



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Identificación del potencial  
eólico para la generación de  
energía eléctrica en México  
mediante el análisis  
geoespacial de datos**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**INGENIERA CIVIL**

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

**LOURDES AURORA FERNÁNDEZ SÁNCHEZ**

**DIRECTOR DE TESIS**

**M.I. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA HIROSE**



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

*A mi familia por su infinito amor.*

*A mi director de tesis por su apoyo incondicional.*

*A mis profesores por sus invaluable conocimientos.*

*A mis amigos por sus entrañables risas.*

*A la UNAM por todo.*

## ÍNDICE

Introducción .....	5
1. Antecedentes .....	6
Objetivos .....	8
2. Energías renovables .....	9
2.1. Energía .....	9
2.2. Energía renovable .....	9
2.3. Tipos de energía renovable .....	11
2.3.1. Energía hidráulica .....	11
2.3.2. Energía eólica .....	11
2.3.3. Energía solar fotovoltaica .....	12
2.3.4. Energía termosolar .....	13
2.3.5. Bioenergía .....	13
2.3.6. Energía geotérmica .....	14
2.4. Ventajas y desventajas de las energías renovables frente a los combustibles fósiles .....	15
2.5. Panorama mundial .....	16
2.6. México y las energías renovables .....	17
3. Energía eólica .....	21
3.1. Aspectos generales .....	21
3.1.1. Aerogenerador .....	22
3.2. Aplicaciones .....	28
3.2.1. Mecánicas .....	28
3.2.2. Eléctricas .....	28

3.3. Ventajas y desventajas de la energía eólica frente a otras energías renovables .....	30
3.4. Industria eólica en México .....	31
4. Sitios con mayor potencial eólico .....	34
4.1. Sistemas de información geográfica como fuente de información .....	34
4.1.1. Aplicaciones .....	34
4.1.2. Ventajas y desventajas de los SIG contra métodos convencionales de análisis y edición de datos geospaciales .....	35
4.1.3. Programas SIG .....	36
4.1.4. Modelo de datos .....	37
4.2. Aspectos geospaciales, ambientales y sociales .....	39
4.2.1. Geospaciales .....	39
4.2.2. Ambientales .....	42
4.2.3. Sociales .....	53
4.3. Selección de los sitios con mayor potencial eólico .....	56
4.3.1 Metodología .....	56
4.3.2. Procedimiento .....	70
4.3.3. Resultados .....	76
5. Conclusiones y recomendaciones .....	105
Bibliografía .....	108

# Introducción

Las personas empezaron a tomar conciencia de las consecuencias que trajo consigo el desarrollo en los años 60's, gracias a "*Primavera silenciosa*" de Rachel Carson (Manwell, McGowan, & Rogers, 2009), el cual es considerado como el primer libro de impacto ambiental ya que relacionaba el uso de pesticidas con el efecto adverso que causaban en el ambiente. Una vez que el mundo vio la realidad que esto suponía, se empezaron a cuestionar otras prácticas, como el uso de combustibles fósiles, actualmente reconocidos productores de gases de efecto invernadero y pilares de la economía mundial.

Para preservar su estilo de vida, la humanidad ha volteado a ver a la energía que ofrece la naturaleza, buscando consuelo en los dioses del pasado ha desempolvado los libros de historia y volviendo al laboratorio, volcó el rumbo de sus investigaciones ya no para el mejoramiento de la tecnología basada en combustibles fósiles, sino para reemplazarlos totalmente y así eliminar la total dependencia a ellos.

Una de las opciones disponibles es el viento, y las razones para que se haya considerado en esta tesis este tipo de energía y no otras como la solar, se derivan principalmente de la falta de investigación, normatividad y desarrollo en el país acerca de la misma, y aunque el viento se distribuye en todo el globo, eso no significa que en cualquier lugar es posible generar energía eléctrica con él. México tiene potencial disponible y gracias a la tecnología podemos conocer muchos aspectos del mismo como la ubicación, cantidad y calidad del recurso, factores importantes para las primeras fases del desarrollo de proyectos eólicos.

La ingeniería civil es considerada por excelencia como "la destructora de la naturaleza" y no es para menos, el desarrollo de infraestructura requiere alterar el lugar en donde es proyectada, sin embargo, existe una rama de la misma llamada ingeniería ambiental, que si bien es joven, se encarga del bienestar del medio ambiente y en consecuencia mejora la calidad de vida del humano, lo que le ha proporcionado un gran auge las últimas décadas desarrollando así un gran número de conocimiento y herramientas que facilitan la obtención de información útil para amortiguar el daño humano, ha sido una gran impulsora de las energías renovables y toma un papel importante en los proyectos, es por ello que este trabajo se apoya en ella.

# 1. Antecedentes

Los primeros indicios históricos del aprovechamiento del viento como un recurso energético se remontan al año 3500 a. C. con los egipcios navegando en el Río Nilo por medio de botes de vela (O'Neal, 2010), su uso se limitaría a la cuestión marítima hasta al siglo 1 d. C. cuando Herón de Alejandría menciona por primera vez en su tratado *“La neumática”* al molino de viento como un medio para proveer aire a un órgano, sería en Persia entre los años 500 – 900 d. C. en donde se utilizarían los molinos de viento para la molienda de granos y bombeo de agua, según se piensa, los vikingos fueron los responsables que llegaron al norte de Europa en el siglo XII debido a sus constantes viajes entre estas dos regiones y su uso se expandió a otras tareas mecánicas, como accionar herramientas y aserrar madera (Manwell, McGowan, & Rogers, 2009), mientras que a principios del siglo XIII en China se documenta su uso para los mismos fines que los persas.

Fue en Europa, en específico Holanda, donde los molinos de viento tuvieron su mayor desarrollo en el siglo XVI, se hicieron más altos y se añadió un sistema de orientación que permitía a las aspas permanecer siempre perpendiculares al viento, también se usaron para drenar áreas inundadas y procesar productos como especias, tabaco, etc.

La energía eólica mantuvo su auge hasta la Revolución Industrial (1760-1840), donde el carbón la reemplazó en gran medida por su bajo costo y su cualidad de poder ser transportado (Manwell, McGowan, & Rogers, 2009). En 1870 en los Estados Unidos, los molinos sufrieron cambios al optar por un diseño más pequeño y cambiar las aspas de madera por metal, su usos principales fueron el bombeo de agua a la superficie para el ganado y consumo doméstico en lugares alejados (Smith, 2005).

Fue hasta en julio de 1887 cuando el ingeniero eléctrico y profesor universitario escocés James Blyth construyó el primer aerogenerador, conformado de un eje de 10 [m], cuatro brazos de 4 [m] con velas de lona y baterías para almacenar la energía eléctrica y proveer de electricidad a su casa de campo en Marykirk, Escocia. Tal fue el éxito de su invención que Blyth ofreció el excedente a sus vecinos, los cuales lo rechazaron al considerar a la energía eléctrica una “invención del diablo”, por lo que decidió construir un aerogenerador que funcionó por 30 años en el Hospital Psiquiátrico Montrose, el cual era más grande y tenía muchas mejoras respecto a su primer modelo.

El primer aerogenerador puesto en marcha en el continente americano fue construido por el estadounidense Charles Brush en 1888, tenía una altura de 18 [m] y abasteció por 20 años de 12 [kW] a su residencia en Cleveland, Ohio (U.S. Department of Energy, 2018).

Más tarde entre 1891 y 1918, el físico danés Poul La Cour, construyó más de 100 aerogeneradores que producían electricidad con el fin de separar el hidrógeno del agua (electrólisis) y así obtenerlo en forma de gas, el cual se usaba en la iluminación.

En 1931, Rusia construye el primer parque eólico, y en 1971 Dinamarca el primero offshore (marítimo) (O'Neal, 2010), de ahí en adelante el desarrollo de los aerogeneradores ha dado enormes pasos gracias a la investigación, avance de la tecnología y conciencia ambiental, dando como resultado el renacimiento de la energía eólica.

# Objetivos

## Objetivo general

El objetivo general de este trabajo de investigación, es utilizar la ingeniería ambiental como una rama de la ingeniería civil capaz de identificar los lugares adecuados para la instalación de parques eólicos onshore (en tierra firme), procurando el bienestar ambiental, social y cultural.

## Objetivos particulares

- Identificar los aspectos geoespaciales, ambientales y sociales más importantes que influyen en el desarrollo de un proyecto eólico onshore.
- Obtener por medio de la investigación o cálculo, las distancias de exclusión que deben tener diversos elementos para no ser afectados por el funcionamiento de aerogeneradores.
- Crear capas guía que nos indiquen en donde sería imposible la instalación de un parque eólico y en donde ciertas condiciones, pueden resultar desfavorables para su desarrollo.
- Obtener las áreas con potencial eólico y las de exclusión, para así integrar las áreas viables para construcción.



## 2. Energías renovables

### 2.1. Energía

Existen cuantiosas definiciones de lo que es la energía, siendo una pieza importante en nuestra vida diaria y el cosmos, pareciera que cada persona tiene su propia interpretación de ella, eso es debido a que todavía no la comprendemos del todo al ser un elemento muy superior a nuestro entendimiento y propia existencia.

Una definición condensada sería considerarla como una magnitud conservativa, finita, capaz de realizar trabajo y propia de un sistema físico en donde se cumple que la energía total inicial es igual a la energía total final. Gracias a tales propiedades el ser humano la ha utilizado para su propio beneficio desde tiempos remotos y se ha enfrentado a las dificultades que eso conlleva, principalmente su almacenamiento y transformación, retos que la humanidad ha sorteado gracias al avance de la tecnología.

### 2.2. Energía renovable

Según el Diccionario de la Lengua Española, energía renovable es aquella cuyas fuentes se presentan en la naturaleza de modo continuo y de manera prácticamente inagotable, el diccionario de Cambridge nos dice que es la energía que es producida usando el sol, el viento, los cultivos, ect., en vez de utilizar combustibles como el petróleo o el carbón.

Las definiciones anteriores son sencillas, pero contienen la esencia de lo que son las energías renovables, además, que fungen como un reflejo del conocimiento básico y promedio de la sociedad en general, de ellas podemos rescatar varios puntos que se consideran características importantes de las energías renovables y que son clave para su identificación:

#### *Naturales*

Se encuentra de forma común en la naturaleza, siendo creadas en procesos en donde el ser humano no tiene interferencia alguna.

## *Limpias*

A diferencia de los combustibles fósiles, el aprovechamiento de las energías renovables en la mayoría de los casos no contamina, y en otros producen gases que pueden ser clasificados como contaminantes, pero como veremos en el caso de la biomasa, sigue siendo una mejor opción que las energías convencionales.

## *Inagotables*

Abundan en el planeta y se renuevan rápidamente, lo que las convierte en fuentes virtualmente inagotables de energía.

Con lo anterior se puede definir a las energías renovables:

Son aquellas energías que se encuentran de manera abundante en la naturaleza ya que son capaces de renovarse a corto plazo siendo transformadas por el ser humano a otros tipos de energía (comúnmente a eléctrica) para su aprovechamiento creando casi nula contaminación en el proceso.

## *¿Por qué el nombre de energías renovables?*

Se les llama así gracias a una de sus mejores cualidades que es su capacidad de renovarse, lo cual su contraparte carece, aunque es el término más popular para referirse a ellas, pueden ser llamadas con otros nombres que en algunos casos aluden a ideas que no se pueden aplicar a este tipos de energías, por ejemplo, no podemos llamarlas *nuevas* porque siempre han estado ahí, al menos desde nuestra perspectiva humana, ni tampoco *alternativas* porque sería catalogarlas como una “opción” restándoles su debida importancia.

## 2.3. Tipos de energías renovables

### 2.3.1. Energía hidráulica

Es aquella que se obtiene gracias a la retención de un gran volumen de agua (véase Figura 1.0) y al caer hace mover las turbinas que están conectadas a un generador, convirtiendo la energía potencial en energía cinética y finalmente a eléctrica. Es la energía renovable más usada a nivel mundial por el fácil almacenamiento y el flujo constante de agua, desafortunadamente el recurso no se encuentra distribuido de manera uniforme en todas partes, además, el costo y el impacto a gran escala hace que este tipo de proyectos sea cada vez menos viable.



Figura 1.0: Central hidroeléctrica Ing. Carlos Ramírez Ulloa, "El Caracol", Guerrero, México.  
Fuente: CFE.

### 2.3.2. Energía eólica

Es la energía que se obtiene cuando la energía cinética del viento hace mover las aspas de los aerogeneradores transformándola en energía mecánica y después a eléctrica. Los parques eólicos pueden tener desde uno a cientos de aerogeneradores onshore (véase Figura 2.0) u offshsore, gracias a que las nuevas tecnologías han mejorado y abaratado los sistemas para esta energía.

El viento se encuentra en todo el globo, sin embargo, los aerogeneradores necesitan cierta cantidad de recurso eólico de manera constante todo el año para que la producción de energía sea rentable.



*Figura 2.0: Parque eólico “Bangui Bay II”, Bangui, Ilocos Norte, Filipinas.  
Fuente: José Roberto Jr. Del Rosario.*

### **2.3.3. Energía solar fotovoltaica**

La radiación producida por el sol se transforma en energía eléctrica al incidir en una célula fotoeléctrica, que junto con otras forman un panel solar, ahí se produce lo que se llama efecto fotovoltaico que consiste en la excitación de los electrones por la diferencia de potencial eléctrico entre ambas caras, creando corriente continua y por medio de un dispositivo llamado inversor se convierte en alterna. El conjunto de paneles forma un huerto solar cuando la producción es a pequeña escala y planta o parque fotovoltaico cuando es industrial (véase Figura 3.0). No emite gases invernadero y puede aplicarse tanto en gran escala como a nivel doméstico, las desventajas radican en la gran inversión inicial y que la radiación solar no es uniforme en todo el año, variando así la producción de energía.



*Figura 3.0: Planta fotovoltaica “Copper Mountain Solar 3”, Boulder City, Nevada, EUA.  
Fuente: Cupertino Electric Inc.*

### 2.3.4. Energía termosolar

El proceso de obtención de este tipo de energía es el siguiente: la radiación solar se refleja a través de espejos, usualmente de forma parabólica para concentrarla y direccionarla hacia un tubo que se encuentra en medio (véase Figura 4.0), el cual contiene un fluido que viaja hasta un contenedor de agua en donde absorbe el calor del fluido, se produce vapor que hace girar una turbina que está conectada a un generador y así generar energía eléctrica.



*Figura 4.0: Planta termosolar “Xina Solar One”, Pofadder, Sudáfrica. Fuente: Abengoa Solar.*

### 2.3.5. Bioenergía

Utiliza materia orgánica como fuente de energía para producir energía térmica y eléctrica mediante el calor producido por la combustión, se puede aprovechar de manera casera con calderas y de manera industrial (véase Figura 5.0) para la generación de energía eléctrica al convertir agua en vapor y así activar una turbina.



*Figura 5.0: Caldera de combustión de biomasa en una central térmica, Lübeck, Alemania. Fuente: Florian Gerlach.*

### 2.3.6. Energía geotérmica

Se aprovechan las reservas de agua a altas temperaturas que se encuentran bajo tierra, se extrae el vapor para hacer girar una turbina ubicada en una central geotérmica (véase Figura 6.0), el agua que procede del vapor ya enfriado se regresa a la reserva para así continuar el ciclo.



*Figura 6.0: Central geotérmica de Nesjavellir, Islandia. Fuente: Gretar Ívarsson.*

#### *¿Qué pasa con la energía nuclear?*

En este trabajo no se considera a la energía nuclear como una energía renovable, a pesar que cumple con las características para considerarla como tal ya que no produce gases de efecto invernadero, proviene de la naturaleza y su fuente es inmensa ya que se necesita una pequeña cantidad del isótopo del material radiactivo para realizar la fisión, la energía nuclear enfrenta dos grandes problemas.

El primero radica en la gran cantidad de medidas de seguridad que se deben considerar en una central nuclear (que es lugar donde se induce de manera controlada una reacción nuclear), desde la construcción del complejo, implicando grandes cantidades de concreto de alta resistencia, diferentes tipos de acero y materiales especiales para la contención de los efectos radiactivos, además de la cercanía a una fuente de agua para garantizar la refrigeración del sistema y su uso inmediato en caso de desastre, entre otras implicaciones.

El segundo trata de los residuos radiactivos que se generan, los cuales tardarán miles de años en degradarse por lo que deben confinarse en depósitos especiales bajo tierra (cementerios nucleares) y darse manteniendo de manera permanente, siendo una peligrosa y costosa herencia.

## *2.4. Ventajas y desventajas de las energías renovables frente a los combustibles fósiles*

### *Ventajas*

- + Reducción considerable de la producción de gases invernadero.
- + Cada vez se vuelven más rentables gracias a la investigación de nuevas tecnologías, alza de los precios de los hidrocarburos y el incremento de la competencia en el área.
- + Diversificación de las fuentes de energía.
- + Independencia energética de los países.
- + Se pueden aprovechar de manera domiciliaria e industrial.
- + Creación de empleos en las comunidades cercanas a los lugares de producción.
- + La mayoría de estas energías se encuentran disponibles en todo el globo.

### *Desventajas*

- Dependencia a las condiciones geológicas y climatológicas en las que se desarrolle la energía a aprovechar.
- Los combustibles fósiles son más versátiles porque se encuentran en los estados, líquido, sólido y gaseoso.
- La tecnología actual está enfocada a los combustibles fósiles, por lo que se necesitaría nuevos dispositivos e infraestructura.
- La infraestructura para su aprovechamiento puede interrumpir procesos naturales y afectar a la biosfera.
- Pueden producir contaminación auditiva y algunos consideran que también visual.

## 2.5. Panorama mundial

A consecuencia de las crisis ambientales, energéticas, económicas y sociales que atraviesan los países en la actualidad muchos están apostando su futuro en aprovechar la energía que sus territorios ofrecen con nueva infraestructura, aumento en capacidad de las ya instaladas, legislación y beneficios para alentar su uso entre su población, mientras que algunos aspiran a ser 100% dependientes de ese tipo de energías y otros todavía son escépticos, sin embargo, ambos comparten la necesidad de aprovecharlas sabiendo que ya no son opciones como se les consideraba en el pasado, sino el único salvavidas que les queda.

Como se muestra en la Figura 7.0, las energías renovables ocupan casi un cuarto de la producción de energía eléctrica a nivel mundial, mientras que el resto lo dominan combustibles fósiles que son el carbón, gas natural y petróleo. No hay que subestimar tal porcentaje, ya que cada año las energías renovables ganan terreno con el aumento de su capacidad, un crecimiento anual del 8.7% (véase Tabla 1.0) es un excelente indicador, con la energía eólica en segundo lugar en crecimiento y en capacidad (véase Figura 7.1) se demuestra que cada vez más personas apuestan por las energías renovables y una gran parte de ellas por la energía eólica.

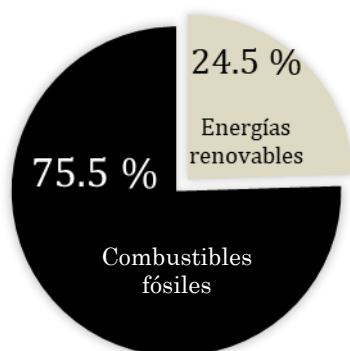


Figura 7.0: Participación en producción de energía eléctrica mundial.

Fuente: REN21 Renewables 2017 Global Status Report.



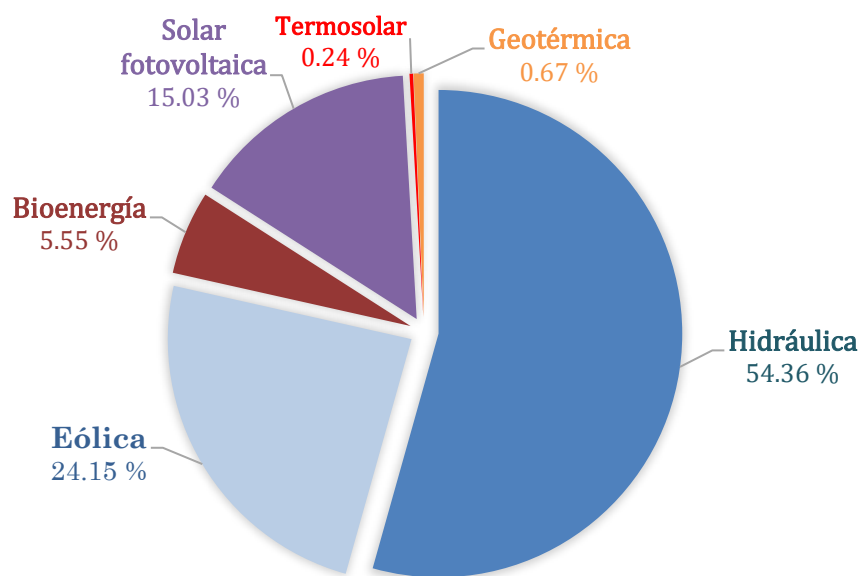


Figura 7.1: Porcentaje de participación de cada tipo de energía renovable a nivel mundial.  
Fuente: REN21 Renewables 2017 Global Status Report.

Tabla 1.0: Capacidad y crecimiento de cada energía renovable a nivel mundial.  
Fuente: REN21 Renewables 2017 Global Status Report.

Energía	Capacidad [GW]		Porcentaje de crecimiento
	2015	2016	
Hidráulica	1071	1096	+ 2.3 %
Eólica	433	487	+ 12.5 %
Solar fotovoltaica	228	303	+ 32.9 %
Bioenergía	106	112	+ 5.7 %
Geotérmica	13	13.5	+ 3.8 %
Termosolar	4.7	4.8	+ 2.1 %
Total	1855.7	2016.3	+ 8.7 %

## 2.6. México y las energías renovables

La historia de la energía eléctrica en México y el uso de las energías renovables para su generación son más cercanas de lo que pareciera, todo comenzó en 1879 con la primera planta generadora la cual proporcionaba electricidad a una fábrica textil, diez años después la primera planta hidroeléctrica ya estaba operando, al decretarse como un servicio público varias compañías extranjeras

crearon empresas para suministrar electricidad a la población, construyeron infraestructura para lograrlo siendo lo más destacado el proyecto hidroeléctrico Necaxa, pero a pesar de las millonarias inversiones sólo el 38.25% de la población tenía el servicio el cual era deficiente y caro, además que se limitaba sólo a las grandes ciudades, para cambiar la situación el gobierno creó en 1937 la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para brindar energía eléctrica a la sociedad procurando hacerlo con la mayor eficiencia y al mínimo costo, sin embargo, el gobierno todavía tiene por delante varios retos que superar para lograr sus objetivos y para identificarlos se deben analizar los datos que se tienen en disposición, no sólo de México sino también de Latinoamérica.

El acceso a la electricidad en el país en 1990 era del 94%, para el 2014 subió a 99.2%, haciendo una comparación con otros países de Latinoamérica el primer lugar lo tiene Barbados y Chile con el 100% de su población con acceso a la energía eléctrica, les sigue de cerca Brasil con 99.7, Costa Rica 99.5% y Venezuela con 99.1%, en los últimos lugares se encuentran Honduras con 88.7%, Nicaragua con 81.9% y Haití con 37.9%, a nivel mundial se tiene un tasa del 85.34% (Banco Mundial, 2017).

En el año 1960 el porcentaje de consumo de energía en México procedente de combustibles fósiles era del 94.14%, en 1970 siguió aumentando hasta el 94.55%, sin embargo, para el siguiente año (1971) se registró una caída significativa llegando hasta el 84.45% y para el 2014 registró un porcentaje del 80.81%, para ese último año el país producía el 90.4% de su energía eléctrica a partir de combustibles fósiles (Banco Mundial, 2017), siendo que para el 2016 fue del 82.83% (SENER, 2017). Lo anterior significa que en el país existen 3.7 millones de personas que aún no cuentan con electricidad en su hogares tanto en zonas rurales como urbanas (REN21, 2017).

Evidentemente existe un rezago en proporcionar este servicio a la población que se encuentra en constante crecimiento, mientras que los combustibles fósiles que tienen la mayoría de participación en su producción cada vez se vuelven más escasos y costosos, creando crisis de diversas índoles entre las naciones, y aunque México es un país petrolero, ha experimentado en los últimos años estas situaciones y poco a poco ha ido inclinando la balanza hacia las energías renovables, gracias a eso y a su ubicación destaca a nivel mundial en la energía geotérmica con el cuarto lugar en el 2016 con la adición de 15 [MW] de capacidad, eso es aproximadamente 3% del total agregado y el quinto en capacidad total en esta energía con 950 [MW] (REN21, 2017), el mercado termosolar creció un 6% con 95 plantas en el país, la industria del etanol tuvo

una producción de 20 millones de litros y se agregaron 150 [MW] a la capacidad total de la solar fotovoltaica (REN21, 2017).

México tiene una mayor participación de energías renovables que el promedio mundial con el 28.82% (véase Figura 8.0), que se traduce en 17,519 [MW] instalados en todo el país (véase Figura 8.1), en donde el primer lugar se lo lleva la energía hidráulica con el 70.95% y 12,430 [MW], el segundo lugar la energía eólica con el 18.23% y 3,193 [MW] (véanse Figuras 8.2 y 8.3), sin embargo, el crecimiento de la eólica es superior a la hidráulica como se muestra en la Tabla 1.0, perfilándose como la favorita a ser la principal energía renovable del país.

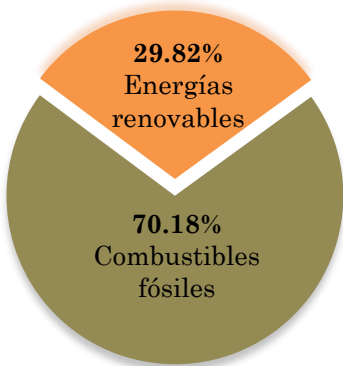


Figura 8.0: Participación en producción de energía eléctrica en México. Fuente: SENER 2015.

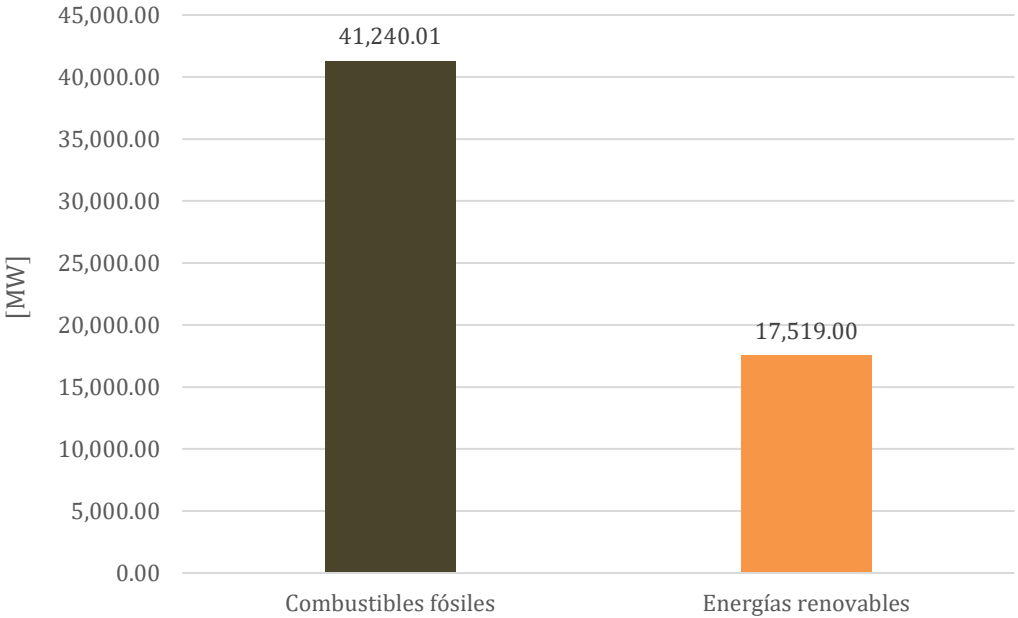


Figura 8.1: Capacidad instalada en México. Fuente: SENER 2017.

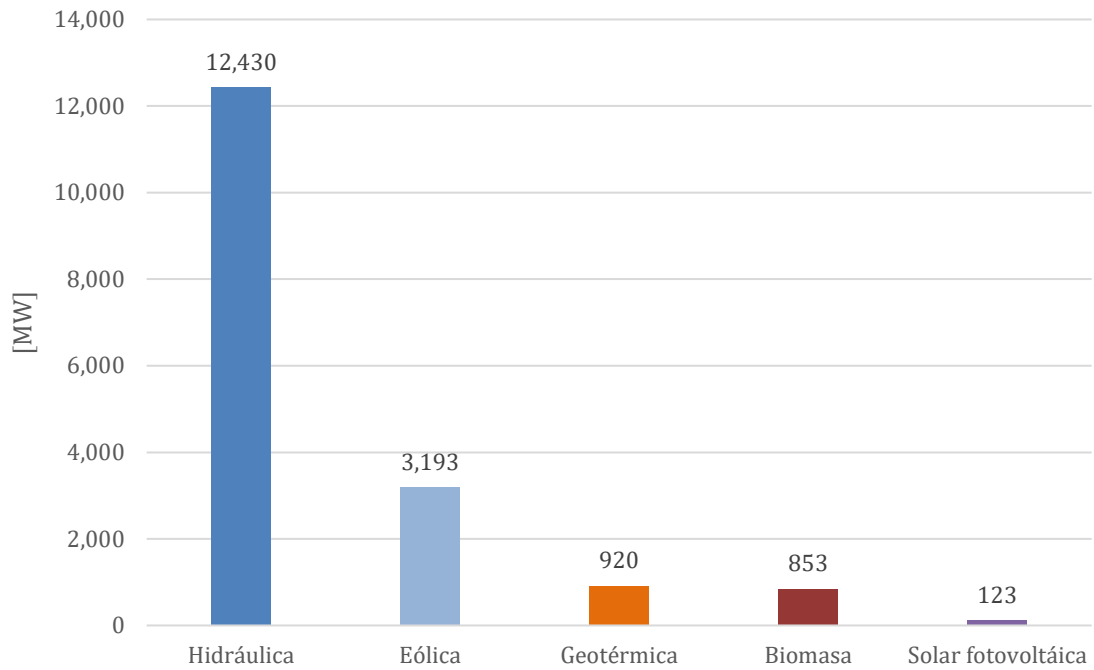


Figura 8.2: Capacidad instalada en México por cada tipo de energía renovable.  
Fuente: SENER 2017.

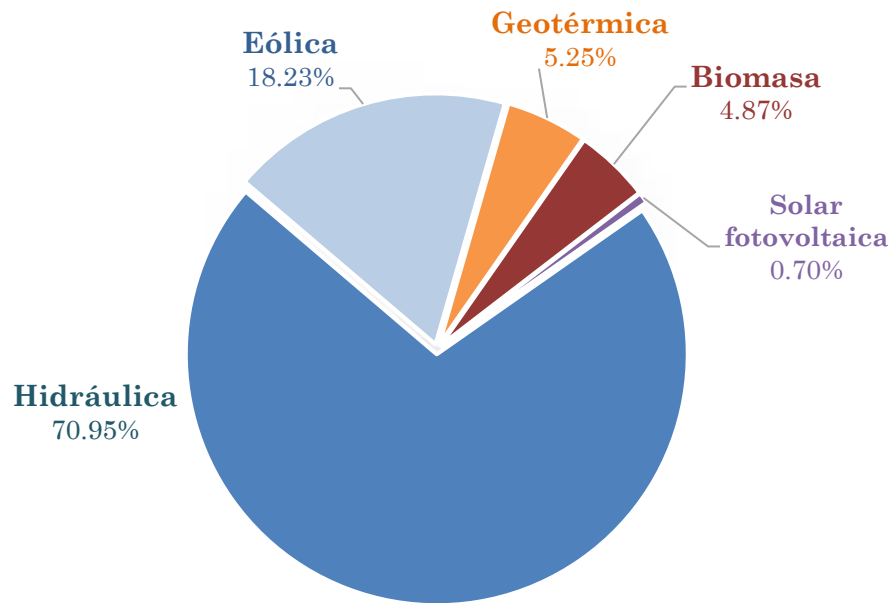


Figura 8.3: Porcentaje de participación de cada tipo de energía renovable en México.  
Fuente: SENER 2017.

## 3. Energía eólica

### 3.1. Aspectos generales

La palabra viento proviene del latín *ventus* y se define como el desplazamiento de masas de aire por el calentamiento diferencial de las mismas, así que podría decirse que la energía solar produce la energía eólica, siendo esta última llamada así por Eolo, dios griego de los vientos.

A través de la historia el ser humano ha aprovechado esta energía para diferentes fines, los primeros fueron los egipcios con velas para navegación, después en Persia (hoy Irán) surgían los de eje horizontal para moler granos y bombear agua (véase Figura 9.0).

Los molinos de viento tomando la forma tan característica en Europa, y sería hasta 1887 cuando se usaron por primera vez para producir electricidad.



*Figura 9.0: Molinos de viento de eje vertical construidos entre el año 500 y 900 D.C., Nashtifan, Irán.  
Fuente: Mohamad Reza Shahpasand, 2012.*

### 3.1.1. Aerogenerador

La energía eólica se obtiene por medio de un aerogenerador, algunas veces llamado turbina eólica o molino de viento, el último haciendo referencia a sus predecesores que molían trigo para producir harina. Es un sistema con miles de años de desarrollo, en donde su evolución lo ha convertido en un mecanismo complejo con tecnología de punta compuesto de más de 8,000 piezas (U.S. Department of Energy, 2018), las cuales con el debido mantenimiento como un sistema completo tiene una vida útil de 20 a 25 años.

Pueden trabajar a velocidad fija o variable, siendo los aerogeneradores de velocidad variable los más usados por las ventajas que ofrece sobre la tecnología más sencilla que son los de velocidad fija, siendo una de las principales mayor eficiencia en la captura de la energía, gracias a la adaptación del rotor a la velocidad del viento en vez de trabajar a una o dos velocidades constantes e inclusión de inversores (Winrock International, 2004).

La mayoría de los aerogeneradores comerciales funcionan con velocidades de viento de entre 3 a 25 [m/s], cuando la velocidad es menor a 3 [m/s] las aspas se mantienen en reposo ya que el viento no ejerce suficiente empuje para modificar ese estado, al llegar a esa velocidad las aspas empiezan a girar y la turbina genera energía, conforme aumenta la velocidad también lo hace la producción de energía eléctrica, es hasta los 20 – 25 [m/s] que tales velocidades pueden causar severos daños a la turbina por lo que cuando se llega a esos límites se apaga automáticamente (Seifried & Witzel, 2010).

Actualmente la mayoría de los aerogeneradores para producción a gran escala onshore son de 700 [kW] a 5 [MW], siendo la excepción el E-126 de ENERCON con una capacidad de producción de 7.580 MW, una altura del buje de 135 m y un diámetro de 127 m, considerado como el aerogenerador onshore más potente del mundo hasta el momento.

A continuación, en la Figura 9.1, se presenta el esquema de un aerogenerador estándar de eje horizontal, la configuración más usada para los parques onshore.

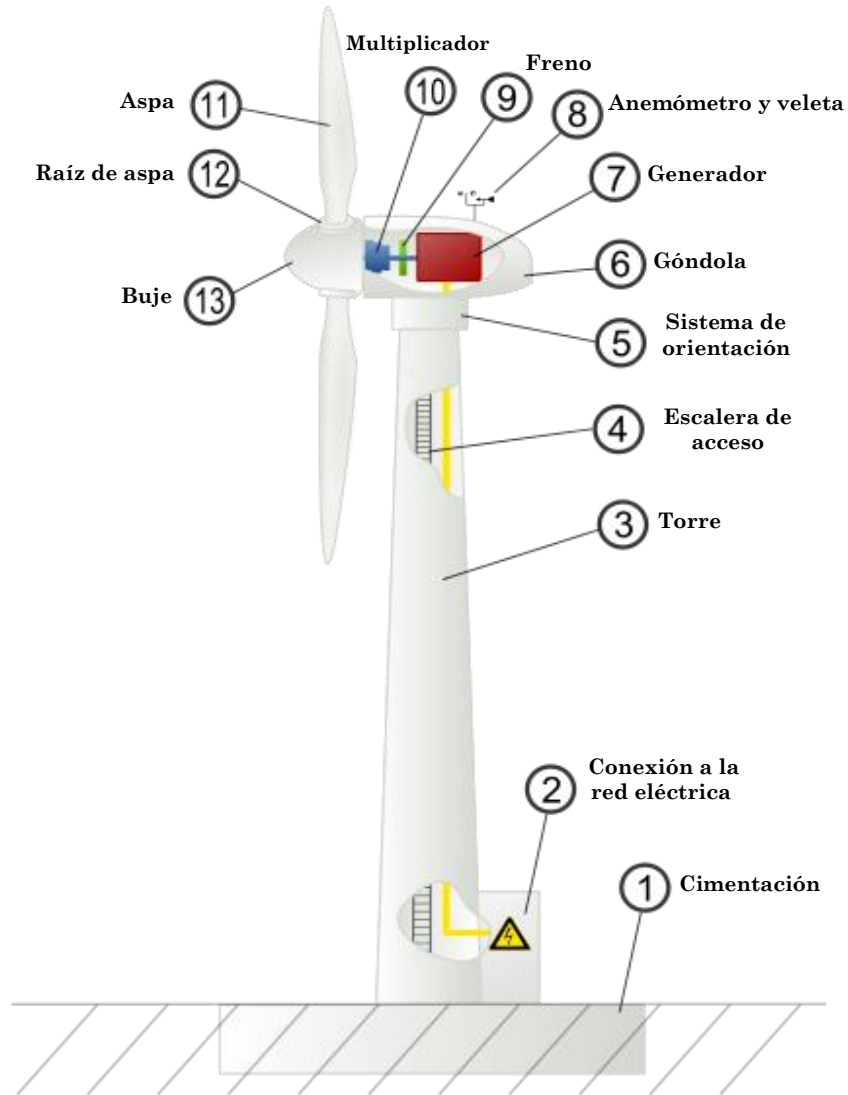


Figura 9.1: Esquema de un aerogenerador onshore de eje horizontal.  
Fuente Arne Nordmann, 2007.

### 1. Cimentación

La cimentación es uno de los elementos más importantes, ya que se encarga de transmitir las cargas al suelo y aportar estabilidad a la estructura, la elección del tipo de cimentación para un aerogenerador depende principalmente del tipo de parque eólico y terreno, las opciones más usadas para parques onshore son las cimentaciones superficiales, zapatas de concreto armado (véase Figura 9.2) que a veces se le integran pilotes cuando las condiciones de suelo lo requieran.



*Figura 9.2: Cimentación de un aerogenerador del parque eólico “Tres Mesas”, Llera, Tamaulipas.  
Fuente: Comisión de Energía de Tamaulipas, 2015.*

## *2. Conexión a la red eléctrica*

La corriente de energía eléctrica (alterna), producida dentro de la góndola es transmitida por medio de cables a través de la torre y hasta una pequeña estación situada en la base del aerogenerador, que es la encargada de regular la energía eléctrica que será transmitida a la red.

## *3. Torre*

La torre es la que eleva y soporta a la góndola, el buje y las aspas para exponer éstas últimas al viento, usualmente son tubulares troncocónicas (su diámetro va disminuyendo conforme se acerca a la góndola) de acero, siendo que la velocidad del viento es directamente proporcional a la altura la tendencia es construir aerogeneradores cada vez más altos.

Actualmente algunas comprenden alturas de los 55 a 166 [m], en la mayoría de los modelos la altura se puede ajustar de acuerdo al proyecto siendo los aerogeneradores más altos aquellos que se utilizan para parques offshore.





*Figura 9.3: Instalación de una torre para un aerogenerador en el parque eólico “Bremerhaven”, Bremerhaven, Bremen, Alemania. Fuente: Hannes Grobe, 2007.*

#### *4. Escalera de acceso*

Permite que el personal de mantenimiento se desplace desde la base hasta la góndola de manera segura integrando arnés de seguridad.

#### *5. Sistema de orientación*

Permite que la parte superior del aerogenerador gire unos pocos grados cuando el anemómetro registre un cambio en la dirección del viento.

#### *6. Góndola*

Dentro de la góndola se encuentran los elementos más importantes como lo son el multiplicador, sistema hidráulico, eje de alta velocidad, generador eléctrico, unidad de refrigeración, mecanismo de orientación, el anemómetro y el controlador electrónico.



*Figura 9.4: Dentro de la góndola de un aerogenerador de 2.3 MW, EUA. Fuente: National Renewable Energy Lab, 2017.*

## 7. *Generador*

Un aerogenerador puede tener tres tipos de generadores: de corriente continua, de corriente alterna síncronos y de corriente alterna asíncronos.

Un generador se alimenta del par de torque suministrado por el rotor y aumentado por el multiplicador y gracias a un alternador la energía mecánica se convierte en energía eléctrica.

## 8. *Anemómetro y veleta*

Son las encargadas de enviar la información del viento (velocidad y dirección respectivamente) al controlador electrónico para indicar la dirección del viento al sistema de orientación, poner en marcha el sistema cuando el viento alcance la velocidad mínima o apagarlo cuando excede la máxima



*Figura 9.5: Veleta (izq.) y anemómetro (der.), parque eólico “Schwabhausen”, Schwabenhausen, Thüringen, Alemania. Fuente: Cornelius Bartke, 2009.*

## 9. *Freno*

Se utiliza en caso de emergencia/fallo del sistema o cuando se realiza el mantenimiento.

## 10. *Multiplicador*

Aumenta la velocidad de giro proveniente del rotor al generador de 13 a 1,500 [rpm] aproximadamente.

### 11. Aspa

También llamada pala o álabe, se encarga de convertir la energía cinética proporcionada por el viento en energía mecánica mediante la captación del viento que la hace girar sobre un eje horizontal y que transmite la rotación hacia los componentes que se encuentran dentro de la góndola.

Cada aerogenerador se compone de tres aspas, usualmente de un material compuesto llamado GRP (Glass Reinforced Plastic), en español “plástico reforzado con fibra de vidrio” y siendo que en algunos casos se refuerza con fibra de carbono, sus ventajas son que es resistente, ligero y no es complicado moldearlo.



*Figura 9.6: Transporte de un aspa hacia el lugar de instalación, California, EUA.  
Fuente: Chuck Coker, 2009.*

### 12. Raíz de aspa

Conecta la base del aspa con el buje para su sustento y transferencia de energía.

### 13. Buje

Elemento externo que contiene a las aspas y gracias a ellas el buje gira transmitiendo la energía al rotor.



*Figura 9.6: Buje del aerogenerador E126 de Enercon. Fuente: Enercon, 2010.*

## 3.2. Aplicaciones

El uso de turbinas para producir energía eléctrica a partir de la eólica a gran escala inició en la década de 1920, y a partir de entonces la tecnología ha avanzado a pasos agigantados mejorando la eficiencia de los sistemas, así como la reducción en los precios de generación.

La energía mecánica obtenida de la eólica no sólo puede convertirse a eléctrica, sino puede usarse tal y como es para brindar otros tipos de servicios, a continuación, se presentan las aplicaciones más comunes de los molinos de viento y los aerogeneradores.

### 3.2.1. Mecánicas

El bombeo de agua es el uso más común para la transformación de energía eólica a mecánica, es el sistema más sencillo y barato, ya que se necesitan bajas velocidades de viento y usualmente abastecen a pequeñas y medianas granjas.

La energía térmica se obtiene a partir de calentar agua por rozamiento mecánico o a través de la compresión de un fluido refrigerante, con ello el calor producido puede usarse como calefacción ((BUN-CA), 2002).



Figura 10.0: Molino de viento para bombeo de agua, California, EUA. Fuente: Randy Robertson, 2007.

### 3.2.2. Eléctricas

#### *Sistemas aislados*

Su principal uso es proporcionar energía eléctrica a lugares alejados, en donde la presencia de redes eléctricas sea nula, pueden ser *sistemas individuales* que se caracterizan por el uso de pequeñas turbinas en zonas rurales al servicio de una vivienda por medio de un sistema con baterías para almacenamiento de energía, *sistemas centralizados* en donde toda una comunidad es beneficiada y los *sistemas híbridos*, que son útiles cuando las condiciones del viento no

satisfagan las necesidades de la comunidad y se opta por agregar al sistema otra fuente de energía, puede ser renovables o a partir de combustibles fósiles, los expertos recomiendan la combinación eólica – solar fotovoltaica por el problema que significaría el transporte del combustible hasta el lugar de generación.



*Figura 10.1: Instalación de un aerogenerador de 10 kW para abastecer una granja, Inglaterra. Fuente: Charles McGowan, 2012.*

### *Sistemas conectados a la red*

El nombre dado a estos sistemas es *parque eólico* (véase Figura 10.2) y las diferencias con los aislados radican en que están conectados directamente a la red eléctrica, por lo que no se requieren baterías para almacenamiento, sirven a ciudades y tienen la tecnología más avanzada siendo que las turbinas son más grandes y más numerosas.



*Figura 10.2: Parque eólico “Hallet Hill”, Australia. Fuente: David Clarke, 2009.*

### *3.3. Ventajas y desventajas de la energía eólica frente a otras energías renovables*

#### *Ventajas*

- + El recurso eólico se presenta tanto de día como de noche, a diferencia de la tecnología solar en donde sus horas de producción se ven limitadas por las horas de sol.
- + Impulsa la economía de la región con la creación de empleos e infraestructura.
- + No afecta de manera considerable el relieve del lugar, ya que no se necesitan grandes movimientos de tierras para la instalación de los aerogeneradores.
- + Es un recurso inagotable, abundante y renovable.
- + Se encuentra en todo el planeta, por lo que todos los países pueden aprovecharlo mientras el viento pasa por sus territorios.
- + Un parque eólico es rápido de instalar (aproximadamente 1 año para 50 [MW]), su operación y mantenimiento son mucho más económicos que el de otras energías, además que se debe efectuar cada 6 meses ((BUN-CA), 2002).
- + Es aplicable para proyectos de pequeña escala (sistemas aislados) y para ciudades (sistemas conectados a la red).
- + Pueden construirse parques eólicos tanto en tierra firme (onshore) como en el mar (offshore).

#### *Desventajas*

- Se requieren ciertas condiciones de viento para que el proyecto sea viable, además que no es constante.
- Grandes extensiones de terreno son necesarias para ubicar los aerogeneradores.
- Con una inadecuada planeación puede ocasionar problemas sociales y ambientales.

- La construcción y mantenimiento de los parques offshore son costosos y difíciles de realizar.
- Algunas personas consideran que un parque eólico contamina de manera visual, otros lo consideran una imagen que representa progreso, en la mayoría de los casos es cuestión de perspectiva.

### 3.4. Industria eólica en México

México se encuentra junto con Chile, India y Marruecos entre los países que más se han desarrollado en la energía eólica onshore, de tal manera que los costos de producción han disminuido convirtiéndose en la mejor opción entre las energías renovables. (REN21, 2017). En el 2016 México añadió 0.5 [GW] de capacidad, mientras que Chile tuvo un incremento igual del 0.5 [GW], Uruguay de 0.4 [GW] y Perú de 0.1 [GW], aunque estos países de Latinoamérica tuvieron un crecimiento considerable en el mercado de la energía eólica en la región, Brasil se consagra como el líder con el 5.7% de su energía eléctrica proporcionada por la eólica (REN21, 2017). La mayor parte de los parques eólicos del país son de desarrolladores privados (véase Tabla 2.1) y la meta para el 2030 es tener una capacidad instalada de 20 [GW] de energías renovables, de los cuales la mitad será energía eólica (REN21, 2017). Actualmente el país cuenta con 62 parques eólicos, todo ellos onshore ubicados en varios estados (véase Tabla 2.0), sumando una capacidad de 5,847 [MW] (The Wind Power, 2018).

Tabla 2.0: Inventario actual por estado de energía eólica. Fuente: The Wind Power, 2018.

Nombre	Potencia nominal total (kW)	Número de aerogeneradores
No clasificadas	397 500	95
Baja California	165 700	53
Chiapas	28 800	16
Coahuila de Zaragoza	200 500	1
Jalisco	306 400	124
Nuevo León	526 000	162
Oaxaca	2 441 075	1 508
Puebla	286 500	117
Quintana Roo	1 500	1
San Luis Potosí	200 000	100
Tamaulipas	607 050	191
Yucatán	455 600	219
Zacatecas	230 000	115

Tabla 2.1: Parques eólicos en México. Fuente: *The Wind Power*, 2018.

<i>Nombre</i>	<i>Capacidad instalada [kW]</i>	<i>Unidades</i>	<i>Desarrollador</i>	<i>Municipio</i>	<i>Estado</i>
<b>Amistad</b>	200 000	NHD*	Enel GreenPower	-	Coahuila de Zaragoza
<b>Arriaga</b>	28 800	16	Grupo Salinas	Arriaga	Chiapas
<b>BHCE Yucutan</b>	250 000	125	-	-	Yucatán
<b>Bii Hioxio</b>	234 000	117	Gas Natural Fenosa Renovables	Juchitan de Zaragoza	Oaxaca
<b>Bii Nee Stipa I</b>	26 350	31	Iberdrola Renewables	Juchitan de Zaragoza	Oaxaca
<b>Bii Nee Stipa II</b>	74 000	NHD*	Gamesa/Enel GreenPower	Juchitan de Zaragoza	Oaxaca
<b>Bii Nee Stipa III</b>	70 000	NHD*	Gamesa/Enel GreenPower	Juchitan de Zaragoza	Oaxaca
<b>Bii Nee Stipa IV</b>	74 000	37	Iberdrola Renewables	Juchitan de Zaragoza	Oaxaca
<b>Bii Stinú</b>	164 000	82	EDF-EN	-	Oaxaca
<b>Cancun</b>	1 500	1	Acciona Energia	-	Quintana Roo
<b>Cementos Apasco</b>	500	1	-	-	Coahuila de Zaragoza
<b>Chacabal I</b>	30 000	15	Aldesa Energias Renovables	Chacabal	Yucatán
<b>Chacabal II</b>	30 000	15	Aldesa Energias Renovables	Chacabal	Yucatán
<b>Chinampas</b>	63 000	NHD*	-	-	-
<b>Coahuila</b>	197 400	94	EDP Renovaveis	Parra, General Cepeda, Ramos Arizpe	Coahuila
<b>Dominica I</b>	100 000	50	Enel GreenPower/Sowite c	Charcas	San Luis Potosi
<b>Dominica II</b>	100 000	50	Enel GreenPower/Sowite c	Charcas	San Luis Potosi
<b>Dos Arbolitos</b>	70 000	NHD*	Gamesa	-	Oaxaca
<b>Dzilam</b>	70 000	28	-	-	Yucatán
<b>El Porvenir</b>	54 000	30	Compañía Eólica de Tamaulipas	Reynosa	Tamaulipas
<b>Eurus I</b>	37 500	25	Acciona Energia	Juchitan de Zaragoza	Oaxaca
<b>Eurus II</b>	212 500	142	Acciona Energia	Juchitan de Zaragoza	Oaxaca
<b>Fuerza Eólica del Istmo I</b>	50 000	20	Peñoles	-	Oaxaca
<b>Fuerza Eólica del Istmo II</b>	30 000	12	Peñoles	-	Oaxaca
<b>Granja Sedena</b>	15 000	5	-	Ixtepec	Oaxaca
<b>Guerrero Negro</b>	600	1	CFE	Mulegé	Baja California
<b>Ingenio</b>	49 500	33	Acciona/Zuma	Santo Domingo Ingenio	Oaxaca
<b>La Bufa</b>	130 000	65	-	-	Zacatecas
<b>La Mata - La Ventosa</b>	67 500	27	EDF-EN	La Mata, La Ventosa, Istmo de Tehuantepec	Oaxaca
<b>La Mesa</b>	135 300	30	Isolux	Villa de Casa, Guemeza	Tamaulipas



<b>Nombre</b>	<b>Capacidad instalada [kW]</b>	<b>Unidades</b>	<b>Desarrollador</b>	<b>Municipio</b>	<b>Estado</b>
<b>La Rumorosa I</b>	10 000	5	Gobierno estatal	Tecate, Ejido Gustavo Aubanel Vallejo, La Rumorosa, Sierra de Juarez	Baja California
<b>La Venta I</b>	1 575	7	CFE	Juchitan de Zaragoza	Oaxaca
<b>La Venta II</b>	83 300	98	CFE	Juchitan de Zaragoza	Oaxaca
<b>La Venta III</b>	102 000	120	CFE/Iberdrola Renewables	Juchitan de Zaragoza	Oaxaca
<b>La Ventosa</b>	101 900	105	Iberdrola Renewables	Juchitan de Zaragoza	Oaxaca
<b>Los Altos</b>	50 400	28	Grupo Dragon	Los Altos de Jalisco	Jalisco
<b>Los Altos II</b>	64 000	32	Grupo Dragon		Jalisco
<b>Oaxaca I</b>	102 000	NHD*	CFE/EYRA	Juchitan de Zaragoza	Oaxaca
<b>Oaxaca II</b>	102 000	68	CFE/Acciona Energia	-	Oaxaca
<b>Oaxaca III</b>	102 000	68	CFE/Acciona Energia	-	Oaxaca
<b>Oaxaca IV</b>	102 000	68	CFE/Acciona Energia	-	Oaxaca
<b>Pacifico</b>	160 000	80	EDF-EN	Juchitan de Zaragoza	Oaxaca
<b>Palo Alto</b>	129 000	43	Enel GreenPower	Ojuelos	Jalisco
<b>Parques Ecológicos de México</b>	79 900	94	Iberdrola Renewables	Juchitan de Zaragoza	Oaxaca
<b>Piedra Larga</b>	227 500	114	Renovalia	Unión Hidalgo	Oaxaca
<b>Pier II</b>	66 000	33	Iberdrola Renewables	Esperanza	Puebla
<b>Pier IV</b>	220 500	NHD*	-	Esperanza	Puebla
<b>Salitrillos</b>	93 000	NHD*	-	-	-
<b>Santa Catarina</b>	22 000	8	-	Santa Catarina	Nuevo León
<b>Santiago Eólico</b>	105 000	NHD*	-	-	-
<b>Sierra Juarez</b>	155 100	47	Ienova	Jacumé de la Rumorosa	Baja California
<b>Sureste I phase II</b>	102 000	34	Enel GreenPower	Asunción Ixtaltepec	Oaxaca
<b>Tres Mesas I</b>	62 700	19	Abengoa	Llera de Canales	Tamaulipas
<b>Tres Mesas II</b>	85 800	26	Abengoa	Llera de Canales	Tamaulipas
<b>Ventika I</b>	126 000	42	Fisterra Energy/Cemex	General Bravo	Nuevo León
<b>Ventika II</b>	126 000	42	Fisterra Energy/Cemex	General Bravo	Nuevo León
<b>Vientos del Altiplano</b>	100 000	50	Enel GreenPower	Mazapil, Villa de Cos	Zacatecas

\* No hay datos

## 4. Sitios con mayor potencial eólico

### 4.1. *Sistemas de información geográfica como fuente de información*

Los sistemas de información geográfica (SIG) o en inglés “geographic information systems (GIS)”, pueden definirse como un conjunto de información geográfica y software, herramientas sumamente útiles en la consulta, manipulación, recuperación, edición y visualización de datos espaciales.

Es común que las personas confundan los SIG con los sistemas CAD (*Computer aid design*) “diseño asistido por computadora”, que son de igual manera herramientas computacionales que permiten principalmente a ingenieros, arquitectos y diseñadores dibujar en 2D y modelar en 3D, la gran diferencia con los SIG radica en que no permiten el procesamiento de datos geográficos ni la modelación geográfica. (Navarro, 2011)

Los sistemas de información geográfica deben responder las preguntas (INEGI, 2017) referentes a:

- Localización
- Condición.
- Historia.
- Modelos.
- Simulación.

#### 4.1.1. **Aplicaciones**

Los SIG son una herramienta muy útil para resolver problemas en donde los fenómenos involucrados se repiten periódicamente en cierta región geográfica. Las aplicaciones son variadas como lo son estudios de transporte, de agricultura, demográficos, comerciales, ambientales, logísticos, cartográficos, etc.

### 4.1.2. Ventajas y desventajas de los SIG contra métodos convencionales de análisis y edición de datos geoespaciales

#### *Ventajas*

##### + Simplificación de procesos

El uso de los formatos digitales nos permite transportar y trabajar con un gran número de datos que en el pasado hubiera sido imposible mapas de papel, además, que el procesamiento y la obtención de resultados se realiza de manera inmediata.

##### + Información actualizada y exacta

Existen diferentes formas de obtener la información con la que trabajan los SIG, una forma es la digitalización de mapas e información impresa, imágenes satelitales, imágenes áreas y teledetección.

##### + Interactivo

Las formas de despliegue, manipulación y visualización de datos permiten operar el programa a partir de conocimientos básicos para su uso.

##### + Análisis espacial

El análisis se hace a partir de datos geográficamente referenciados, integrado en su mayoría información espacial con varias capas de datos.

##### + Multidisciplinario

Aunque la mayoría de los usuarios de este tipo de programas tienen profesiones relacionadas con la topografía, geografía, etc., casi cualquier persona puede hacer uso de los SIG para elaborar gran variedad de modelos.

#### *Desventajas*

##### - Costos

Aunque existen softwares libres, en algunos proyectos se solicita el uso de software de paga, el cual es costoso de adquirir.

#### - Problemas técnicos

Al ser un software basado en la captura de datos de fuentes digitales como análogas, pueden presentarse inconsistencias y errores en cuestiones de fiabilidad y compatibilidad cuando se realiza una conversión.

### **4.1.3. Programas SIG**

Actualmente existe una gran variedad de programas SIG en el mercado, algunos son desarrollados por el gobierno, otros por empresas privadas y algunos por los propios usuarios. Los primeros ofrecen licencias a precios accesibles pero poco mantenimiento, actualización y respaldo, los segundos ofrecen todos los servicios postventa a precios muy elevados (Geoffrey J. Meaden, 1992), mientras que los últimos tienen licencia libre donde el respaldo corre a cuenta de los desarrolladores.

A continuación, se muestran los principales programas de licencia libre (open source) que se encuentran actualmente en el mercado (Morales, 2017):

- GRASS (Geographic Resources Analysis Support System)
- gvSIG Desktop
- Kosmo Desktop
- OpenJUMP
- QGIS
- SAGA
- TerraView
- TILEMILL
- uDig (User-friendly Desktop Internet GIS)
- Whitebox GAT

Programas no libres o de licencia propietaria:

- ArcGIS
- Bentley Map
- IDRISI
- LatinoGis
- Manifold
- Maptitude
- SITAL
- GeoStratum
- SPRING
- TatukGIS

#### **4.1.4. Modelo de datos**

Los datos *discretos* (temáticos, categóricos o discontinuos), son aquellos que sólo pueden tener un valor y sus límites son conocidos, mientras que los datos *continuos* (de campo, no discretos o de superficie), pueden tomar cualquier valor dentro de un rango, por ejemplo, una casa es un objeto discreto en una superficie continua como lo es una colina.

Los modelos de datos son aquellos que almacenan la información en un SIG y existen dos tipos:

- *Modelo ráster*

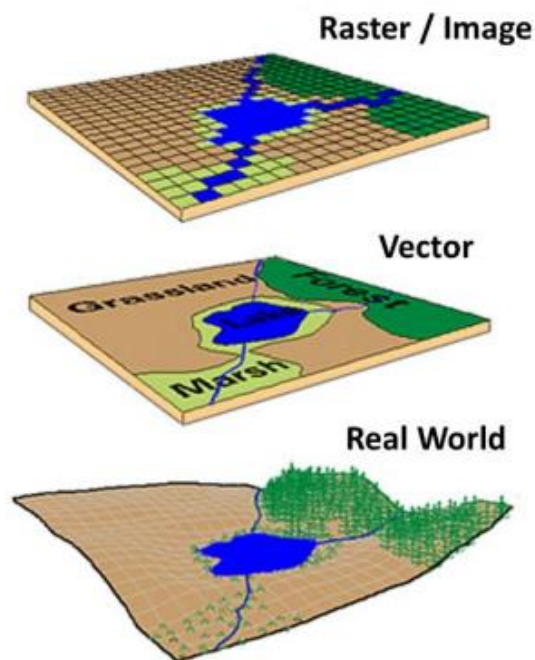
El espacio geográfico se divide en pequeñas celdas cuadradas regulares, usualmente llamadas píxeles (véase Figura 11.0), donde cada una tiene un único valor y en conjunto forman una malla o retícula (INEGI, 2017).

Se caracteriza por la simplicidad de la estructura de datos, lo que facilita operaciones como la superposición o combinación de capas sobre todo cuando existen grandes y variadas cantidades de datos, sin embargo, esos grandes

volúmenes y su representación en forma de píxeles hacen que se requiera mayor almacenamiento y generan una resolución baja en donde los límites no son tan definidos.

- *Modelo vectorial*

Con este modelo el espacio geográfico se representa por medio de puntos, líneas y polígonos (véase Figura 11.0). Sus ventajas radican en su buena y compacta estructura de datos y en su salida gráfica que ofrece una gran definición de límites, desgraciadamente lo anterior se puede volcar en su contra, ya que su estructura de datos que, si bien es formidable, presenta una mayor complejidad que el ráster dificultando la realización de simulaciones y aumentando el precio de los programas que lo manejan.



*Figura 11.0: Representación del mundo real como un modelo ráster y un modelo vectorial.  
Fuente: INEGI, 2017.*

## 4.2 Aspectos geoespaciales, ambientales y sociales

### 4.2.1. Geoespaciales

- **Viento**

El viento es el recurso y la variable más importante al momento de tomar la decisión de instalar un parque eólico, el proceso de identificación del sitio empieza con una evaluación inicial usando mapas de viento del país o región de interés.

Para una estimación del recurso eólico y así obtener identificación previa se pueden utilizar diferentes métodos:

*Métodos ecológicos:* Consisten en recolectar información del viento en el lugar a través de indicadores como la deformación de la vegetación de la zona y con ello se puede obtener una aproximación de la velocidad y la dirección utilizando el “Índice de deformidad de Griggs-Putnam”, éste método es muy útil en zonas remotas, en donde no se dispone información o el área es pequeña dificultando la obtención de información característica (Manwell, McGowan, & Rogers, 2009).

*Mapas:* Así como existen mapas que representan diferentes propiedades de la superficie terrestre también los hay enfocados a la atmósfera mostrando los fenómenos que ocurren en ella y el viento no es una excepción, el área cubierta por uno de éstos mapas comprende desde 200 [m] hasta los 5 [km], se pueden encontrar en formato físico o digital, de manera individual o en compilación, integrando un atlas de la región, país o continente.

La debilidad de los mapas de viento en físico recae en su naturaleza misma, muestran las condiciones estimadas de viento a largo plazo de una región, siendo que el viento cambia constantemente incluso a lo largo de un día por lo que es de esperar no encontrar mucha exactitud y que sean usados principalmente para la fase de la selección inicial del lugar, las versiones digitales son usadas en los Sistemas de Información Geográfica (Manwell, McGowan, & Rogers, 2009) y a diferencia de los mapas en papel éstos pueden contener muchas capas de información en diferentes puntos en el tiempo.

*Modelos multiescala de viento:* Los modelos se crean a través de software especializado como el MERRA de la NASA o ERA-Interim de ECMWF, se les llaman multiescala porque analizan el viento desde tres escalas espaciales y temporales distintas (Mayol, Navarro, Otero, & Saulo, 2017), se basa en datos

de la atmósfera a un nivel superior a los alcanzados por un aerogenerador, por lo que se extrapolan para obtener la velocidad del viento a cualquier altura desde el suelo (Manwell, McGowan, & Rogers, 2009).

*Métodos estadísticos:* Son utilizados cuando existen grandes cantidades de datos sobre la velocidad del viento de la región de estudio y por medio de los métodos estadísticos llamados Medir-Correlacionar-Predecir se puede obtener la relación que existe entre los datos, para así, estimar las condiciones del viento en el futuro (Manwell, McGowan, & Rogers, 2009).

Después se investigan los datos climatológicos, topográficos, etc., la visita a sitio puede arrojar información por medio de indicadores naturales como la deformación de vegetación y sociales como las costumbres locales, en cuanto a construcción y evidencia oral por parte de los pobladores, si todo lo anterior resulta positivo se procede a colocar en el lugar una o varias torres meteorológicas compuestas por anemómetros y veletas que proporcionarán información principalmente sobre la velocidad y dirección del viento a varias alturas, recolectando lecturas cada hora por seis meses hasta dos años (Winrock International, 2004). Gracias a las mediciones periódicas se puede obtener la *densidad de potencia* disponible en el viento, que actualmente es el indicador más usado para determinar la potencia eólica de un sitio, sus unidades son watt sobre metro cuadrado [W/m<sup>2</sup>] y puede definirse como “*la potencia eólica disponible por unidad de área barrida por las aspas del aerogenerador*” (Earnest, 2015), hay que aclarar que es independiente al tamaño, potencia o eficiencia de un aerogenerador, pero sí es dependiente de la densidad y velocidad del viento.

Su ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$WPD = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \rho \cdot v_i^3 \quad \dots \text{Ec.1}$$

Donde:

$WPD$  = (Wind Power Density) Densidad de potencia del viento [W/m<sup>2</sup>].



$n$  = Número de registros en el intervalo utilizado para el promedio.

$\rho$  = Densidad del viento en una hora particular de observación [ $\text{kg/m}^3$ ].

$v_i^3$  = El cubo de la velocidad del viento en la misma hora de observación [ $\text{m/s}$ ].

El potencial del viento se puede categorizar en clases de acuerdo a la densidad de potencia y/o velocidad del viento (véase Tabla 3.0), estos indicadores cambian de acuerdo a la altura por lo que una misma densidad de viento no es la misma clase a 50 [m] que a 80 [m].

La potencia se compone de 7 clases siendo la clase 1 para los vientos que contienen la menor energía y la 7 para la máxima, las áreas con vientos clase 4 y superiores son consideradas ideales para la generación de energía eólica (United States Rural Utilities Service, 2007).

*Tabla 3.0: Clases de densidad de potencia de viento a 10 [m] y 50 [m].*

*Fuente: Laboratorio Nacional de Energía Renovable, Departamento de Energía E.U. 2018.*

<i>Clases de densidad de potencia de viento a 10 m y 50 m</i>				
Clase de potencial de viento	10 [m]		50 [m]	
	Densidad de potencia del viento [ $\text{W/m}^2$ ]	Velocidad [ $\text{m/s}$ ]	Densidad de potencia del viento [ $\text{W/m}^2$ ]	Velocidad [ $\text{m/s}$ ]
1	0	0	0	0
	100	4.4	200	5.6
2	150	5.1	300	6.4
	200	5.6	400	7.0
3	250	6.0	500	7.5
	300	6.4	600	8.0
4	400	7.0	800	8.8
	1000	9.4	2000	11.9

- **Temperatura**

La temperatura es un factor importante a considerar para la colocación de un parque eólico, no solo es una variable de la densidad de potencia del viento, también toma un papel fundamental en el funcionamiento de los aerogeneradores, si se presentan casos extremos por una baja o alta temperatura los componentes mecánicos de la turbina simplemente dejan de funcionar.

El rango de temperatura en donde se presenta una operación estándar del aerogenerador usualmente es de  $-20$  [°C] a  $40$  [°C], algunas pueden tener un funcionamiento bajo a  $-30$  [°C] y a  $45$  [°C] e incluso a  $50$  [°C]. (Siemens Gamesa, 2016)



*Figura 12.0: Parque eólico “Maesgwyn”, Glynneath, Gales, Reino Unido, en donde las temperaturas en invierno oscilan entre los  $-10$  [°C] y los  $15$  [°C]. Fuente: Simon Rowe, 2017.*

#### **4.2.2. Ambientales**

- **Ruido**

El sonido es la alteración y fluctuación de ondas de presión del aire, que se desplazan a través de los distintos estados de la materia y van perdiendo energía conforme van viajando.

El ruido simplemente se puede definir como un sonido no deseado, una de sus propiedades es la intensidad o nivel de presión acústica, que se expresa en decibeles [dB] (Salvato, Nemerow, & Agardy, 2003), un decibel es una unidad

adimensional, relativa y representa la décima parte de un belio [B], precisamente por esas características necesita referenciarse para obtener valores absolutos y para el ruido se mide con la ponderación A. (GreenFacts Scientific Board, s.f.)

Desde que la energía eólica se propuso como un modo no contaminante para la obtención de energía eléctrica el ruido se ha presentado como un obstáculo para su implementación y no tanto por los efectos mismos del fenómeno, sino por las personas que están en contra de este tipo de energía (American Wind Energy Association, 2017).

Los aerogeneradores pueden producir ruido de dos maneras, el ruido *mecánico* proviene del generador, la caja multiplicadora y las conexiones, el *aerodinámico* es generado en las aspas a consecuencia de los flujos de aire que inciden y pasan alrededor de ellas (Siemens Gamesa, 2016). El ruido mecánico siempre va a presentarse pero puede disminuirse mejorando el diseño, en donde entran variables como los materiales del engranaje, el tipo de generador, insonorización en la góndola, etc. (Manwell, McGowan, & Rogers, 2009), sin embargo, el predominante será el aerodinámico (National Research Council of The National Academies, 2007).

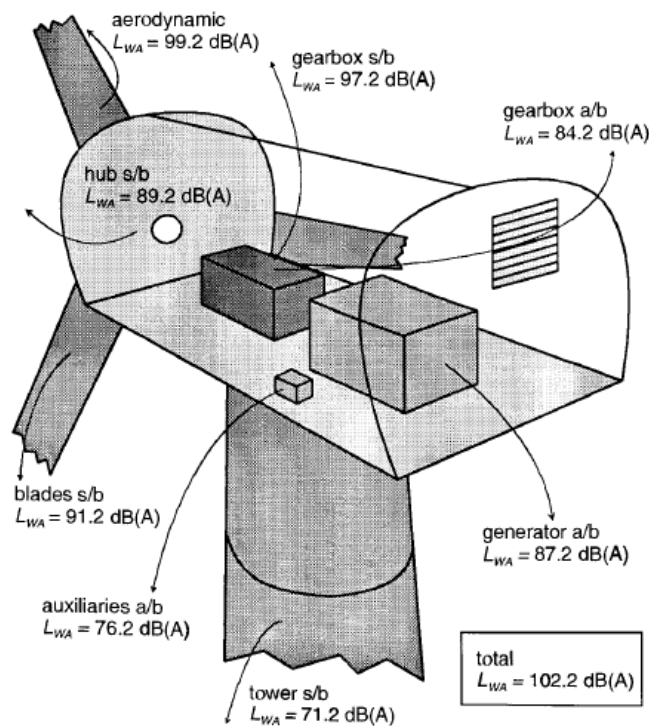


Figura 12.1: Intensidad en decibelios de cada componente y el total producido por un aerogenerador.

Fuente: Wagner, Bareiß, & Guidati, 1996.

La Figura 12.1 muestra el ruido producido por algunos componentes mecánicos y el aerodinámico, mostrando un total de 102.2 [dBA], la medición del ruido se hace por medio de un sonómetro que está compuesto de un micrófono, filtros, detectores y una pantalla (BUREAU VERITAS, 2008), por lo que al no tener a disposición un sonómetro, un aerogenerador y las condiciones necesarias para hacer las mediciones tomaremos como datos los niveles de sonido presentados, lo que sí se puede comprobar es la suma de los decibeles mediante la siguiente ecuación:

$$dBA_T = 10 \log_{10} \left( \sum 10^{\frac{dBA_i}{10}} \right) \quad \dots \text{Ec.2}$$

El Nivel de Presión Acústica de todas esas fuentes de energía sería:

$$NPA_T = 10 \log_{10} \left( 10^{\frac{99.2}{10}} + 10^{\frac{97.2}{10}} + 10^{\frac{89.2}{10}} + 10^{\frac{97.2}{10}} + 10^{\frac{89.2}{10}} + 10^{\frac{91.2}{10}} + 10^{\frac{84.2}{10}} + 10^{\frac{76.2}{10}} + 10^{\frac{87.2}{10}} + 10^{\frac{71.2}{10}} \right)$$

$$NPA_T = 102.19 \approx 102.2 \text{ [dBA]}$$

Tal como se había mencionado antes, el ruido aerodinámico (99.2 [dBA]) es superior al mayor de los mecánicos (97.2 [dBA]), aunque 102.2 [dBA] es un dato extraído de un libro de 1996, las fichas técnicas de los productos de las empresas afiliadas a la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE) ofrecen aerogeneradores desde los 2 [MW] hasta los hasta los 5 [MW], para onshore en el ruido máximo varía de los 103.9 [dBA] hasta los 105 [dBA], siendo que los offshore de 6 [MW] emiten hasta 109 [dBA], tal vez parezca extraño que el ruido haya aumentado con el paso de los años, suponiendo que la tecnología que tenemos ahora es mucho más eficiente que la de hace más de veinte años, pero hay que considerar que ese avance ha permitido instalar aerogeneradores cada vez más grandes, que producen mucha más energía eléctrica y por lo tanto más ruido.

La determinación de la distancia a la que debe estar situado un parque eólico de los asentamientos humanos debido al ruido está basada (en la mayoría de los países que tienen reglamento para la energía eólica) en límites máximos permisibles, aunque a veces cada país recomienda una distancia mínima en

donde generalmente se asegura el cumplimiento de las pautas referentes a ruido.

Varios países especifican una distancia mínima entre el parque eólico y los hogares (véase Figura 12.2), aunque algunos gobiernos dan un rango de distancias, la mínima (barra azul) y la máxima (barra verde), siendo el promedio de la mínima distancia es de 470 [m] y la promedio máxima 700 [m] exceptuando a Escocia con su distancia máxima de 2000 [m] (Minnesota Department of Commerce, 2011).

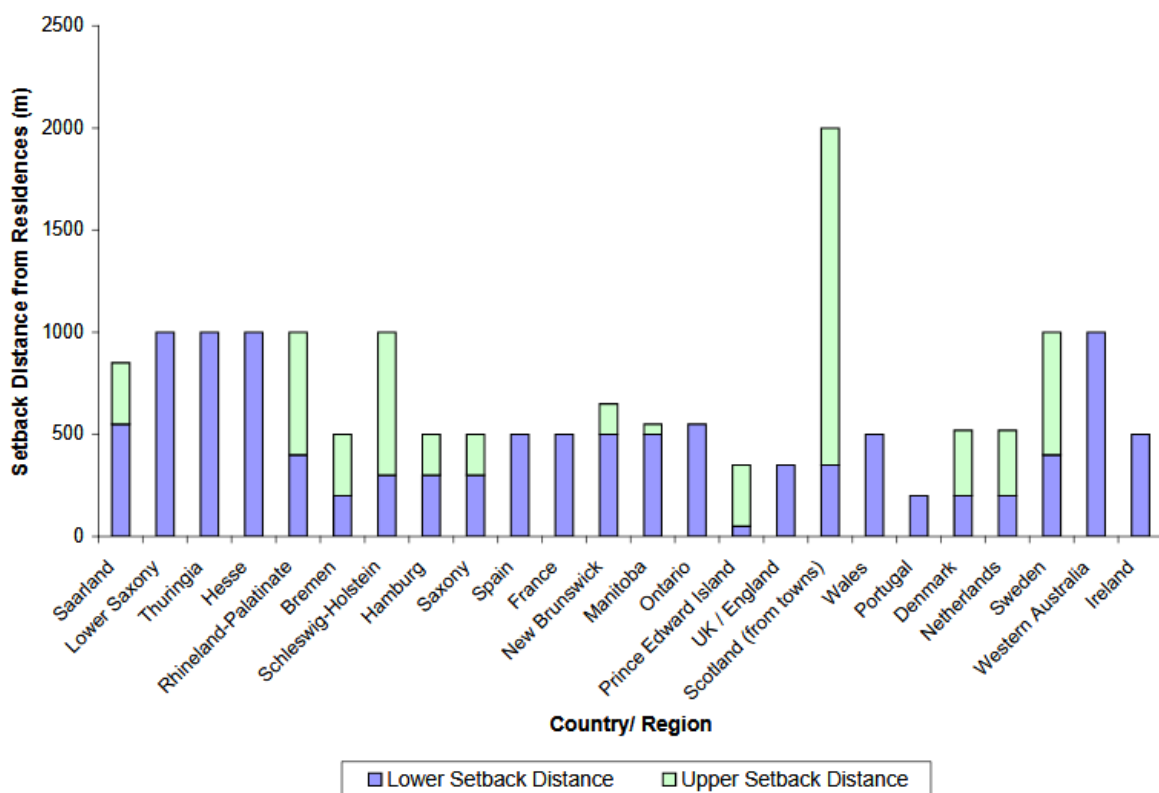


Figura 12.2: Distancias mínimas y máximas de los parques eólicos y las residencias.  
Fuente: Minnesota Department of Commerce, 2011.

Desafortunadamente México no cuenta legislación enfocada específicamente a la energía eólica, pero sí tiene relacionada a la emisión de ruido, según la Norma Oficial Mexicana NOM-081-ECOL-1994 establece los siguientes límites máximos permisibles para dos horarios:

Tabla 3.1: Límites máximos permisibles de emisión de ruido de fuentes fijas en México.  
Fuente: NOM-081-ECOL-1994.

Horario	Límite máximo permisible
de 6:00 a 22:00	68 [dBA]
de 22:00 a 6:00	65 [dBA]

En comparación con otros países, por ejemplo, en Alemania los límites de ruido se clasifican de acuerdo al área, si es residencial, comercial, rural o mixto, en general para el día se tiene un rango de 50 - 65 [dBA] y para la noche de 35 - 50 [dBA], tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.2: Límites máximos de ruido en [dBA]. Fuente: Shepherd & Zhang, 2017.

País	Comercial	Mixto	Residencial	Rural
<b>Dinamarca</b>	-	-	40	45
<b>Alemania</b>				
día	65	60	55	50
noche	50	45	40	35
<b>Países Bajos</b>				
día	-	50	45	40
noche	-	40	35	30

Para determinar la mínima distancia a la que las poblaciones deben estar de un parque eólico, se utilizó la ecuación para la propagación de los sonidos a la distancia (Zhang, 2015):

$$L_p = L_w - 10 \log_{10}(2\pi R^2) - \alpha R \quad \dots \text{Ec.3}$$

Donde:

$L_p$  = Nivel de presión acústica al receptor [dBA].

$L_w$  = Nivel de presión acústica de la fuente [dBA].

$R$  = Distancia desde la fuente [m].

$\alpha$  = Coeficiente de absorción acústica dependiente de la frecuencia  $\alpha = 0.005$  [dBA/m].

Tomando como referencia al aerogenerador onshore más grande del mercado en el momento de 7.580 [MW], que alcanza un nivel máximo de presión acústica de 108.5 [dBA], redondeándolo a 109 [dBA] e ingresándolo a la ecuación nos arroja los siguientes resultados:

*Tabla 3.3: Distancias a las que se presentan los niveles de presión acústica para un aerogenerador de 109 [dBA]. Fuente: Elaboración propia*

$R$ [m]	$L_p$ [dBA]
20	74.90
40	68.78
60	65.16
80	62.56
100	60.52
120	58.83
140	57.40
160	56.14
180	55.01
200	54.00
220	53.07
240	52.21
260	51.42
280	50.68
300	49.98
320	49.32
340	48.69
360	48.09
380	47.52
400	46.98
420	46.45
440	45.95
460	45.46
480	44.99
500	44.54

Usando el valor para el día de 65 [dBA] ya que es el límite permisible menor y por lo tanto el más desfavorable de los dos indicados por la NOM-081-ECOL-1994, de acuerdo a la Tabla 3.4 se presenta entre los 60 [m] y 80 [m].

Tabla 3.4: Distancias a las que se presentan los niveles de presión acústica para un aerogenerador de 109 [dBA] en el rango de 60 [m] a 80 [m]. Fuente: Elaboración propia.

R [m]	L <sub>p</sub> [dB(A)]
60	65.16
61	65.01
62	64.86
63	64.72
64	64.57
65	64.43
66	64.30
67	64.16
68	64.03
69	63.90
70	63.77
71	63.64
72	63.51
73	63.39
74	63.26
75	63.14
76	63.02
77	62.90
78	62.79
79	62.67
80	62.56

El valor se presenta a los 61 [m], específicamente a los 61.1 [m], por lo que para razones prácticas se tomará 65 [m] como la distancia mínima en la que un aerogenerador debe estar de una localidad para el cumplimiento del límite máximo permisible según la NOM-081-ECOL-1994.

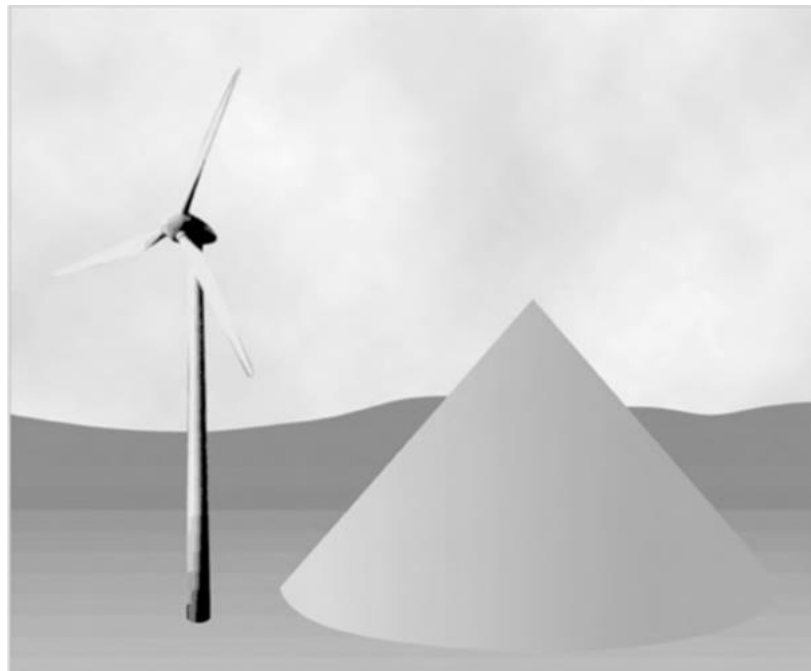
- **Contaminación visual**

El impacto visual que crea un parque eólico onshore sobre el ambiente es usualmente objeto de crítica, algunas personas señalan la degradación de la calidad del paisaje como un efecto inminente y por supuesto no deseado, sin embargo, hay que señalar que la obtención de energía eléctrica a partir de la eólica afecta mucho menos la imagen de un lugar que si se usaran combustibles fósiles e incluso otras energías renovables, tales como la energía solar.



Por ejemplo, una mina de carbón destruye totalmente el sitio y deja daños irreparables al ecosistema en donde se encuentra (véase Figura 12.3), siendo que un parque eólico cubre con los aerogeneradores y demás obras civiles como las vías de acceso sólo del 1% al 5% del terreno que le es asignado ((BUN-CA), 2002), mientras que el resto puede usarse de acuerdo a los intereses del dueño del lugar, por ejemplo la agricultura y ganadería (Seifried & Witzel, 2010), el cableado eléctrico es subterráneo desde el aerogenerador hasta la subestación eléctrica para no alterar el entorno en el que se ubiquen, los aerogeneradores deben ser de color blanco con sólo el logotipo del fabricante o dueño en la góndola y la clave de cada unidad en la torre, además de realizar trabajos de restauración de la vegetación y suelo si al término de la vida útil del parque no se decide repotenciarse.

De acuerdo a lo anterior, podemos de dejar de considerar a la contaminación visual como algo subjetivo y convertir la imagen de un aerogenerador en sinónimo de progreso y conciencia ambiental.



*Figura 12.3: Un aerogenerador de 1.5 [MW] y altura de 67 [m] al buje produce en 20 años 76 millones de [kW], la misma energía se produce quemando 84 mil toneladas de carbón que apilados crearían una pirámide de circular de 80 [m] de diámetro y 50 [m] de alto. Fuente: Seifried & Witzel, 2010.*

## • Fauna y flora

La fauna y flora pueden haber sido perturbadas previamente si en el lugar se realizan o realizaron actividades agropecuarias, teniendo como consecuencia el desplazamiento de la fauna y la desaparición de la capa vegetal zona, no en todos los casos se pueden presentar estas condiciones, pero son las más comunes por lo que para cada proyecto se deben realizar estudios que registren los posibles impactos.

La fauna de interés principal son los invertebrados, mamíferos, especies de importancia económica, herpetofauna (reptiles y anfibios), fauna edáfica (invertebrados que habitan en el suelo), especies en peligro de extinción y la fauna nociva (ratas y cucarachas), esta última para evitar su reproducción por la acumulación de residuos.

### *Aves*

De acuerdo con La Real Sociedad para la Protección de Aves (The Royal Society for the Protection of Birds), *“las aves pueden ser dañadas por un parque eólico de tres maneras: alteración, pérdida de hábitat y colisión”* (RSPB, 2018). Los riesgos pueden reducirse considerablemente con una buena planeación de la ubicación de parques eólicos, la RSPB recomienda mantenerlos alejados de las rutas importantes de alimentación, reproducción, migración y reposo.

Durante el vuelo las aves migratorias mantienen una distancia de 150 [m] desde el suelo o mar (IWEA, 2018), una altura superior a la mayoría de los aerogeneradores actuales destinados a parques onshore, pero hay que considerar que no todo el tiempo las aves se mantendrán a esa altura ya que México cuenta con hábitats que dan refugio a millones de aves que cada año migran principalmente de Estados Unidos y Canadá, para ello la SEMARNAT tiene identificadas las Áreas Importantes para la Conservación de las Aves (AICAS) como herramientas para su protección.

### *Murciélagos*

Los murciélagos son una parte importante de los ecosistemas al ser dispersores de polen, semillas y controlar plagas de insectos que pueden afectar las

cosechas, por lo que la fatalidad de murciélagos a causa de aerogeneradores es un tema de preocupación a la hora de desarrollar un proyecto eólico.

En la mayoría de los casos los cuerpos no tienen heridas visibles a causa de impacto, por lo que los científicos creen que el descenso de la presión cerca de las aspas del aerogenerador provoque expansión de los pulmones y hemorragias internas, siendo necesario que en el lugar de estudio por medio de radares o equipo acústico se monitoreen el comportamiento y distribución de los murciélagos que habitan y migran en el área. Sin embargo la mortalidad generada por aerogeneradores es insignificante a la que generan el “Síndrome de la nariz blanca”, ventanas y gatos (Buxton, 2017).

### *Ganado*

Ganado bovino, equino y ovino no presentan molestias relacionadas con la presencia y el ruido de un aerogenerador (IWEA, 2018), por lo que el ganado puede incluso criarse dentro del terreno designado para el parque eólico.

#### • **Sombra parpadeante**

Cuando un aerogenerador se encuentra entre el sol a un ángulo bajo, por ejemplo, después del amanecer o antes del atardecer, sus aspas producen una sombra que junto con la rotación de las mismas generan un efecto de parpadeo que puede ser molesto para los habitantes (IWEA, 2018). Otro problema relacionado con esta situación es la posibilidad que el parpadeo pueda provocar ataques de epilepsia a las personas que sufran de epilepsia fotosensitiva, aunque es un tipo de epilepsia rara, cada vez más videojuegos, películas y videos muestran avisos que el material en cuestión puede provocar dichos ataques, sin embargo, la frecuencia del parpadeo es de 0.6 [Hz] a 1.0 [Hz], siendo que los ataques se pueden presentar con frecuencias superiores a 10 [Hz] (National Research Council of The National Academies, 2007) por lo que no se considera un peligro para las personas con epilepsia fotosensitiva. Por otro lado, el parpadeo puede distraer a conductores y causar accidentes, aunque el tamaño de la sombra depende de la altura de la torre, el tamaño del rotor y la latitud en la que se encuentra el aerogenerador (por el ángulo del sol en ciertas temporadas) no es un problema a una distancia de 1,000 [ft] (304.8 [m])

(Barrera-Hernández, Barton, Godden, Lucas, & Rønne, 2016), de igual manera la normativa irlandesa recomienda que las turbinas se encuentren a una distancia mínima de 300 [m] de los caminos (National Research Council of The National Academies, 2007).

- **Interferencia electromagnética**

Una cuestión preocupante para las comunidades cercanas a los parques eólicos, es la posible interferencia en la recepción de señales de radio y televisión, sin embargo, este fenómeno sólo ocurre cuando las aspas son de acero u alguna otra aleación de metales, actualmente las aspas son de combinaciones de plásticos o fibra de vidrio (Jha, 2010), por lo que no es un aspecto preocupante al momento de planear la ubicación.

- **Hidrografía**

La presencia de cuerpos de agua en cualquier proyecto de ingeniería civil es una cuestión que debe tomarse mucho en cuenta, nuestra necesidad de agua se sobrepone a la de energía convirtiéndola en un recurso valioso que se contamina en el proceso de extracción de petróleo, gas o por una mala planeación en la construcción de un parque solar, eólico, etc.

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) en el artículo 3, fracción XLVII define "Ribera o Zona Federal" como *"Las fajas de diez metros de anchura contiguas al cauce de las corrientes o al vaso de los depósitos de propiedad nacional, medidas horizontalmente a partir del nivel de aguas máximas ordinarias. La amplitud de la ribera o zona federal será de cinco metros en los cauces con una anchura no mayor de cinco metros..."*.

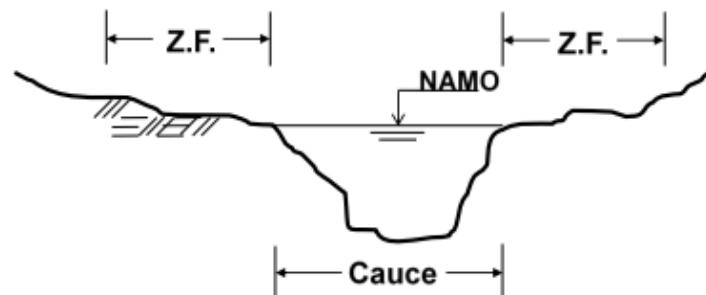


Figura 12.4: Descripción gráfica de la faja de zona federal (Z.F.) y cauce de un río.  
Fuente: Peñaloza Rueda & González Verdugo.

### 4.2.3. Sociales

- **Arrendamiento**

El desarrollador tiene dos opciones para obtener derecho sobre la tierra en la que pretende instalar el parque eólico, comprar o arrendar, la primera no es tan común por el tamaño de capital que debería invertirse al principio, no se necesita ocupar toda el área, son pocas las personas dispuestas a vender sus tierras y mantener el control a largo plazo no es de interés para el desarrollador, por otra parte el arrendamiento permite distribuir los pagos a lo largo del tiempo establecido en el contrato, disponer del lugar el número de años conveniente para la obtención de ganancias y bajar los costos de la tierra al permitir a los dueños desempeñar otras actividades dentro del lugar.

El arrendar propiedades para el desarrollo de un proyecto eólico representa la posibilidad de un ingreso mayor y diferente a lo que usualmente se obtiene del terreno, la diversificación de ingresos, el mantener la propiedad de la tierra y la posibilidad de seguir con sus actividades ganaderas y/o agrícolas gracias a la poca área que ocupan los aerogeneradores son condiciones que pueden llegar a ser muy atractivas para el o los dueños y considerarse para la firma de contratos.

Antes de iniciar con la fase de estudios previos es necesario que el desarrollador firme el contrato que le permitirá realizarlos, es llamado “Contrato de Opción” y le permite llevar a cabo las pruebas previas y rentarlo si el proyecto se aprueba, el pago del contrato de opción es muy inferior al de arrendamiento ya que el área ocupada en sitio sólo corresponde a las torres meteorológicas.

Los puntos más importantes de un contrato de arrendamiento son: *el tiempo en que es vigente*, usualmente 20 a 50 años, siendo que la vida útil de los aerogeneradores son de 15 a 25 años por lo que si el contrato supera ese tiempo quiere decir que al final del ciclo del proyecto se instalará otro en el mismo lugar (Winrock International, 2004), los contratos que superan por mucho la vida útil del equipo no son muy usuales ya que incluyen el riesgo que el primer proyecto no dé los resultados esperados, por lo que se opta a un contrato menor con opción a ampliación.

*El área arrendada* suele ser un tópico de discusión y malentendidos entre el desarrollador y el arrendatario si no se especifican claramente términos

importantes como colindancias, ubicación de los aerogeneradores e instalaciones eléctricas, caminos de acceso, etc.

Por último, *el pago del arrendamiento* debe ser muy específico sobre las cuotas, fechas de pago, tipo de moneda (en algunas partes del país se cotiza en dólares estadounidenses) y demás elementos que conformen su estructura.

- **Desarrollo económico**

Un parque eólico genera muchos cambios económicos positivos en la zona, siendo el primer beneficiado el o los propietarios de la tierra en donde se ubique y el gobierno local ya que obtiene ganancias de los impuestos sobre la propiedad y el permiso de construcción. El proyecto genera empleos de manera directa con la contratación de población local durante la construcción, operación y mantenimiento, el número de personal varía dependiendo del tamaño del proyecto, las habilidades y capacitación obtenida. Los empleos se generan de igual manera en la manufactura de los componentes de los aerogeneradores, una planta de torres genera 100 empleos al año en el país (Winrock International, 2004).

De manera indirecta se beneficia a la economía local con la compra de insumos, renta de maquinaria para la construcción, compra de alimentos y artículos de uso personal para los trabajadores y de servicios por parte de abogados, contadores, médicos, etc., proporcionando un mayor nivel adquisitivo para las familias beneficiadas (Winrock International, 2004).

La creación o pavimentación de caminos en la localidad para el paso de maquinaria y vehículos, y demás cambios en la infraestructura influyen de manera positiva en la calidad de vida de los pobladores.

- **Conflictos sociales**

La gran parte de los proyectos eólicos se desarrollan en zonas rurales, en donde la población indígena se concentra en mayor proporción y el analfabetismo es predominante, por lo que los conflictos sociales suelen ser frecuentes ya que los desarrolladores pueden aprovecharse de su ignorancia para obtener ventajas, la tensión con los pobladores puede presentarse a no llegar a un acuerdo referente al pago de la renta del terreno, usualmente por las bajas tarifas que

ofrecen los desarrolladores, en el mundo aproximadamente el 1% al 5% de los ingresos brutos de un parque eólico se destina al arrendamiento de la tierra, en Europa es el 3.9% y en México del 0.025% al 1.53% (SEGOB, 2015), además que las personas afectadas apuntan de abusos, falta de transparencia y falsificación de firmas en las asambleas ejidales en el momento de la firma de los contratos de arrendamiento, esto suele suceder a falta de leyes u organismos que regulen estos casos.

De igual manera la ignorancia acerca de este tipo de proyectos pone a la población en contra de su desarrollo, ya que lo pueden ver como una amenaza para sus tierras, cultivos, biodiversidad y costumbres, por lo que es necesario que los desarrolladores mantengan una buena comunicación con la comunidad y expliquen las ventajas y desventajas para evitar malentendidos.

- **Sitios arqueológicos**

México tiene una gran herencia cultural por parte de civilizaciones que lo habitaron hace cientos de años, dejando asentamientos humanos dispersos por todo el país, así que como estudio previo al igual que el viento, se pueden visualizar en mapas físicos o digitales los restos arqueológicos descubiertos, sin embargo existe la posibilidad que no sean visibles a simple vista en el lugar de proyecto, por lo que es necesario obtener autorización por parte del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) para realizarlo.

### 4.3. Selección de los sitios con mayor potencial eólico

#### 4.3.1 Metodología

Como ya se mencionó, los modelos de datos de un SIG se dividen en dos: vectorial y ráster. La representación de ellos en un software es por medio de capas, las capas vectoriales y ráster se encuentran en su mayoría disponibles de manera gratuita para su uso en portales de internet privados o de gobierno.

A continuación, se presentan las capas vectoriales y ráster utilizadas para el análisis:

#### *Sociales e infraestructura*

- **Arqueología**

Capa vectorial que identifica la ubicación de los 150 diferentes rasgos arqueológicos más importantes del país, como pueden ser pinturas rupestres, sitios arqueológicos y zonas arqueológicas.

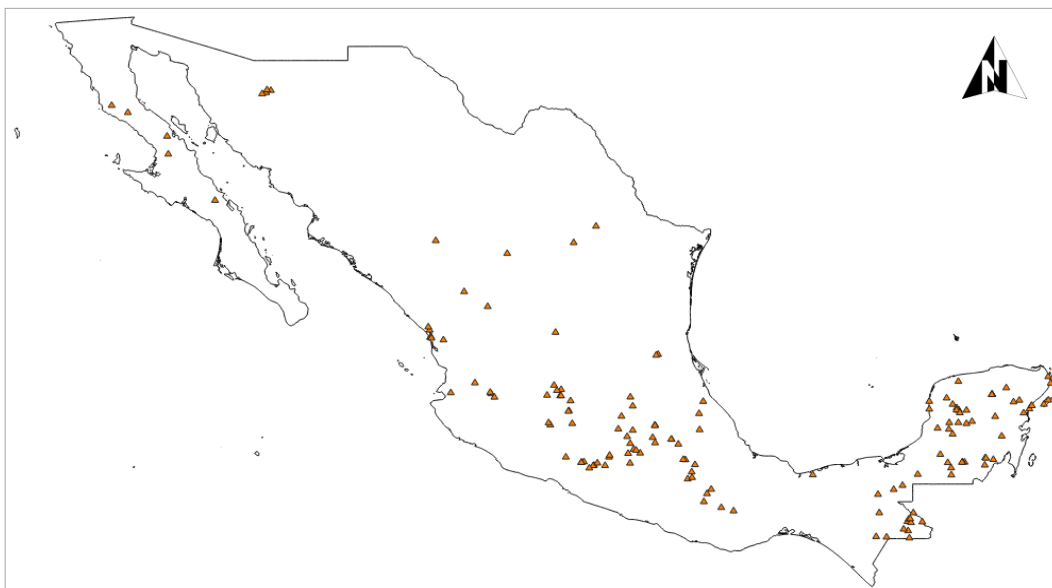
#### Metadatos:

Autor: Dirección General de Geografía – INEGI.

Fecha de publicación: 03-07-2000.

Escala: 1:1'000,000.

Formato: Vectorial. Shapefile.



*Figura 13.0: Rasgo arqueológico más importante de México. Fuente: INEGI, 2000.*



- **Localidades**

Capa vectorial que identifica las 192,245 localidades habitadas en el país.

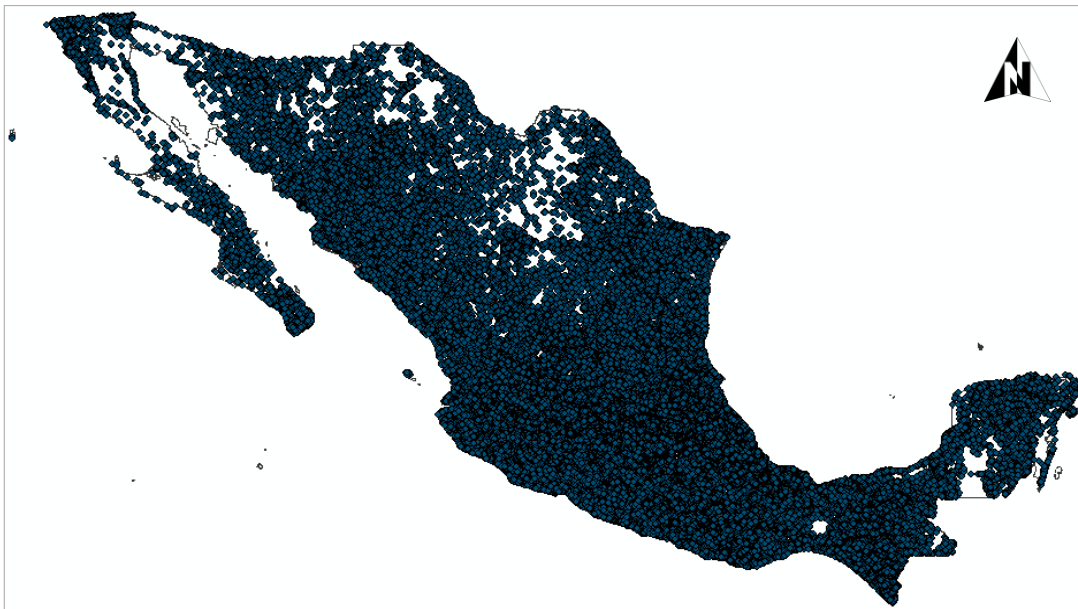
Metadatos:

Autor: INEGI, (2010). 'Localidades de la República Mexicana, 2010'. Obtenido de Principales resultados por localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2010. Editado por Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México, D.F.

Fecha de publicación: 24-01-2012.

Datum: WGS84.

Formato: Vectorial. Shapefile.



*Figura 13.1: Localidades de la República Mexicana. Fuente: INEGI, 2010.*

- **Población indígena**

Capa vectorial que muestra información acerca de la población indígena del país a nivel municipal.

Metadatos:

Autor: CONABIO, (2012). 'Población indígena en México por municipio, 2010'. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Datos estadísticos del 2010, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). México D.F.

Fecha de publicación: 27-04-2012.

Escala: 1:250,000.

Datum: WGS84.

Formato: Vectorial. Shapefile.

Al ingresar la capa no muestra alguna clasificación de la información que contiene, sólo la división municipal, por lo que se procedió a hacer lo siguiente:

De acuerdo a la descripción dada en la página de CONABIO, la capa tiene las siguientes variables, lo que se encuentra en paréntesis se refiere a sus nombres en la tabla de atributos: Población total (POTO10), población de 3 años y más (P3T10), población de 3 años y más que habla una lengua indígena (P3I10), población monolingüe (MON10), población bilingüe (BIL10) y población que no habla lengua indígena (NEI10). Para identificar de manera más eficiente la cantidad de población indígena se creó un nuevo campo en la tabla de atributos llamado “PORCENTAJE\_P3I10” haciendo referencia al porcentaje de población de 3 años y más que habla una lengua indígena.

Para su representación visual se clasificó de manera manual de acuerdo al rango de porcentaje, del 0 al 10%, del 10.000001 al 25%, del 25.000001 al 50%, del 50.00001 al 75% y del 75.000001 al 100%:

Símbolo	Valores
<input checked="" type="checkbox"/> 	0.00 - 10.00
<input checked="" type="checkbox"/> 	10.00 - 25.00
<input checked="" type="checkbox"/> 	25.00 - 50.00
<input checked="" type="checkbox"/> 	50.00 - 75.00
<input checked="" type="checkbox"/> 	75.00 - 100.00

Figura 13.2: Leyenda de la capa “Población indígena en México por municipio”. Fuente: Elaboración propia.

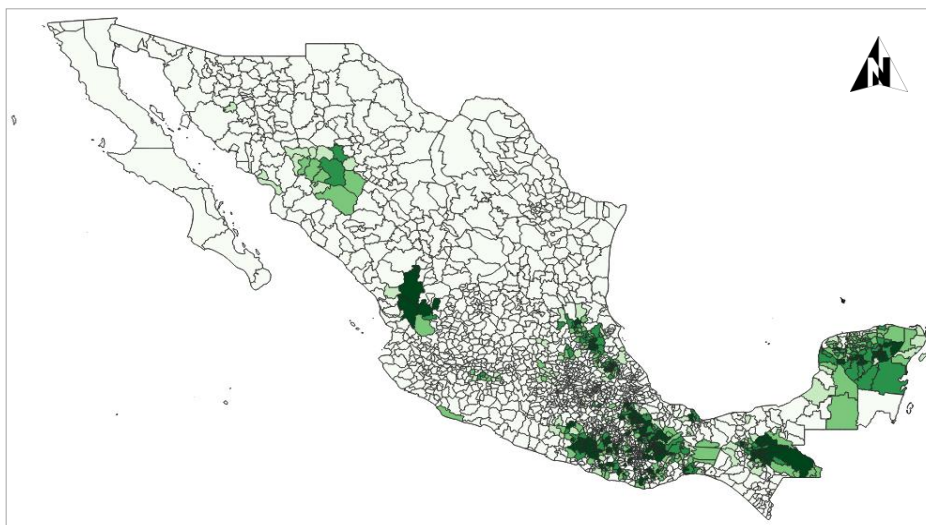


Figura 13.3: Población indígena en México por municipio. Fuente: CONABIO, 2012.

- **Vías de comunicación**

Capa que contiene las 73545 vías de comunicación de la SCT, incluye las pavimentadas, revestidas, brechas, libres divididas y terracerías

Metadatos:

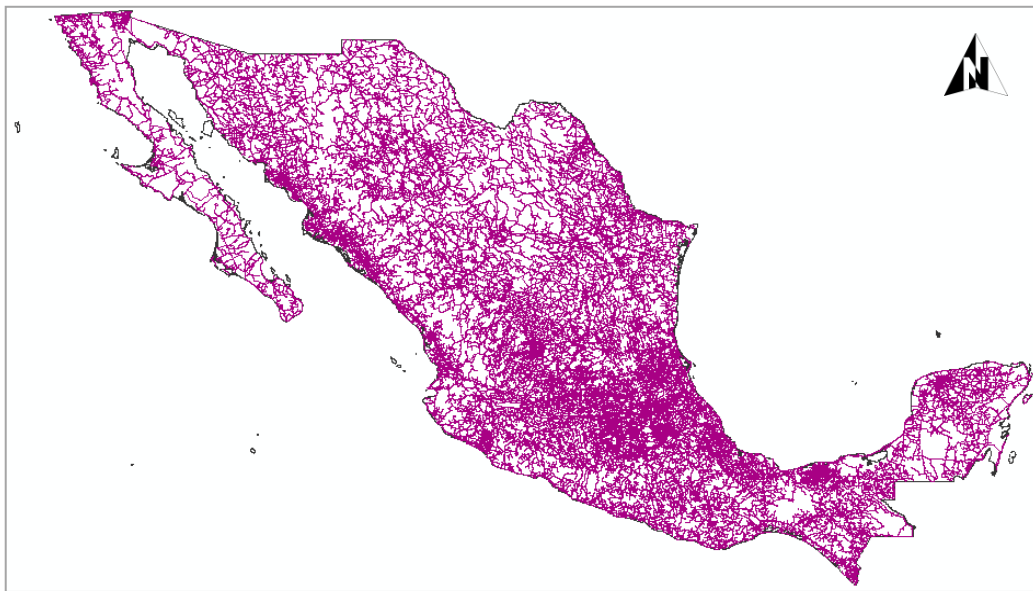
Autor: SCT, (01/01/2012). 'Red de vías de comunicación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2012', escala: 1:250000. edición: 1a. Secretaria de Comunicaciones y Transporte. Distrito Federal Benito Juárez.

Fecha de publicación: 03-11-2014

Escala: 1:250,000.

Datum: WGS84.

Formato: Vectorial. Shapefile.



*Figura 13.4. Red de vías de comunicación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Fuente: SCT, 2012.*

- **Aeropuertos**

Capa que muestra la ubicación de los 79 aeropuertos nacionales e internacionales que se encuentran en operación en México.

Metadatos:

Autor: Dirección General de Geografía – INEGI.

Fecha de publicación: 03-07-2000.

Escala: 1:1'000,000.

Formato: Vectorial. Shapefile.

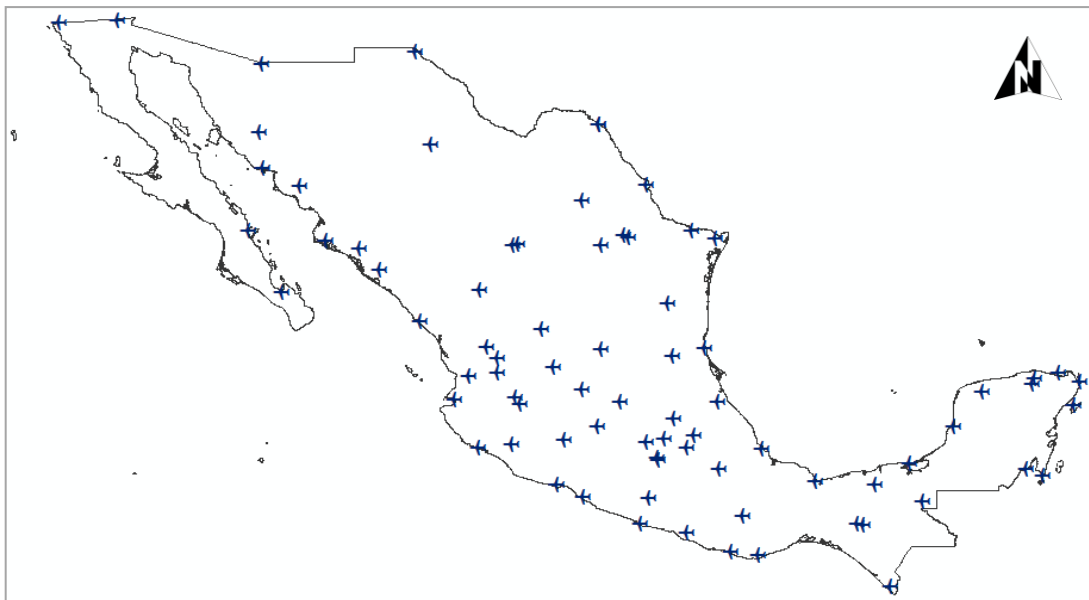


Figura 13.5. Aeropuertos nacionales e internacionales de México. Fuente: INEGI, 2000.

## *Ambientales*

### • **Sitios RAMSAR**

El 3 de febrero de 1971, 18 países firmaron el tratado “Convención relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas” en la ciudad de Ramsar, Irán. La misión de la convención es *“la conservación y el uso racional de los humedales mediante acciones locales y nacionales y gracias a la cooperación internacional, como contribución al logro de un desarrollo sostenible en todo el mundo”*, la Convención considera como humedales *“Las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”* (The Ramsar Convention Secretariat, 2014).

México es parte de la Convención con 142 sitios RAMSAR en el país.

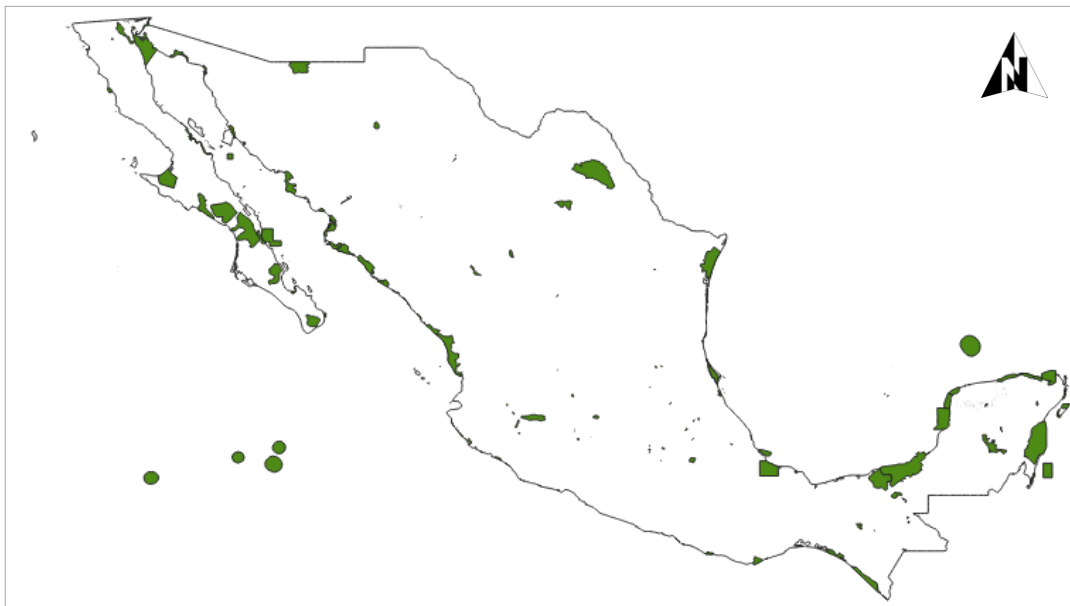
Metadatos:

Autor: CONANP, (29/02/2016). 'Sitios RAMSAR de México 2016', edición: 1a. Comisión Nacional de Áreas naturales Protegidas. Ciudad de México, México.

Fecha de publicación: 27-07-2016.

Datum: WGS84.

Formato: Vectorial. Shapefile.



*Figura 13.6. Sitios RAMSAR de México. Fuente: CONANP, 2016.*

• **Áreas de importancia para la conservación de las aves (AICAS)**

Capa vectorial que identifica las 283 Áreas de Importancia para la Conservación de Aves.

Metadatos:

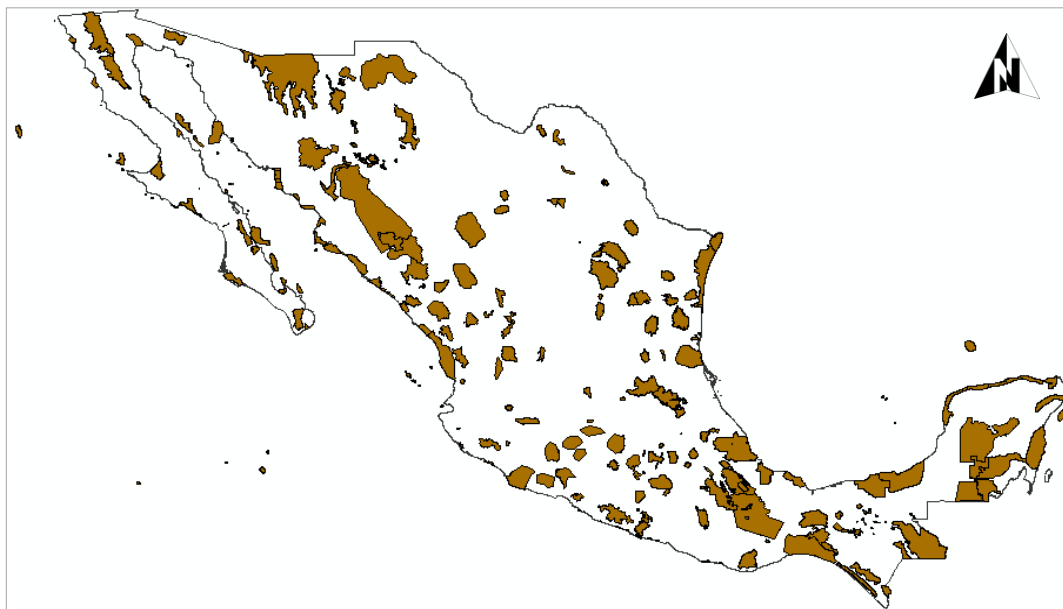
Autor: CIPAMEX (CONABIO), (17/07/2015). 'Áreas de importancia para la conservación de las aves, 2015'. Sección Mexicana del Consejo Internacional para la Preservación de las Aves. Financiado por CONABIO-FMCN-CCA. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, D.F.

Fecha de publicación: 17-07-2015

Escala: 1:250,000.

Datum: WGS84.

Formato: Vectorial. Shapefile.



*Figura 13.7. Áreas de importancia para la conservación de las aves. Fuente: CIPAMEX, 2015.*

### • **Áreas Naturales Protegidas Federales de México (ANP)**

Capa vectorial que muestra las 182 Áreas Naturales Protegidas federales del país.

Metadatos:

Autor: SEMARNAT-CONANP, (01/11/2017). '182ANP\_Geo\_ITRF08\_Noviembre\_2017', edición: 2017. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Ciudad de México, México.

Fecha de publicación: 06-12-2017.

Datum: WGS84.

Formato: Vectorial. Shapefile.

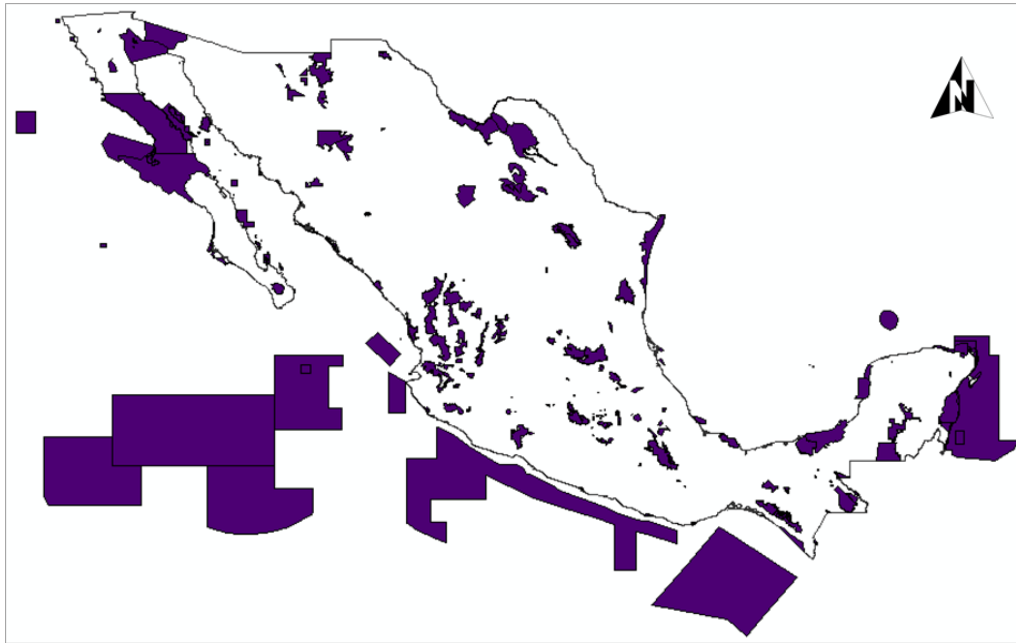


Figura 13.8. Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Fuente: SEMARNAT-CONANP, 2017.

## • Murciélagos

El país tiene una gran diversidad de estos mamíferos, con 140 especies de las cuales 38 se encuentran en riesgo según la NOM-059-SEMARNAT-2010. A continuación, se presentan las capas vectoriales de las 4 especies de murciélagos en peligro de extinción.

### Murciélago platanero (*Musonycteris harrisoni*)

#### Metadatos:

Autor: CONABIO, (2010). 'Musonycteris harrisoni (murciélago platanero). Distribución conocida', Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Datos obtenidos del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB), registros comprendidos entre los años de 1959 y 1985 (registros no continuos). México.

Fecha de publicación: 04-08-2010.

Escala: 1:1'000,000.

Datum: WGS84.

Formato: Vectorial. Shapefile.

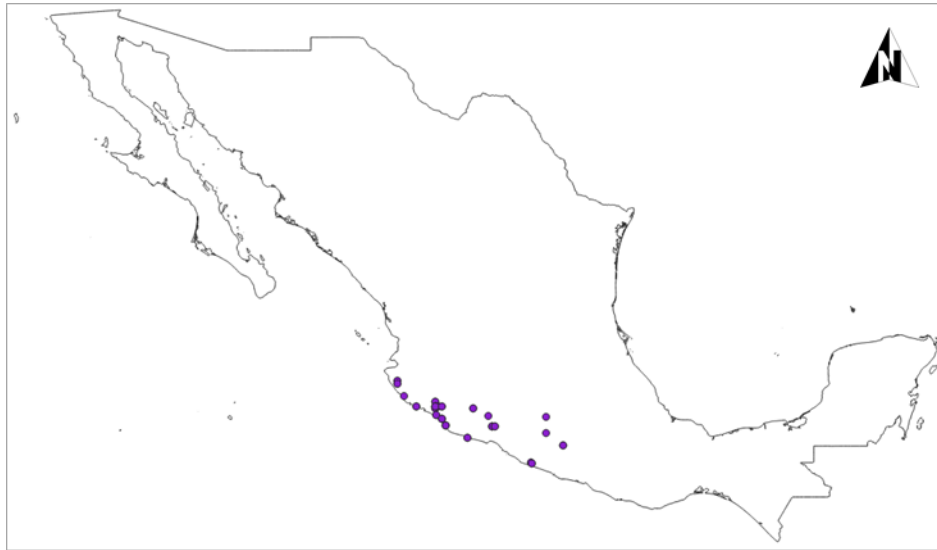


Figura 13.9. *Musonycteris harrisoni* (murciélago platanero). Distribución conocida. Fuente: CONABIO, 2010.

### Vampiro falso de Linneo (*Vampyrum spectrum*)

#### Metadatos:

Autor: CONABIO, (2010). 'Vampyrum spectrum (vampiro falso de linneo). Distribución conocida', Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Datos obtenidos del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB), registros comprendidos entre los años de 1896 y 1994 (registros no continuos). México.

Fecha de publicación: 06-08-2010.

Escala: 1:1'000,000.

Datum: WGS84.

Formato: Vectorial.  
Shapefile.

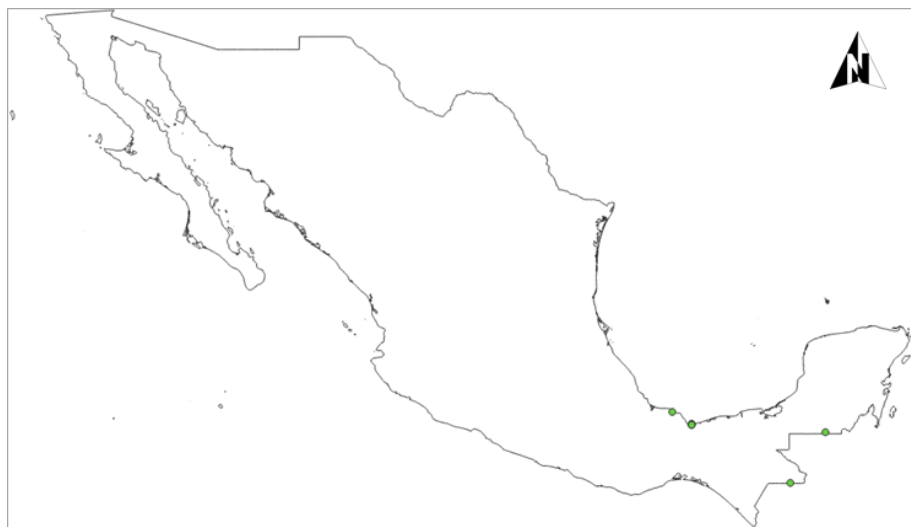


Figura 13.10. *Vampyrum spectrum* (vampiro falso de linneo). Distribución conocida. Fuente: CONABIO, 2010.



## Miotis cabeza plana (*Myotis planiceps*)

### Metadatos:

Autor: Ceballos, G., S. Blanco, C. González y E. Martínez (2006). 'Myotis planiceps (Murciélago). Distribución potencial'. Extraído del proyecto DS006 'Modelado de la distribución de las especies de mamíferos de México para un análisis GAP'. Con un tamaño de píxel: 0.01 grados decimales. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Financiado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México.

Fecha de publicación: 22-09-2010

Escala: 1:1'000,000.

Datum: WGS84.

Formato: Vectorial. Shapefile.

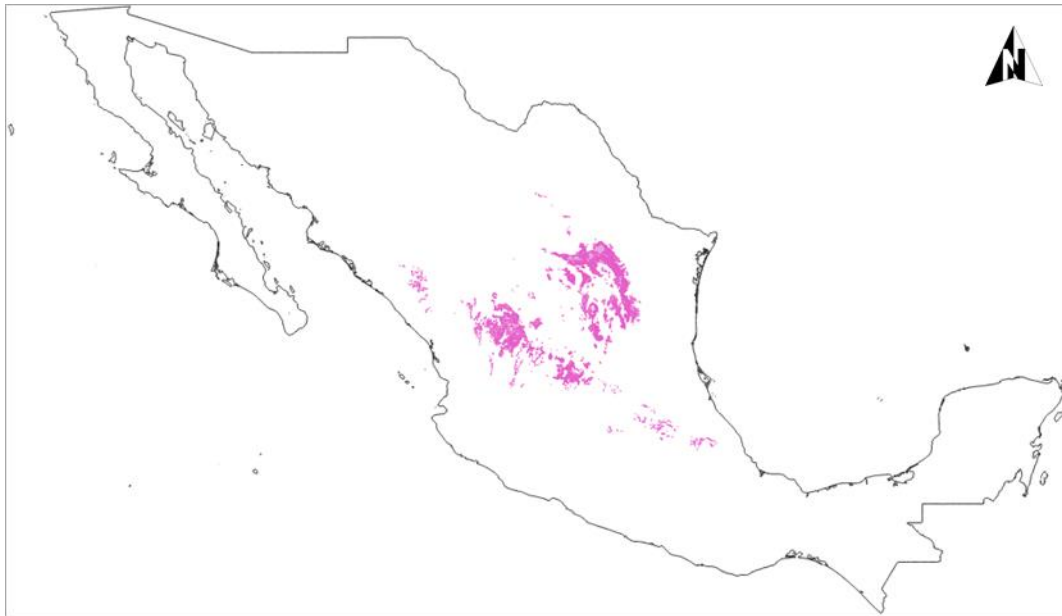


Figura 13.11. *Myotis planiceps* (Murciélago). Distribución potencial. Fuente: CONABIO, 2010.

## Miotis pescador (*Myotis vivesi*)

### Metadatos:

Autor: CONABIO, (2010). 'Myotis vivesi (miotis pescador). Distribución conocida', Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Datos obtenidos del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB), registros comprendidos entre los años de 1928 y 1965 (registros no continuos). México.

Fecha de publicación: 29-09-2010.

Escala: 1:1'000,000.

Datum: WGS84.

Formato: Vectorial. Shapefile.

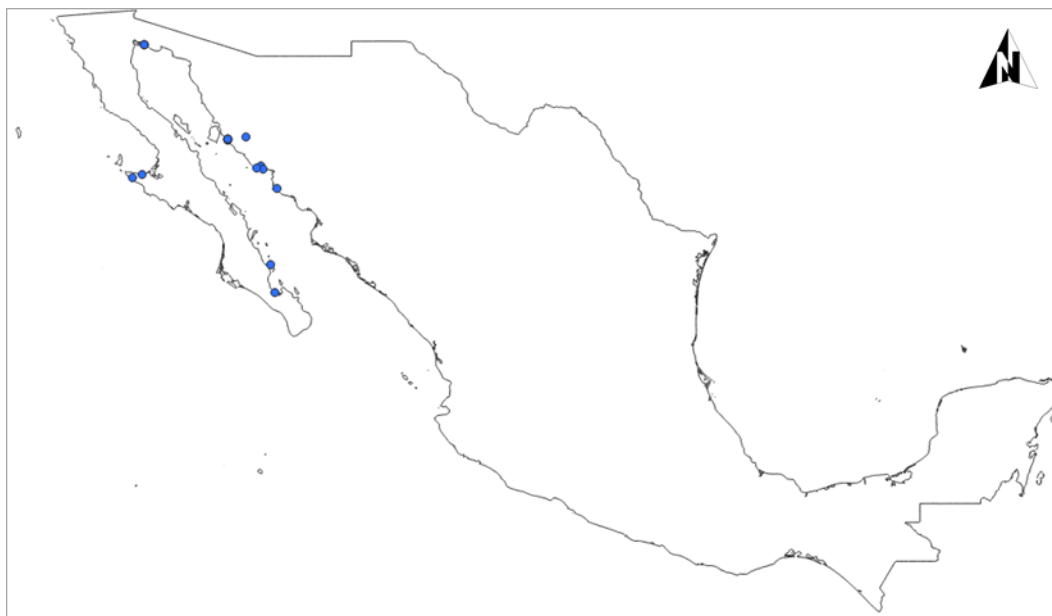


Figura 13.12. *Myotis vivesi* (motis pescador). Distribución conocida. Fuente: CONABIO, 2010.

### • Hidrografía

Capa vectorial que representa la red hidrográfica, más no el tipo de flujo ni el caudal del mismo.

#### Metadatos:

Autor: Maderey-R, L. E. y Torres-Ruata, C. (1990), 'Hidrografía'. Extraído de Hidrografía e hidrometría, IV.6.1 (A). Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1: 4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México.

Fecha de publicación: 03-08-1998.

Escala: 1:4'000,000.

Datum: WGS84.

Formato: Vectorial. Shapefile.

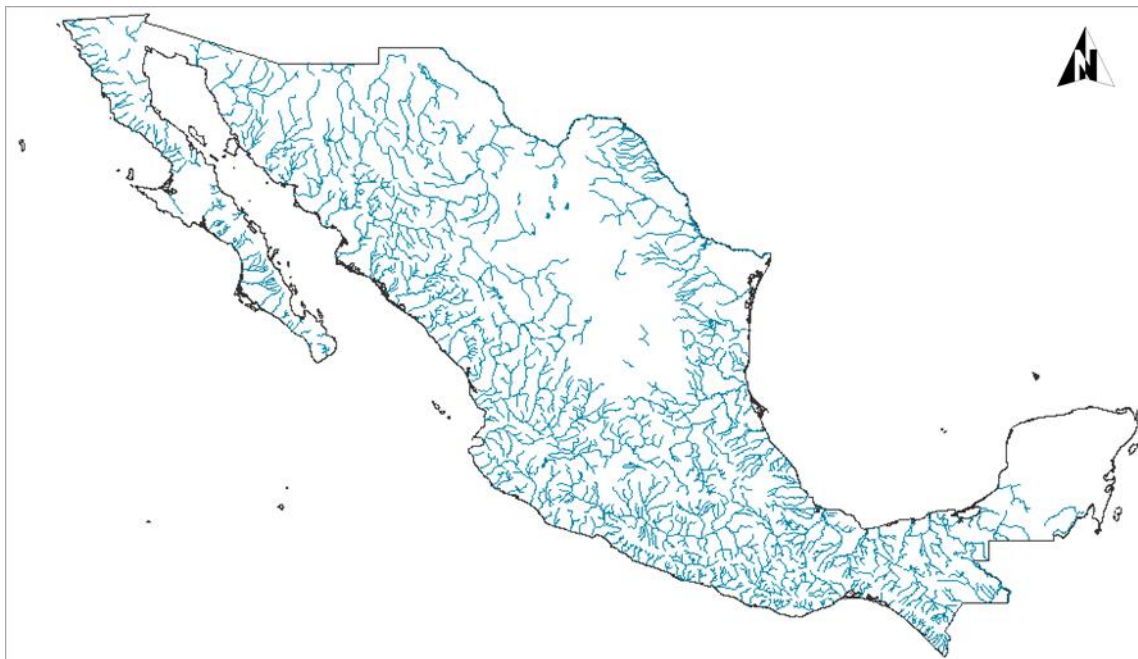


Figura 13.13. Red hidrográfica de México. Fuente: Maderey-R, L. E. y Torres-Ruata, C., 1990.

## Geospaciales

### • Temperatura

#### Temperatura mínima promedio

##### Metadatos:

Autor: García, E. - CONABIO, (1998). 'Temperatura mínima promedio'. México.

Variable filtrada: Rango de temperatura.

Fecha de publicación: 09-07-2001.

Escala: 1:1'000,000.

Datum: WGS84.

Formato: Vectorial. Shapefile.

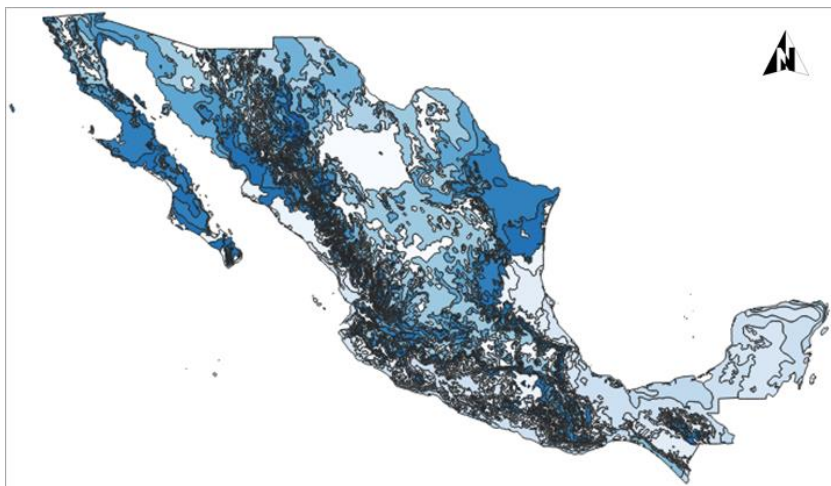


Figura 13.14. Temperatura mínima promedio. Fuente: García, E. - CONABIO, 1998.

### Temperatura máxima promedio

#### Metadatos:

Autor: García, E. - CONABIO, (1998). 'Temperatura máxima promedio'. Escala 1:1000000. México.

Variable filtrada: Rango de temperatura.

Fecha de publicación: 26-05-1999

Escala: 1:1'000,000.

Datum: WGS84.

Formato: Vectorial. Shapefile.

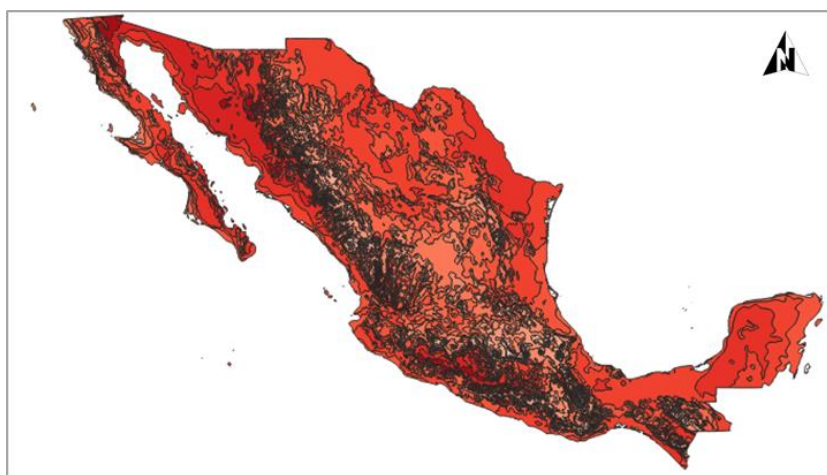


Figura 13.15. Temperatura máxima promedio. Fuente: García, E. - CONABIO, 1998.

## • Viento

Para el viento se usó la capa ráster de densidad de potencia, contenida en el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE) del estudio realizado por la CFE para 80 [m], se eligió esa altura porque que la mayoría de los aerogeneradores de uso comercial en E.U. tienen una altura al buje de 82 [m] (U.S. Department of Energy, 2018).

El estudio comprende de una capa ráster para cada mes del año y una anual, esta última se usará para el análisis en este trabajo.

### Metadatos:

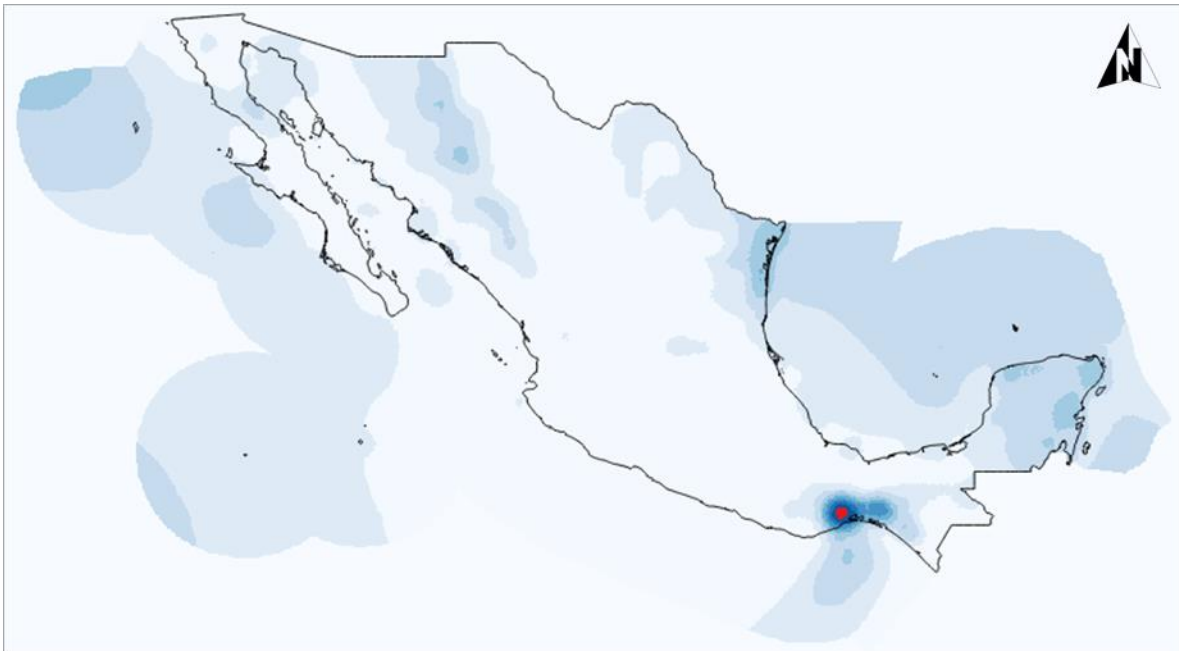
Autor: Luis Carmona Sánchez, Esteban Daniel Ortega Cobarrubias, Alejandro Zitácuaro Contreras, Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, Comisión Federal de Electricidad.

Fecha de publicación: 05-05-2014.

Editor: Víctor Hugo Fernández Escamilla.

Datum: WGS84.

Formato: Ráster.



*Figura 13.16. Densidad de Potencia a 80 metros de altura (Anual). Fuente: CFE a través del INERE, 2014.*

### 4.3.2. Procedimiento

El software utilizado fue QGIS versión 3.2.2 “Bonn”, el cual es un programa de licencia libre para edición, análisis y creación de información geoespacial.

El procedimiento consistió, en primer lugar, en el manejo de las capas *excluyentes* que, de acuerdo a las leyes humanas o físicas, sería imposible llevar a cabo un proyecto eólico y las *condicionantes* en donde las cualidades del lugar son aptas para su uso, pero existen situaciones que se deben estudiar de manera detallada en el sitio, por lo que se empezará con las primeras.

Como apoyo se utilizó una capa vectorial que representa el límite nacional publicado por la CONABIO ya que algunas capas no lo incluyen.

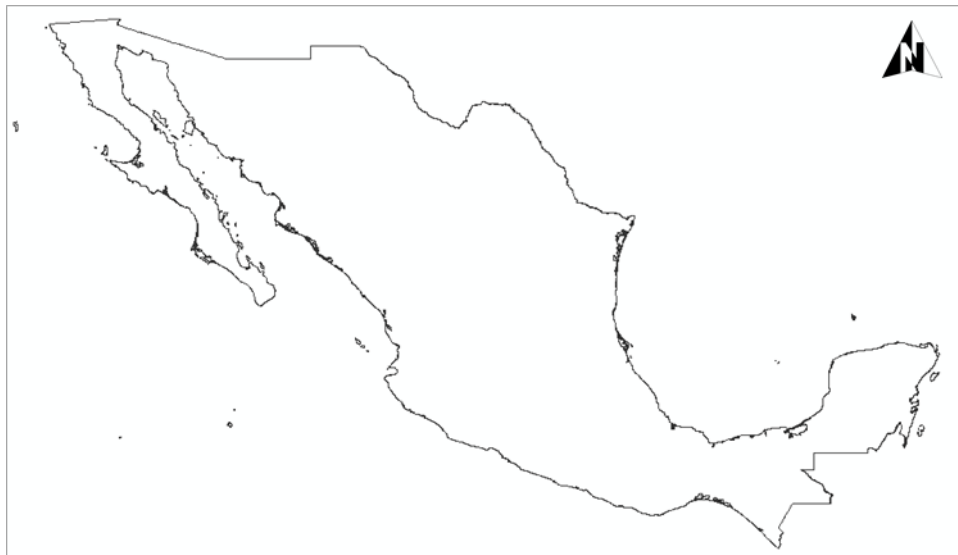


Figura 13.17. Límite nacional. Fuente: CONABIO, 2001.

De acuerdo a los aspectos ambientales a considerar, el ruido es un factor que puede afectar el bienestar de una población y como ya se demostró, la NOM-081-ECOL-1994 referente a los límites máximos permisibles de emisión de ruido de fuentes fijas, en México se cumple a los 61.1 [m] redondeándose a los 65 [m] para cuestiones prácticas, sin embargo el fenómeno de la sombra parpadeante es un problema que puede perjudicar a las comunidades por lo que siendo la distancia recomendada para evitarlo de 300 [m] mayor a los 65 [m] del ruido, se tomó esa distancia para hacer una zona de exclusión de un radio de 300 [m] de cada localidad (véase Figura 13.18), para ello se usó una herramienta llamada “Buffer”, que sirve para crear áreas de influencia alrededor de puntos, líneas o polígonos.

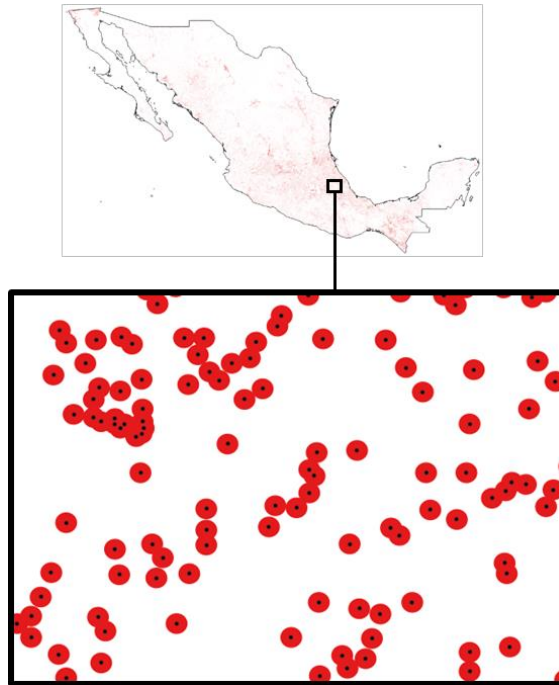


Figura 13.18. Localidades con zona de exclusión de 300 [m] de radio. Fuente: Elaboración propia.

El mismo procedimiento y distancia se aplicaron para evitar la sombra parpadeante en la red de vías de comunicación.

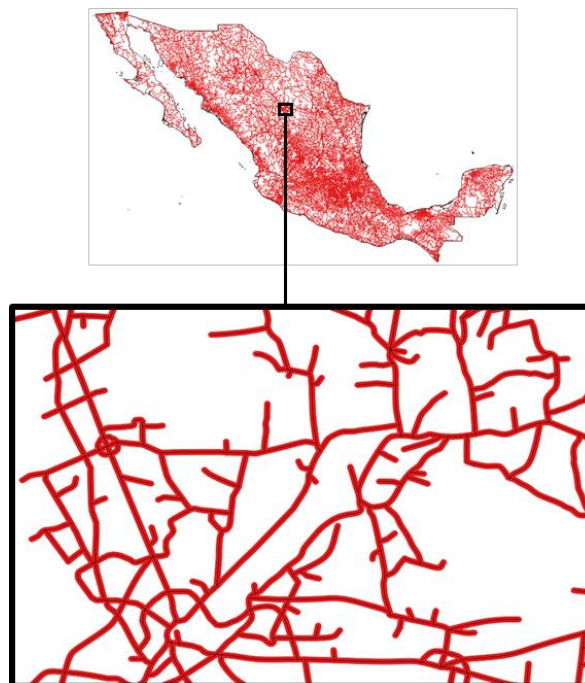


Figura 13.19. Red de vías de comunicación con zona de exclusión de 300 [m] de radio. Fuente: Elaboración propia.

La NOM-002-SCT3-2001 define a un aeropuerto como “*aeródromo civil de servicio público, que cuenta con las instalaciones y servicios adecuados para la recepción y despacho de aeronaves, pasajeros, carga y correo del servicio de transporte aéreo regular, del no regular, así como del transporte privado comercial y privado no comercial.*”

De acuerdo a la NOM-EM-014-SCT3-1994 “Que regula las superficies limitadoras de obstáculos para aeródromos civiles”, en la sección “5.7.2 Superficie horizontal interna” se describe el plano horizontal sobre un aeropuerto que delimita la zona libre de obstáculos en base en la clasificación del aeropuerto en cuestión (véase Tabla 4.0), para aeropuertos con clave 4 y 3 les corresponde un círculo de 4000 [m] de radio, para clave 2 uno de 2500 [m] y clave 1 de 2200 [m].

*Tabla 4.0: Clave de referencia de acuerdo a las dimensiones y parámetros operativos de la aeronave crítica que opera el aeródromo civil. Fuente: NOM-EM-014-SCT3-1994.*

CLAVE				
No. Clave	Long. Campo Ref.	Letra	Envergadura	Ancho Vía
1	Menos de 800m	A	Menos de 15m	Menos de 4.5m
2	800m a 1,200m	B	15m a 24m	4.5m a 6m
3	1,200m a 1,800m	C	24m a 36m	6m a 9m
4	más de 1,800m	D	36m a 52m	9m a 14m
-	-	E	52m a 65m	9m a 14m
-	-	F	más de 65m	más de 14m

Ya que la capa de aeropuertos no muestra en su tabla de atributos información acerca de la clave de cada uno, se utilizó para realizar un buffer el radio de 4000 [m] correspondiente de la clave 4 y 3, por ser la situación más desfavorable (véase Figura 13.20).



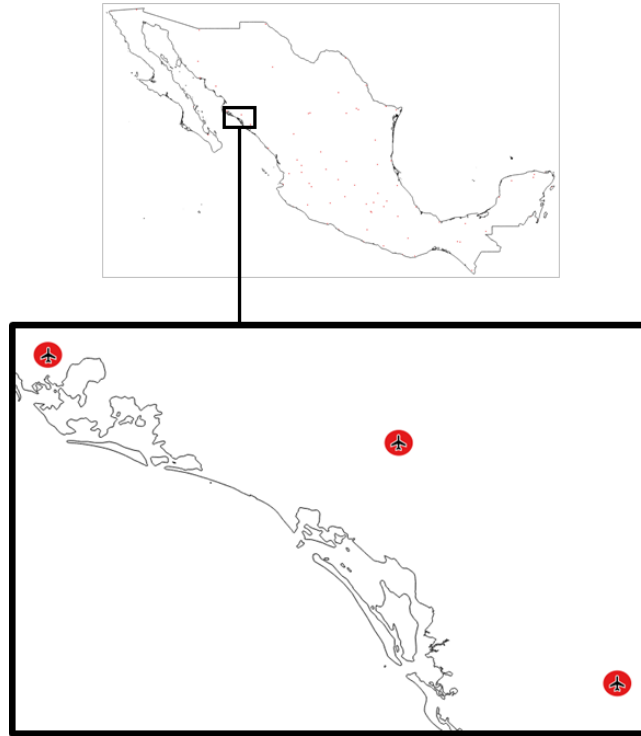


Figura 13.20. Aeropuertos con zona de exclusión de 4000 [m] de radio. Fuente: Elaboración propia.

Para la capa hidrografía, se creó un buffer de 10 [m] de radio para especificar las zonas federales de los ríos.

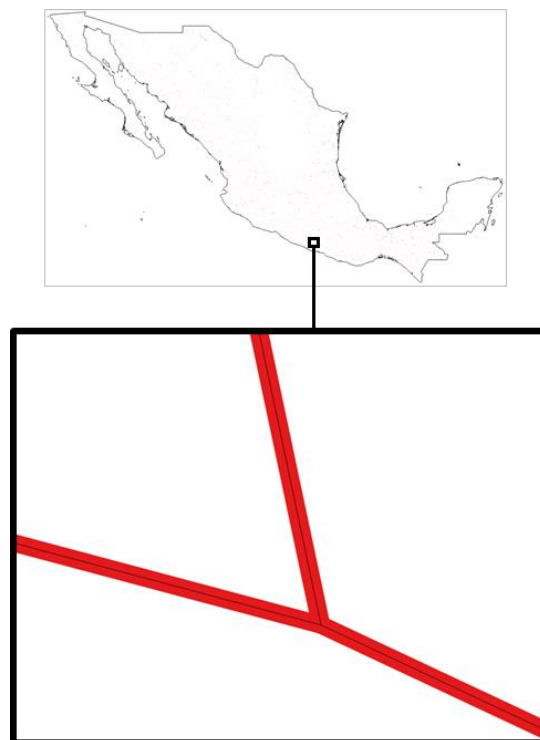
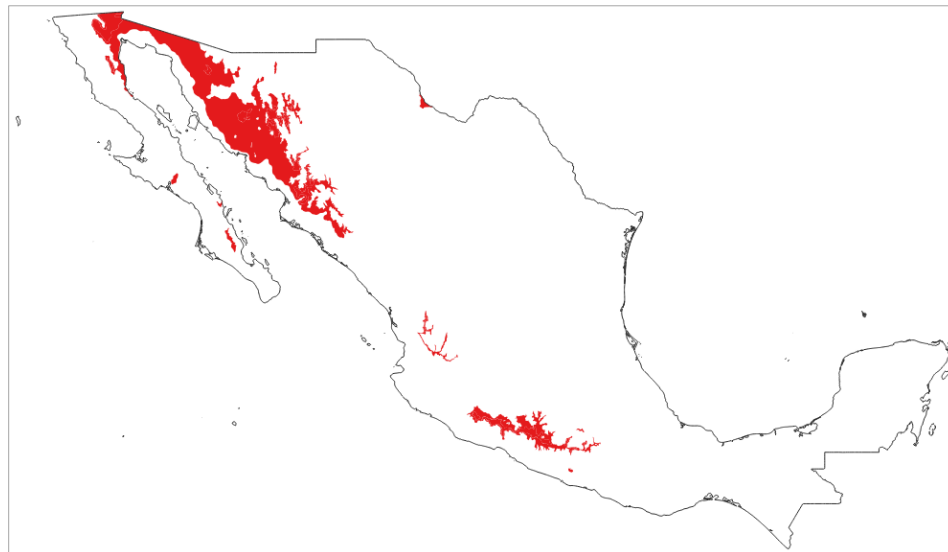


Figura 13.21. Red hidrológica con zona de exclusión de 10 [m] de radio. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a lo antes mencionado, los aerogeneradores funcionan de manera estándar en el rango de temperatura de  $-20$  [°C] a  $40$  [°C] y con una baja eficiencia de  $-30$  [°C] a  $45$  [°C]; en el país sólo tres veces se han presentado temperaturas menores e iguales a  $-20$  [°C],  $-25$  [°C] el 21/12/1997 en Madera, Chihuahua,  $-21.5$  [°C] el 31/12/2006 en La Rosilla, Durango y  $-20$  [°C] el 13/12/1997 en Mesillas, Zacatecas (CONAGUA, 2017) y aunado a que el menor valor de la capa “Temperatura mínima promedio” es “Menor de  $-8$  [°C]”, podemos determinar que las bajas temperaturas en el país no son un problema para el desempeño de aerogeneradores, sin embargo las altas temperaturas sí lo pueden ser, la información contenida en la capa de “Temperatura máxima promedio” se compone de rangos de temperaturas que van de “Menor de  $5$  [°C]” a “Mayor de  $40$  [°C]”, considerando  $40$  [°C] como la temperatura crítica se filtraron “de  $38$  [°C] a  $40$  [°C]” y “mayor a  $40$  [°C]” para que solamente esos rangos se muestren en la capa, obteniéndose como resultado los lugares en donde por la temperatura promedio máxima un aerogenerador tendría problemas de eficiencia o funcionamiento (véase Figura 13.22), es probable que ese rango se presente un día o por varios meses en el año, por lo que al no tener más información al respecto se tomará el área filtrada como no apta para la instalación de aerogeneradores.



*Figura 13.22. Sitios en donde la temperatura máxima promedio comprende los rangos “de  $38$  [°C] a  $40$  [°C]” y “mayor a  $40$  [°C]”. Fuente: Elaboración propia.*

Con las capas de buffers creados se añadieron las capas excluyentes que ya tienen un área definida, como lo son los Sitios RAMSAR, las Áreas de importancia para la conservación de las aves (AICAS) y las Áreas Naturales Protegidas Federales de México (ANP). Uniformizando con color negro y

eliminando el contorno se unieron las capas excluyentes, obteniendo una capa única que representa la superficie de la república en donde de acuerdo a las condiciones ambientales, de temperatura y de infraestructura sería inviable la construcción de proyectos eólicos.

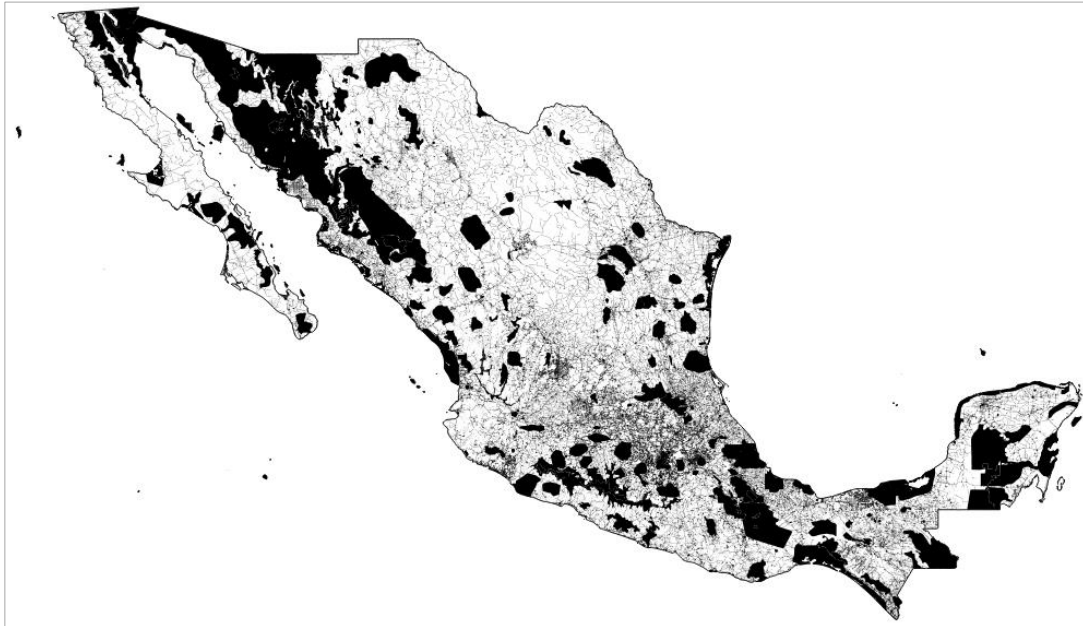


Figura 13.23. Capa excluyente. Fuente: Elaboración propia.

Cortando el ráster de densidad de potencia anual a 80m de altura utilizando la capa de contorno como máscara, se obtuvo una nueva capa que muestra la densidad de potencia en sólo la superficie continental del país.

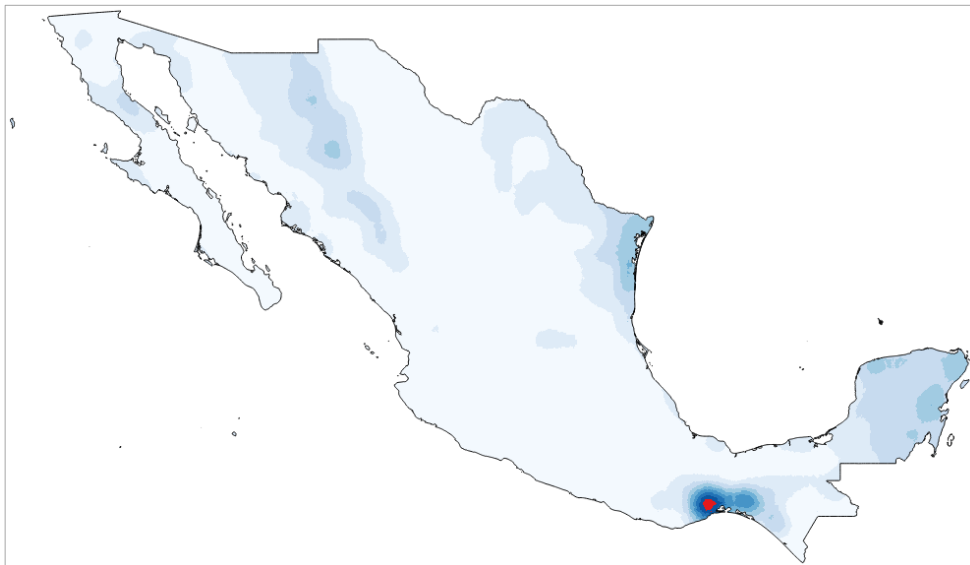


Figura 13.24. Densidad de potencia a 80[m] de altura en superficie continental. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo la capa excluyente y agregando las capas condicionantes, a excepción de la capa de población indígena ya que obstruiría la visibilidad de la capa de densidad de potencia, se procedió a analizar los resultados.

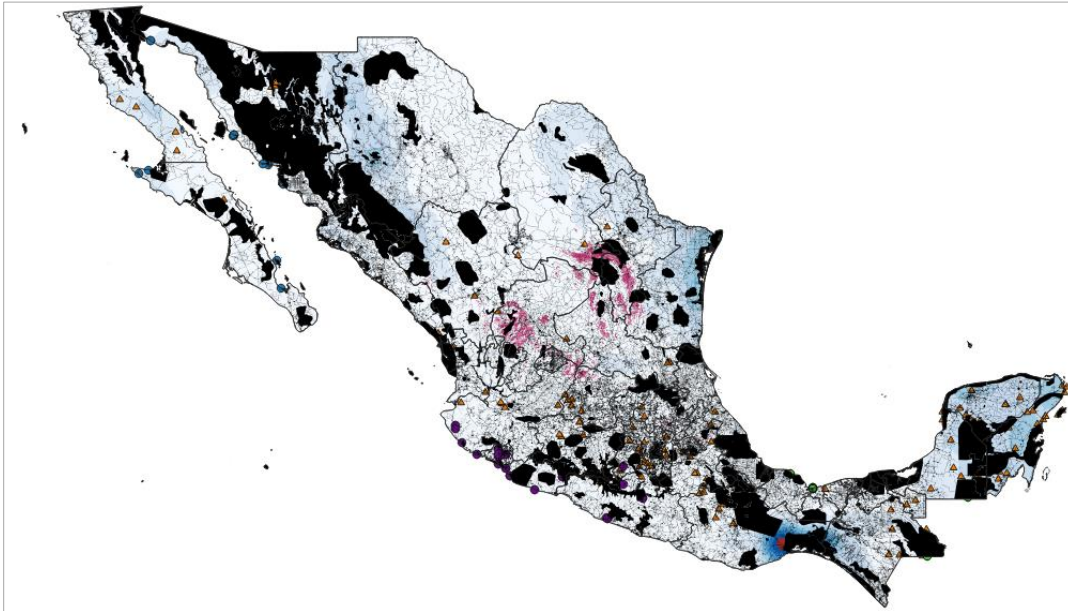


Figura 13.25. Densidad de potencia a 80[m] de altura en superficie continental con la capa excluyente y capas condicionales. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.2. Resultados

De acuerdo a lo escrito en los aspectos geoespaciales, en específico en la parte de viento, para una óptima generación de energía es necesario que el potencial de viento sea mínimo clase 4.

La densidad de potencia en cada clase cambia dependiendo de la altura, por lo que, para la altura de estudio de 80 [m], se tiene la siguiente clasificación:

Tabla 4.1: Clases de potencial de viento a 80 [m] de altura. Fuente: (Renewable Energies Offshore, 2015).

Clases de potencial de viento	Densidad de potencia de viento [W/m <sup>2</sup> ]
1	0 – 251.3
2	251.3 – 375.1
3	375.1 – 490.8
4	490.8 – 603.6
5	603.6 – 732.6
6	732.6 – 975.1
7	> 975.1

Siendo que la clase 4 inicia a los 490.8 [W/m<sup>2</sup>], se redondeó a 500 [W/m<sup>2</sup>] para su fácil identificación en la leyenda de densidad de potencia, que se basa en colores y se encuentra junto con la capa de densidad de potencia a 80 [m] en la página del Inventario Nacional de Energías Renovables. Considerando el límite mínimo de 500 [W/m<sup>2</sup>], el rango de estudio es el siguiente:

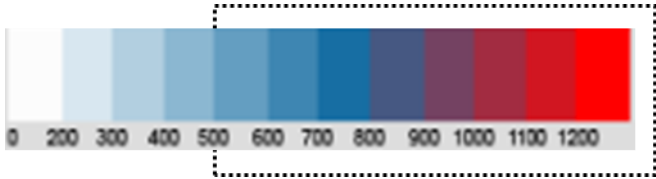


Figura 13.26. Rango de densidad de potencia a 80[m] perteneciente a potencial de viento clase 4. Fuente: Elaboración propia.

Conforme a lo anterior, las entidades federativas en donde la densidad de potencia de viento anual a 80 [m] de altura es favorable para la instalación de parques eólicos son: **Chihuahua, Tamaulipas, Oaxaca, Chiapas, Yucatán y Quintana Roo.**

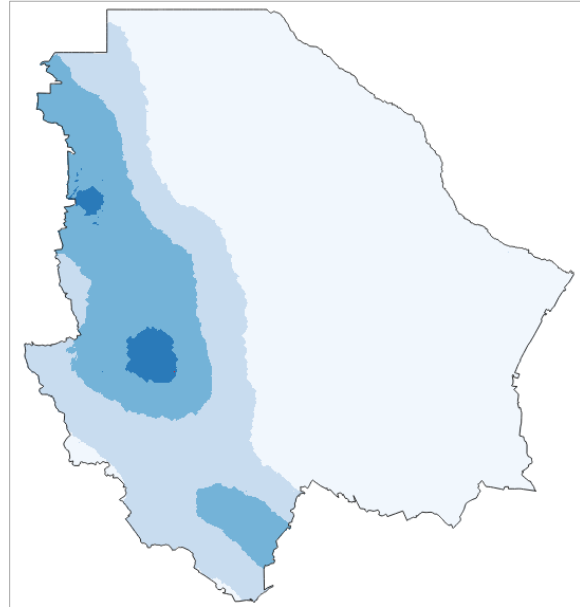


Figura 13.27. Estados con potencial de viento clase 4, anual y a 80 [m]. Fuente: Elaboración propia.

## Chihuahua

### *Potencial eólico*

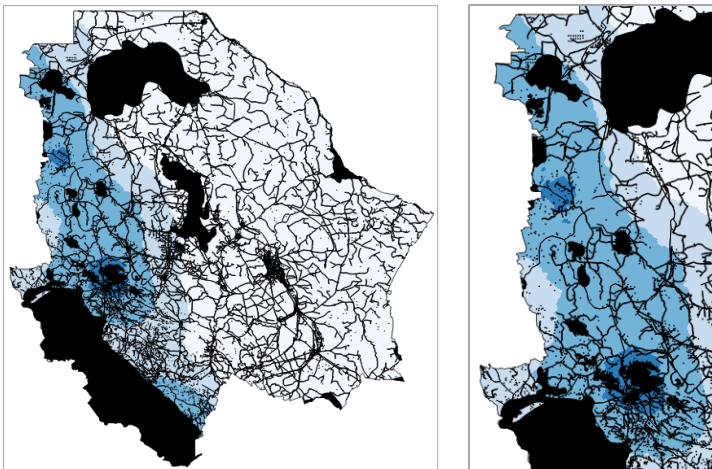
La entidad presenta aproximadamente en un 1.4% de su territorio una densidad de viento de 700 [W/m<sup>2</sup>] a 800 [W/m<sup>2</sup>] y el 18.4% de 500 [W/m<sup>2</sup>] a 600 [W/m<sup>2</sup>], haciendo un total de 19.8% (49337.6 [km<sup>2</sup>]) de su superficie apta para la instalación de parques eólicos, ya que las densidades de potencia que presentan de manera anual a 80 [m] corresponden a un potencial de viento clase 4, sin embargo, como se ha planteado anteriormente y se demostrará a continuación, esta superficie no se puede utilizar en su totalidad por varios factores.



*Figura 13.28. Densidad de potencia en el estado de Chihuahua. Fuente: Elaboración propia.*

### *Excluyentes*

La principal función de las condiciones excluyentes es proteger la integridad y bienestar de las personas y el medio ambiente, como se detalló anteriormente se componen de zonas exclusión para vías de comunicación, localidades, aeropuertos, sitios RAMSAR, AICAS, ANP, hidrografía y temperatura. Su área total aproximada dentro de la zona con potencial es de 10978.9 [km<sup>2</sup>].



*Figuras 13.29 y 13.30. Áreas de exclusión para la instalación de parques eólicos en Chihuahua. Fuente: Elaboración propia.*

## Condicionales

### Arqueología

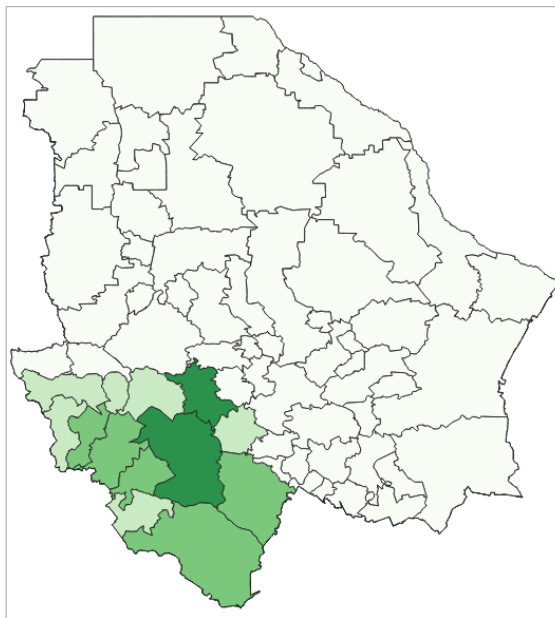
Aunque la capa de rasgos arqueológicos no arrojó resultados para el estado de Chihuahua, es importante considerar que para la realización de cualquier proyecto civil como es el caso de un parque eólico, según la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas, el INAH deberá inspeccionar la zona de proyecto y emitir un dictamen sobre la presencia de materiales arqueológicos en la superficie, si es positivo puede llevarse a cabo siguiendo las acciones recomendadas por el Instituto, en el caso de una negativa, se deberán hacer cambios en el proyecto o en el caso extremo desecharlo.

### Murciélagos

No se detectó presencia de murciélagos en peligro de extinción, sin embargo, es importante procurar los murciélagos locales que, aunque no se encuentren amenazados, se deben preservar por el bien del ecosistema.

### Población indígena

La máxima concentración de población que habla una lengua indígena es del 50% al 75% en los municipios de Carichí y Guachochi, localizados en la Sierra Madre Occidental mejor conocida como Sierra Madre Tarahumara.



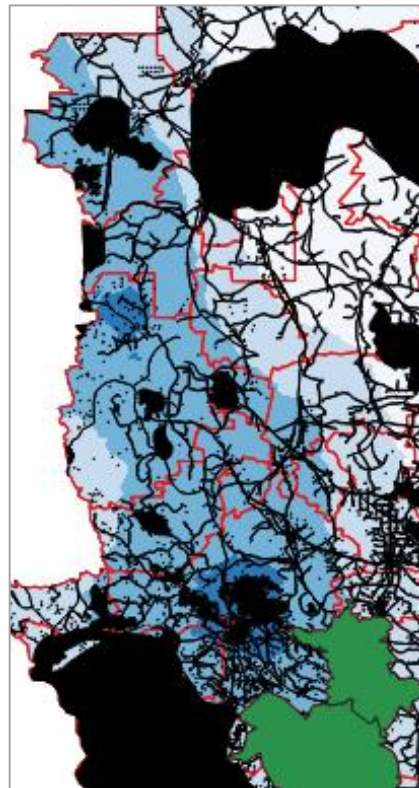
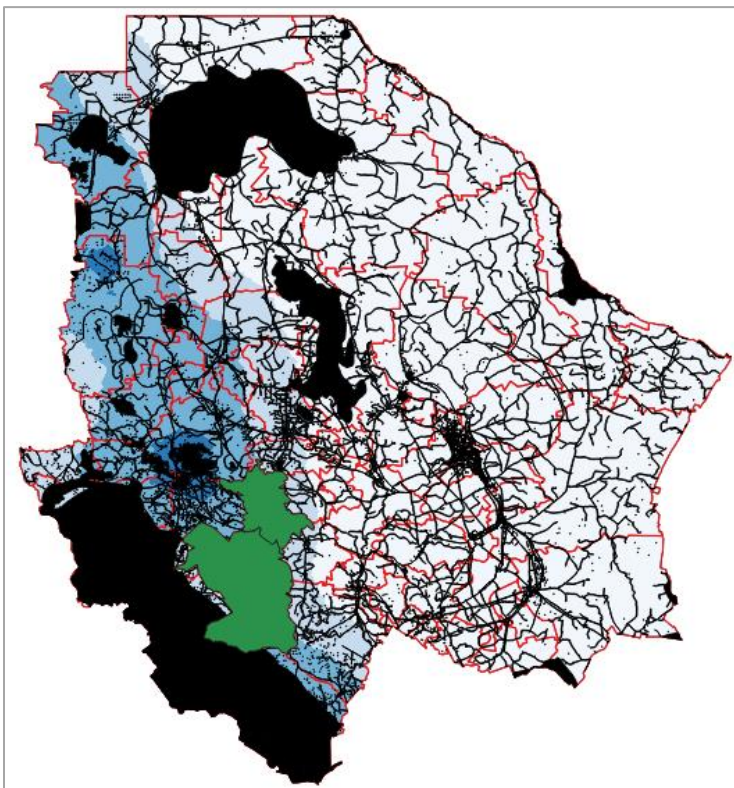
*Figura 13.31. Porcentaje de distribución de la población que habla una lengua indígena en Chihuahua.  
Fuente: Elaboración propia.*

### Resultado para Chihuahua

Juntando las capas de densidad de potencia, excluyentes, condicionales y como apoyo una capa que muestra la división municipal de la entidad (líneas rojas), podemos identificar los municipios en donde parte de su territorio se encuentra dentro de la zona con potencial haciendo un total de 38358.8 [km<sup>2</sup>] de área factible para la instalación de parques eólicos, el dato anterior se obtuvo de restar el área con potencial eólico menos el área excluyente dentro de la misma.

Tabla 4.2: Municipios de Chihuahua con potencial de viento clase 4 a 80 [m] y las capas que intervienen en ellos. Fuente: Elaboración propia.

#	Municipio	Capas	#	Municipio	Capas
1	Janos	Excluyente	9	Bachíniva	Excluyente
2	Casas Grandes	Excluyente	10	Namiquipa	Excluyente
3	Madera	Excluyente	11	Guerrero	Excluyente
4	Ignacio Zaragoza	Excluyente	12	Ocampo	Excluyente
5	Gómez Farías	Excluyente	13	Maguarichi	Excluyente
6	Temósachi	Excluyente	14	Bocoyna	Excluyente
7	Matachí	Excluyente	15	Guachochi	Excluyente, Pob.Indig.
8	Carichí	Excluyente, Pob.Indig.	16	Cusihuirachi	Excluyente



Figuras 13.32. y 13.33. Totalidad de capas que influyen en Chihuahua. Fuente: Elaboración propia.

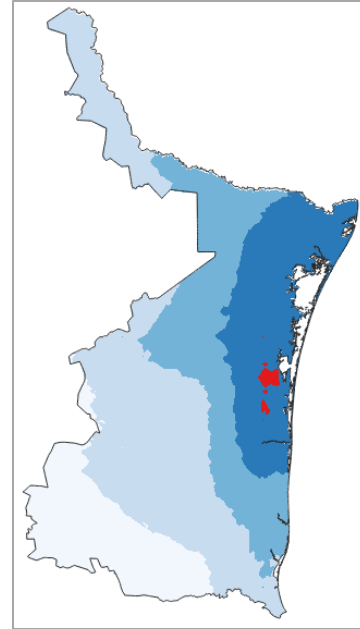


## Tamaulipas

### Potencial eólico

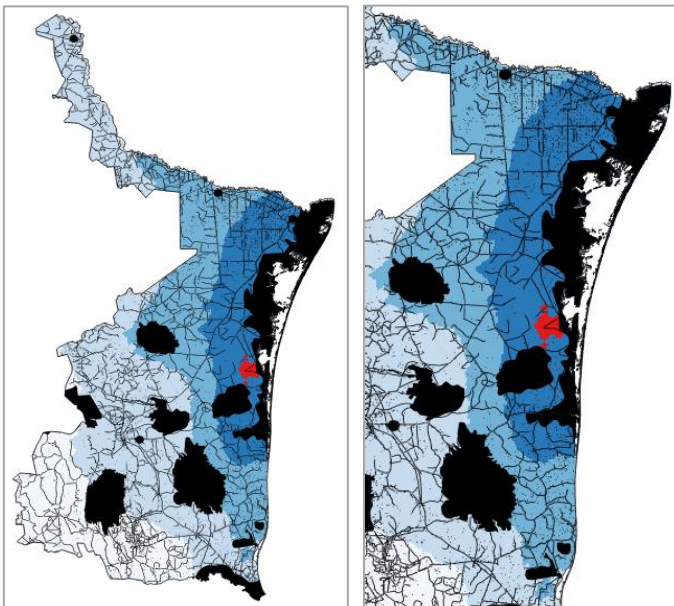
El 0.48% de la superficie del estado tiene una densidad de potencia anual a 80 [m] de más de 1200 [W/m<sup>2</sup>], 21.6% de 700 [W/m<sup>2</sup>] a 800 [W/m<sup>2</sup>] y 23.5% de 500 [W/m<sup>2</sup>] a 600 [W/m<sup>2</sup>], en total 45.58% (35909.7 [km<sup>2</sup>]) del territorio es apto para utilizarse en proyectos eólicos

Figura 13.34. Densidad de potencia de viento en el estado de Tamaulipas. Fuente: Elaboración propia.



### Excluyentes

La gran parte de las áreas de exclusión corresponden a vías de comunicación, Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICAS) y Áreas naturales protegidas (ANP). A continuación, se presentan las áreas que se encuentran dentro de la superficie de potencial de viento clase 4. Cabe mencionar que las AICAS, ANP y RAMSAR presentadas en esta sección para esta y las demás entidades sus superficies pueden o no estar en su totalidad dentro del área de importancia para extracción de energía eólica. El área aproximada de exclusión en la zona con potencial es de 14364.7 [km<sup>2</sup>].



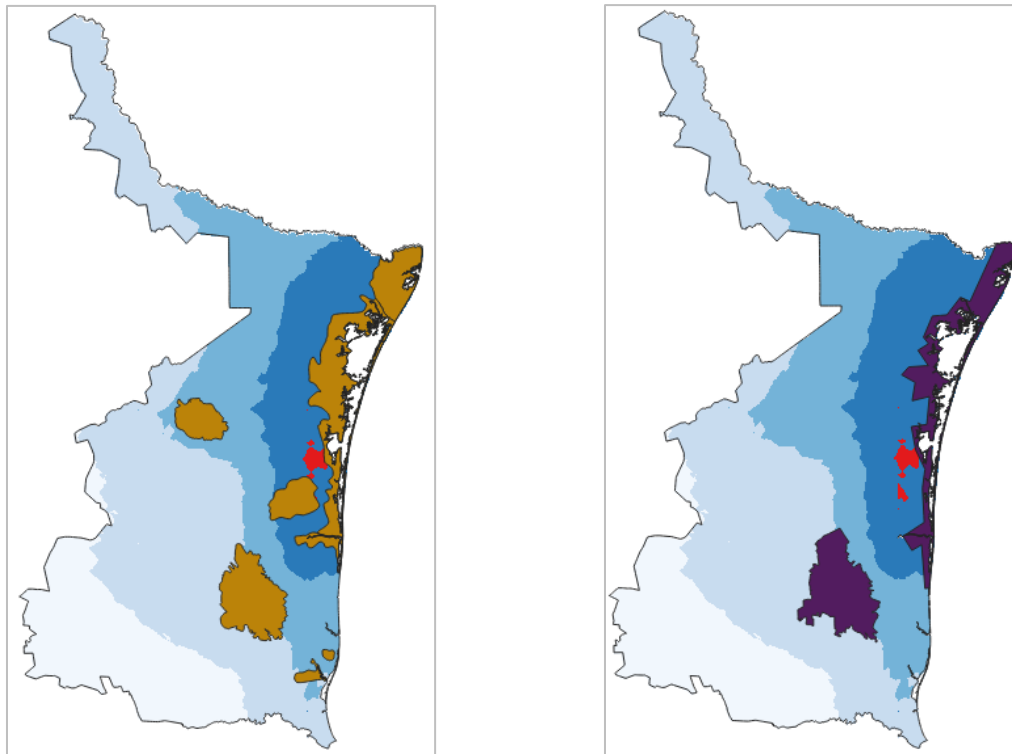
Figuras 13.35 y 13.36. Áreas de exclusión para la instalación de parques eólicos en Tamaulipas. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3: AICAS dentro del área del estado de Tamaulipas con potencial de viento clase 4 a 80 [m].  
Fuente: Elaboración propia.

AICAS	
Nombre	Área [km <sup>2</sup> ]
Sierra de San Carlos	992
Parras de la Fuente	942
Rancho Los Colorados y Área de Influencia	68
Laguna Madre	3409
Desembocadura del Río Soto la Marina	325
Sierra de Tamaulipas	2646
Cerro del Metate	198
Delta del Río Bravo	1389

Tabla 4.4: ANP dentro del área del estado de Tamaulipas con potencial de viento clase 4 a 80 [m]. Fuente: Elaboración propia.

ANP	
Nombre	Área [km <sup>2</sup> ]
Laguna Madre y Delta del Río Bravo	3693
Sierra de Tamaulipas	3120



Figuras 13.37 y 13.38. (Izq.) AICAS y (Der.) ANP que se encuentran dentro de la superficie de potencial de viento clase 4 a 80 [m]. Fuente: Elaboración propia.

## Condicionales

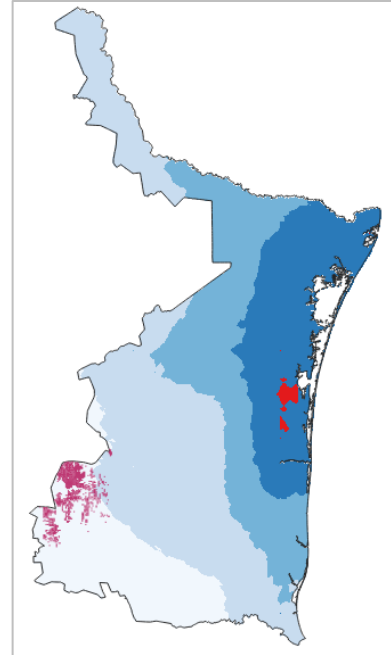
### Arqueología

La entidad no presenta rasgo arqueológico importante en su superficie, sin embargo, es recomendable seguir el procedimiento recomendado descrito en Chihuahua.

### Murciélagos

La distribución potencial del murciélago en peligro de extinción *Miotis cabeza plana* (*Myotis planiceps*) se encuentra fuera de la zona de influencia del potencial de viento clase 4, aunque cómo se explicó anteriormente hay que tener en consideración a la población de murciélagos local y los que en su proceso de migración pasan por la zona.

*Figuras 13.39. Distribución potencial del murciélago Miotis cabeza plana (Myotis planiceps) en el estado de Tamaulipas. Fuente: Elaboración propia.*



### Población indígena

La población que habla al menos una lengua indígena tiene un bajo porcentaje de presencia en el estado. De acuerdo a la clasificación por color, su totalidad se encuentra en el rango del 0% al 10%, siendo su porcentaje real máximo del 2.62%, por lo que el riesgo de discrepancias con poblaciones indígenas es mínimo.

*Figuras 13.40. Porcentaje de distribución de la población que habla una lengua indígena en Tamaulipas. Fuente: Elaboración propia.*



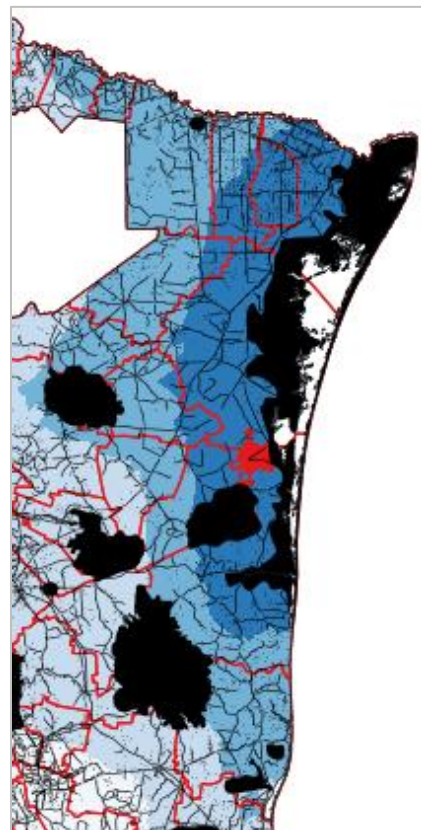
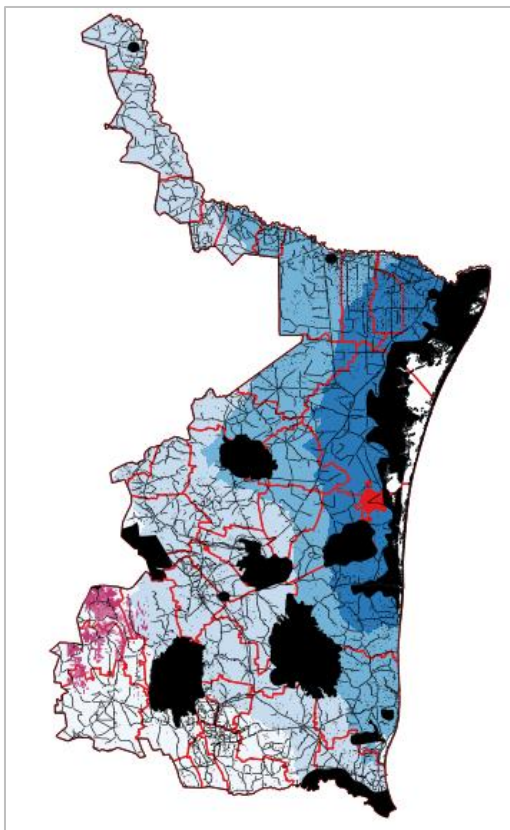
### Resultado para Tamaulipas

El estado cuenta con 21545 [km<sup>2</sup>] para la instalación de parques eólicos.

A continuación, se presentan los municipios de Tamaulipas en donde es posible la captación de energía eólica a 80 [m] por medio de parques eólicos.

Tabla 4.5: Municipios de Tamaulipas con potencial de viento clase 4 a 80 [m] y las capas que intervienen en ellos. Fuente: Elaboración propia.

#	Municipio	Capas	#	Municipio	Capas
1	Camargo	Excluyente	10	Cruillas	Excluyente
2	Gustavo Díaz Ordaz	Excluyente	11	San Nicolás	Excluyente
3	Reynosa	Excluyente	12	San Carlos	Excluyente
4	Río Bravo	Excluyente	13	Jiménez	Excluyente
5	Valle Hermoso	Excluyente	14	Abasolo	Excluyente
6	Matamoros	Excluyente	15	Soto la Marina	Excluyente
7	Méndez	Excluyente	16	Casas	Excluyente
8	San Fernando	Excluyente	17	Aldama	Excluyente
9	Burgos	Excluyente	18	Altamira	Excluyente



Figuras 13.41. y 13.42. Totalidad de capas que influyen en Tamaulipas. Fuente: Elaboración propia.

## Oaxaca

### Potencial eólico

El 1.43% del estado tiene densidad de potencia anual a 80 [m] de más de 1200 [W/m<sup>2</sup>], 2.64% del rango de 800 [W/m<sup>2</sup>] a 900 [W/m<sup>2</sup>], 2.85% de 700 [W/m<sup>2</sup>] a 800 [W/m<sup>2</sup>], 5.68% de 600 [W/m<sup>2</sup>] a 700 [W/m<sup>2</sup>] y 5.90% de 500 [W/m<sup>2</sup>] a 600 [W/m<sup>2</sup>], en total 18.5% (17332.3 [km<sup>2</sup>]).

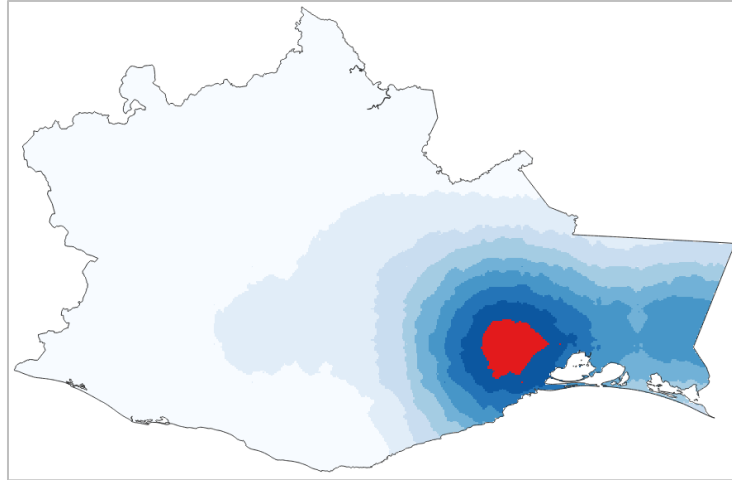
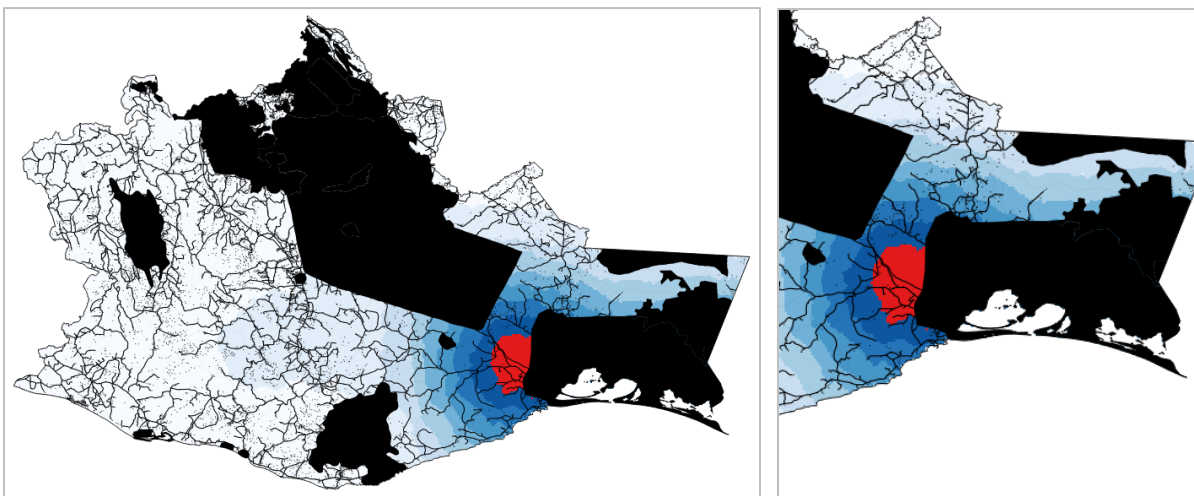


Figura 13.43. Densidad de potencia de viento en el estado de Oaxaca. Fuente: Elaboración propia.

### Excluyentes

Una gran parte de la superficie excluyente que se encuentra dentro del área con viento clase 4 corresponde a Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICAS), haciendo un total aproximado de 10215 [km<sup>2</sup>].



Figuras 13.44 y 13.45. Áreas de exclusión para la instalación de parques eólicos en Oaxaca. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.6: AICAS dentro del área del estado de Oaxaca con potencial de viento clase 4 a 80 [m].  
Fuente: Elaboración propia.

AICAS	
Nombre	Área [km <sup>2</sup> ]
La Sepultura	49
Sierra Maderas del Carmen	15068
Chimalapas	1827
Istmo de Tehuantepec – Mar Muerto	6489
Cerro Piedra Larga	89

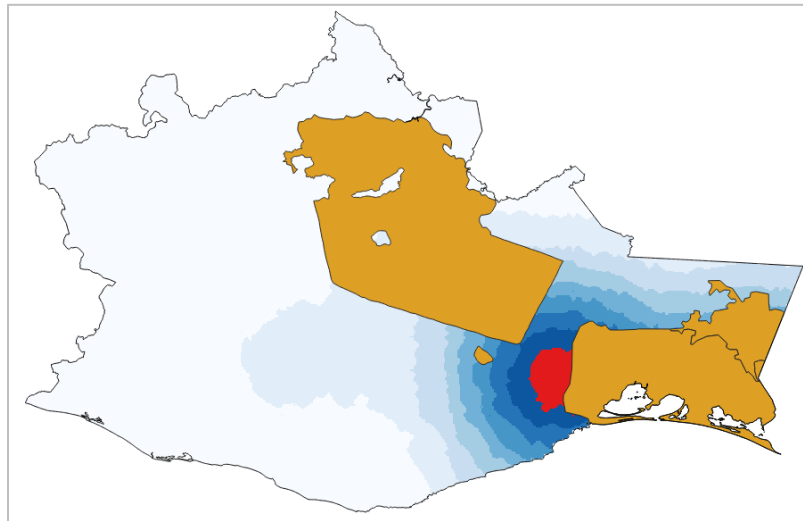


Figura 13.46. AICAS que se encuentran dentro de la superficie de potencial de viento clase 4 a 80 [m].  
Fuente: Elaboración propia.

### Condicionales

#### Arqueología

El principal rasgo arqueológico de la entidad se encuentra fuera del área de interés.

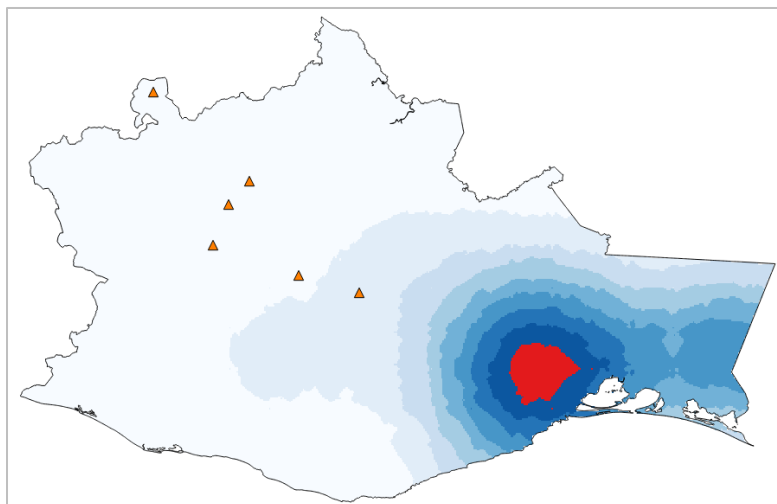


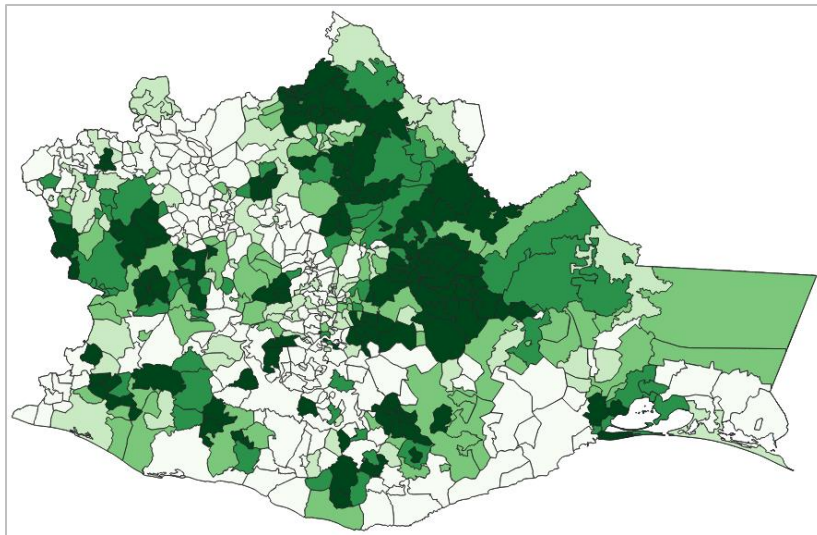
Figura 13.47. Rasgo arqueológico del estado de Oaxaca. Fuente: Elaboración propia.

## Murciélagos

El estado no presenta población de murciélagos en peligro de extinción.

## Población indígena

162 municipios tienen un porcentaje de población que habla al menos una lengua indígena dentro del rango del 75% al 100%.



*Figura 13.48. Porcentaje de distribución de la población que habla una lengua indígena en Chihuahua.  
Fuente: Elaboración propia.*

## *Resultado para Oaxaca*

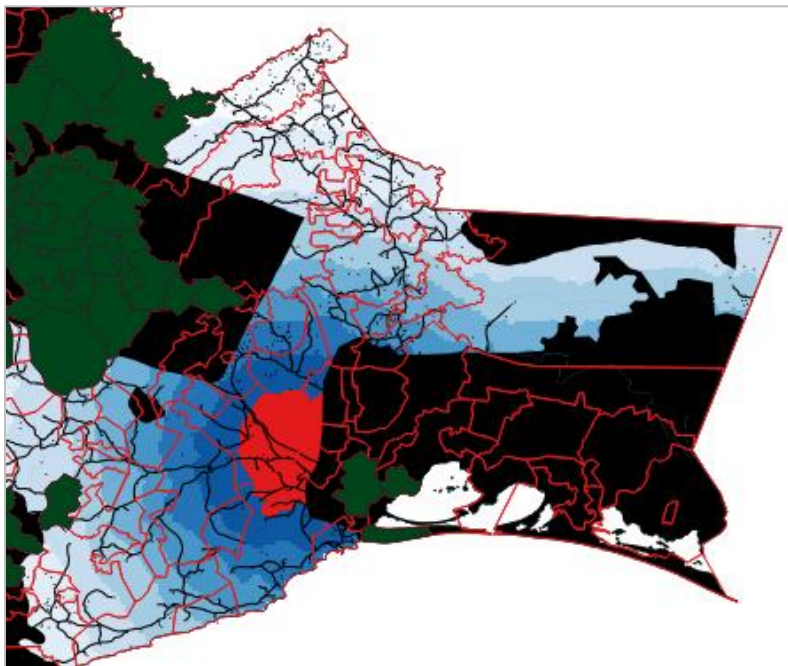
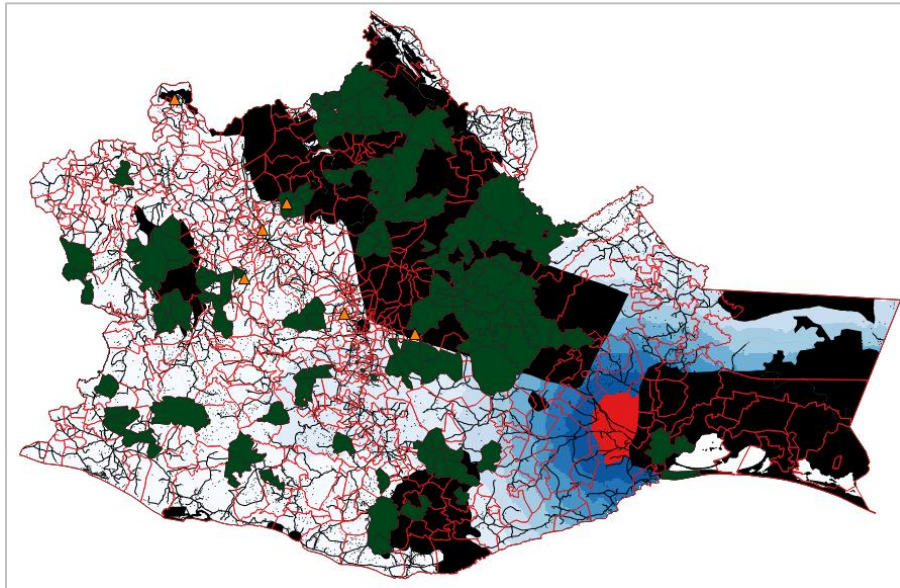
53 municipios del estado se encuentran parcialmente o en su totalidad dentro del área de interés, 8 de ellos presentan una población igual o superior al 75% que habla al menos una lengua indígena y presentan áreas de exclusión por la población misma, vías de comunicación, ríos, AICAS, etc. En total, se tiene una superficie territorial con potencial eólico disponible en el estado de 7117.3 [km<sup>2</sup>].

Tabla 4.7: Municipios de Oaxaca con potencial de viento clase 4 a 80 [m] y las capas que intervienen en ellos. Fuente: Elaboración propia.

#	Municipio	Capas	#	Municipio	Capas
1	San Miguel Chimalapa	Excluyente	28	San Miguel Tenango	Excluyente
2	San Pedro Tapanatepec	Excluyente	29	Ciudad Ixtepec	Excluyente
3	Chahuites	Excluyente	30	Santiago Laollaga	Excluyente
4	Santo Domingo Zanatepec	Excluyente	31	Santo Domingo Chihuitán	Excluyente
5	Reforma de Pineda	Excluyente	32	Asunción Ixtaltepec	Excluyente
6	Santiago Niltepec	Excluyente	33	El Barrio de la Soledad	Excluyente
7	San Francisco Ixhuatán	Excluyente	34	Santo Domingo Petapa	Excluyente
8	San Francisco del Mar	Excluyente	35	San Pedro Huamelula	Excluyente
9	San Dionisio del Mar	Excluyente	36	Santiago Astata	Excluyente
10	Santo Domingo Ingenio	Excluyente	37	Santa María Ecatepec	Excluyente
11	Unión Hidalgo	Excluyente	38	Asunción Tlacolulita	Excluyente
12	El Espinal	Excluyente	39	San Bartolo Yautepec	Excluyente
13	Heroica Ciudad de Juchitán de Zaragoza	Excluyente	40	Santa María Petapa	Excluyente
14	San Pedro Ixcatlán	Excluyente	41	Matías Romero Avendaño	Excluyente
15	Salina Cruz	Excluyente	42	San Andrés Teotilápam	Excluyente
16	Santo Domingo Tehuantepec	Excluyente	43	Santa María Guienagati	Excluyente
17	San Miguel Tenango	Excluyente	44	Guevea de Humboldt	Excluyente
18	Santa María Jalapa del Marqués	Excluyente	45	Santa Ana Tavela	Excluyente
19	Santa María Mixtequilla	Excluyente	46	San Mateo del Mar	Excluyente, Pob.Ind.
20	Magdalena Tlacotepec	Excluyente	47	Santa María Xadani	Excluyente, Pob.Ind.
21	San Carlos Yautepec	Excluyente	48	San Blas Atempa	Excluyente, Pob.Ind.
22	Nejapa de Madero	Excluyente	49	Santiago Ixcuintepec	Excluyente, Pob.Ind.
23	Santa María Totolapilla	Excluyente	50	San Lucas Camotlán	Excluyente, Pob.Ind.
24	Magdalena Tequisistlán	Excluyente	51	San Miguel Quetzaltepec	Excluyente, Pob.Ind.



#	Municipio	Capas	#	Municipio	Capas
25	Santiago Lachiguiri	Excluyente	52	San Pedro Ocotepéc	Excluyente, Pob.Ind.
26	San Juan Lajarcia	Excluyente	53	San Juan Juquila Mixes	Excluyente, Pob.Ind.
27	Nejapa de Madero	Excluyente			



Figuras 13.49. y 13.50. Totalidad de capas que influyen en Oaxaca. Fuente: Elaboración propia.

## Chiapas

### Potencial eólico

El potencial eólico se encuentra en la frontera con Oaxaca, en la zona donde la otra entidad también concentra la mayoría de su potencial, sin embargo, Chiapas no llega a superar los 1200 [W/m<sup>2</sup>].

Aproximadamente el 1.33% del área del estado tiene una densidad de potencia de viento anual a 80 [m] de 700 [W/m<sup>2</sup>] a 800 [W/m<sup>2</sup>], el 1.99 % de 600 [W/m<sup>2</sup>] a 700 [W/m<sup>2</sup>] y el 3.33% de 500 [W/m<sup>2</sup>] a 600 [W/m<sup>2</sup>], haciendo un total del 6.65% (4889.7 [km<sup>2</sup>]).

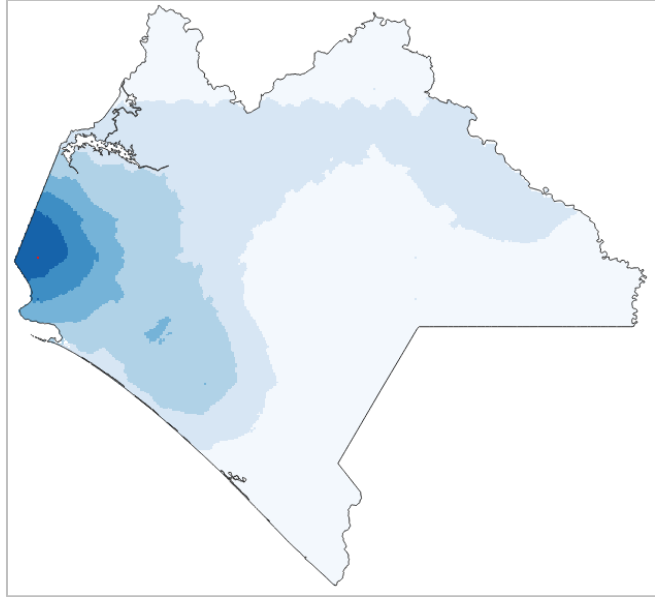
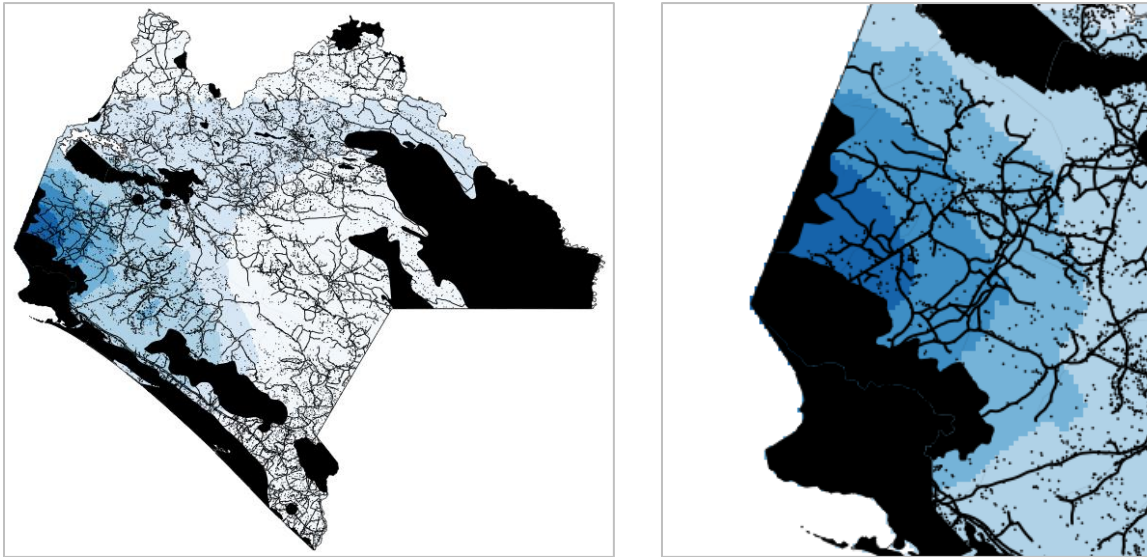


Figura 13.51. Densidad de potencia de viento en el estado de Chiapas. Fuente: Elaboración propia.

### Excluyentes

En el caso de Chiapas, la gran parte del área excluyente en la zona clase 4 corresponde a AICAS, ANP y sitios RAMSAR. En total 2868 [km<sup>2</sup>].



Figuras 13.52 y 13.53. Áreas de exclusión para la instalación de parques eólicos en Chiapas. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.8: AICAS dentro del área del estado de Chiapas con potencial de viento clase 4 a 80 [m]. Fuente: Elaboración propia.

AICAS	
Nombre	Área [km <sup>2</sup> ]
Chimalapas	184
La Sepultura	813
Istmo de Tehuantepec	997

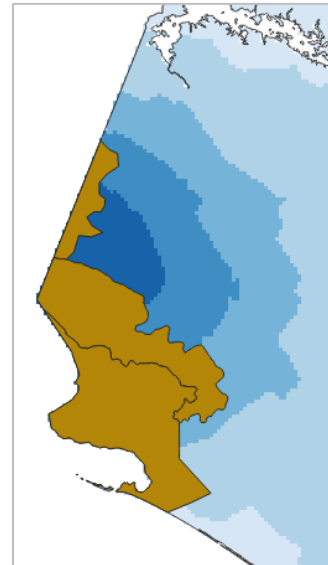


Figura 13.54. AICAS que se encuentran dentro de la superficie de potencial de viento clase 4 a 80 [m] en Chiapas. Fuente: Elaboración propia.

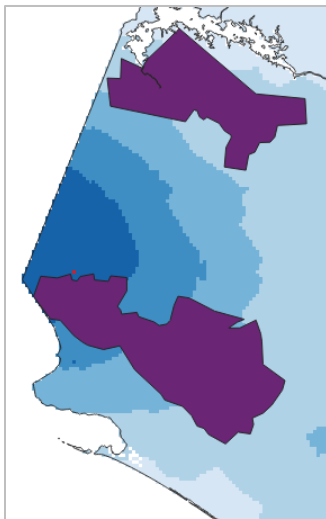


Tabla 4.9: ANP dentro del área del estado de Chiapas con potencial de viento clase 4 a 80 [m]. Fuente: Elaboración propia

ANP	
Nombre	Área [km <sup>2</sup> ]
Selva El Ocote	1023
La Sepultura	1693

Figura 13.55. ANP que se encuentran dentro de la superficie de potencial de viento clase 4 a 80 [m] en Chiapas. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.10: Sitios RAMSAR dentro del área del estado de Chiapas con potencial de viento clase 4 a 80 [m]. Fuente: Elaboración propia

Sitios RAMSAR	
Nombre	Área [km <sup>2</sup> ]
Sistema Estuarino Puerto Arista	343

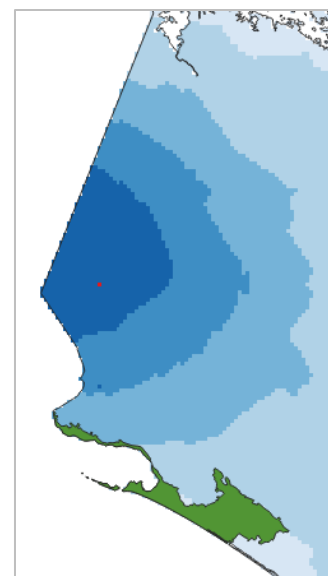


Figura 13.56. Sitios RAMSAR que se encuentran dentro de la superficie de potencial de viento clase 4 a 80 [m] en Chiapas. Fuente: Elaboración propia.

## Condicionales

### Arqueología

Las principales zonas arqueológicas del estado se encuentran fuera del área de interés eólico.

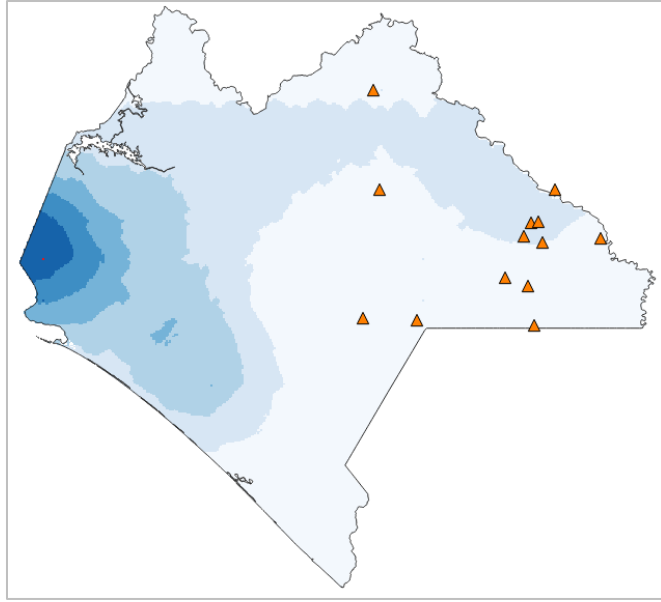
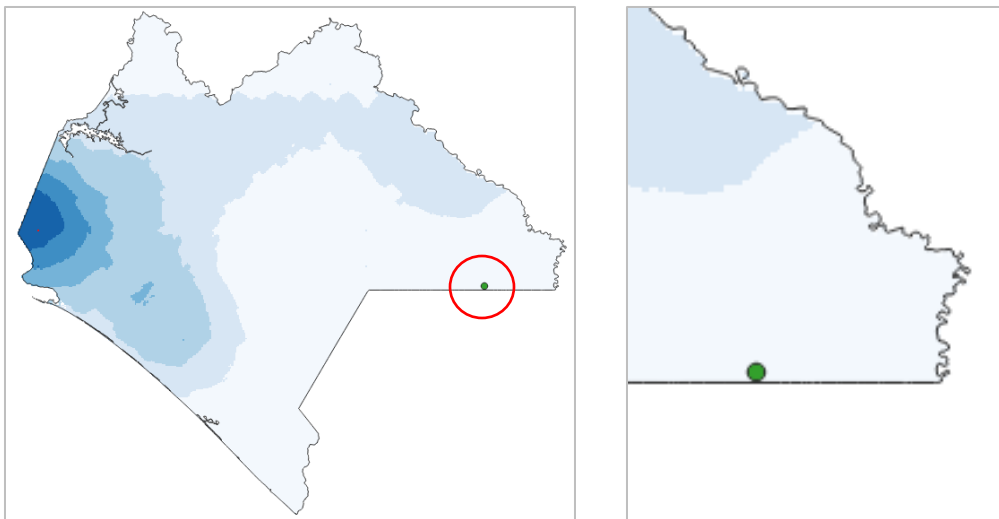


Figura 13.57. Rasgo arqueológico del estado de Chiapas. Fuente: Elaboración propia.

### Murciélagos

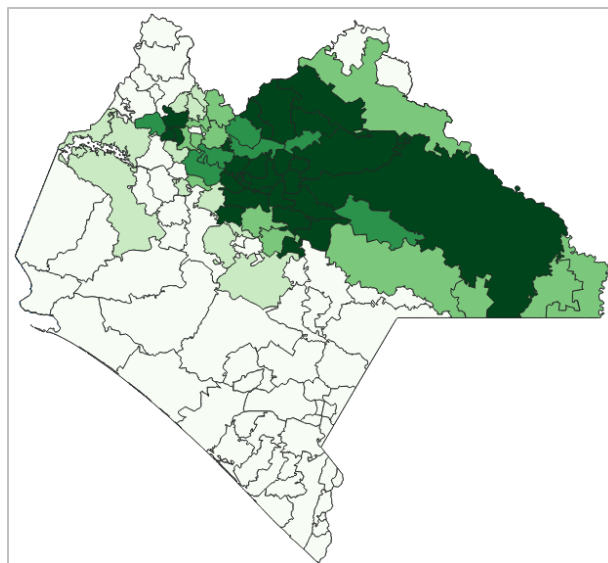
El municipio de Marqués de Comillas, que se encuentra en la frontera con Guatemala y dentro de la Selva Lacandona es el hogar del murciélago en peligro de extinción Vampiro falso de Linneo (*Vampyrum spectrum*), su ubicación con respecto a la zona con potencial de viento clase 4 es de aproximadamente 280 [km] por lo que no representan peligro para su población.



Figuras 13.58 y 13.59. Ubicación del murciélago Vampiro falso de Linneo (*Vampyrum spectrum*) en el estado de Chiapas. Fuente: Elaboración propia.

## Población indígena

Los municipios con alto porcentaje de población indígena están concentrados en las regiones Selva Lacandona, Tulijá Tseltal Choi y Altos Tsotsil-Tseltal, que se encuentran fuera de zona de interés para proyectos eólicos la cual contiene municipios con rango de 0% a 10% de población indígena.



*Figura 13.60. Porcentaje de distribución de la población que habla una lengua indígena en Chiapas.  
Fuente: Elaboración propia.*

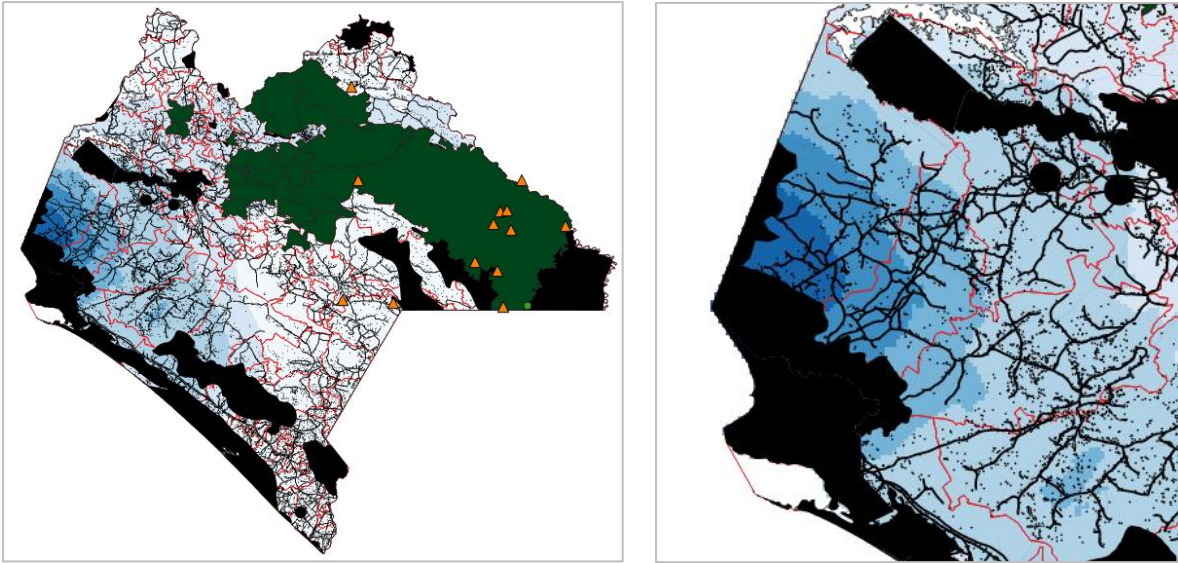
## *Resultado para Chiapas*

Se cuentan con 6 municipios en donde sus áreas son aptas para la colocación de parques eólicos con aerogeneradores de 80 [m] según el estudio anual de CFE. Cintalapa presenta la mayor superficie y los tres rangos de densidad de potencia.

Aproximadamente, la entidad cuenta con 2021.7 [km<sup>2</sup>] de superficie con potencial disponibles para la instalación de parques eólicos.

*Tabla 4.11: Municipios de Chiapas con potencial de viento clase 4 a 80 [m] y las capas que intervienen en ellos. Fuente: Elaboración propia.*

#	Municipio	Capas	#	Municipio	Capas
1	Cintalapa	Excluyente	4	Tonalá	Excluyente
2	Jiquipilas	Excluyente	5	Villaflores	Excluyente
3	Arriaga	Excluyente	6	Ocozocoautla de Espinosa	Excluyente



Figuras 13.61. y 13.62. Totalidad de capas que influyen en Chiapas. Fuente: Elaboración propia.

## Yucatán

### Potencial eólico

Aproximadamente el 11.87% (4728.4 [km<sup>2</sup>]) de la entidad tiene una densidad de potencia de 600 [W/m<sup>2</sup>] a 700 [W/m<sup>2</sup>], la cual pertenece a un potencial de viento clase 4 a 80 [m].

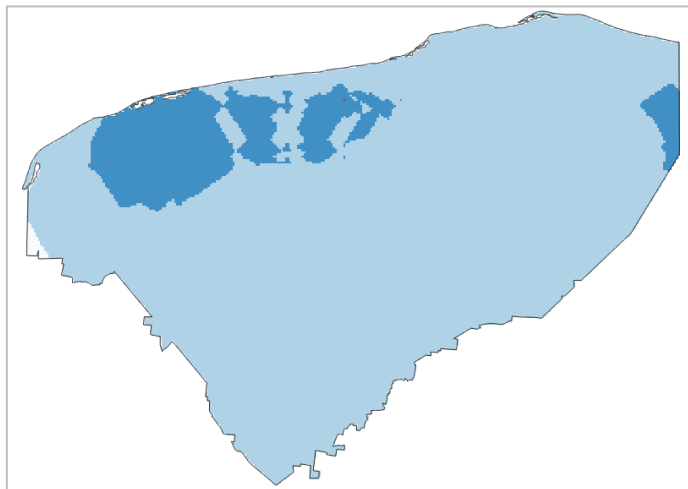


Figura 13.63. Densidad de potencia de viento en el estado de Yucatán. Fuente: Elaboración propia.

### Excluyentes

Los principales elementos excluyentes en el estado se componen de AICAS, sitios RAMSAR y el Aeropuerto Internacional Manuel Crescencio Rejón o Aeropuerto Internacional de Mérida. El total aproximado del área excluyente en la zona de potencial es de 1698 [km<sup>2</sup>].

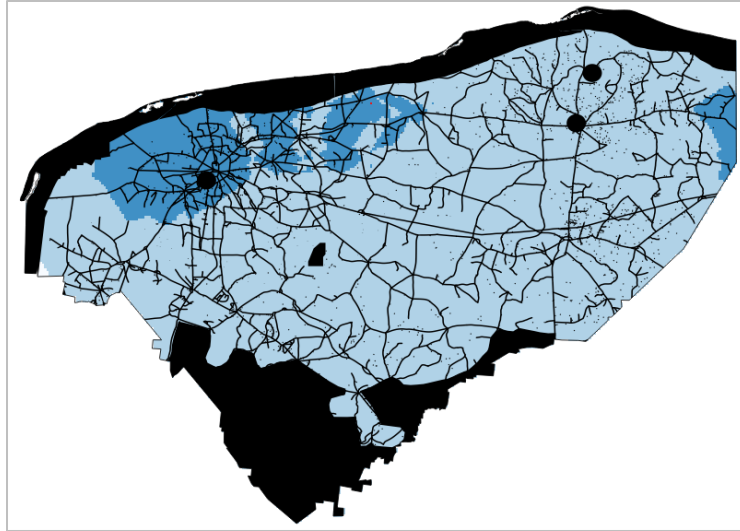


Figura 13.64. Áreas de exclusión para la instalación de parques eólicos en Yucatán.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.12: AICAS dentro del área del estado de Yucatán con potencial de viento clase 4 a 80 [m]. Fuente: Elaboración propia.

AICAS	
Nombre	Área [km <sup>2</sup> ]
Ría Celestún	721
Ichka' Ansijo	793
Reserva Estatal de Dzilam	966

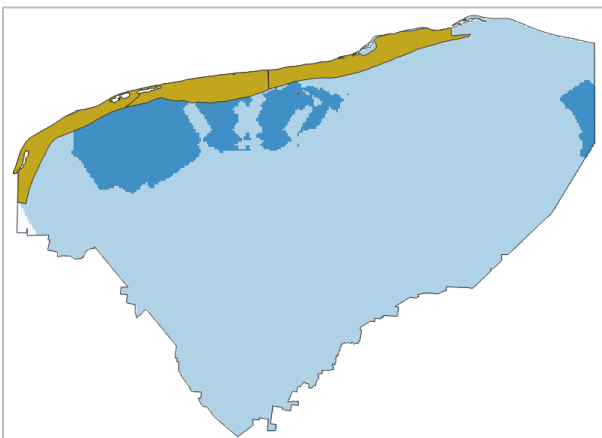


Figura 13.65. AICAS que se encuentran dentro de la superficie de potencial de viento clase 4 a 80 [m] en Yucatán. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.13: Sitios RAMSAR dentro del área del estado de Yucatán con potencial de viento clase 4 a 80 [m].  
Fuente: Elaboración propia

Sitios RAMSAR	
Nombre	Área [km <sup>2</sup> ]
Reversa Estatal "El Palmar"	402

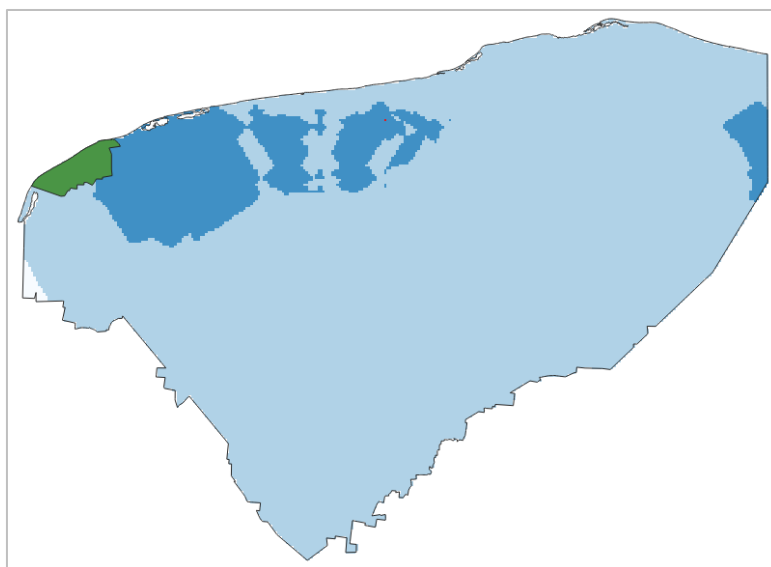


Figura 13.66. Sitios RAMSAR que se encuentran dentro de la superficie de potencial de viento clase 4 a 80 [m] en Yucatán. Fuente: Elaboración propia.

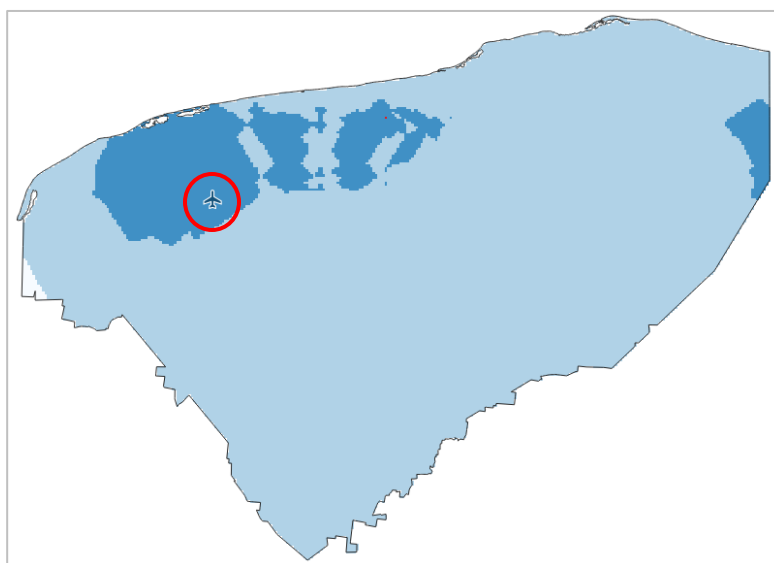


Figura 13.67. Aeropuerto Internacional Manuel Crescencio Rejón o Aeropuerto Internacional de Mérida. Fuente: Elaboración propia.



## Condicionales

### Arqueología

Dentro del área de interés se encuentra un rasgo arqueológico importante ubicado en el municipio de Mérida, aunque dada la herencia cultural de la región es poco probable que sea el único, la capa lo muestra principalmente de manera representativa.

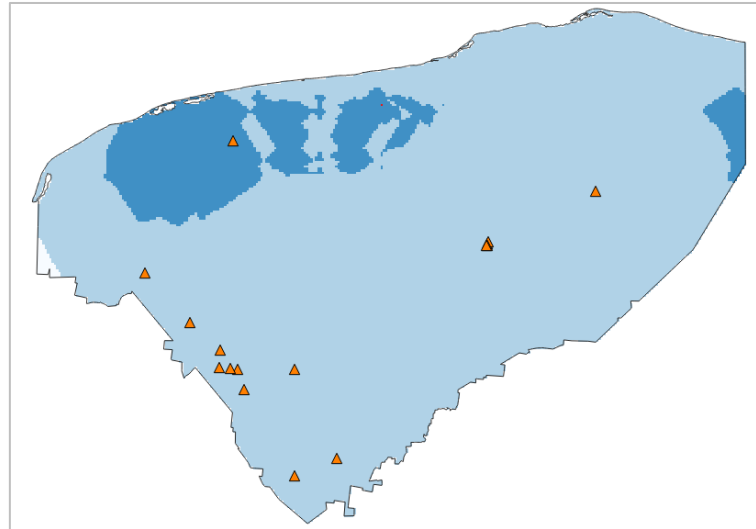


Figura 13.68. Rasgo arqueológico del estado de Yucatán. Fuente: Elaboración propia.

### Murciélagos

El estado no presenta población de murciélagos en peligro de extinción en su territorio.

### Población indígena

20 municipios cuentan con el 75% al 100% de población indígena, 3 de ellos se encuentran en las zonas con potencial eólico.

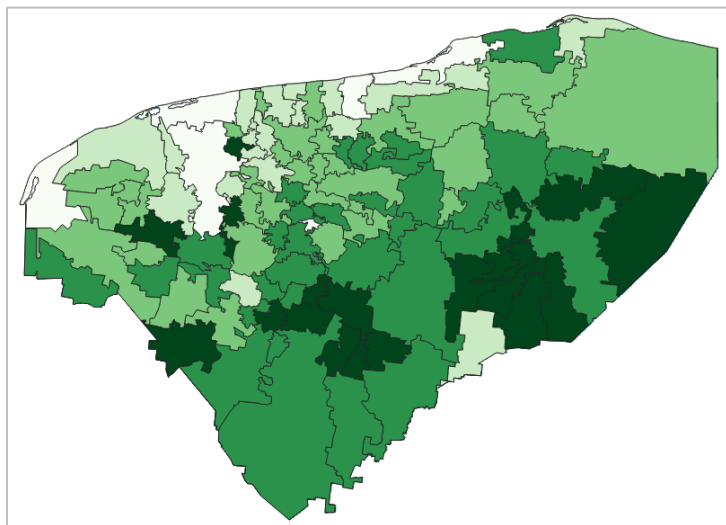


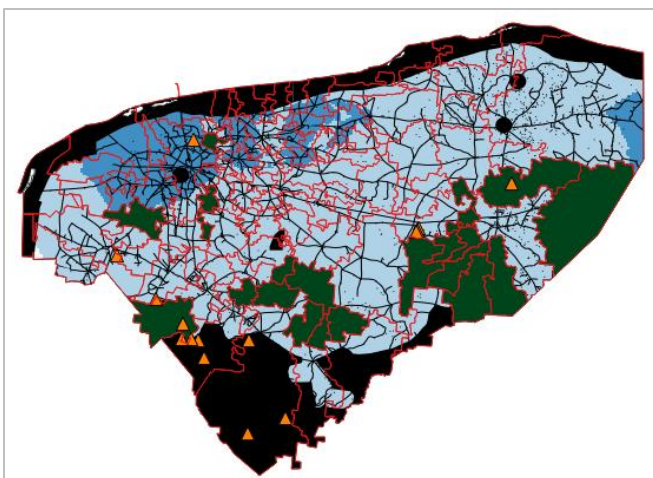
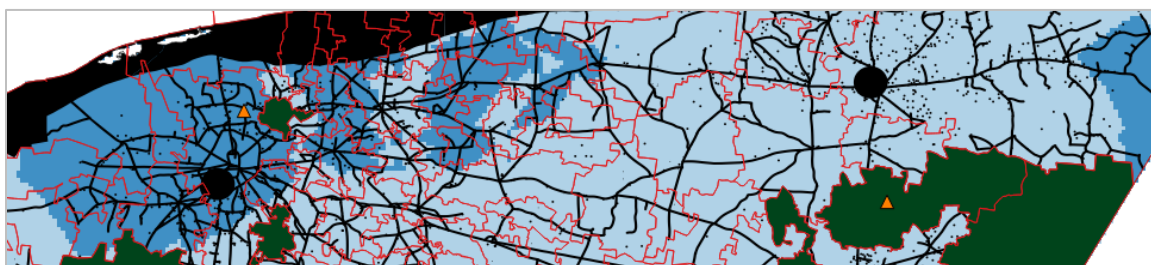
Figura 13.69. Porcentaje de distribución de la población que habla una lengua indígena en Yucatán. Fuente: Elaboración propia.

## Resultado para Yucatán

34 municipios de Yucatán comparten una densidad de potencia en promedio anual de 600 [W/m<sup>2</sup>] a 700 [W/m<sup>2</sup>] a 80 [m], todos tienen influencia de la capa excluyente y 4 de capas condicionales, haciendo un total de 3030.4 [km<sup>2</sup>].

Tabla 4.14: Municipios de Yucatán con potencial de viento clase 4 a 80 [m] y las capas que intervienen en ellos. Fuente: Elaboración propia.

#	Municipio	Capas	#	Municipio	Capas
1	Hunucmá	Excluyente	18	Yobaín	Excluyente
2	Tetiz	Excluyente	19	Dzidzantún	Excluyente
3	Kinchil	Excluyente	20	Dzilam González	Excluyente
4	Samahil	Excluyente	21	Buctzotz	Excluyente
5	Umán	Excluyente	22	Temax	Excluyente
6	Ucú	Excluyente	23	Dzoncauich	Excluyente
7	Progreso	Excluyente	24	Tekal de Venegas	Excluyente
8	Kanasín	Excluyente	25	Tepakán	Excluyente
9	Tixpéhua	Excluyente	26	Teya	Excluyente
10	Tixkokob	Excluyente	27	Suma	Excluyente
11	Yaxkukul	Excluyente	28	Tekantó	Excluyente
12	Ixil	Excluyente	29	Bokobá	Excluyente
13	Motul	Excluyente	30	Tizimín	Excluyente
14	Baca	Excluyente	31	Mérida	Excluyente, Arqueología
15	Muxupip	Excluyente	32	Chocholá	Excluyente, Pob.Ind.
16	Telchac Pueblo	Excluyente	33	Conka	Excluyente, Pob.Ind.
17	Cacalchén	Excluyente	34	Chemax	Excluyente, Pob.Ind.

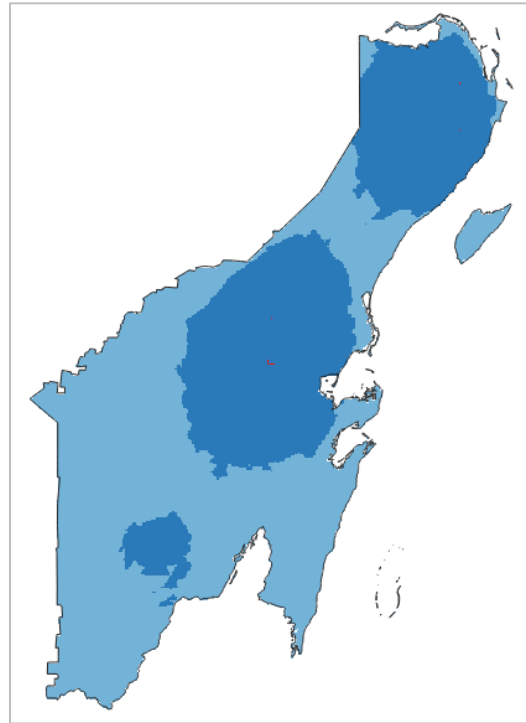


Figuras 13.70. y 13.71. Totalidad de capas que influyen en Yucatán. Fuente: Elaboración propia.

## Quintana Roo

### *Potencial eólico*

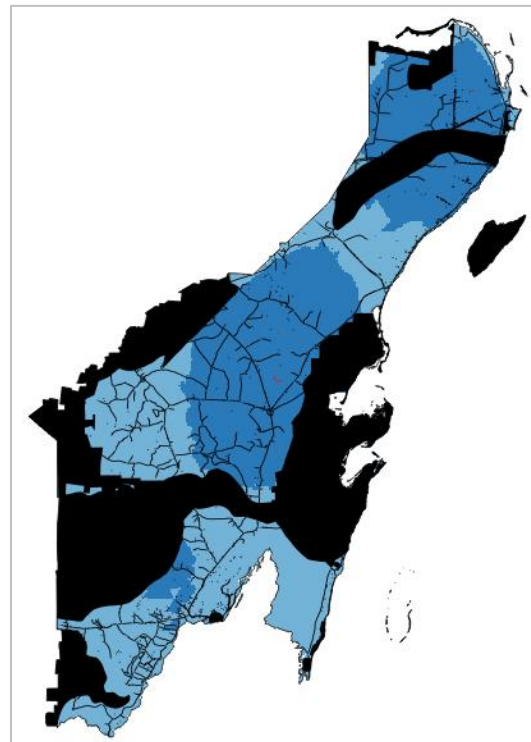
El 0.014% del estado tiene densidad de potencia anual a 80 [m] de más de 1200 [W/m<sup>2</sup>] y el 40.64% de 600 [W/m<sup>2</sup>] a 700 [W/m<sup>2</sup>], total de 40.65% (17799.5 [km<sup>2</sup>]).



*Figuras 13.72 y 13.73. Densidad de potencia de viento en el estado de Quintana Roo. Fuente: Elaboración propia.*

### *Excluyentes*

La mayor parte del área de exclusión en la zona de potencial se compone de AICAS, ANP y sitios RAMSAR, que en conjunto con los demás aspectos, forman un área de exclusión aproximadamente de 8234.3 [km<sup>2</sup>].



*Figura 13.74. Áreas de exclusión para la instalación de parques eólicos en Quintana Roo. Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 4.15: AICAS dentro del área del estado de Quintana Roo con potencial de viento clase 4 a 80 [m].  
Fuente: Elaboración propia.

AICAS	
Nombre	Área [km <sup>2</sup> ]
Yum-Balam	533
Corredor Central Vallarta-Punta Laguna	1759
Sierra de Ticul-Punto Put	2645
Sian Ka'An	4749
Corredor Calakmul-Sian Ka'An	5234

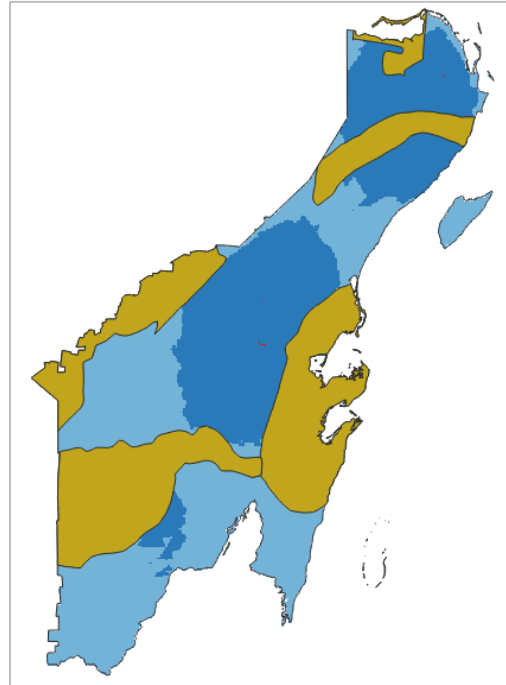


Figura 13.75. AICAS que se encuentran dentro de la superficie de potencial de viento clase 4 a 80 [m] en Quintana Roo. Fuente: Elaboración propia.

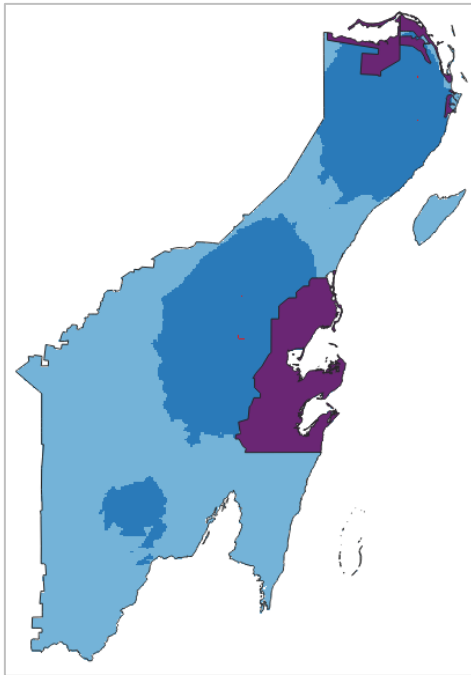


Tabla 4.16: ANP dentro del área del estado de Quintana Roo con potencial de viento clase 4 a 80 [m]. Fuente: Elaboración propia

ANP	
Nombre	Área [km <sup>2</sup> ]
Manglares de Nichupté	43
Yum Balam	521
Sian Ka'an	3711
Caribe Mexicano	277

Figura 13.76. ANP que se encuentran dentro de la superficie de potencial de viento clase 4 a 80 [m] en Quintana Roo. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.17: Sitios RAMSAR dentro del área del estado de Quintana Roo con potencial de viento clase 4 a 80 [m].  
Fuente: Elaboración propia

Sitios RAMSAR	
Nombre	Área [km <sup>2</sup> ]
Área de Protección de Flora y Fauna Yum Balam	521
Manglares de Nichupté	43
Sian Ka'an	4614

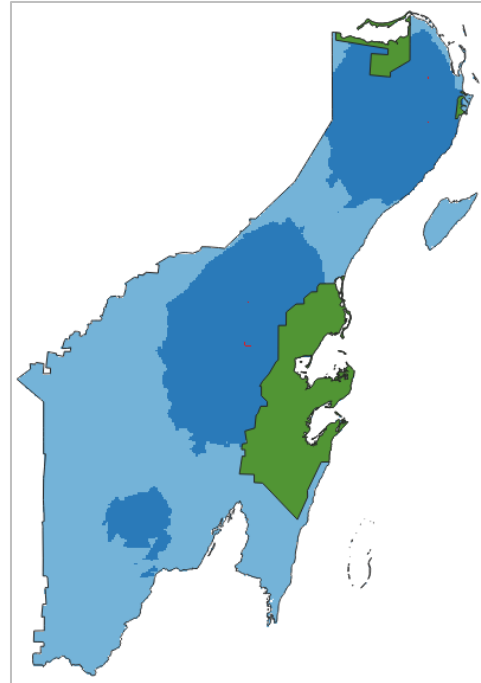


Figura 13.77. Sitios RAMSAR que se encuentran dentro de la superficie de potencial de viento clase 4 a 80 [m] en Quintana Roo. Fuente: Elaboración propia

### Condicionales

#### Arqueología

Al igual que Yucatán, Quintana Roo fue una región clave para el desarrollo de la civilización maya, por lo que el rasgo arqueológico es abundante en la entidad.

Los municipios de Felipe Carrillo Puerto, Isla Mujeres y Othón P. Blanco son los que se encuentran en la zona con potencial eólico y según la capa de arqueología dentro de la misma se encuentran rasgos importantes.

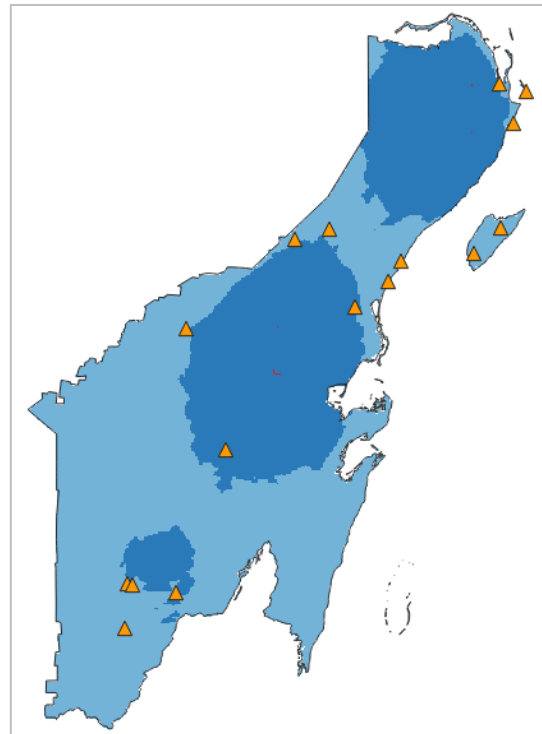


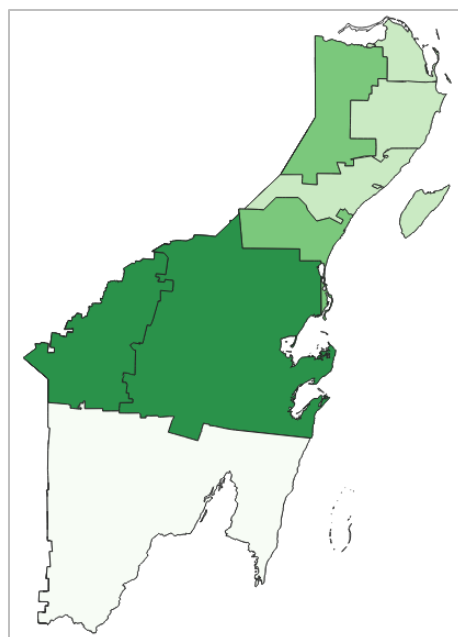
Figura 13.78. Rasgo arqueológico del estado de Quintana Roo. Fuente: Elaboración propia.

## Murciélagos

La población de murciélagos en peligro de extinción es nula en la entidad.

## Población indígena

De los 11 municipios que conforman el estado, los que presentan el mayor porcentaje de población de habla indígena son Felipe Carrillo Puerto y José María Morelos con un rango del 50% al 75%



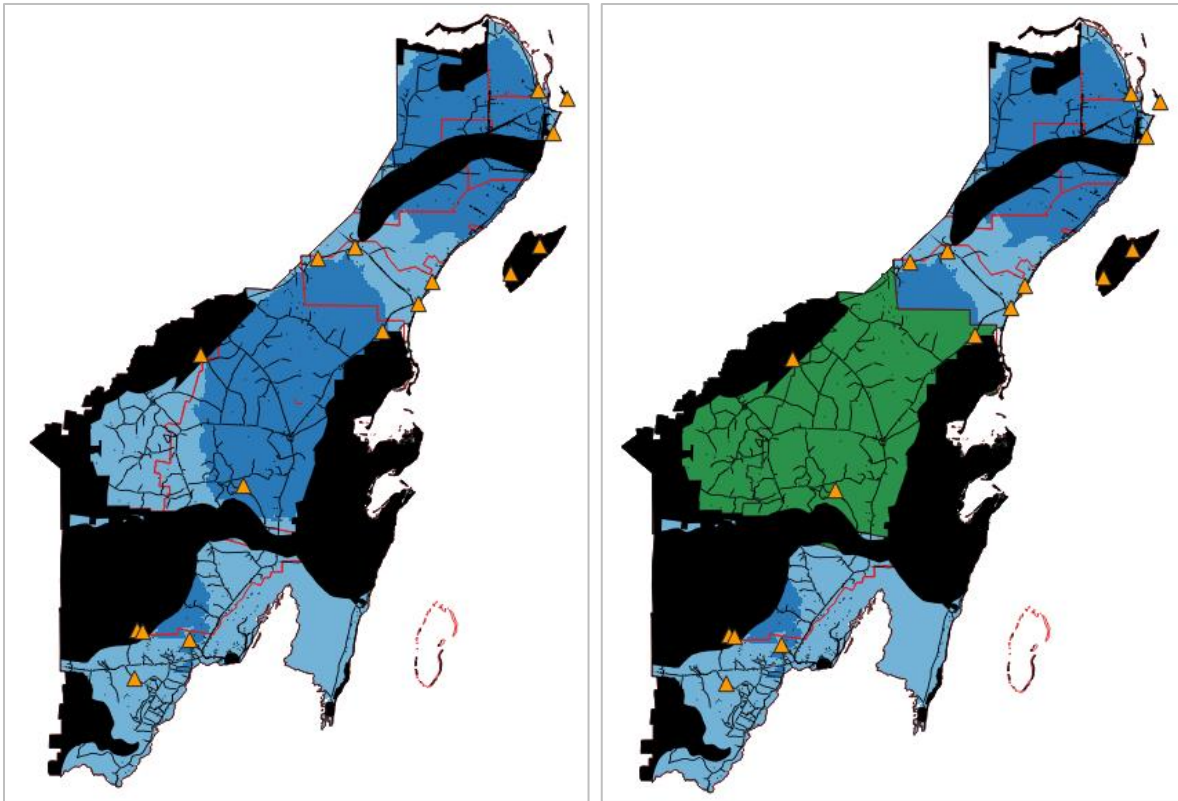
*Figura 13.79. Porcentaje de distribución de la población que habla una lengua indígena en Quintana Roo. Fuente: Elaboración propia.*

## *Resultado para Quintana Roo*

10 municipios presentan una densidad de potencial de viento anual apta para la instalación de parques eólicos, sin embargo, una elevada presencia de rasgo arqueológico y un alto porcentaje de población indígena en el municipio con mayor área con potencial (Felipe Carrillo Puerto) hace que los estudios previos a proyectos eólicos sean más exhaustivos para evitar daños en la gran herencia cultural que la zona posee. En total, el área disponible es de 9565.2 [km<sup>2</sup>].

*Tabla 4.14: Municipios de Quintana Roo con potencial de viento clase 4 a 80 [m] y las capas que intervienen en ellos. Fuente: Elaboración propia.*

#	Municipio	Capas	#	Municipio	Capas
1	Isla Mujeres	Excluyente	6	Tulum	Excluyente
2	Lázaro Cárdenas	Excluyente	7	Felipe Carrillo Puerto	Excluyente, Arqueología, Pob.Ind.
3	Benito Juárez	Excluyente	8	José María Morelos	Excluyente, Pob.Ind.
4	Puerto Morelos	Excluyente	9	Bacalar	Excluyente
5	Solidaridad	Excluyente	10	Othón P. Blanco	Excluyente, Arqueología



*Figuras 13.80. y 13.81. Totalidad de capas que influyen en Quintana Roo. Fuente: Elaboración propia.*

## Resultados generales

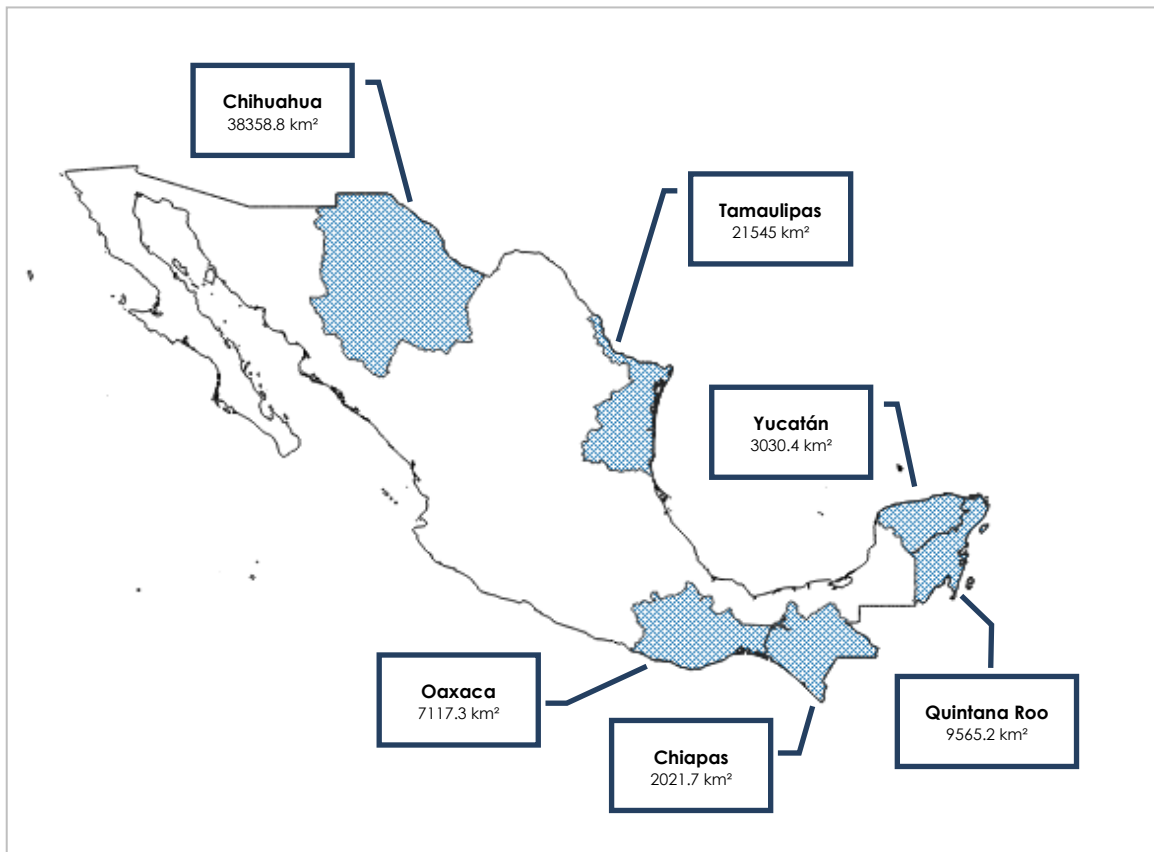
En la Tabla 4.15, se presentan los resultados para cada entidad federativa con potencial eólico anual a 80 [m] de altura. Cabe señalar que las áreas involucradas son aproximadas y se refieren a la parte continental, ya que como se mencionó, el presente estudio se centra en parques eólicos onshore.

Chihuahua es el estado con mayor área apta para la instalación de aerogeneradores (véase Figura 14.0), esto se debe a diversos factores, el principal es la superior extensión de su superficie y el clima árido predominante, esto último resulta en escasas de agua que a su vez causa menor concentración de población humana y hábitats naturales, reduciendo considerablemente aspectos excluyentes como localidades, hidrografía, aeropuertos, AICAS, ANP, sitios RAMSAR, etc.

Tabla 4.15: Resultados por entidad federativa. Fuente: Elaboración propia.

Entidad	Área continental de la entidad. [km <sup>2</sup> ]	Área con potencial eólico. [km <sup>2</sup> ]	Área de exclusión. [km <sup>2</sup> ]	Área viable para el desarrollo de proyectos eólicos con aerogeneradores de 80 [m]*. [km <sup>2</sup> ]
<b>Chihuahua</b>	249180	49337.6	10978.9	38358.8
<b>Tamaulipas</b>	78784	35909.7	14364.7	21545
<b>Oaxaca</b>	93688	17332.3	10215	7117.3
<b>Chiapas</b>	73496	4889.7	2868	2021.7
<b>Yucatán</b>	39835	4728.4	1698	3030.4
<b>Quintana Roo</b>	43783	17799.5	8234.3	9565.2

\*Es posible que en algunos estados ya existan parques eólicos instalados, sin embargo, la falta de información hizo imposible ubicar cada uno de ellos.



Figuras 14.0. Superficie viable para la instalación de proyectos eólicos. Fuente: Elaboración propia.



## 5. Conclusiones y recomendaciones

Se demostró que la ingeniería ambiental posee la capacidad de identificación de no sólo lugares en donde la instalación de parques eólicos es posible sino también en los que estaría prohibido, en los cuales podrían poner en riesgo a poblaciones vulnerables y zonas de gran importancia para la identidad del país.

Los aspectos que se consideraron para el análisis surgieron de la investigación y/o cálculo. El principal aspecto a considerar fue el recurso eólico y el proceso para su identificación fue el siguiente:

Los expertos recomiendan el uso de la densidad de potencia para identificar el potencial eólico de una región, el cálculo se puede hacer mediante una ecuación (Ec.1) sin embargo, la CFE mediante la plataforma del Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE) pone a la disposición del público capas de densidad del viento del país a diferentes alturas, la elegida fue 80 [m] anual ya que es el promedio de altura de los aerogeneradores modernos y los estudios relacionados a viento usualmente toman un año.

Las clases de densidad de potencia nos indican el potencial del viento, pero la densidad que le corresponde a cada clase varía dependiendo la altura de estudio, tal clasificación para 80 [m] se encontró en bibliografía especializada y considerando que una clase 4 y superior es considerada óptima para la generación de energía eólica, se determinó que para la altura dada el límite mínimo de densidad de potencia sería 500 [W/m<sup>2</sup>]. Gracias a ese dato y a la capa de densidad de potencia se pudo identificar las entidades federativas en donde las condiciones de viento son favorables para la instalación de parques eólicos: Chihuahua, Tamaulipas, Oaxaca, Chiapas, Yucatán y Quintana Roo.

A su vez los demás aspectos se integraron en grupos de capas dependiendo de su naturaleza, *excluyente* para todo aquel que por reglamento descarte ciertas áreas para la instalación de aerogeneradores en pos del bienestar humano y ambiental, y *condicional* para aquellos que pueden ser un obstáculo para el desarrollo de proyectos eólicos.

### Excluyentes

Es conveniente aclarar que las áreas excluyentes realizadas sobre las localidades, vías de comunicación, aeropuertos e hidrografía sólo contienen el buffer, ya que las mismas no tienen una extensión determinada porque son

representadas como un punto o línea y no como un polígono, en consecuencia, es muy probable que el área de exclusión aumente en la vida real.

- *Temperatura.* Un aerogenerador opera de manera estándar en un rango de temperatura de  $-20[^\circ\text{C}]$  a  $40[^\circ\text{C}]$ , sólo tres veces se han presentado temperaturas menores e iguales a  $-20[^\circ\text{C}]$  por lo que se omitió la capa de la temperatura mínima y se consideró usar la de máxima filtrando las superficies donde se presentarían en promedio  $38 [^\circ\text{C}]$  en adelante debido a los rangos manejados por la capa.
- *Sombra parpadeante.* La sombra generada por las aspas de los aerogeneradores puede ocasionar molestias tanto a habitantes como a conductores por lo que se recomienda hacer es instalarlos al menos  $300 [m]$  de las vías de comunicación y poblaciones.
- *Ruido.* El país no tiene determinadas una distancia mínima y máxima entre parques eólicos y asentamientos humanos, la máxima es utilizada como medida de factibilidad de realización por los costos implicados en la transmisión de la energía eléctrica generada a la población beneficiada y la mínima como medida de seguridad por los problemas de salud que el ruido puede ocasionar, usando la ecuación para la propagación de los sonidos a la distancia (Ec.3) y tomando como entrada el nivel máximo de presión acústica del aerogenerador onshore más grande al momento  $109 [dB(A)]$ , el límite máximo permisible según la NOM-081-ECOL-1994 se cumple a los  $61.1 [m]$ , siendo que el fenómeno de la sombra parpadeante sugiere un radio de  $300 [m]$  para evitarlo, se dibujó áreas de exclusión de  $300 [m]$  en todas las localidades del país.
- *Aeropuertos.* Se tomó la condición más desfavorable de la NOM-EM-014-SCT3-1994, que es un radio de  $4000 [m]$  sobre los aeropuertos.
- *Hidrografía.* Las zonas federales de los ríos comprenden  $10 [m]$  de radio.
- *Flora y fauna.* Sitios RAMSAR, Áreas de importancia para la conservación de las aves (AICAS) y Áreas Naturales Protegidas Federales de México (ANP) son lugares de gran importancia ecológica por lo que estaría prohibido realizar un proyecto de gran magnitud como lo es un parque eólico.

## Condicionales

- *Arqueología.* Se consideró como un aspecto condicional ya que la capa que se usó no muestra la ubicación ni la extensión de todos los lugares de importancia arqueológica del país.
- *Murciélagos.* Las capas muestran las ubicaciones de los cuatro tipos de murciélagos en peligro de extinción que alberga el país, la presencia de aerogeneradores no necesariamente puede ser una amenaza a su población si se realizan los estudios y adecuaciones correspondientes en el desarrollo del proyecto.
- *Población indígena.* Una alta concentración de población indígena puede significar niveles de analfabetismo y pobreza elevados, por lo que prejuicios acerca de este tipo de proyectos son comunes, el enfoque de acercamiento a las comunidades debe ser diferente y de una manera que evite agresiones y abusos por ambas partes.

En el país existen al menos seis estados en donde sería posible implementar la energía eólica a 80 [m] como una opción viable para sustituir a los combustibles fósiles, no obstante, la falta de información y legislación sobre el tema en el país es un obstáculo para impulsar su desarrollo y aceptación entre la sociedad, por lo que los resultados de este trabajo pueden ser de ayuda para la planeación de proyectos eólicos en el país o simplemente para concientizar al lector de la gran cantidad de recurso eólico que México posee.

## Bibliografía

- (BUN-CA), B. U. (2002). *Manual sobre energía renovable: Eólica*. San José, C.R.: Biomass Users Network (BUN-CA).
- AMDEE. (s.f.). *Asociación Mexicana de Energía Eólica*. Recuperado el 30 de Diciembre de 2017, de <http://www.amdee.org>
- American Wind Energy Association. (26 de Noviembre de 2017). *AWEA*. Obtenido de <https://www.awea.org/>
- Banco Mundial. (6 de Agosto de 2017). *Banco de datos del Banco Mundial*. Obtenido de <https://datos.bancomundial.org/>
- Barrera-Hernández, L., Barton, B., Godden, L., Lucas, A., & Rønne, A. (2016). *Sharing the Costs and Benefits of Energy and Resource Activity: Legal Change and Impact on Communities*. Oxford University Press.
- BUREAU VERITAS. (2008). *Manual para la formación en medio ambiente*. Lex Nova.
- Buxton, G. (2017). *Alternative Energy Technologies: An Introduction with Computer Simulations*. CRC Press.
- CONAGUA. (Diciembre de 2017). Obtenido de [https://twitter.com/conagua\\_clima/status/940432964177072130/photo/1](https://twitter.com/conagua_clima/status/940432964177072130/photo/1)
- Earnest, J. (2015). *Wind Power Technology, Second Edition* (2 ed.). Phi.
- Geoffrey J. Meaden, J. M. (1992). *Los sistemas de información geográfica y la telepercepción en la pesca continental y la acuicultura*. FAO.
- GreenFacts Scientific Board. (s.f.). *GreenFacts Facts on Health and the Environment*. Recuperado el 7 de Diciembre de 2017, de <https://www.greenfacts.org/es/glosario/def/decibelio.htm>
- INEGI. (10 de Septiembre de 2017). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/internet/sistemainformaciongeografica.pdf>
- IWEA. (2018). *Irish Wind Energy Association*. Recuperado el 19 de Enero de 2018, de <http://www.iwea.com>

- Jha, A. (2010). *Wind Turbine Technology*. CRC Press.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). *Wind Energy Explained Theory, Design and Application*. John Wiley & Sons Ltd.
- Mayol, M. L., Navarro, G. P., Otero, A. D., & Saulo, A. C. (9 de Agosto de 2017). Técnicas para el análisis multiescala del recurso eólico utilizando computación de alto desempeño. Buenos Aires, Argentina. Recuperado el 14 de Diciembre de 2017, de [https://www.researchgate.net/publication/319181532\\_Tecnicas\\_para\\_el\\_analisis\\_multiescala\\_del\\_recurso\\_eolico\\_utilizando\\_computacion\\_de\\_alto\\_desempeno\\_presentacion](https://www.researchgate.net/publication/319181532_Tecnicas_para_el_analisis_multiescala_del_recurso_eolico_utilizando_computacion_de_alto_desempeno_presentacion)
- Minnesota Department of Commerce. (2011). *International Review of Policies and Recommendations for Wind Turbine Setbacks from Residences: Setbacks, Noise, Shadow Flicker, and Other Concerns*. Recuperado el 8 de Febrero de 2017, de [https://mn.gov/commerce/energyfacilities/documents/International\\_Review\\_of\\_Wind\\_Policies\\_and\\_Recommendations.pdf](https://mn.gov/commerce/energyfacilities/documents/International_Review_of_Wind_Policies_and_Recommendations.pdf)
- Morales, A. (23 de Mayo de 2017). *MappingGIS*. Obtenido de <http://mappinggis.com/2012/09/aplicaciones-gis-open-source/>
- National Research Council of The National Academies. (2007). *Environmental Impacts of Wind-Energy Projects*. Washington, D.C.: The National Academies Press.
- Navarro, A. P. (2011). *Introducción a los sistemas de información geográfica y geotelemática*. Barcelona: OUC.
- O'Neal, C. (2010). *How To Use Wind Power to Light and Heat Your Home* . Mitchell Lane.
- REN21. (2017). *Renewables 2017 Global Status Report*.
- Renewable Energies Offshore*. (2015). CRC Press.
- RSPB. (2018). *The Royal Society for the Protection of Birds*. Recuperado el 19 de Enero de 2018, de <https://www.rspb.org.uk/our-work/our-positions-and-casework/our-positions/climate-change/action-to-tackle-climate-change/uk-energy-policy/wind-farms>

- Salvato, J. A., Nemerow, N. L., & Agardy, F. J. (2003). *Environmental Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- SEGOB. (2015). *La energía eólica en México: Una perspectiva social sobre el valor de la tierra*.
- Seifried, D., & Witzel, W. (2010). *Renewable Energy The Facts*. Earthscan.
- SENER. (10 de Agosto de 2017). *Inventario Nacional de Energías Renovables*. Obtenido de <https://dgel.energia.gob.mx/inere/>
- Siemens Gamesa. (22 de Julio de 2016). *Siemens Gamesa Renewable Energy*. Recuperado el 26 de Noviembre de 2017, de <http://www.siemensgamesa.com/recursos/doc/rsc/compromisos/clientes/certificaciones-ohsas-y-i/documentacion-declaracion-ambiental-g90.pdf>
- Smith, K. K. (2005). *Powering Our Future: An Energy Sourcebook for Sustainable Living*. Alternative Energy Institute.
- The Ramsar Convention Secretariat. (2014). *Ramsar*. Obtenido de [www.ramsar.org](http://www.ramsar.org)
- The Wind Power. (4 de marzo de 2018). *The Wind Power*. Obtenido de [www.thewindpower.net](http://www.thewindpower.net)
- U.S. Department of Energy. (2018). Obtenido de <https://www.energy.gov/articles/quiz-test-your-wind-energy-iq>
- United States Rural Utilities Service. (2007). *Basin Electric Power Cooperative Dry Fork Station and Hughes Transmission Line: Environmental Impact Statement*.
- Winrock International. (Marzo de 2004). Guía de Herramientas para Proyectos con Energía Eólica.
- Zhang, M. H. (2015). *Wind Resource Assessment and Micro-siting: Science and Engineering*. John Wiley & Sons.