

LA CONSERVACIÓN Y VULNERABILIDAD A LA URBANIZACIÓN DEL KARSO¹ PUERTORRIQUEÑO

Ariel E. Lugo y Eileen H. Helmer

Instituto Internacional de Dasonomía Tropical

Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América

1201 Calle Ceiba, Jardín Botánico Sur, Río Piedras, Puerto Rico 00926-1119

y

Abel Vale

Ciudadanos del Karso

497 Avenida E. Pol, Box 230

San Juan, Puerto Rico 00926-5636

RESUMEN

El karso cubre el 27 por ciento de la superficie de Puerto Rico y contiene recursos naturales de enorme valor para la Isla y la sustentabilidad de su calidad de vida. En este ensayo, enumeramos las características y valores del karso puertorriqueño, revisamos las leyes, reglamentos y mecanismos disponibles para la conservación de este recurso natural y analizamos la vulnerabilidad del karso a desarrollos urbanos incompatibles con su conservación. Encontramos que Puerto Rico cuenta con excelentes leyes y políticas públicas para proteger sus recursos naturales--inclusive el karso-- pero aparenta carecer de voluntad gubernamental para hacer valer esas leyes y reglamentos. La tasa de urbanización en el karso aparenta estar en aumento. De hecho, 8.4 por ciento adicional del karso es vulnerable a urbanizarse en los próximos años. Concluimos que para asegurar la conservación del karso a perpetuidad, es necesario aumentar la proporción de estos terrenos en el dominio público a la vez que se fiscaliza con más efectividad la actividad gubernamental relacionada a la implantación de la política pública ambiental del país.

ABSTRACT

The Puerto Rican karst region covers 27 percent of the surface of the Island and contains valuable natural resources that are needed to sustain the island's life quality. We discuss the characteristics and values of the Puerto Rican karst, review the laws, regulations, and mechanisms available to conserve this region, and analyze its vulnerability to urbanization and incompatible uses. We found that Puerto Rico has an adequate body of laws and regulations, and mechanisms to protect its natural resources, including the karst. However, the island government appears to lack the will to implement them. The rate of urbanization in the karst appears to be increasing, and 8.4 percent is vulnerable to additional development in the short-term. We conclude that to assure the perpetual conservation of the Puerto Rican karst region, more land needs to be incorporated into the

¹En América Latina se usa indistintamente karso o carso. Utilizamos karso y caliza en forma intercambiable.

public domain and at the same time oversight over the government's environmental actions needs to increase and improve in its effectiveness.

INTRODUCCIÓN

El karso cubre el 27.5 por ciento de la superficie de Puerto Rico (Tabla 1) y se extiende por casi toda la Isla con la excepción del sector sureste y las altas elevaciones de la Cordillera Central (Fig. 1a, b). A pesar de su amplia distribución geográfica, el karso comúnmente se asocia más a la caliza del norte y más específicamente a la franja kárstica, que es una masa continua de roca caliza expuesta a los elementos climáticos entre el norte de Bayamón y Rincón (Fig. 1b). En esta porción del karso, el drenaje es mayormente subterráneo (Fig. 1c). En el llano costero entre Luquillo y Arecibo, la roca caliza está mayormente cubierta por una gruesa capa de sedimento, producto de la erosión en las montañas volcánicas del país. Esta zona de valles aluviales recibe atención por los procesos hidrológicos en la superficie y generalmente se ignoran los procesos subterráneos en las rocas calizas subyacentes.

La zona caliza del sur ocurre en un clima seco, lo que retarda los procesos hidrogeológicos y el desarrollo de formaciones kársticas. La región se distingue más por sus atractivos bosques secos, en particular el bosque de Guánica designado como una reserva biosférica de las Naciones Unidas. En las zonas de caliza dispersas por el resto de la Isla, la masa kárstica es pequeña y por lo tanto su importancia e influencia se enmascara por el entorno volcánico en la cual se encuentra. Además, estas regiones han recibido poca atención científica y su riqueza natural no se ha documentado sistemáticamente.

Los datos en la Tabla 1 indican que la cobertura de bosques en el karso es alta (49 por ciento en la franja kárstica). Los suelos en esta región generalmente no son aptos para la agricultura. Irónicamente, en los valle aluviales del karso se encuentran los mejores suelos agrícolas de Puerto Rico (Lugo *et al.* 2001).

Independientemente de su ubicación o extensión geográfica, todas las zonas kársticas de Puerto Rico tienen características y valores que contribuyen a la diversidad y funcionamiento del paisaje puertorriqueño. Las características y los valores del karso son generalmente desconocidos por el público y por eso las funciones geológicas, geomorfológicas, hidrológicas y ecológicas del karso no se valorizan. Esta situación convierte al karso puertorriqueño en una región vulnerable a usos incompatibles con su naturaleza.

En este ensayo, discutimos tres aspectos de la conservación del karso. Primero, tomamos como base el análisis de Lugo *et al.* (2001) y resumimos brevemente las características y los valores del karso. Luego, examinamos el grado de protección con que cuenta este sistema usando como guía las leyes, reglamentos y designaciones de reservas públicas en la región. Finalmente, discutimos la vulnerabilidad del karso norteño ante desarrollos urbanos. El desarrollo urbano en cualquier zona kárstica transforma fundamentalmente la región a estados que eventualmente no son sostenibles y causan problemas a largo plazo para la economía (Lugo *et al.* 2001).

Características y Valores del Karso

Para entender las características del karso, es necesario tomar en cuenta aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y ecológicos. Estos cuatro aspectos en conjunto definen lo que es el karso. Geológicamente, el karso de Puerto Rico es roca caliza producto del metabolismo de arrecifes de coral que existieron en la costa de la Isla hace millones de años. Cambios en el nivel del mar y movimientos tectónicos son responsables por el levantamiento del armazón de estos arrecifes de coral y la formación de la masa terrestre que hoy conocemos como el karso. Las rocas calizas más antiguas de Puerto Rico se remontan a sobre 30 millones de años (Tabla 2). Desde entonces, se depositaron en la Isla distintas clases de formaciones calizas de variadas edades, espesores y características físicas y químicas

TABLA 1. Algunos datos sobre la cobertura de distintos usos de terreno en el karso de Puerto Rico. Los datos son de Lugo *et al.* (2001).

Unidad (ha)	Franja kárstica	Caliza del norte	Caliza del sur	Caliza dispersa	Total
Área total	142,544	218,692	21,022	4,571	244,285
Suelos agrícolas	39,830	65,411	1,837	390	67,638
Suelos no aptos para la agricultura	102,714	153,281	19,185	4,181	176,647
Cobertura urbana (1977-1978)	14,556	36,085	1,362	402	37,849
Cobertura urbana (1994)	19,272	43,881	2,176	509	46,566
Cobertura de bosque (1977-1978)	69,553	77,320	16,300	1,826	95,446

(Tabla 2). Al ser expuestas al clima y atmósfera tropical (particularmente el viento, la lluvia, el CO₂ y las altas temperaturas) estas formaciones rocosas fueron transformadas a distintas estructuras geomorfológicas que hoy se reconocen como mogotes, sumideros, cuevas, acantilados y otras listadas en la Tabla 3. Cada formación caliza está asociada a distintos rasgos geomorfológicos, razón por la cual el karso puertorriqueño exhibe una alta diversidad de estructuras en un área geográfica relativamente pequeña. El karso puertorriqueño es altamente diverso en su expresión geomorfológica. Cada una de estas estructuras geomorfológicas tiene su propio historial y característica y sostiene distintos sistemas ecológicos e hidrológicos. Ríos subterráneos, acuíferos, humedales y manantiales son ejemplos de los sistemas hidrológicos del karso. Bosques, ciénagas, pantanos, estuarios y lagunas son ejemplos de los sistemas ecológicos de la región kárstica. Todos estos sistemas están descritos en detalle en Lugo *et al.* (2001).

En conjunto, los sistemas geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y ecológicos de la

región del karso albergan una riqueza extraordinaria de especies de plantas y animales (Tabla 4) muchas de las cuales son endémicas a la región o a Puerto Rico y otras que se consideran en peligro de extinción (Lugo *et al.* 2001). El karso se caracteriza por un extenso caudal de valores que contribuye directamente a la calidad de vida y economía de Puerto Rico. La Tabla 5 contiene una lista de 24 recursos ambientales de la caliza del norte de Puerto Rico. Es difícil identificar uno u otro como el más importante o más valioso. Cada uno amerita reflexión y motivación para conservarlo pues la sustentabilidad de la calidad de vida en Puerto Rico depende de estos recursos naturales.

El Marco de Protección Legal del Karso

La protección de los recursos naturales en Puerto Rico depende de tres factores principales:

- Quién es el dueño.
- Qué leyes o reglamentos aplican.
- Cuán celosa es la sociedad y las agencias del gobierno hacia la conservación de lugares o recursos particulares.

FIGURA 1. Mapas de Puerto Rico ilustrando distintos aspectos del karso (Lugo *et al.* 2001). A. Las principales divisiones fisiográficas (Monroe 1976). La franja kárstica es la zona donde abundan las formaciones kársticas. En la planicie discontinua de la costa norte, la caliza es subyace. B. La región caliza de Puerto Rico según Monroe (1976). La zona caliza del norte incluye la franja kárstica. C. Los ríos, riachuelos y canales de Puerto Rico (base de datos del Servicio Geológico de EE.UU.). La zona donde no existe una red visible de ríos y riachuelos en la costa del noroeste corresponde al sector de la franja kárstica con patrón de desagüe subterráneo. Algunos de los canales en el noroeste no son naturales, sino que pertenecen al Distrito de Riego de Isabela.

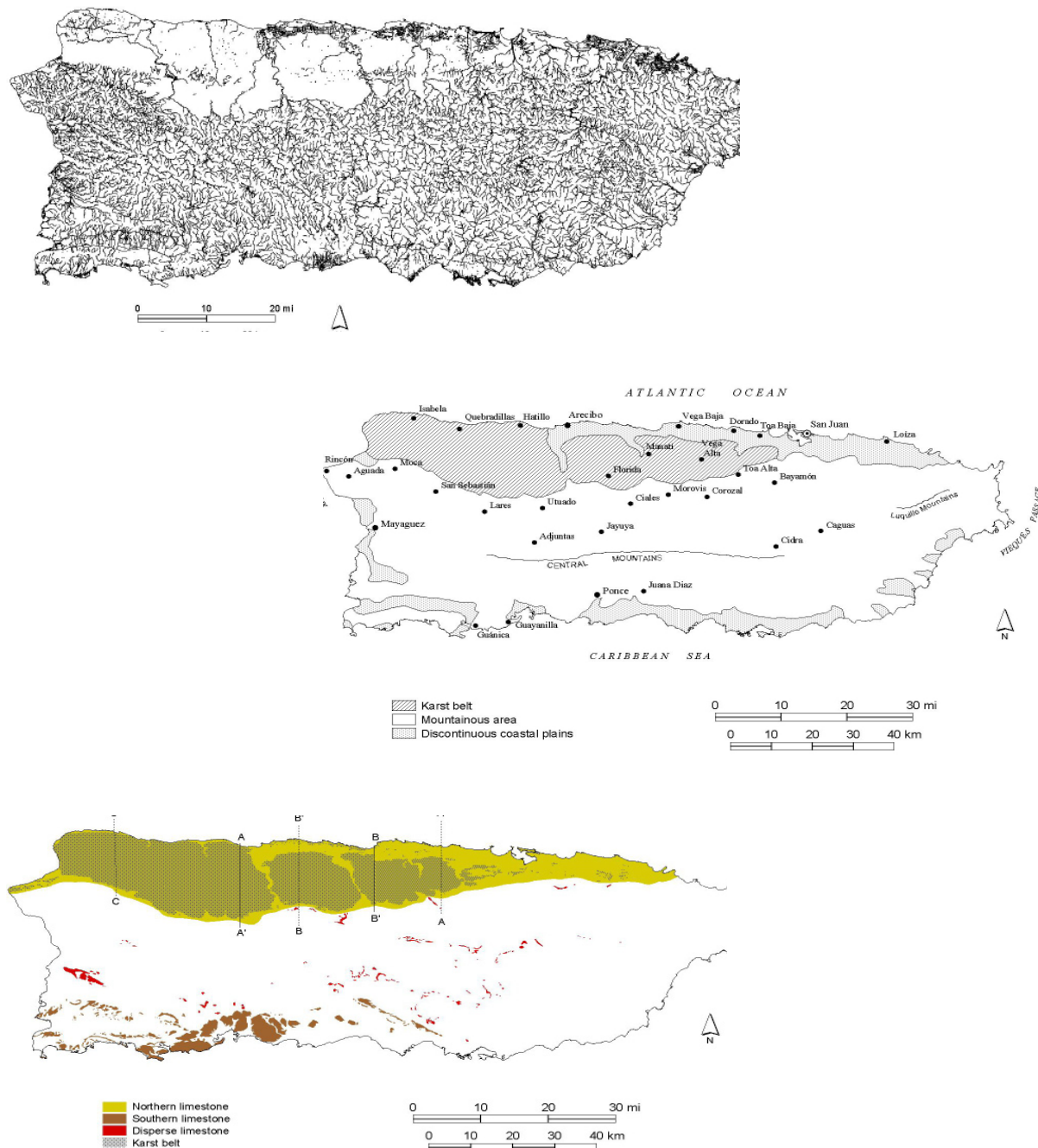


TABLA 2. Estrados del Terciario Medio en la zona norte de Puerto Rico (Monroe 1976, 1980). El grosor máximo de los estrados se indica entre paréntesis (Giusti 1978). Ma indica millones de años atrás. Traducido del inglés en Lugo *et al.* (2001) por Anne Catesby Jones.

Mioceno—Desde 23.5 a 5.2 Ma

Formación Camuy —arenisca, caliza y creta arenosa y ferruginosa (200 m).

Disconformidad.

Caliza Aymamón —creta muy pura indurada en su superficie para convertirse en caliza; creta un poco ferruginosa en la parte superior, noroeste de Puerto Rico (300 m).

Caliza Aguada —caliza dura estratificada en gradación descendiente hasta creta; arenosa en algunas partes (90 m).

Formación Cibao —(230 m).

Miembro superior; creta y caliza blanda.

Miembro Guajataca; (en la zona oeste únicamente) arcilla calcárea fosilífera y caliza con lentes de arena y grava de grosor de hasta 15 m.

Miembro de Arena Miranda; (en la zona este únicamente) arena y grava, arena y arcilla arenosa.

Miembro de Caliza Montebello; (en la zona central únicamente) calcarenita pura friable, indurada al ser expuesta a caliza resistente a la erosión.

Miembro de Caliza Quebrada Arenas; (en la zona este únicamente) caliza estratificada de cristalización fina.

Oligoceno—Desde 34 a 23.5 Ma

Miembro de la Caliza río Indio; (en la zona este únicamente) caliza compacta, gredosa, de color amarillento-anaranjado y de estratificación débil.

Creta o marga típica; (en las zonas este y oeste) creta arcillosa, arenosa y cenagosa.

Caliza Lares —caliza casi pura, de estratificación débil a gruesa; la parte inferior contiene granos de cuarzo y arena limonita, intercalada al oeste con arena y grava, cartografiada con la Formación San Sebastián (300 m).

Formación San Sebastián —mayormente arena y arcilla, de estratificación débil alguna caliza arenosa, en algunas partes, sobre todo al oeste, arena y grava (300 m).

Disconformidad (angular).

Cretáceo al Eoceno—De 146 a 34 Ma

Roca volcánica, sedimentaria e intrusiva.

El tercer punto lo discutimos en la próxima sección y los primeros dos los discutimos a continuación.

El 7.1 por ciento de la caliza del norte está bajo dominio público (Tabla 6), lo que implica que este terreno recibe la máxima protección posible en Puerto Rico. El resto de la caliza del norte está bajo dominio privado y su conservación depende de la sensibilidad de los dueños y de las leyes y reglamentos que protegen el uso del karso.

En Puerto Rico existe una ley que específicamente protege todo el karso y varias leyes que lo hacen indirectamente al proteger algunos aspectos o sectores del karso. La ley que lo protege específicamente karso es la Ley 292 del 21 de agosto

de 1999, conocida como *Ley para la Protección y Conservación de la Fisiografía Cársica de Puerto Rico*. Esta ley tiene como finalidad en su política pública proteger, conservar y manejar para beneficio de las generaciones presentes y futuras la fisiografía kárstica de Puerto Rico. La Ley 292 tiene una visión abarcadora y es un documento que recoge muy bien la relación entre lo biótico y abiótico, entre la geología y la hidrogeología, aunque tiene unos errores de redacción que deben enmendarse para darle mayor claridad al documento.

Dicha ley entre otras cosas, define las distintas zonas kársticas del archipiélago de Puerto Rico; reconoce su importancia por recargar y tener el mayor acuífero en la Isla del cual depende parte de la población y la industria; reconoce sus

TABLA 3. Patrón general de correspondencia de los rasgos kársticos con las formaciones kársticas del Norte de Puerto Rico (Monroe 1976). La Formación San Sebastián no desarrolla rasgos kársticos. Traducido del inglés en Lugo *et al.* (2001) por Anne Catesby Jones.

Formación caliza	Rasgos geomorfológicos	Formación caliza	Rasgos geomorfológicos
Caliza Lares	Karso de cono de formación particular--conos de cima redonda y en algunas partes irregulares. Conos y crestas dentadas. Cavernas grandes.	Caliza Aguada, cont.	Dolinas de disolución de laderas empinadas formadas por colapso, de hasta 70m de profundidad. Arcos naturales. Pequeñas depresiones que semejan poljes. Torres de laderas empinadas conectadas por crestas filosas cuando están adyacentes a la Caliza Aymamón.
Formación Cibao	Crestas. Escarpa de tipo cuesta. Karso de cono y riscos. Zanjones. Grietas acuíferas. Valles cegados.	Caliza Aymamón	Mogotes. Karso de torre. Escarpa de tipo cuesta. Pozos verticales. Pocas cavidades. Espeleotemas puntiagudas. Charcas de disolución.
Caliza Aguada	Escarpa alta orientada hacia el sur desde San Juan hasta Aguadilla, hasta de 100 m Dolinas de disolución, hasta de 30 m de profundidad, separada por crestas redondeadas Karso de cono típica.	Formación Camuy	Simas cilíndricas hasta de 30 m de profundidad. Escarpa de tipo cuesta. Sumideros de hasta 20 cm de diámetro en el miembro central.

características geológicas y sus rasgos topográficos tanto superficiales como subterráneos; reconoce su importancia por la flora y fauna que alberga, muchas legalmente designadas como amenazadas o en peligro de extinción, así como sus ecosistemas particulares; reconoce su valor estético, recreativo y de investigación científica. Dicha ley reconoce el karso como uno de nuestros recursos naturales no renovables.

Algunas de las disposiciones de la Ley 292 son:

- Cualquier extracción de corteza terrestre tiene que tener los permisos de acuerdo a la Ley 132 del 25 de junio de 1968 y no se otorgarán permisos simples ni exenciones para la extracción de corteza terrestre;

- Se prohíbe la creación de vertederos y actividad agrícola que tienda a la exterminación total de la vegetación o al uso de biocidas no degradables que puedan filtrarse a los acuíferos;
- Se prohíbe la construcción de caminos y/o carreteras sin la autorización del Secretario del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA);
- Se prohíbe la fragmentación de ecosistemas de valor natural;
- Se prohíbe la deforestación selectiva o total;
- Se prohíbe la remoción, caza o exterminio de la fauna silvestre cuyo hábitat sea la zona kárstica;

TABLA 4. Riqueza de especies en la zona caliza del norte. Detalles y más información en Lugo *et al.* (2001) y en la Tabla 5.

Grupo de organismos	Número de especies
Flora	
Bosque Río Abajo	
Plantas vasculares	1,030
Nativas	878
Forasteras	158
Endémicas	88
Fauna	
Macrofauna Acuática	
Peces	99
Crustáceos	24
Invertebrados de Cuevas	
En Puerto Rico	151
En Isla de Mona	46
Endémicos	23
Reptiles	38
Anfibios	13
Aves	223
Endémicas	16
Mamíferos	
Fósiles	20
Murciélagos	15
Terrestres	5
Murciélagos	13

- Se prohíbe la construcción o instalación de torres o antenas para líneas de transmisión eléctrica o antenas de comunicación.

La Ley 292 faculta al secretario para imponer multas por las violaciones a esta ley. Además, le impone la responsabilidad de implantar las disposiciones de esta ley, de hacer un reglamento para la ley y de apercibir de las disposiciones de esta ley a todas las agencias del Estado Libre Asociado e informar de la misma a varias agencias federales. Le impone al DRNA hacer un estudio que defina las áreas que, debido a la importancia y función geológica, hidrológica y ecosistémica, no puedan ser utilizadas bajo ningún concepto para la extracción de materiales de corteza terrestre y que

se deben de conservar dentro de un máximo de dos años luego de aprobada la ley.

Otras leyes protegen indirectamente al karso. Por ejemplo, la Ley 111 del 1985, *Ley de Protección de Cuevas, Cavernas y Sumideros*. Estos rasgos fisiográficos son parte del karso y en Puerto Rico sólo se encuentran en el karso. Esta ley que antecede la Ley 292, se concentra exclusivamente en la protección de las cuevas y los sumideros. La Ley 241 del 1999, *Ley de Vida Silvestre*, establece la protección y la conservación de la vida silvestre y de la diversidad biológica o biodiversidad. La biodiversidad está constituida por todos los reinos de la vida conocidos y de lo abiótico que sostiene a la vida silvestre. Ante la gran riqueza de vida silvestre

TABLA 5. Recursos ambientales de la caliza del norte de Puerto Rico (Lugo *et al.* 2001). Traducido del inglés en Lugo *et al.* (2001) por Anne Catesby Jones.

- El sesenta y cuatro por ciento del acuífero de Puerto Rico se extiende por la zona caliza del norte. Descarga unos 0.45 Mm³/d (120 mgd) de los cuales 0.20 Mm³/d (52 mgd) se consumen.

La franja kárstica también contiene:

- El río más largo, el río de La Plata
- El único río que forma una delta, el río Grande de Arecibo
- La descarga fluvial de mayor tamaño, el río Grande de Arecibo
- La menor densidad de drenaje superficial
- Los estuarios fluviales de mayor tamaño
- Los humedales costeros de mayor extensión
- Los únicos ríos subterráneos de la Isla
- Las cuevas y sistemas de cavernas más grandes
- Las dunas de arena más grandes
- Una formación terrestre única en el mundo: los zanjones
- La mayor diversidad de especies arbóreas por unidad de área
- Más de 220 especies de aves
- Dieciséis de las 17 aves endémicas a la Isla
- Treinta y cuatro especies en peligro de extinción: 10 aves, 1 reptil, 1 batracio, 22 plantas
- Dos especies de plantas y nueve especies de aves denominadas como vulnerables
- Las únicas poblaciones de la especie en peligro de extinción, el Sapo Concho y de dos reptiles vulnerables
- Playas de anidaje para tres tortugas marinas en peligro de extinción
- Más de 110 especies de aves migratorias, por lo menos 11 de las cuales anidan ahí
- Más de 90 especies de peces asociados con los cuerpos de agua de la zona
- Los yacimientos de fósiles más importantes tanto como con respecto a la paleobotánica como a la paleofauna
- Los únicos yacimientos paleontológicos en la Isla
- Paisajes espectaculares
- Una verdadera zona silvestre.

TABLA 6. Protección y vulnerabilidad del karso a la urbanización. Estos datos estan basados en Helmer (2003).

Región kárstica	Área (ha)				
	Área de estudio	Bosques	Bosque protegidos	Bosques vulnerables a	Karso vulnerable a urbanización
Norte	114,115	59,621	4,234	2,128	7,808
Sur	43,659	17,979	3,150	977	5,360
Total	157,774	77,660	7,384	3,129	13,303

en las distintas zonas del karso a lo largo de Puerto Rico, hay una serie de disposiciones de esta ley que son aplicables al karso. La Ley 136 de 1976, para la *Conservación, el Desarrollo y Uso de Aguas de Puerto Rico* es otra ley que potencialmente pudiera usarse en la protección del karso ya que esta área contiene los mayores acuíferos de la Isla, así como una gran cantidad de humedales.

Las leyes de planificación y los reglamentos aprobados al amparo de las mismas, así como la *Ley de Municipios Autónomos*, son otros mecanismos que pueden afectar positiva o negativamente las zonas del karso de Puerto Rico. Estas leyes y reglamentos son quizás los mecanismos de conservación más importantes que tiene Puerto Rico, pero hasta el momento no se han utilizado efectivamente para conservar los recursos naturales. La Junta de Planificación tiene unas guías para planificar conocidas como *Objetivos y Políticas Públicas del Plan de Uso de Terrenos de Puerto Rico*, las cuales contienen una sección sobre el karso y la protección del mismo. Este documento es el que rige cuando se va a evaluar una variación de usos de suelos en terrenos rústicos y las decisiones que toma la Junta de Planificación son importantes ya que determinan el impacto que puede tener sobre los terrenos kársticos, al igual que cualquier otra región no kárstica. Los planes de ordenamiento territorial son una extensión de la planificación antes ejercida por la Junta de Planificación y ahora por los municipios en vías de obtener su autonomía.

La delegación de la planificación para el uso de terrenos a los municipios autónomos pone en peligro todos los recursos naturales de Puerto Rico, incluyendo el karso. El peligro estriba en que no se coordinen los usos entre municipios adyacentes o en la misma cuenca hidrográfica. Tal falta de coordinación puede resultar en la fragmentación de recursos naturales y/o el impedimento de su funcionamiento óptimo. Además, algunos municipios pueden decidir urbanizar el 100 por ciento de sus terrenos a expensas de los recursos naturales. Esto le pondría presión a los recursos naturales de otros municipios a la vez que crearía efectos inesperados en otros sectores de la Isla. Más

aún, tales circunstancias crearían la dependencia de los municipios urbanizados en los recursos naturales de los municipios no urbanizados.

Existen otras leyes que proveen la oportunidad para que la ciudadanía contribuya a la protección del karso, tales como la nueva Ley 183 de 2001, *Ley de Servidumbres de Conservación* y la Ley 133 de 1975, *Ley de Bosques*. La ley de servidumbres de conservación permite que se le ponga un gravamen a la escritura de la propiedad a terrenos privados con valor ecológico para la conservación a perpetuidad de la misma al igual que proveer incentivos contributivos al dueño de la propiedad. La servidumbre tiene que ser asignada a una organización sin fines de lucro dedicada a la conservación. Dicha ley enmendó la *Ley de Herencias de Puerto Rico*, permitiendo el gravamen a perpetuidad en la escritura.

La Ley de Bosques se circunscribe a los terrenos públicos designados como bosques o reservas naturales. En las zonas del karso se encuentran los bosques estatales de Vega, Cambalache, Río Abajo, Guajataca, y el de Guánica y las reservas de Mona y Caño Tiburones, todos protegidos por la Ley de Bosques. La Ley de Bosques en su artículo 10, establece la categoría de *Bosque Auxiliar*. La misma le provee exención de contribuciones sobre la propiedad a un dueño de terrenos con cinco o más cuerdas localizadas en bosques que firme un convenio con el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, con la intención de mantener la mayor cantidad de terrenos en bosques.

La Vulnerabilidad del Karso al Desarrollo Urbano

Puerto Rico contiene una gran cantidad de leyes y reglamentos que protegen el ambiente en general y una excelente ley que protege el karso en particular, así como varias leyes que contienen aspectos que pueden ser usadas en la protección del mismo. No obstante lo anterior, hemos visto como el gobierno no pone las leyes ambientales en vigor, lo que ha permitido que los recursos naturales del país se utilicen en muchas ocasiones de forma

ilegal e incompatible con su conservación. Lo más desalentador es cuando en muchas ocasiones es precisamente el gobierno el mayor violador de esas leyes que debe hacer cumplir. Como dice el refrán de pueblo: “*El papel aguanta todo lo que se le pone.*”

Por ejemplo, las áreas protegidas en el dominio público no necesariamente están todas protegidas porque muchas veces el gobierno no cumple con su deber ministerial y permite la privatización del karso o usos incompatibles con la conservación de este recurso. Esto ocurrió con la construcción de la carretera PR 10 (Lugo *et al.* 2001) y la expedición de permisos de uso de terreno contrarios a los requisitos de las leyes y reglamentos del país a lo largo de esta carretera. Otro ejemplo es el hecho de que el DRNA no ha hecho el estudio sobre el karso que le requiere la Ley 292. Sin antes cumplir con este requisito de ley, este departamento continúa expidiendo permisos de extracción de la corteza terrestre sin conocer las consecuencias de esas acciones y en clara violación a la política pública ambiental.

Igualmente, la Junta de Planificación y la Administración de Reglamentos y Permisos (ARPE) rutinariamente permiten usos urbanos incompatibles, no sólo con la conservación del karso, sino también con su funcionamiento como abasto de agua para la economía del país. Agencias estatales ubican la infraestructura sobre el karso pensando que ahorran dinero por ser los terrenos “de poco valor económico” y terminan gastando enormes sumas de dinero corrigiendo los errores de sus decisiones. En el ejemplo de la carretera PR 10, hay un kilómetro de carretera que se considera uno de los más caros del mundo y donde ya se han gastado sobre 30 millones de dólares sin que se logre estabilizar el terreno. La carretera continúa, bien sea cerrada, o con uno o dos carriles operacionales en lugar de los cuatro que se diseñaron con más de 30 años de esfuerzo de ingeniería. Increíblemente, la misma agencia pretende alinear un nuevo expreso (PR 22) a todo lo largo de la franja kárstica, como si no hubiese aprendido la lección durante la construcción de la PR 10.

Por todo lo anterior, no es sorpresa para nadie que a pesar de las excelentes leyes ambientales que existen, la situación ambiental en Puerto Rico es una de continuo deterioro y de continuas violaciones a las leyes, en donde el karso no es una excepción. El problema principal es que en Puerto Rico aparentemente no hay control sobre el uso del terreno. Las agencias reguladoras no han zonificado toda la Isla y son incapaces de sostener las zonificaciones que han hecho. El ejemplo de la zonificación especial para El Yunque (Lugo *et al.* 2000) es significativo pues a pesar del valor que los puertorriqueños le asignan a esta montaña, la tasa de no conformidad en los desarrollos a la zonificación aumentó por un factor de 5.8 (de 94.8 a 547.8 ha/año) después de ser anunciada la zonificación especial (López *et al.* 2003). En terrenos privados no zonificados, como la mayoría del karso, es fácil justificar el desarrollo urbano sin importar el lugar donde se proponga o los costos económicos, ambientales y sociales para el sector público.

Usando como base las tendencias históricas en el uso del terreno en Puerto Rico, Helmer (2004) llevó a cabo un estudio del potencial del cambio de uso de terrenos en el karso norteño. Para desarrollar el mapa de vulnerabilidad de desarrollo, Helmer (2004) primero muestreó al azar píxels de 30 m de resolución para desarrollar un modelo estadístico de la probabilidad de cambio en cobertura de terreno de no urbano a urbano entre el 1977-1978 y el 1994. Estas fechas corresponden a mapas de cobertura de terreno basados en imágenes de satélite o fotos aéreas. Con esos datos calculó la percentila del 75 por ciento de los valores de varios atributos estudiados en todos los píxels que cambiaron de no urbano a urbano durante el intervalo de tiempo.

Para cada píxel muestreado, se obtuvo información para cuantificar 24 atributos de cada uno. Por ejemplo, de su elevación, distancia a una carretera, etc. Estos atributos se consideran indicadores de la probabilidad de desarrollo urbano y por lo tanto se correlacionaron con el cambio a cobertura urbana de los píxels durante el intervalo de tiempo del estudio. De los 24 atributos estudiados, 12 dieron correlaciones estadísticamente

significativas con el desarrollo urbano y en cuatro casos la correlación fue significativa a $p=.005$. Estos cuatro fueron la pendiente del terreno, la elevación, la distancia de una carretera y la distancia a lugares ya urbanizados y se utilizaron para completar el estudio.

De estas observaciones derivaron seis mapas binarios. Cuatro correspondían a cada uno de los cuatro atributos del modelo estadístico que se identificaron como determinantes para el cambio de cobertura a urbano. Dos de los mapas identificaban terrenos bajo dominio público u otros terrenos que ya estaban protegidos. Los terrenos protegidos no cambiaron de cobertura durante el intervalo del estudio. Para cada uno de los mapas con los atributos que correlacionaban significativamente con el desarrollo urbano, se le asignaron píxeles con valores de 1 si el valor del atributo era menor al promedio para todas las tierras que cambiaron a urbano y de lo contrario el valor era cero. La vulnerabilidad de terrenos al desarrollo urbano se estableció en aquellos píxeles que tenían el mismo valor binario cuando se solaparon los cinco mapas y que eran propiedad privada en el mapa 6. Los

terrenos vulnerables al desarrollo urbano se caracterizaban por tener pendientes menores al 22 por ciento, elevación menor a 130 m, una distancia menor a 90 m de una carretera y una distancia menor a 240 m a lugares ya urbanizados.

Helmer (2004) encontró que el 8.4 por ciento de la región kárstica es vulnerable al desarrollo urbano (Tabla 6). Sin embargo, el problema es más agudo en el karso del sur, donde el 12.3 por ciento es vulnerable al desarrollo urbano. Sin embargo, hay una proporción mayor de bosques protegidos en el karso sureño y como consecuencia la vulnerabilidad de bosques al desarrollo urbano es menor en el karso sureño que en el norteño (3.6 vs 5.4 por ciento, respectivamente). Los mapas de Puerto Rico (Figura 2) y del karso norteño (Figura 3) contienen la ubicación de las zonas más vulnerables a la urbanización y señalan la vulnerabilidad de las tierras agrícolas ante la urbanización. Las tierras agrícolas a urbanizarse en la región kárstica son tierras de enorme fertilidad y valor agrícola para Puerto Rico. Sin embargo, la estadística más reveladora es que el área en la región kárstica que es vulnerable a urbanizarse (13,303 ha,

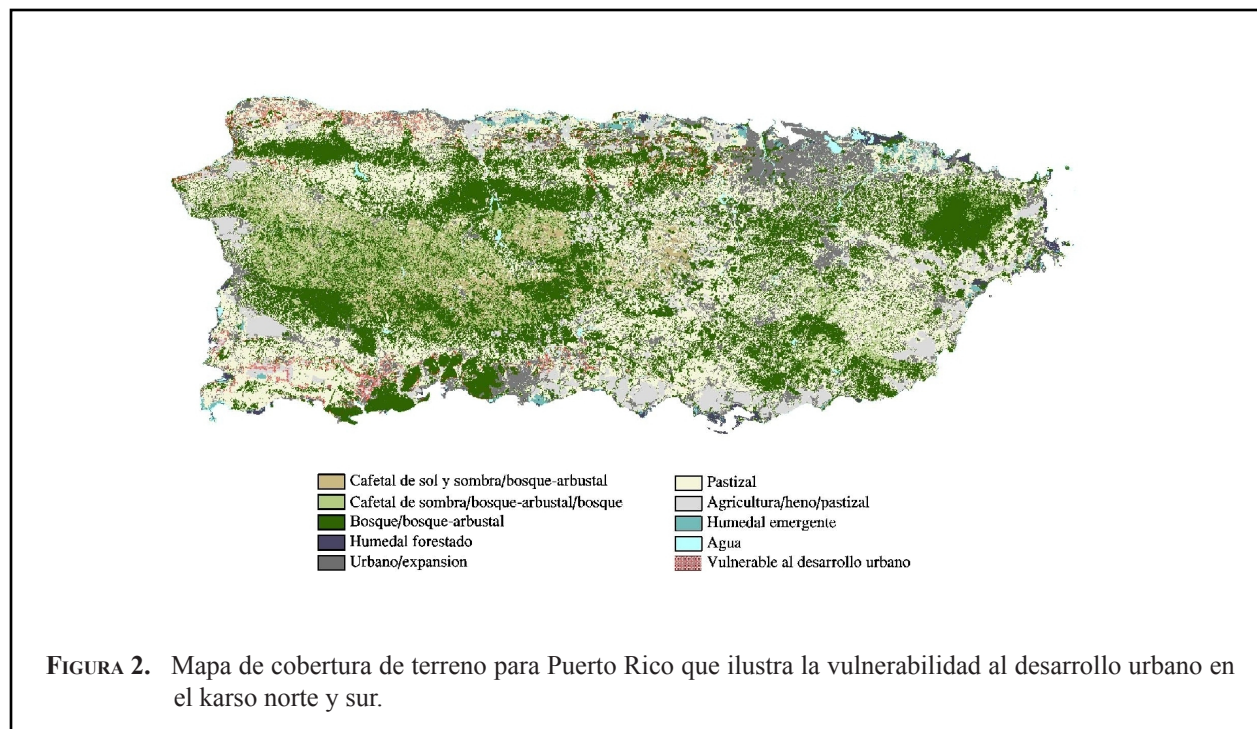


Figura 3. Mapa del karso del norte que ilustra las áreas vulnerables al desarrollo urbano. El modelo usado para crear los mapas son de Helmer (2003); el mapa de cobertura de terreno

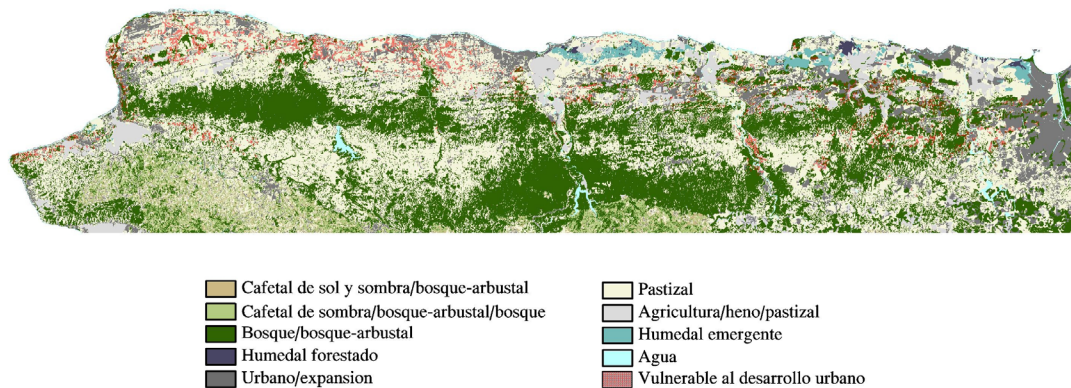


Tabla 6) es casi igual al área que estaba urbanizada en la región en el 1977-78 y es 1.5 veces mayor al área que se urbanizó entre el 1977-1978 y 1994 (Tabla 1). Esto sugiere que la velocidad de la urbanización del karso podría aumentar. El cuatro por ciento del bosque del karso es vulnerable a desarrollo urbano, eso equivale al 42 por ciento del área de bosque bajo protección en la región kárstica. Un desarrollo urbano de esta magnitud en zonas boscosas comprometería los servicios y valores del karso.

Claramente, estamos en un momento crítico cuando se hace necesario tomar acción rápida para salvaguardar los recursos naturales del karso puertorriqueño. La forma más efectiva de lograr el objetivo de conservación es por medio de la adquisición de terrenos según se ha propuesto recientemente ante el Congreso de los Estados Unidos de Norte América (proyecto de ley HR 3213). Con la compra de terrenos y su transferencia al dominio público, estos bosques no estarían sujetos a presiones de desarrollos urbanos por el sector privado y sólo sería necesario fiscalizar a las agencias del gobierno para que protegiesen los valores del karso de acuerdo a las leyes y política ambiental de Puerto Rico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se llevó a cabo en colaboración con la Universidad de Puerto Rico. Parte del estudio fue auspiciado por un acuerdo entre la Universidad de Puerto Rico y la NASA-IRA (contrato NAG8-1709, subcontrato 00-CO-11120105-011). Agradecemos la colaboración de Mildred Alayón y Grizelle González y la traducción de Anne Catesby Jones.

LITERATURA CITADA

- Giusti, E.V. 1978. Hydrogeology of the karst of Puerto Rico. Geological Survey Professional Paper 1012. Washington DC : U.S. Government Printing Office, 68 p. + mapa.
- Helmer, E.H. 2004. Forest conservation and land development in Puerto Rico. *Landscape Ecology* 19(1):29-40.
- López, T. del Mar, A.E. Lugo, O. Ramos y L. Vélez. 2003. Urbanización de la periferia de El Yunque. Manuscrito inédito.
- Lugo, A.E., T. del Mar López y O.M. Ramos. 2000. Zonificación de terrenos en la periferia de El Yunque. USDA Forest Service, International Institute of Tropical Forestry, General Technical Report IITF-16. Río Piedras, PR. 12 p.

- Lugo, A.E., L. Miranda Castro, A. Vale, T. del Mar López, E. Hernández Prieto, A. García Martínó, A.R. Puente Rolón, A.G. Tossas, D.A. McFarlane, T. Miller, A. Rodríguez, J. Lundberg, J. Thomlinson, J. Colón, J.H. Schellekens, O. Ramos y E. Helmer. 2001. Puerto Rican karst - A vital resource. USDA Forest Service, General Technical Report WO-65. 100 p.
- Monroe, W.H. 1976. The karst landforms of Puerto Rico. U.S. Geological Survey Professional Paper 899. Washington, DC : U.S. Government Printing Office, 69 p. + mapa.
- Monroe, W.M. 1980. Geology of the middle Tertiary Formations of Puerto Rico. U.S. Geological Survey Professional Paper 953. Washington, DC. 93 p. + mapa.