemente bien conservado en su porción central, que había sido excluida en 1983. Al mismo tiempo, se convirtieron en Zona de Amortiguamiento dos polígonos: el primero era una franja estrecha en su extremo oriental, y el segundo comprendía la superficie ocupada por el Jardín Botánico y el Vivero Alto, las instalaciones del Centro de Ecología, de los Instituto de Biología e Ingeniería y de la Dirección General de Obras y Conservación (figura 3). Estos dos polígonos quedaron, por consiguiente excluidos de la Zona Núcleo Poniente. La zona oriente definida en 1983 no cambió sus límites, pero el Espacio Escultórico, ubicado en su interior, también se convirtió en zona de amortiguamiento.

En este acuerdo se menciona por primera vez un Comité Ejecutivo de la Reserva, dependiente de la Coordinación de la Investigación Científica y se le atribuye “la regulación de los usos y las actividades por desarrollar en las zonas núcleo”. Sin embargo, no se declara su creación de modo explícito, y no se especifica su estructura, ni los criterios para elegir a sus integrantes. Es de suponerse que la intención fue que se formara con base en el Comité Asesor creado en 1983. Por otra parte, el acuerdo menciona un levantamiento topográfico anexo, pero no ha sido posible determinar si fue elaborado específicamente para definir los límites de la REPSA, dónde se encuentra o que entidad es la encargada de custodiarlo.

Acuerdos de 1996-97

En marzo de 1996 se elaboró otro acuerdo (Sarukhán, 1996), con el fin de desincorporar una superficie de 2.9 hectáreas de la Zona Núcleo Oriente para la construcción de edificios, y reponerla mediante un aumento equivalente en otro de sus linderos, así como la incorporación de una parte nueva al área núcleo poniente. También se creó una nueva *zona de recuperación ecológica*, conocida como la “porción sur-oriental”, “La Canteras” ó “Can-



Figura 3. En el acuerdo de 1990 se expandió la Reserva de 124.5 a 146.9 hectáreas y por primera vez se empleó la designación de Zona Nucleo (Zonas Núcleo Poniente y Oriente en amarillo y azul, respectivamente), y de Zona de Amortiguamiento (formada por tres polígonos rojo, naranja y violeta). Se incorporó una superficie de matorral bien conservado al centro de la Zona Núcleo Poniente. (Plano: Dirección General de Obras y Conservación, UNAM).

tera Oriente”, separada del terreno principal de CU por la Avenida Delfín Madrigal. Esta zona se ubica en un gran hueco en el terreno, formado por la extracción de la roca basáltica que se empleó como material de construcción y se le asignó una zonificación de manejo bastante compleja. Sus partes fueron: la zona núcleo “3”; las Zonas de Amortiguamiento “D” (para evitar invasiones desde el Pedregal de Santo Domingo); “E” (colindante con Av. Delfín Madrigal, para introducción de especies nativas y ornamentales); “F” (instalaciones del Club de Fútbol Pumas) y “G” (tanques de agua potable de la DGCOH-DDF). Como resultado neto, la Reserva se incrementó

a 172 hectáreas y se mantuvo la designación de zonas núcleo y zonas de amortiguamiento (figura 4). En este acuerdo, se menciona nuevamente a la Coordinación de la Investigación Científica como la responsable de regularizar los usos y las actividades en la Zona Núcleo, y se hace mención de una reglamentación que debía ser expedida por el Comité Ejecutivo y por la Comisión para la Conservación y el Mantenimiento del Patrimonio Inmobiliario de la Ciudad Universitaria.

El 13 de enero del año siguiente se publicó un nuevo acuerdo (Sarukhán, 1997), que simplificó la estructura,

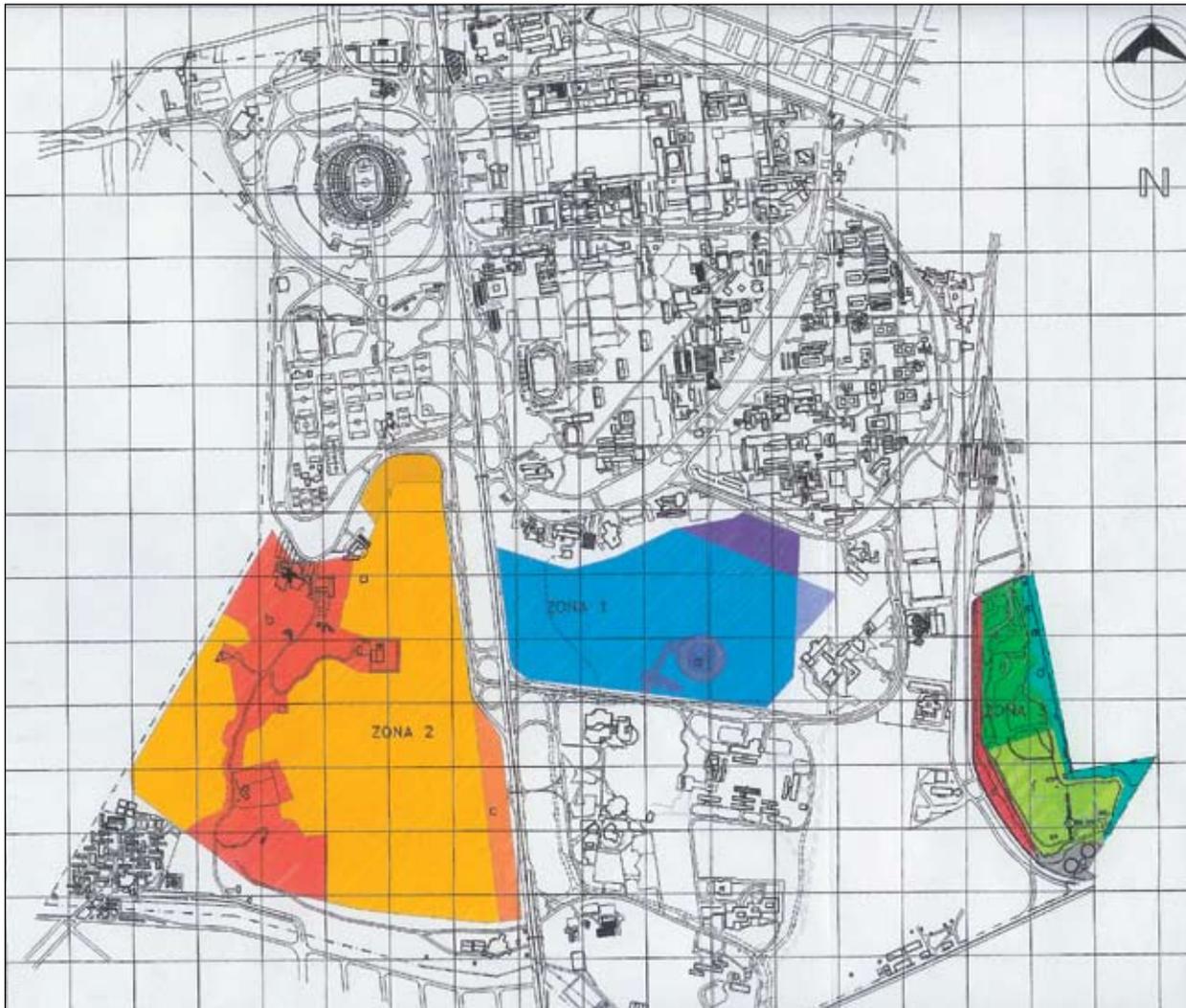


Figura 4. Re-zonificación efectuada a través del acuerdo de marzo de 1996 donde se incluye una tercera zona núcleo a la Reserva ("Sur-Oriente" mostrada como Zona 3, en verde) Se restó superficie al norte de la Zona Núcleo Oriente ó "Zona 1" (color morado), y se compensó mediante incrementos en su extremo oriental (violeta claro) y al norte de la Zona Núcleo Poniente ó "Zona 1" (polígono mostaza). Colindando con la Zona Núcleo 3, en "La Cantera" se definieron las Zonas de Amortiguamiento "D" (azul turquesa), "E" (rojo oscuro), "F" (verde claro) y "G" (gris). La superficie total de la Reserva se incrementó a 172 hectáreas. (Plano: Dirección General de Obras y Conservación, UNAM).

al integrar la mayoría de las zonas de amortiguamiento y casi la totalidad de las zonas núcleo, bajo una sola categoría denominada "Reserva Ecológica", con un régimen de protección estricta equivalente al de las zonas núcleo previas (figura 5). También creó la Zona Núcleo Sur, ubicada al sur del Circuito Mario de la Cueva y colindante con el museo Universum, con lo que la Reserva quedó formada por cuatro porciones. Cabe destacar que se excluyeron las instalaciones del Instituto de Biología y también el terreno anexado en marzo de 1996 al norte de la Zona Núcleo Poniente,

en el cual se construyó posteriormente el Instituto de Investigaciones Biomédicas. También se añadieron a la Zona Núcleo Oriente dos fragmentos: uno al norte, con el que se reintegró el terreno que fue desincorporado en marzo de 1996 y otro al sur, junto a la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales. En este acuerdo se introdujo la figura de las Áreas Verdes de Manejo Especial (AVME), que no eran parte de la Reserva, pero que fungían como zonas de amortiguamiento. Éstas se establecieron en zonas de matorral, en varios camellones y en algunos de los bordes del área protegida, designados como



Figura 5. Plano de la Reserva que acompaña al acuerdo publicado el 13 de enero de 1997, tomado de la Gaceta UNAM. En este acuerdo, se consolidó toda la Reserva anterior en las Zonas Núcleo (naranja), se incorporaron partes a las Zonas Núcleo Oriente y Poniente (verde) y se creó la Zona Núcleo Sur (violeta). Se excluyeron las zonas de amortiguamiento de "La Cantera" y se crearon las Áreas Verdes de Manejo Especial (azul). La superficie total se incrementó a 212 hectáreas. (Sarukhán, 1997). Los números en recuadros y las máscaras de color fueron sobrepuestos por los autores, para facilitar la interpretación.

"futuras vialidades" en los planes de desarrollo. Con este acuerdo, además se creó el Comité Técnico de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (CT-REPSA), que se responsabilizó de su protección y manejo. La extensión del área de protección estricta aumentó a 177 hectáreas, que junto con la superficie ocupada por las AVME (35.6 ha), sumaba 212 ha. Este acuerdo también lleva como anexo un plano de localización en el que se indican los nuevos límites, pero que también adolece de varias deficiencias.

Todos estos acuerdos manejan diferentes denominaciones para la Reserva y sus zonas, pero los propósitos que se les asignan se han mantenido consistentemente. En todos ellos, la descripción de los límites se hace con los mismos criterios que en el de 1983 y se acompañan de planos de localización ó croquis similares.

La delimitación de 2005

En 2005, la construcción de vialidades e instalaciones en sitios colindantes con la REPSA despertó en miembros del Comité Técnico y en buena parte de la comunidad universitaria, la inquietud de que las obras estuviesen invadiendo el área protegida, que su desarrollo tuviera efectos colaterales en ella y que afectara a la fauna que transita por el campus. Si bien es cierto que las dependencias encargadas del desarrollo de infraestructura, habían considerado en sus proyectos los límites de la Reserva desde que ésta fue creada, la falta de una definición precisa, tanto en los planos como en el terreno, hacía posible la existencia de errores y dio lugar a discusiones de difícil solución. En este caso, los dos sitios que generaban mayor preocupación se encontraban justamente en la colindancia con “futuras vialidades” y el conflicto se materializó cuando una de éstas fue construida. Para evaluar la existencia de afectaciones, fue necesario en primer término realizar una interpretación detallada de los límites de la REPSA, que puso de manifiesto las deficiencias mencionadas anteriormente. Por otra parte, no existían marcas o indicaciones de los límites sobre el terreno, lo que propiciaba las invasiones, el tránsito incontrolado de personas, vehículos y fauna feral, la disposición de residuos, el saqueo de especies y la comisión de ilícitos. Esta investigación sobre los linderos, desencadenó la identificación de residuos peligrosos provenientes de laboratorios, llantas, partes de vehículos, papel, troncos de árboles, mobiliario, computadoras de deshecho y contenedores de líquidos industriales. En otras zonas, se encontró que se lavaban revolvedoras, se descargaban grandes cantidades del cemento sobrante o se tiraba cascajo. En otras más, personas ingresaban sin control para transitar, ingerir bebidas o cometer ilícitos, como el abandono de autos robados. Estos problemas, que ya habían sido planteados por miembros de la comunidad, fueron evidentes durante la realización de los trabajos de campo y el análisis de imágenes aéreas.

El proceso dio como resultado la decisión de reestructurar una vez más la REPSA para aumentar su cobertura y eficacia, así como la de incorporar en el nuevo acuerdo una delimitación precisa tanto en los mapas como en el terreno, empleando las herramientas tecnológicas más avanzadas a nuestro alcance (De la Fuente, 2005). Con este acuerdo se dotó de mayor capacidad operativa al

Comité Técnico de la REPSA mediante la creación de la Secretaría Ejecutiva y la asignación de un presupuesto operativo básico.

Identificación de afectaciones

Antes de pasar a la descripción de los métodos empleados en la reestructuración de la REPSA, conviene revisar el proceso que puso de manifiesto los conflictos y las deficiencias técnicas, porque ejemplifica algunos de los problemas que ocurren durante la creación y mantenimiento de las áreas naturales protegidas. También conviene contar con una memoria de ellos, para no cometer errores similares en el futuro. En primer término, para determinar la existencia de afectaciones, se requería de una evaluación que, en principio, era trivial. Bastaba con utilizar un sistema de información geográfica para sobreponer los límites de la REPSA, expresados como polígonos, a una imagen reciente que mostrara las obras en desarrollo, para determinar si existían invasiones y en su caso, medirlas.

Como la descripción en el texto del acuerdo más cercano en el tiempo a estos acontecimientos (Sarukhán, 1997), no era suficiente para determinar la posición de algunos de los límites de interés, se tomarían como referencia los mostrados en el plano de localización anexo a dicho acuerdo. Sin embargo, se presentaron varios obstáculos. El primero fue que el archivo digital del plano ya no existía, y tampoco fue posible conseguir alguna de las impresiones en formato grande hechas a partir de ese archivo, susceptible de ser digitalizada y georreferenciada. Por otra parte, se encontró que la indicación de los límites sobre el plano de localización se hizo de buena fe, pero utilizando un procedimiento inadecuado. Éstos se trazaron directamente sobre la ampliación de una aerofotografía que no había sido ortorectificada ni georreferenciada con métodos fotogramétricos, es decir, que aún no se habían eliminado las deformaciones (principalmente radiales) introducidas por el lente y la desviación del eje óptico de la cámara. Tampoco se tomaron en cuenta los desplazamientos ni las diferencias de escala producidas por el relieve. Todas estas variables deben cuantificarse y hacer las correcciones correspondientes para poder hacer mediciones con una precisión determinada, sobre una imagen. Estos fenómenos alteran la posición y las dimensiones de los objetos representados en la

fotografía, y los errores resultantes estarán presentes en un mapa trazado directamente sobre ella. Por otra parte, las fotografías aéreas pueden ser amplificadas para incrementar su escala hasta cinco veces, pero para que conserven sus características métricas, esto debe hacerse a partir del negativo original y con instrumentos ópticos especializados ó con barredores fotogramétricos; cualquier otro procedimiento de amplificación introducirá deformaciones adicionales e incrementará el error. La magnitud del error depende de la escala; a escalas menores, el error medido en metros es mayor y lo mismo ocurre con los mapas. Pero la precisión de un mapa no puede ser mayor que la de las fotografías que se utilizaron para producirlo, aunque éste se imprima a una escala mayor.

En nuestro caso, los únicos ejemplares del plano que fue posible obtener, eran fotocopias en tamaño carta del acuerdo que presentaban deformaciones evidentes, o copias de escala aún más pequeña mostradas en algunos trabajos científicos. Es decir, que a la incertidumbre sobre la escala original, se sumaron una reducción en la escala del plano y los artificios del fotocopiado, aumentando de modo incontrolado el error. Por estas razones, el documento gráfico del acuerdo no puede considerarse como un plano ó un mapa, sino como un croquis cuya utilidad es ilustrativa, pero no de referencia precisa. En las copias disponibles, el espesor de los trazos equivalía a 8 metros en el terreno, mientras la discusión giraba en torno de afectaciones estimadas de modo preliminar entre 2 y 30 metros. Para dilucidar la ubicación de los límites se consultaron planos topográficos empleados en la construcción de obras, algunos de los cuales parecen haber sido utilizados en 1996 como auxiliares para la elaboración del acuerdo. También se encontraron inconsistencias en estos planos, tanto en la ubicación de rasgos e instalaciones, como en el cierre de los polígonos, siguiendo los ángulos y distancias mostrados en ellos. Fue necesario hacer una aproximación de los límites a partir del análisis del texto, sobreponer el croquis y los planos disponibles a ortofotografías escala 1:4,500, así como realizar consultas constantes con el Comité Técnico de la REPSA. A partir de esta interpretación se definieron dos escenarios que correspondían a las afectaciones máxima y mínima respectivamente. Si bien las afectaciones detectadas en el peor caso eran de escasa magnitud (0.8 hectáreas) en relación con el tamaño de la Reserva, se concluyó que existían y que podrían haber

sido de mayor importancia, sin la reacción oportuna de la comunidad y de las autoridades universitarias. El proceso hizo evidente que la imprecisión en la delimitación de la Reserva constituía una fuente potencialmente seria de conflictos y de daños al ecosistema. Por otra parte, la instalación de bardas y controles era imposible si no se conocía el sitio preciso en el que debían colocarse.

Generación de ortomosaicos

Se construyeron dos mosaicos ortocorregidos a partir de fotografías aéreas digitales visibles e infrarrojas, con varios propósitos. Primero se utilizaron para identificar las obras y su extensión, y después para identificar alternativas de reestructuración a través del diagnóstico de la REPSA, para la identificación de áreas bien conservadas susceptibles de incorporación y para proporcionar una referencia espacial y temática confiable para la delimitación. Para elaborar el primer mosaico, se utilizaron imágenes aéreas obtenidas con cámaras digitales de formato pequeño, que de manera circunstancial fueron tomadas para otros proyectos en esa misma época. Estas imágenes tienen una resolución aproximada de 80 cm/píxel sobre el terreno, que permite utilizar con comodidad una escala de trabajo de 1:20,000. Las imágenes se obtuvieron por medio de dos cámaras digitales, una en color visible y otra en el infrarrojo cercano. Para las imágenes visibles se utilizó una cámara Kodak DCS 14n Pro equipada con un lente Nikkor 35mm AF-D f/2.8, con un conteo nominal de 14 millones de píxeles y que produce archivos de 4,536 x 3,024 píxeles. Las imágenes infrarrojas fueron tomadas con una cámara Sony F-707 modificada para registrar el infrarrojo cercano, que produce archivos de 2,560 x 1,920 píxeles. Tras la modificación se instaló un filtro infrarrojo B+W 093 (Schott RG-830), cuya curva espectral, combinada con la del sensor CCD de la cámara, permite registrar las longitudes de onda entre 850 y 1,100nm con una transmisión superior al 50%. El filtro bloquea el intervalo visible ($\tau < 1\% @800\text{nm}$). Las imágenes infrarrojas fueron remuestreadas y registradas con precisión sobre las visibles para producir archivos TIF con cuatro bandas espectrales. Éstas fueron georreferenciadas, ortocorregidas y unidas en un mosaico. Con estas imágenes fue posible realizar una estimación preliminar de afectaciones, pero presentaron algunas limitaciones. En primer término, el levantamiento del que formaban parte aún no estaba terminado y aunque mostraban las

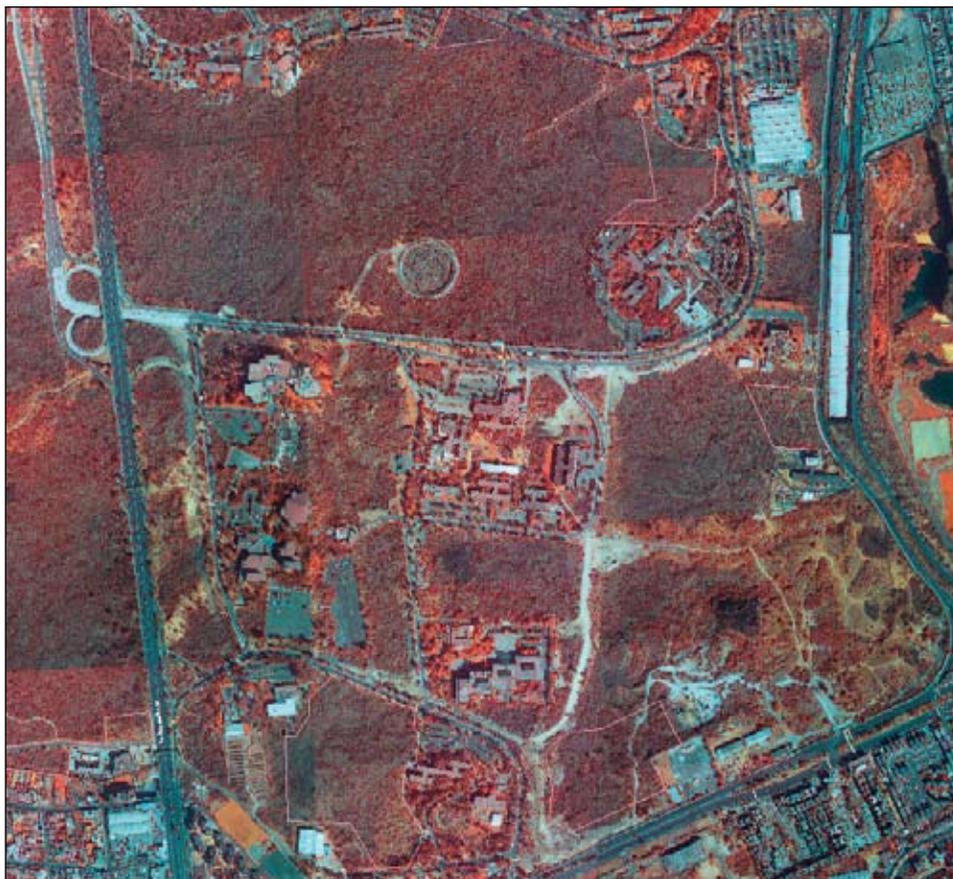


Figura 6. La utilización del mosaico compuesto de imágenes visibles e infrarrojas fue de gran utilidad para detectar aquellas áreas susceptibles de ser incorporadas a la Reserva (señaladas en este caso por polígonos en color rosa).

zonas con los conflictos más importantes, no alcanzaban a cubrir toda el área de CU. Por otra parte, la resolución de 80 cm/píxel no era suficiente para identificar los rasgos más finos y para realizar mediciones menores a 2 metros. Para eliminar estos obstáculos, se realizó de inmediato otro levantamiento aéreo con las mismas cámaras, pero a una altura significativamente menor y cubriendo la totalidad de la superficie de la CU. Las imágenes resultantes tienen las mismas características que las ya mencionadas, pero con una resolución en el terreno de 25 cm/píxel y se procesaron de la misma manera. Éstas permiten la obtención de productos con una escala de 1:2,500 (ASPRS, 2005). Las obras y otras fuentes potenciales de afectación, como los depósitos de materiales y basura, se identificaron mediante la interpretación visual y para ello fue suficiente el uso de las tres bandas que conforman el color visible, en tanto

que la banda infrarroja se reservó para una etapa posterior, en la que se determinó la presencia del matorral en toda la superficie de CU. Los polígonos correspondientes se trazaron sobre el mosaico y se realizaron verificaciones de campo en todos los sitios detectados, para validar la interpretación y también para caracterizar con detalle los materiales presentes y las actividades que se desarrollaban en cada uno. En todo el proceso se utilizó el programa ArcView como plataforma básica para el manejo de información geocodificada y se creó un pequeño SIG, al que se incorporaron las imágenes, los planos y los mapas existentes. En él se generaron también capas con polígonos, rasgos lineales y puntos, así como tablas de atributos y áreas durante las etapas de evaluación y delimitación (figura 6).



Figura 7. Aquellos puntos de la rejilla que resultaron inaccesibles, fueron desplazados hacia lugares claramente identificables desde la fotografía aérea.

Campaña de obtención de puntos de control con GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es una herramienta muy útil para determinar las coordenadas de un punto sobre el terreno. El uso de receptores para trabajo geodésico permite obtener precisiones del orden de unos cuantos milímetros cuando se utiliza en modo diferencial (Prado-Molina y Peralta-Higuera, 2007). Un total de 165 puntos de alta precisión fueron obtenidos usando esta técnica, con una desviación estándar de 15 mm, teniendo como base una rejilla uniformemente distribuida cubriendo el campus universitario y sus alrededores (figura 7). Estos puntos permitieron obtener un modelo digital del terreno y sirvieron también como puntos de control terrestre, para aplicar los procesos fotogramétricos de aerotriangulación y ortorrectificación, que eliminan las distorsiones inherentes a la cámara y el lente, así como aquellas producidas por el relieve del terreno o las introducidas durante la obtención de las imágenes (movimientos incontrolados de la aeronave). Con ello, los ortomosaicos resultantes adquieren características geométricas equivalentes a las de un mapa.

Los equipos utilizados para este proyecto fueron los siguientes: Receptores Trimble™ 4000Ssi de dos bandas (L1, L2) con antena microcentrada, utilizando el método estático rápido con órbitas precisas y dos estaciones de referencia: UIGF (Instituto de Geofísica, UNAM) y UPEC

(Centro Histórico). También se emplearon receptores TOPCON™ HiperL1 de una sola banda (L1) y una estación de referencia BIGG (Instituto de Geografía, UNAM), que sirvieron principalmente para verificar sobre el terreno la posición de algunos de los puntos en conflicto y la posición de los postes que señalan algunos de los vértices de la Reserva. Las coordenadas de esta estación fueron obtenidas mediante triangulación de puntos conocidos y la desviación estándar obtenida con estos equipos fue de 0.5 cm, utilizando el modo estático rápido (Prado-Molina y Peralta-Higuera, 2005a).

Además del mapa definitivo de la Reserva (figura 8) se generó un *anexo técnico* donde se hace una descripción detallada, de las áreas, los límites y colindancias de todas las zonas pertenecientes a la Reserva (Prado-Molina y Peralta-Higuera, 2005b). Los vértices de la Reserva fueron verificados exhaustivamente para evitar inconsistencias en las dimensiones y en su localización geográfica.

También se emprendieron otras acciones importantes para la protección de la zona, como la colocación de postes en todos aquellos vértices de los polígonos en los que no existían otras referencias físicas (figura 9), con la finalidad de evitar confusiones en el futuro y hacer evidentes las invasiones, para poder detenerlas inmediatamente. Las coordenadas de cada poste fueron verificadas con GPS después de su colocación.

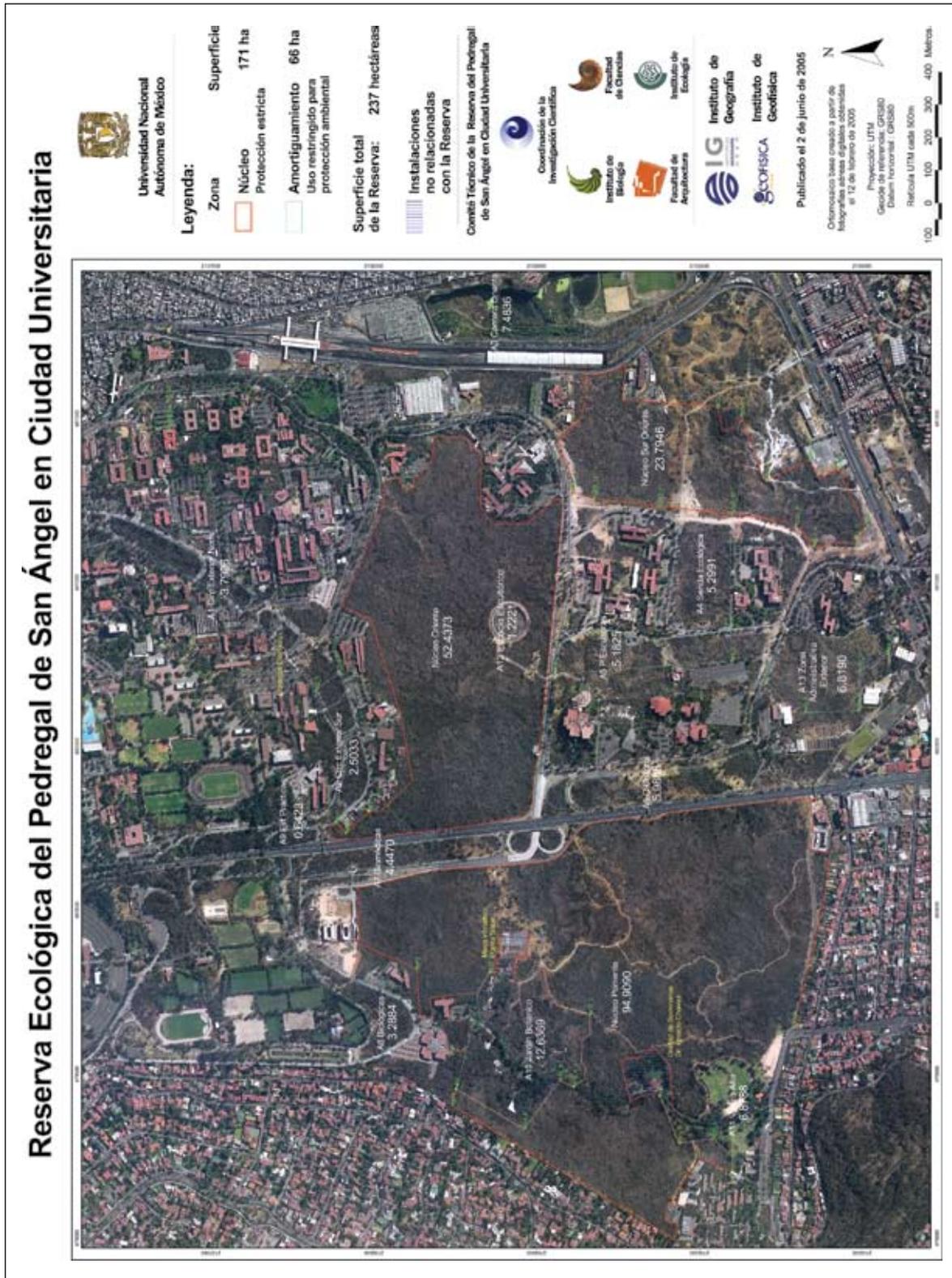


Figura 8. Ortofotomapa con los polígonos de la delimitación de la REPSA sobrepuestos, publicado en Gaceta UNAM el 2 de Junio de 2005. Mediante este acuerdo la Reserva tuvo un incremento de 24 ha, por lo que ahora la zona núcleo es de 171 ha y la de amortiguamiento de 66 ha, contando con una superficie total de 237 ha (Peralta *et al.*, 2005).

Figura 9. La colocación de postes donde no hay una buena referencia física, permite determinar de manera inequívoca la posición de los vértices de la REPSA.



El papel de la geomática en el proceso

Para la reestructuración de la Reserva descrita en este trabajo, la discusión sobre qué áreas debían ser protegidas y cuáles podrían ser usadas para cubrir las necesidades de espacio de la Universidad, se dio en el seno del Comité Técnico de la REPSA, que incluye a especialistas, autoridades y representantes de sectores académicos comprometidos con la conservación. Además del análisis de las imágenes, se realizaron verificaciones de campo y se tomaron en consideración los resultados de muestreos de flora y fauna, que mostraron la importancia de zonas que no se habían considerado previamente, en las que se encontraron ejemplares de especies endémicas o en peligro. Si bien este ejercicio refleja lo que ocurre durante la creación de áreas protegidas a nivel estatal o federal, la divergencia entre los distintos puntos de vista es mucho menos marcada dentro de la Universidad, donde las discusiones son facilitadas por un ambiente de argumentación científica y de búsqueda de soluciones. En la mayoría de los casos a nivel nacional las negociaciones son difíciles, ya que en ellas participan sectores que frecuentemente tienen intereses contrapuestos, como organizaciones ambientalistas, investigadores, productores forestales y agropecuarios, inversionistas turísticos o industriales. El resultado esperado es un equilibrio inteligente entre los objetivos de estos grupos, que es la base del desarrollo

sustentable y para lograrlo es preciso recurrir a métodos complejos diseñados para minimizar los conflictos, identificar las concordancias, posibilitar la participación ciudadana y maximizar la protección de los ecosistemas en el balance final. Durante este proceso, lo ideal es que se identifiquen nuevos escenarios y objetivos que en muchas ocasiones no son evidentes a primera vista. La visualización de relaciones espaciales, la determinación de superficies, la evaluación rápida de alternativas sobre la marcha y la estimación de impactos, son elementos que facilitan la discusión y aportan información objetiva, por lo que la disponibilidad de datos geoespaciales y el aprovechamiento de las herramientas de la geomática deben ocurrir desde el inicio.

Los aspectos metodológicos y las tecnologías que se utilizaron en este trabajo, como los sistemas de información geográfica, los sistemas de posicionamiento global, el análisis geoespacial y la percepción remota, son ya indispensables para la definición y manejo de áreas protegidas y la creación de planes de ordenamiento ecológico. Puesto que una parte de la discusión tiene una base científica, que debe integrar el conocimiento acumulado del territorio, de la sociedad, de la economía y de los ecosistemas, resulta indispensable manejar grandes cantidades de información y es ahí donde estos instrumentos tienen una utilidad excepcional. Sin embargo, es muy importante no perder de vista que estas

herramientas no constituyen la parte esencial del proceso y que su aplicación no sustituye a la discusión que se da entre los puntos de vista divergentes de la conservación, el aprovechamiento de los recursos naturales y las necesidades de sectores específicos.

¿Cuáles son los límites del Pedregal?

A pesar de la pérdida de territorio y la degradación de las áreas remanentes, el ecosistema del *Senecionetum* aún alberga una gran diversidad biológica y es muy probable que existan especies de plantas, animales y de otros grupos que aún no han sido reportados, especialmente en las grietas y en los ambientes subterráneos. Pero también es probable que nunca conozcamos muchas especies que habitaron el Pedregal ó que desaparecerán en los próximos años sin que las hayamos identificado. Además del papel que juega como reservorio de especies desplazadas por el desarrollo urbano en el Valle de México, el Pedregal constituye un paisaje claramente identificable formado por elementos naturales y urbanos, que pueden y deben ser manejados de modo integral dando especial importancia a la CU y a las colonias colindantes (ver también Lot y Camarena, en este volumen). En éstas, se ha desencadenado recientemente un proceso de sustitución de las residencias individuales originales -en las que las masas rocosas y la flora fueron incorporadas en los proyectos arquitectónicos y persisten en los jardines- por condominios horizontales cuya lógica es maximizar la superficie construida en el terreno disponible. Esta tendencia amenaza con provocar la desaparición de los últimos relictos que se encuentran en la colonia Jardines del Pedregal y el papel ambiental que aún conservan. Además de su significado biológico, el Pedregal es de gran importancia para la recarga de los acuíferos. El relieve limita los escurrimientos superficiales y favorece

su transporte a capas inferiores del subsuelo a través de las grietas, reduciendo también la evaporación. Aunque la mayor parte de la superficie ha sido sellada por el desarrollo urbano, es necesario enfatizar el papel que juegan en este proceso los remanentes de mayor extensión, como la REPSA, pero también los jardines y afloramientos rocosos que persisten en la zona, que suman una superficie considerable. El Pedregal proporciona otros servicios ambientales a la sociedad, como sus efectos positivos sobre la calidad del aire, la reducción de la contaminación sónica, las cualidades visuales del paisaje, así como la posibilidad de realizar actividades deportivas, recreativas y culturales, que inciden en la calidad de vida de la población circundante. Su conservación es relevante desde el punto de vista científico y aún quedan muchas preguntas por responder en relación con su estructura y funcionamiento; el conocimiento de la evolución de un ecosistema que se desarrolló en condiciones tan peculiares, puede aportar datos importantes para comprender mejor la adaptación de poblaciones, el reclutamiento de especies, su diferenciación y los fenómenos de sucesión. Es claro que el paisaje único del Pedregal debe ser protegido de la desaparición, por su riqueza biológica e importancia científica, por su valor estético, por la maravilla natural que han creado los derrames de lava y por los servicios ambientales que presta a la sociedad.

Dada la imposibilidad práctica de establecer políticas de manejo en áreas cuya propiedad es en parte pública y en parte privada, y sobre las cuales no existe un acuerdo social, la creación de una conciencia sobre la importancia del Pedregal y de sus límites reales es primordial, más aún que las barreras físicas para proteger lo que queda de él. Los límites legales y físicos, por otra parte, carecen completamente de significado si las autoridades y la comunidad no los conocen y respetan escrupulosamente.

Literatura citada

- ÁLVAREZ SFJ, CARABIAS-LILLO J, MEAVE DEL CASTILLO J, MORENO-CASASOLA P, NAVA-FERNÁNDEZ D, RODRÍGUEZ-ZAHAR F, TOVAR-GONZÁLEZ C Y VALIENTE-BANUET A, 1982. Proyecto para la Creación de una Reserva en el Pedregal de San Ángel. Serie Cuadernos de Ecología, No. 1. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México.
- ASPRS planimetric feature coordinate accuracy requirement for well-defined points. <http://www.usace.army.mil/usace-docs/eng-manuals/em1110-1-1000/c-2.pdf> (sep. 2005).
- CASTILLO-ARGÜERO S, MONTES G, ROMERO MA, MARTÍNEZ 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 (D.F., México), Boletín de la Sociedad Botánica de México, 74: 51-75.
- CANO-SANTANA, Z. Y J. MEAVE 1996. Sucesión primaria en derrames volcánicos: El caso del Xitle. *Ciencias*, **41**: 58-68.
- DE LA FUENTE J. R. 2005. Acuerdo por el que se rezonifica, delimita e incrementa la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria. Publicado en Gaceta UNAM (No. 3813) el 2 de Junio de 2005. pp 14-15 y 19-21.
- PERALTA-HIGUERA A., PRADO-MOLINA J., CABRALCANO E. Y DÍAZ-MOLINA O. 2005. Mapa de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Escala 1:2,500. México, DF: Instituto de Geografía e Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.
- PRADO-MOLINA J, PERALTA-HIGUERA A. 2005a. Diagnosis and Delimitation of a Natural Protected Area Using High-Resolution Multispectral Images. 20th Biennial Workshop on Color Photography, Videography and High Resolution Digital Imagery for Resource Assessment. Weslaco, Texas, EU. CD. ISBN-1-57083-079-7. Trabajo No. 65. pp 1-8.
- PRADO-MOLINA J. Y PERALTA-HIGUERA A. 2005b. Anexo Técnico perteneciente a el Acuerdo publicado en Gaceta UNAM el 2 de Junio de 2005, mediante el cual se re-zonifica, delimita e incrementa la REPSA. Instituto de Geografía, UNAM. 19 pp.
- PRADO-MOLINA J. Y PERALTA-HIGUERA A. 2007. Apuntes del III Diplomado en Geomática. Instituto de Geografía, UNAM. pp. 1-23.
- RZEDOWSKI J. 1954. Vegetación del Pedregal de San Ángel. *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas* **8**: 59-129.
- RIVERO-SERRANO O. 1983. Acuerdo mediante el cual se establece la Reserva Ecológica de Ciudad Universitaria. Publicado en Gaceta UNAM (Vol. I no. 59), el 3 de Octubre de 1983. pp1, 16-17.
- SARUKHÁN, J. 1990. Acuerdo por el que se redefine la Reserva Ecológica de Ciudad Universitaria. Publicado en Gaceta UNAM (No. 2494), el 20 de Agosto de 1990. pp1-2.
- SARUKHÁN, J. 1996. Acuerdo por el que se reordena e incrementa la zona de la Reserva Ecológica de la Ciudad Universitaria. Publicado en Gaceta UNAM el 14 de Marzo de 1996. pp 9-11.
- SARUKHÁN, J. 1997. Acuerdo por el que se reestructura e incrementa la zona de la Reserva Ecológica y se declaran las Áreas Verdes de Manejo Especial de la Ciudad Universitaria. Publicado en Gaceta UNAM el 13 de Enero de 1997. pp 15-17.
- SIEBE C, 2000. Age and archaeological implications of Xitle volcano, southwestern Basin of Mexico-City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **104**(1-4): 45-64.