



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:

1	INTRODUCCIÓN	5
1.1	Motivación	5
1.2	Alcance	5
1.3	Objetivos	6
1.3.1	Principal	6
1.3.2	Específicos	6
2	ANTECEDENTES	7
2.1	Sector eléctrico de Guatemala	7
2.1.1	Marco legal del sector eléctrico	7
2.1.2	Estructura e instituciones del mercado eléctrico de Guatemala	8
2.1.3	Mercado Eléctrico	8
2.1.4	Sistema eléctrico	10
2.1.5	Eólica y fotovoltaica en el contexto de producción eléctrica	10
2.2	Cambio climático	12
2.3	Conflicto entre Instituto Nacional de Electrificación (INDE) y la Empresa Eléctrica Municipal de Quetzaltenango (EEMQ)	13
2.4	Sistemas de producción eólica y fotovoltaica	14
3	METODOLOGÍA PARA LA ELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTOS PARA CENTRALES EÓLICAS Y FOTOVOLTAICAS	15
3.1	PRIMERA ETAPA: Selección de alternativas de emplazamiento	16
3.1.1	Localización de zonas con alta abundancia del recurso renovable	16
3.1.2	Localización de subestaciones del sistema eléctrico	17
3.1.3	Selección de posibles emplazamientos para parques eólicos y fotovoltaicos	17
3.2	SEGUNDA ETAPA: Comparación de emplazamientos candidatos	17
3.2.1	Factor de planta	17
3.2.2	Capacidad futura	18
3.2.3	Distancia al punto de conexión	18
3.2.4	Disponibilidad de vías de acceso	19
3.2.5	Acceso a puerto	19
3.2.6	Aspectos institucionales	19
3.2.7	Aspectos medioambientales	19
3.2.8	Aceptación pública	20
3.2.9	Velocidad del viento (caso fotovoltaico)	20
3.3	TERCERA ETAPA: Selección de emplazamientos para el desarrollo de los proyectos	20
4	METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE ZONAS CON ABUNDANCIA DE RECURSO EÓLICO PARA LA INSTALACIÓN DE PARQUES EÓLICOS	21
4.1	Análisis Cualitativo	22
4.1.1	Uso de mapas de recurso eólico y tablas de clases de vientos	22
4.1.2	Cuantificación indirecta del recurso eólico a partir de información recopilada por estaciones meteorológicas cercanas y bases de datos	23
4.1.3	Cuantificación cualitativa del recurso mediante la observación del área	25
4.2	Factores que favorecen el aprovechamiento del recurso eólico	26
4.2.1	Características del viento adecuadas	26
4.2.2	Orografía y vegetación	27
4.2.3	Pendiente y orientación	27
4.3	Criterios para la selección de zonas para el estudio cuantitativo del recurso eólico	27
4.3.1	Exclusión de espacios protegidos y uso de suelos	27

4.3.2	Proximidad a red eléctrica y red vial	28
4.4	Análisis Cuantitativo	28
4.4.1	Análisis mediante programas informáticos	28
4.4.2	Análisis mediante datos obtenidos en estaciones de medición en la zona 28	
4.4.3	Tratamiento y análisis de datos.....	31
4.4.4	Estimación del potencial del viento.....	33
5	METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE ZONAS CON ABUNDANCIA DE RECURSO SOLAR PARA LA INSTALACIÓN DE CAMPOS FOTOVOLTAICOS	36
5.1	Análisis Cualitativo	37
5.1.1	Uso de mapas y tablas de recurso solar	37
5.1.2	Cuantificación indirecta del recurso solar a partir de información recopilada por estaciones meteorológicas cercanas y bases de datos.....	37
5.2	Factores que favorecen el aprovechamiento del recurso solar.....	38
5.2.1	Características de radiación adecuadas	38
5.2.2	Orografía y vegetación.....	38
5.2.3	Pendiente y orientación.....	38
5.3	Criterios para la selección de zonas para el estudio cuantitativo del recurso solar	38
5.3.1	Exclusión de espacios protegidos y uso de suelos	38
5.3.2	Proximidad a red eléctrica y red vial.....	39
5.4	Análisis Cuantitativo	39
5.4.1	Análisis mediante programas informáticos	39
5.4.2	Análisis mediante datos de estaciones de medición en la zona.....	39
5.4.3	Tratamiento y análisis de datos.....	42
5.4.4	Estimación del potencial fotovoltaico	42
6	DESARROLLO DEL ESTUDIO DE POTENCIAL RENOVABLE EN EL MUNICIPIO DE QUETZALTENANGO	48
6.1	Descripción zona de estudio	48
6.2	Descripción de patrón de vientos de Guatemala	49
6.3	Fuentes de datos e información empleadas	50
6.3.1	Mapas de potencial renovable.....	50
6.3.2	Datos de estaciones meteorológicas locales y bases de datos.....	51
6.3.3	Datos de observaciones de campo.....	51
6.4	Metodología empleada en el caso eólico.....	52
6.5	Localización de zonas de alta abundancia de recurso eólico	53
6.5.1	Uso de mapas de recurso eólico y tablas de clases de vientos.....	53
6.5.2	Cuantificación indirecta del recurso eólico a partir de información recopilada por estaciones meteorológicas cercanas y bases de datos.....	55
6.5.3	Cuantificación cualitativa del recurso mediante la observación del área. .	56
6.6	Factores que favorecen el aprovechamiento del recurso eólico.....	57
6.6.1	Características del viento adecuadas.....	57
6.6.2	Orografía y vegetación.....	57
6.6.3	Pendiente y orientación.....	58
6.7	Criterios para la selección de zonas para el estudio cuantitativo del recurso eólico	60
6.7.1	Exclusión zonas protegidas y uso de suelos	60
6.7.2	Proximidad a red eléctrica y red vial.....	61
6.8	Selección de emplazamiento para el desarrollo del proyecto de medición 62	
6.9	Propuesta de equipos de medición de recurso eólico.....	63
6.10	Metodología empleada para el caso solar	64

6.11	Localización de zonas de alta abundancia de recurso solar	65
6.11.1	Uso de mapas y tablas de radiación	65
6.11.2	Cuantificación indirecta del recurso solar a partir de información recopilada por estaciones meteorológicas cercanas y bases de datos.	65
6.12	Criterios para la selección de zonas para el estudio cuantitativo del recurso solar	68
6.12.1	Terrenos propiedad de la municipalidad	68
6.12.2	Exclusión zonas protegidas y uso de suelos	69
6.13	Factores que favorecen el aprovechamiento del recurso solar	69
6.13.1	Características de radiación y viento adecuadas	69
6.13.2	Orografía y vegetación	70
6.13.3	Pendiente y orientación	70
6.14	Selección de emplazamiento para el desarrollo del proyecto de medición	70
6.15	Propuesta de equipos de medición de recurso solar	71
7	PRESUPUESTO	72
7.1	Consideraciones previas	72
7.2	Costes de Recursos humanos	72
7.3	Amortización de equipos informáticos	72
7.4	Amortización de vehículos y costes de desplazamientos internos	73
7.5	Costes generales	73
7.6	Resumen del presupuesto	74
8	RECOMENDACIONES ADICIONALES	75
9	CONCLUSIONES	76
10	BIBLIOGRAFÍA	77
ANEXOS		79
	Anexo I: Aspectos más importantes en los costos y rentabilidad de los proyectos de energía eólica y solar.	79
	Anexo II: Instrumentos para la medición del potencial eólico.	81
	Anexo III: Tablas para la organización de la información de velocidad promedio horaria del viento.	83
	Anexo IV: Instrumentos para la medición del potencial solar	85
	Anexo V: Tablas de irradiación solar global	86
	Anexo VI: Tablas de valores de referencia del diagrama de trayectoria del sol	87
	Anexo VII: Mapas municipio de Quetzaltenango	88
	Anexo VIII: Coordenadas zonas con potencial eólico	96
	Anexo IX: Áreas protegidas de Quetzaltenango	97
	Anexo X: Plan Maestro PRMQ (Probosques 2001).	98
	Anexo XI: Presupuestos de instalaciones de medición	99
	Anexo XII: Futura localización estaciones de medición	101
	Anexo XIII: Localización torres de comunicación	103

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

La División de Ciencias de la Ingeniería (DCI), de la Universidad San Carlos de Guatemala lleva 20 años desarrollando proyectos de investigación aplicada y difusión en temas relacionados con las energías renovables.

La sede de la DCI se encuentra en Quetzaltenango, segunda ciudad más importante de la república.

Esta ciudad cuenta con la Empresa Eléctrica Municipal de Quetzaltenango (EEMQ), la cual compra energía eléctrica al Instituto Nacional de Electrificación (INDE).

La tarifa eléctrica es la más baja del país y no se corresponde con los precios que se dan en el resto del territorio. Dicho precio se ha mantenido debido a un conflicto entre el INDE y EEMQ, lo que ha favorecido a los habitantes de la ciudad. Pero esta situación se prevé que va a cambiar en los próximos años, por lo que se están buscando alternativas con el objetivo de evitar que el impacto en la tarifa sea el menor posible (evitando con ello mayores conflictos sociales y económicos).

Desde la universidad, una de las alternativas de solución que se están estudiando es la búsqueda de fuentes de generación eléctrica, con el objetivo de que sean gestionadas por la EEMQ reduciendo la cantidad de energía a comprar al INDE, y unas de ellas son la energía eólica y solar, tentativamente instalando aerogeneradores en las partes altas de las montañas que rodean la ciudad de Quetzaltenango o plantas fotovoltaicas instaladas en su territorio. De ahí, la necesidad de contar con estudios preliminares para empezar a formalizar estudios más profundos para el aprovechamiento del potencial eólico y solar de esta ciudad.

1.2 Alcance

El presente trabajo tiene como uno de sus objetivos una propuesta metodológica para la localización de emplazamientos de centrales eólicas y fotovoltaicas, los cuales minimicen la inversión necesaria y maximicen la rentabilidad, para posteriormente evaluarlos y compararlos entre sí seleccionando el más adecuado para el desarrollo del proyecto. La elaboración y redacción de este método incluye la definición de conceptos significativos de cada etapa, recopilación de información y análisis de los factores más determinantes de los proyectos. Cabe destacar que todas las consideraciones presentes en dicho método y que determinan la viabilidad de los proyectos están relacionadas de forma directa con su ubicación.

Dada la relevancia que adquiere la ubicación del emplazamiento, en el documento se profundizará en esta etapa de la metodología general, desarrollando una segunda metodología más específica para la localización de emplazamientos con abundancia de recurso eólico y solar, siendo éste uno de los factores más determinantes en la rentabilidad de los proyectos.

De acuerdo a estas metodologías diseñadas dentro del trabajo, se lleva a cabo el estudio de potencial renovable en el municipio de Quetzaltenango (Guatemala).

Es importante resaltar que estas metodologías propuestas y desarrolladas se pueden definir como de búsqueda y comparación, y no como evaluación de un emplazamiento concreto, es por ello que para el caso concreto que se estudia, se proponen herramientas para la posterior evaluación técnica del recurso en los emplazamientos seleccionados. Por tanto, la metodologías propuesta no garantiza la rentabilidad de los proyectos eólico y fotovoltaico en un periodo de tiempo concreto, sino se centra en la búsqueda de los mejores emplazamientos dentro de una región geográfica determinada.

1.3 Objetivos

1.3.1 Principal

- Diseñar una metodología para la localización óptima de emplazamientos de centrales eólicas y fotovoltaicas.
- Diseñar e implementar para el municipio de Quetzaltenango (Guatemala) metodologías para la localización de emplazamientos con recurso renovable para la instalación de centrales eólicas y fotovoltaicas.

1.3.2 Específicos

- Analizar el funcionamiento de los parques eólicos y campos fotovoltaicas para determinar los principales requerimientos para su construcción y operación.
- Analizar y evaluar las variables más importantes a la hora de decidir sobre la ubicación de centrales eólicas y fotovoltaicas.
- Redactar un texto que desarrolle y explique la metodología para localizar centrales eólicas y fotovoltaicas en forma clara y sistemática.
- Redactar un texto que desarrolle y explique las metodología para la localización de zonas con recurso renovable para la construcción de instalaciones eólicas y fotovoltaicas.
- Establecer las bases para la generación de una base de datos para el estudio del potencial eólico y solar en el departamento de Quetzaltenango.
- Promover la utilización de los recursos renovables de energía, en especial del recurso eólico y fotovoltaico; como una opción de energía limpia.
- Amortiguar el incremento de la factura eléctrica provocada por el conflicto energético en el departamento de Quetzaltenango.
- Generar una propuesta para la instalación de estaciones de medición meteorológica para la evaluación del recurso eólico y solar.

2 ANTECEDENTES

2.1 Sector eléctrico de Guatemala

2.1.1 Marco legal del sector eléctrico

El marco legal del mercado eléctrico tiene la siguiente estructura:



Figura 2.1: Marco legal del sector eléctrico de Guatemala. *Fuente: CNEE. Adaptación propia.*

En las principales leyes y reglamentos del marco eléctrico guatemalteco relacionadas con las energías renovables, citadas en la **figura 2.1**, se desarrolla en profundidad los objetivos y normativa que estas establecen.

2.1.2 Estructura e instituciones del mercado eléctrico de Guatemala

En Guatemala, la estructuras e instituciones que conforman el sector eléctrico son las siguientes:

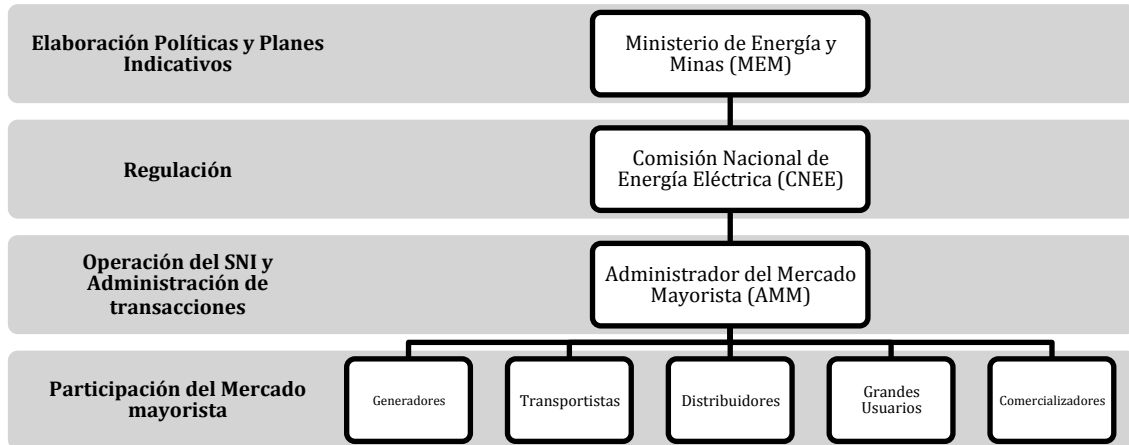


Figura 2.2: Estructura del subsector eléctrico. *Fuente: CNEE. Adaptación propia.*

En la página web de cada una de las instituciones se desarrollan en profundidad las funciones de los principales órganos que componen el mercado eléctrico guatemalteco.

2.1.3 Mercado Eléctrico

El nivel de apertura en el sector eléctrico guatemalteco, se basa en un modelo de mercado competitivo a nivel de generación y comercialización, en el cual se ha privilegiado el libre acceso y la existencia de un sistema de precios que refleja equilibrios libres de oferta y demanda, debido a que en estos segmentos pueden darse condiciones efectivas de competencia. En aquellos segmentos en que la presencia de economías de escala da lugar a la existencia de monopolios naturales los precios son fijados por el ente regulador sobre la base de costos económicos eficientes. El Mercado de Energía Eléctrica está constituido por el Mercado Regulado y el Mercado Mayorista. Es competitivo en los segmentos de generación y comercialización. La generación es abierta a la participación de actores privados, lo mismo que la transmisión. Los precios de transmisión y distribución están regulados.

El Mercado Regulado está integrado de la siguiente manera:

- Por el lado de la demanda: Todos aquellos usuarios con demanda de potencia menor a 100 kW, situados dentro del área geográfica cubierta por la distribuidora.
- Por el lado de la oferta: Distribuidoras autorizadas dentro de su zona de cobertura.

El Mercado Mayorista es el espacio donde sus agentes (Generadores, Transportistas, Distribuidores, Comercializadores, Grandes Usuarios) realizan transacciones económicas en el Mercado Libre. Esta libertad es caracterizada por variables como:

- Riesgo.
- Precios Competitivos.
- Derechos y obligaciones por acuerdo de las partes.

El Mercado Mayorista agrupa a generadores, transmisores que tengan como mínimo 10 MW de capacidad de transporte, distribuidores con un mínimo de 15.000 usuarios, comercializadores que compren o vendan bloques de energía asociados a una oferta firme no menor a 2 MW, y grandes usuarios con demanda máxima de potencia por arriba de 100 kW. Los límites establecidos para los comercializadores se aplican también para importadores y exportadores. La administración del mercado le corresponde al Administrador del Mercado Mayorista (AMM).

Las operaciones de compra y venta del Mercado Mayorista se realizan bajo las Normas de Coordinación Comercial, a través de:

- El Mercado de Oportunidad o Mercado Spot.
- El Mercado a Término. Los Grandes Usuarios pactan los plazos, las cantidades y precios de energía.
- El Mercado de Transacciones de Desvíos de Potencias diarios y mensuales.

El Mercado Mayorista de Guatemala presenta las siguientes particularidades:

- Basado en costos.
- Libre acceso a sistemas de Transmisión y Distribución, pagando el peaje correspondiente.
- Competencia en Generación y Comercialización.
- El precio de oportunidad de la energía refleja el costo marginal de corto plazo.
- Despacho económico, se optimizan costos variables, valor del agua, precios de contratos y precios de importaciones.
- Contratación obligada de potencia Demanda Firme.
- Precios Nodales (señal de localización de la generación y liquidación de pérdidas de energía).
- La expansión de la red de transporte se da por acuerdo entre partes o por consulta y licitación pública.
- Los servicios complementarios están sujetos a la competencia, previa habilitación para prestarlos.

En el mercado de oportunidad o mercado “spot” cada comprador compra del conjunto de vendedores y las transacciones se realizan al precio de oportunidad de la energía, calculado con base en el costo marginal de corto plazo, que resulta del Despacho de la Oferta Disponible.

En el mercado a término o mercado de contratos, a través de un instrumento contractual, los agentes de mercado pactan entre ellos los plazos, cantidades y precios de la electricidad. El grueso de las transacciones en el mercado de contratos se da entre generadores y distribuidoras. Sin embargo, también participan grandes usuarios y comercializadores.

Para adicionar nueva generación el distribuidor debe realizar una licitación abierta por un período máximo de 15 años, la cual deberá iniciarse con un mínimo de 5 años de anticipación al suministro. Los términos de referencia son establecidos por la CNEE, y las bases de licitación elaboradas por el Distribuidor serán aprobadas por la CNEE. Los excedentes de potencia y/o energía se comercializan en el mercado de oportunidad.

2.1.4 Sistema eléctrico

El sistema eléctrico esta compuesto por todas las instalaciones de generación, líneas de transmisión, subestaciones eléctricas, líneas de distribución y en general todas las infraestructuras destinadas a la transferencia de electricidad en los diferentes niveles.

De una forma simplificada, el sistema eléctrico es dividido en sistema de generación (producción de la energía eléctrica), sistema de transporte (transmisión de la energía eléctrica desde el punto de producción a los puntos de consumo) y sistema de distribución (transferencia de la energía eléctrica desde la línea de transferencia a los puntos concretos de consumo).

El sistema eléctrico de Guatemala está formado por el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), conformado por el Sistema Nacional Interconectado (SNI) y algunos sistemas aislados. El SNI está operado por la Administración de Mercado Mayorista (AMM) de acuerdo a las Normas de Coordinación Operativa, conjunto de disposiciones y procedimientos para asegurar el abastecimiento al mínimo costo, la continuidad y calidad del servicio. Estas normas son aprobadas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE).

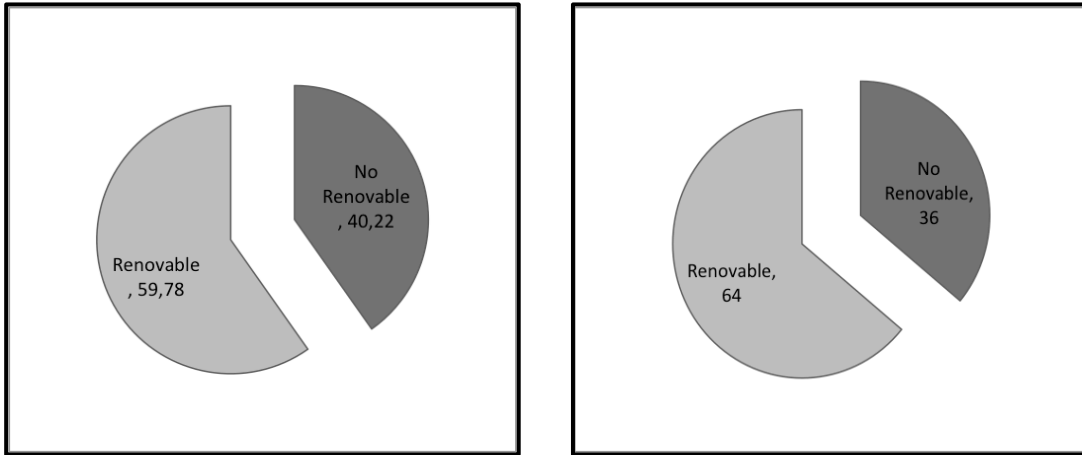
Agentes y Grandes Usuarios	Cantidad
Agente Generador	81
Agente Transportista	12
Agente Comercializador	46
Agente Distribuidor	4
Grandes Usuarios	1.211

Tabla 2.1: Grandes Usuarios y Agentes del Mercado Mayorista (Abril 2016)

Fuente: Secretaria General (MEM)

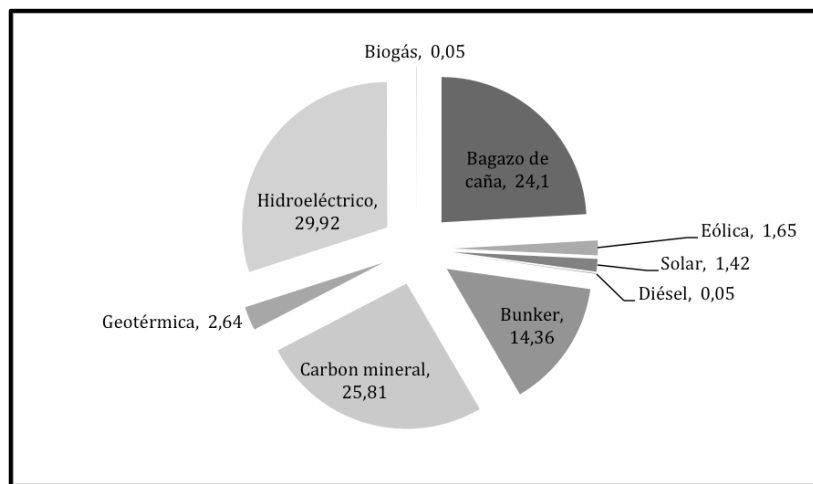
2.1.5 Eólica y fotovoltaica en el contexto de producción eléctrica

Guatemala cuenta con una cantidad de recursos renovables considerable, los cuales hasta el momento no están siendo aprovechados de una forma intensiva. En la actualidad, en la matriz de generación eléctrica, el recurso renovable supone un 60% del total, queriéndose alcanzar, de acuerdo a los objetivos del plan estratégico energético del gobierno una fracción del 64% en 2030.



Gráfica 2.1: Matriz de Generación eléctrica por tipo de recurso 2016 y objetivos 2030. *Fuente CNEE.*

Pero sin embargo, si se analiza la matriz de generación eléctrica de acuerdo al tipo de combustible, se observa que tanto la eólica como la fotovoltaica, suponen una fracción poco significativa.



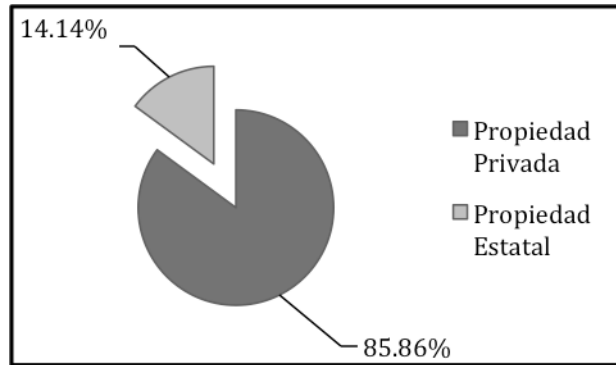
Gráfica 2.2: Matriz de Generación por tipo de combustible. *Fuente: CNEE*

A pesar de la abundancia de recurso, de la presencia de un marco legal estable y la existencia de incentivos legales y fiscales, así como de un mercado eléctrico maduro y fiable, en la actualidad únicamente se cuenta con dos parques eólicos conectados al SIN, con una potencia de 75.9 MW y tres centrales solares fotovoltaicas con 85 MW.

Las principales debilidades o barreras que provocan esta situación son la ausencia de una base de datos fiable de la disponibilidad y calidad de recursos, así como de estudios preliminares y la oposición sistemática de algunas comunidades, unido todo esto a la falta de recursos económicos para costear dichas tecnologías.

Es debido a esta situación que las generadoras privadas representan una parte cada vez más grande de la potencia instalada en el país y todos los proyectos que en la actualidad se están llevando a cabo son de índole privada o consorcios formados por inversionistas tanto nacionales como extranjeros. Toda la energía nueva en proyecto es financiada por empresas privadas, y por lo tanto, a excepción de la energía

hidroeléctrica, toda energía renovable en Guatemala depende en gran medida de lo económicamente atractiva que resulta la inversión para el sector privado.



Gráfica 2.3: Capacidad instalada por tipo de propiedad

Fuente: Dirección General de Energía Ministerio de Energía y Minas (MEM) junio 2016

2.2 Cambio climático

Durante los últimos 25 años Guatemala ha sufrido una serie de eventos meteorológicos extremos que han puesto de manifiesto la vulnerabilidad del país respecto al cambio climático, siendo catalogado éste como uno de los países más vulnerables a los efectos del cambio climático.

Al analizar las variaciones climáticas se ha observado que tanto la temperatura promedio anual como la precipitación total anual, mostraron variaciones destacables. Los mayores incrementos de temperatura anual, se observaron en las regiones más frías (altiplano occidental), zona dentro de la cual se encuentra Quetzaltenango, región objeto de estudio. Las proyecciones de temperatura muestran que la tendencia es a continuar aumentando.

Se considera que algunas enfermedades, como las gastrointestinales, respiratorias, la malaria y el dengue, son potenciadas por las variaciones climatológicas. La influencia del clima sobre determinados factores que favorecen la transmisión de algunas enfermedades son clave.

Además se espera una reducción en la disponibilidad de los recursos hídricos, consecuencia de la reducción de la precipitación anual y el incremento de la temperatura a mediano y largo plazo.

La variabilidad del ciclo hidrológico ha puesto de manifiesto la vulnerabilidad del sector energético, pues en años de sequía se detectó una reducción importante en la generación hidroeléctrica respecto a años base, influyendo esto de forma sustancial en la matriz de generación energética.

Como consecuencia de esto y ante el reconocimiento del calentamiento del planeta, Guatemala ha tomado una serie de medidas para combatir este problema, tanto para adaptarse y reducir la vulnerabilidad como para contribuir a la reducción de gases de efecto invernadero. Esto incluye una amplia gama de acciones en las que se encuentra la generación eléctrica mediante energías renovables.

2.3 Conflicto entre Instituto Nacional de Electrificación (INDE) y la Empresa Eléctrica Municipal de Quetzaltenango (EEMQ)

La Empresa Eléctrica Municipal de Quetzaltenango (EEMQ), fue creada el 7 de agosto de 1919, con la finalidad de suministrar luz, fuerza y calefacción al departamento de Quetzaltenango, siendo propiedad de la Municipalidad.

En 1978 con el objetivo de regular y ordenar la distribución y la facturación de energía eléctrica autoridades del Instituto Nacional de Electrificación (INDE), y de la Municipalidad de Quetzaltenango, firmaron un contrato en el cual se acordaban varios compromisos por ambas partes. Dentro de estos compromisos está la definición de la terminología, el compromiso del INDE de suministrar energía eléctrica, las características, la medición, las tarifas, la vigencia y los compromisos de la Municipalidad en cuanto a aceptar ese instrumento jurídico.

La Municipalidad empezó a regular sus precios y los pagos al INDE, según estaba plasmado en el contrato cuya vigencia era de cinco años, las autoridades del INDE nunca se preocuparon por firmar un nuevo contrato y actualizar los precios, al igual que las autoridades municipales, no fue hasta 2009 cuando se solicita desde el INDE hacer un ajuste de precios. Las autoridades de Quetzaltenango se oponen por las implicaciones económicas y sociales que esto conlleva y por ello piden negociar la actualización de los nuevos precios.

De forma inesperada en mayo de 2009 el INDE, envió una factura a la Municipalidad de Quetzaltenango, facturando el triple de lo que hasta ese momento se estaba pagando.

El aumento del cobro conllevaba que la Municipalidad debía de triplicar el precio de la factura de los quetzaltecos o comunicar un ajuste para pagar la factura y de ahí un ajuste de precios, es aquí donde comienza la discusión y las denuncias en contra de los miembros de Concejo Municipal y del Alcalde.

Actualmente el INDE quiere que se firme un nuevo contrato, pero ello implica un aumento en el coste de la energía eléctrica de aproximadamente un 75 por cien, la postura de las autoridades municipales es que el aumento sea escalonado y no se aplique directamente un nuevo contrato.

Se espera que con los nuevos términos que contendrá el nuevo contrato, se determinen nuevos precios para la Empresa Eléctrica y esta a su vez con los consumidores.

Los 19 juicios y denuncias contra las autoridades podrían ser retirados por parte del INDE si la Municipalidad presenta un proyecto de modernización de la EEMQ que incluye un análisis del balance técnico de la red distribución y de la problemática administrativa y financiera de la empresa.

Por otra parte se espera que las autoridades del INDE comprendan el impacto que tendría un aumento inmediato de los precios, por ello se pretende buscar consensos y acuerdos para que no afecte a la población de una forma tan brusca. Además por parte de la Municipalidad se están llevando a cabo estudios para la producción de energía eléctrica mediante energías renovables tales como la mejora y ampliación de las centrales hidroeléctricas existentes, y para el desarrollo de la energía eólica y

fotovoltaica, intentando amortiguar con la producción propia el aumento de los costes en la factura. Además existen ya algunos proyectos con energía geotérmica y biomasa que están siendo desarrollados.

2.4 Sistemas de producción eólica y fotovoltaica

Por razones de espacio no son explicadas en el trabajo los diferentes sistemas de producción de energía eólica y fotovoltaica. Para conocer los proyectos de este tipo de energía se recomiendan los libros:

- Julián Cantos Serrano. “Configuración de instalaciones solares fotovoltaicas”
- Jose L. Rodríguez Amenado, Juan Carlos Burgos Díaz, Santiago Arnalte Gómez, “Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica”

3 METODOLOGÍA PARA LA ELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTOS PARA CENTRALES EÓLICAS Y FOTOVOLTAICAS.

En el siguiente apartado se establece y describe una metodología para la selección de emplazamientos para la instalación de centrales de producción de energía eléctrica mediante recurso eólico y solar.

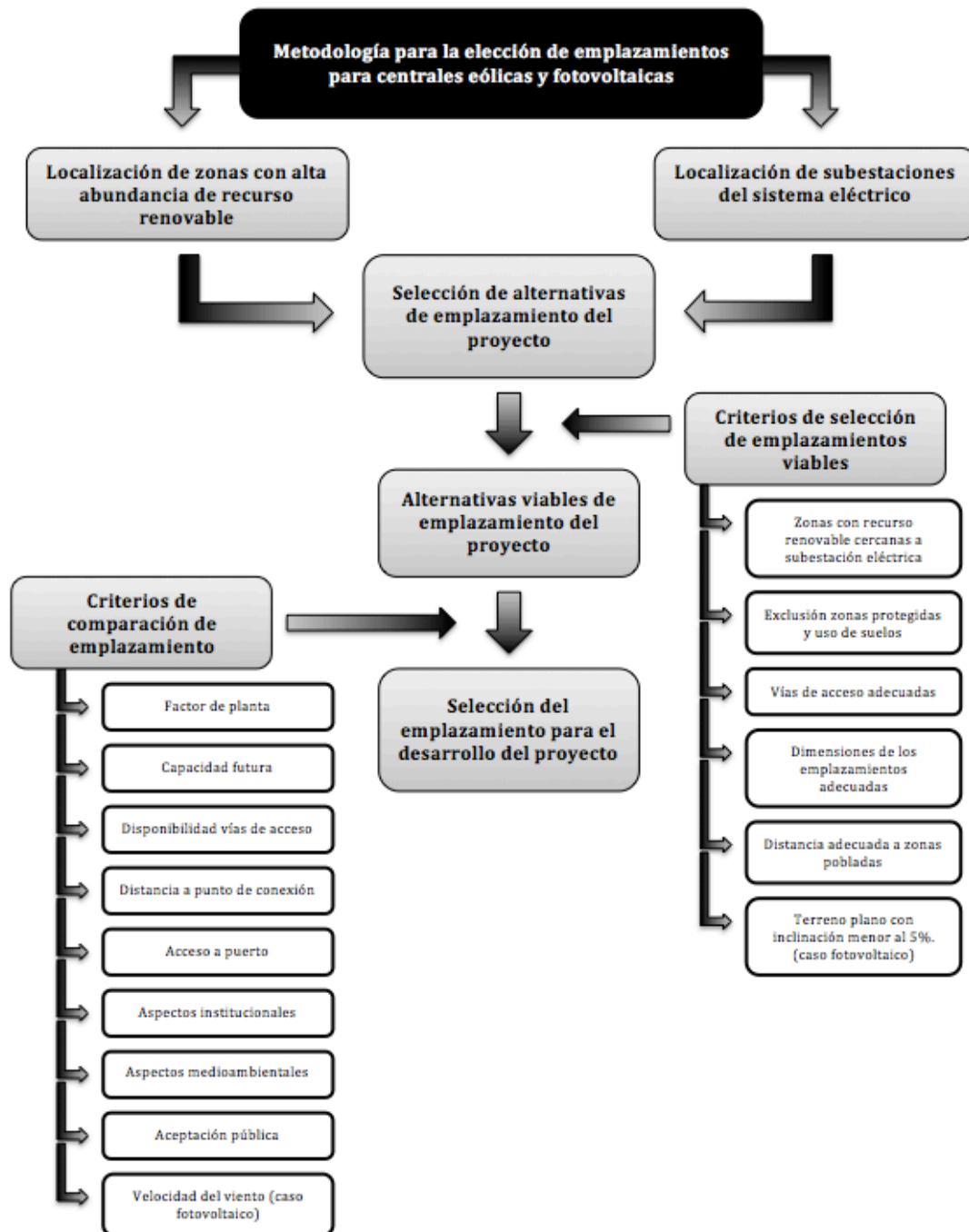


Figura 3.1: Metodología para la elección de emplazamientos para centrales eólicas y fotovoltaicas. Fuente: *Elaboración propia.*

3.1 PRIMERA ETAPA: Selección de alternativas de emplazamiento

La primera etapa tiene como objetivo la búsqueda de emplazamientos económicamente competitivos para la instalación de parques eólicos y campos fotovoltaicos. Para su desarrollo se deben tener en cuenta dos aspectos, la abundancia de recurso y la estructura de costes de los proyectos, los cuales son desarrollados en el **Anexo I**.

Una vez determinados los aspectos más influyente en relación al coste y rentabilidad de los proyectos eólico y fotovoltaico, y su dependencia con la ubicación, se pueden definir una serie de criterios que permiten determinar los lugares más adecuados para el desarrollo de estas actividades.

3.1.1 Localización de zonas con alta abundancia del recurso renovable

Como se citó anteriormente, uno de los criterios principales en la elección de emplazamiento es la abundancia del recurso renovable. La abundancia o no de recurso puede hacer que un proyecto localizado en un emplazamiento determinado sea viable económicamente o no.

3.1.1.1 Zonas de alta abundancia del recurso eólico

La abundancia de recurso eólico se puede definir mediante los siguientes criterios:

Especificaciones técnicas de los aerogeneradores:

Existe una gran variedad de aerogeneradores, tanto de tamaños como de potencias nominales distintas, sin embargo, el rango de velocidades de viento de operación es similar en ellos. Estos alcanzan su límite de generación para vientos de 12 m/s aproximadamente. Por lo tanto, no es conveniente la selección de emplazamientos donde la velocidad promedio sea inferior a 6 m/s para que la utilización de la instalación sea eficiente.

Factor de planta del proyecto:

En aquellos sitios donde la velocidad del viento promedio sea menor de 10 m/s, es necesario evaluar en detalle la cantidad de energía que se podría generar anualmente, y obtener un factor de planta para esos emplazamientos.

Es considerado a nivel mundial, que un buen proyecto eólico tiene al menos un factor de planta de 0,3.

3.1.1.2 Zonas de alta abundancia de recurso solar

La abundancia de recurso solar se puede definir mediante los siguientes criterios:

Especificaciones técnicas de los paneles:

Para que el funcionamiento de los paneles fotovoltaicos sea adecuado se seleccionarán zonas con un nivel de densidad de radiación que permita el uso óptimo de las celdas instaladas.

Factor de planta del proyecto:

Es conveniente evaluar la cantidad de energía que se podrá generar de acuerdo a la densidad de radiación del emplazamiento y la tecnología seleccionada.

Es considerado como adecuado para una instalación fotovoltaica un factor de planta superior a 0,25.

3.1.2 Localización de subestaciones del sistema eléctrico

Otro de los criterios más determinantes a la hora de elegir un emplazamiento, es la distancia de éste a un punto de conexión del sistema eléctrico, es decir, a una subestación. Estrictamente, la proximidad a un sitio de la línea de transmisión también podría considerarse como una opción, sin embargo implica la construcción de una nueva subestación que eleve el voltaje al nivel de la línea, lo que resulta costoso en comparación a conectar a una subestación ya existente (aceptando que las subestaciones suelen poseer una holgura de potencia instalada y la gran mayoría de proyectos renovables son inferiores a los 100 MW de capacidad instalada).

3.1.3 Selección de posibles emplazamientos para parques eólicos y fotovoltaicos

En esta fase se realiza el cruce de información de la localización de las subestaciones y los emplazamientos con abundancia de recurso renovable. Dicho cruce se realiza de acuerdo a los siguientes criterios:

- Localización de zonas con recurso renovable cercanas a cada subestación.
- Verificar que los emplazamientos no son parte de zonas protegidas y que el uso de suelo es adecuado para la construcción de las instalaciones.
- Revisar que las vías de acceso desde el puerto más cercano hasta el emplazamiento son adecuados para el tránsito de camiones de alto tonelaje.
- Verificar que las dimensiones de los emplazamientos sean adecuadas para albergar la potencia instalada del proyecto.
- Asegurarse que los emplazamientos se encuentran a una distancia adecuada de zonas pobladas para evitar posibles impactos.
- Verificar que para el caso fotovoltaico el terreno sea plano con inclinación menor al 5%.

Como conclusión de este cruce de información se obtendrá emplazamientos adecuados para el desarrollo de los proyectos, los cuales posteriormente serán comparados para determinar aquellos más favorables al desarrollo de la actividad.

3.2 SEGUNDA ETAPA: Comparación de emplazamientos candidatos

En una segunda etapa, una vez definidas las alternativas de emplazamiento de los proyectos, se procede a la evaluación de cada uno de ellos y la comparación entre las posibles localizaciones. Los criterios considerados en la elección son básicamente los mismos para los dos tipos de proyectos pues las diferencias solamente corresponden a aspectos relacionados con la descripción cuantitativa de cada uno de ellos.

3.2.1 Factor de planta

El factor de planta determina los ingresos del parque, dependiendo estos directamente del nivel de recurso disponible, y por lo tanto de la ubicación del emplazamiento.

Para el cálculo del factor de planta se emplean histogramas de distribución del viento anual para el caso eólico, y distribución diaria de densidad de radiación para el caso fotovoltaico.

En el cálculo del factor de planta para el caso eólico se emplea la expresión (Andrés Fernández, 2011):

$$FP_{eólico} = \frac{\sum_{i=1}^N p(v_i) \Delta t_i}{P_{max.i} 8760}$$

Donde:

v_i = viento de i (m/s).

$p()$ = curva de potencia versus velocidad del viento de la turbina empleada.

Δt_i = duración del viento con velocidad v_i .

$P_{max.i}$ = potencia máxima del aerogenerador.

En el caso fotovoltaico la expresión utilizada es (Andrés Fernández, 2011):

$$FP_{fotovoltaico} = \frac{\sum_{j=1}^{24} R_i S_{panel} Eff_{panel}}{P_{max.panel} 24}$$

Donde:

R_i = densidad de radiación anual durante la hora i del día (W/m^2).

S_{panel} = superficie del panel (m^2).

Eff_{panel} = eficiencia del panel (a $25^\circ C$).

$P_{max.panel}$ = potencia máxima del panel (W).

Aunque en ambos casos la potencia generada puede depender de otros factores, no considerados en la expresiones, estas son las mejores aproximaciones al factor de planta con la información de la que se dispone.

3.2.2 Capacidad futura

Este criterio se basa en la hipótesis de ampliar las instalaciones sin necesidad de realizar inversiones o ampliaciones en el sistema de transmisión minimizando con ello los costes. Para ello se buscan emplazamientos en los cuales se puede ampliar la instalación con posterioridad a su puesta en marcha. Sin embargo, la posible ampliación de estos tipos de proyectos no depende solamente de los recursos financieros, sino de la disponibilidad de terreno, del recurso renovable y de la capacidad del sistema de transmisión, particularmente de la potencia nominal de las líneas conectadas a la barra que corresponde a la instalación. Como criterio que caracteriza la capacidad futura del emplazamiento se considera el total de las potencias nominales de las líneas conectadas a la barra de la instalación objeto de estudio, pues representa la máxima potencia que se puede inyectar al sistema en el caso de que no exista un consumo en ese punto (siendo este el caso más restrictivo en la generación).

3.2.3 Distancia al punto de conexión

Uno de los aspectos que influyen en la estructura de costes de los parques eólicos y fotovoltaicos es la distancia al punto de conexión. Con el propósito de minimizar los costes producidos por la conexión al sistema se buscan emplazamientos con

proximidad a subestaciones con capacidad para la conexión del parque. En el caso de que estos no sea posible se buscarán aquellos que tengan menor distancia a la línea de transmisión.

3.2.4 Disponibilidad de vías de acceso

Los emplazamientos requieren de vías de acceso existentes ya que la construcción de parques eólicos y campos fotovoltaicos requieren del traslado de material y maquinaria en camiones de gran tonelaje, y la construcción de éstas conlleva un alto coste. Estos caminos han de ser sólidos y no presentar curvas cerradas que impidan el tránsito de los camiones.

Por lo general, los posibles emplazamientos para la instalación de centrales de energía renovable no poseen vías de acceso (pues su ubicación esta determinada principalmente por la abundancia de recurso), es por esto que se debe evaluar la distancia mínima que se debe construir entre el emplazamiento destinado a la generación y el camino más cercano, con el objetivo de minimizar la inversión necesaria.

3.2.5 Acceso a puerto

Este criterio se aplica debido a que la mayor parte de la infraestructura que se emplea en los proyectos eólicos y fotovoltaicos ha de ser traída del extranjero, ya sea de Norteamérica, Asia o Europa (en el caso de proyectos en Centroamérica y Sudamérica).

Debido al gran tonelaje y tamaño de la infraestructura, conviene que el emplazamiento sea cercano al puerto. Este criterio se aplica considerando si hay acceso a puerto o no, dado que es de poca importancia considerar las distancias de los emplazamientos al puerto, pues la distancia es poco relevante en comparación con la distancia recorrida desde el puerto de origen.

Este criterio puede ser ignorado si todos los emplazamientos de la región objeto de estudio poseen acceso a puerto.

3.2.6 Aspectos institucionales

Es de vital importancia para la ejecución final del proyecto tener en cuenta cual es el uso de terrenos y normativa del emplazamiento seleccionado.

El proyecto se debe ajustar al plan de ordenamiento y reglamentos de uso de suelos. Se descartarán por tanto los lugares en los cuales la normativa aplicable impida la instalación de parques eólicos y campos fotovoltaicos.

3.2.7 Aspectos medioambientales

El emplazamiento debe afectar lo menos posible a la flora y fauna , destacando la influencia en lo referido a las aves, tanto en rutas migratorias, lugares de anidación, como en sitios de alimentación.

En cuanto al impacto visual, el lugar seleccionado debe interferir lo menos posible en el medio que lo rodea.

En lo que respecta al impacto sonoro, deben considerarse las afecciones posibles, tanto a los habitantes cercanos al emplazamiento como a la fauna.

3.2.8 Aceptación pública

Debido a los diferentes impactos que el desarrollo de un proyecto eólico o fotovoltaico puede acarrear, puede haber sectores de la población que se posicionen en contra de la construcción. Se buscará en la medida de lo posible emplazamientos en los que la aceptación sea mayor, llegando a acuerdos con los pobladores de las proximidades si es necesario.

3.2.9 Velocidad del viento (caso fotovoltaico)

En las instalaciones fotovoltaicas tiene gran importancia que las estructuras encargadas de soportar los paneles solares resistan vientos sin que estos se desprendan. Cuanto mayores sean los vientos del emplazamiento, más amplias y profundas serán las cimentaciones necesarias, aumentando con ello también los costes.

De la misma forma, la presencia de viento conlleva presencia de polvo en las celdas, esto conlleva una reducción en la absorción de la radiación y por lo tanto de la eficiencia del parque fotovoltaico. Esta problemática puede ser mitigada por un sistema de limpieza automática de los paneles, pero esto requiere de una inversión adicional.

3.3 TERCERA ETAPA: Selección de emplazamientos para el desarrollo de los proyectos

En una última etapa, una vez evaluados y comparados los posibles emplazamientos viables para el desarrollo de los proyectos, serán seleccionados aquellos que de acuerdo a los criterios establecidos, cumplen de manera más adecuada con los requisitos necesarios para el desarrollo de la actividad pertinente, y por lo tanto son los más adecuados para la construcción del parque eólico o campo fotovoltaico.

4 METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE ZONAS CON ABUNDANCIA DE RECURSO EÓLICO PARA LA INSTALACIÓN DE PARQUES EÓLICOS

En el siguiente apartado se establece y describe un procedimiento estándar para la selección y determinación de la capacidad de explotación de un emplazamiento para la instalación de un proyecto eólico, el cual se basa en los siguientes pasos representados en la figura.

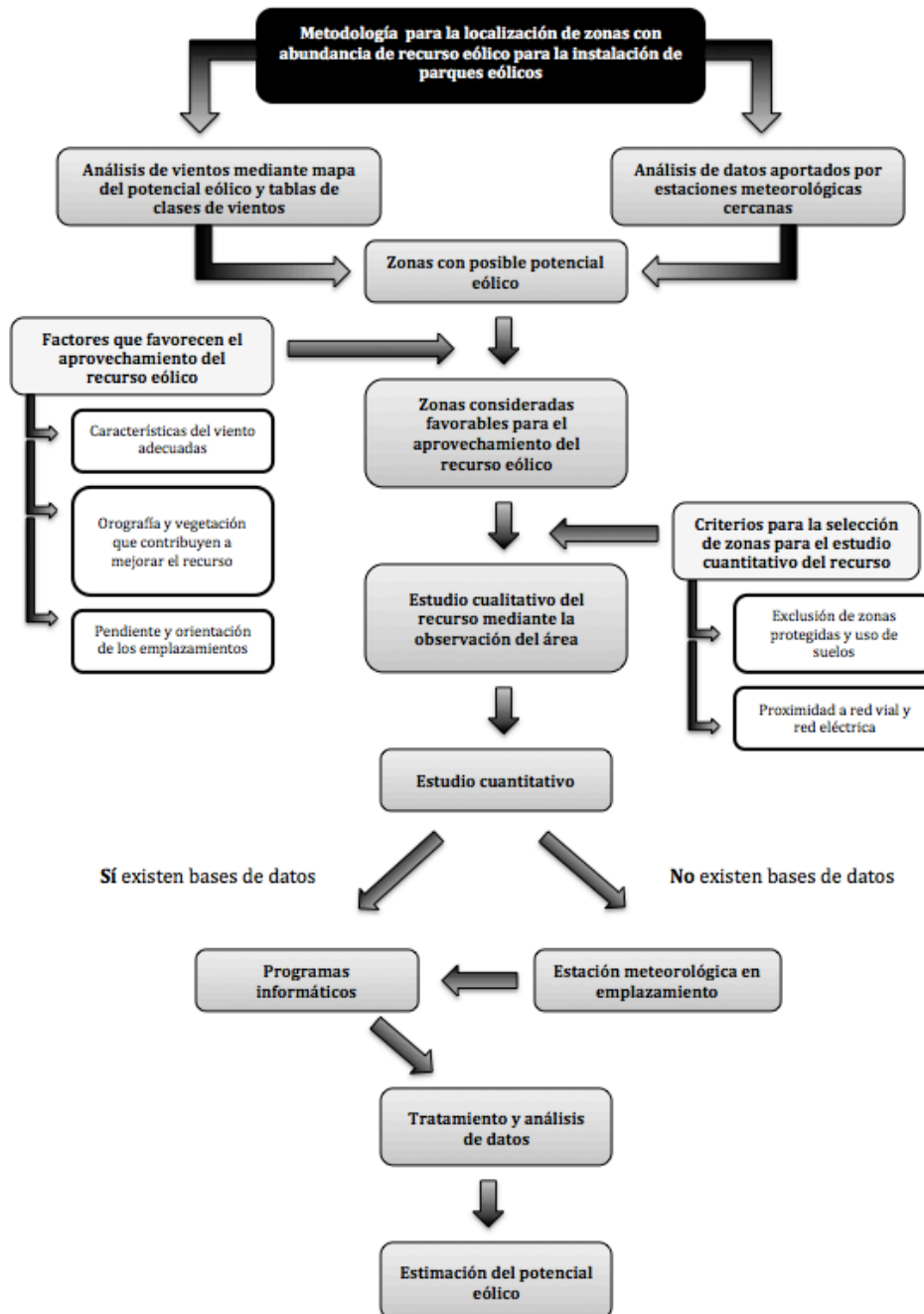


Figura 4.1: Metodología para la localización de zonas con alta abundancia de recurso eólico. *Fuente: Elaboración propia*

4.1 Análisis Cualitativo

En una primera etapa se realiza un análisis cualitativo del recurso mediante el uso de mapas de recurso eólico, tablas de clases de vientos y la información recopilada por estaciones meteorológicas de la región objeto de estudio. Esto acotará las zonas con posible potencial eólico. Este primer estudio será completado con la cuantificación cualitativa del recurso mediante la observación de las áreas con posible potencial.

4.1.1 Uso de mapas de recurso eólico y tablas de clases de vientos.

En los mapa de recurso eólico se representan la clase de potencia de viento, definida ésta como el rango de densidades de potencia de viento (watts por metro cuadrado de área barrida por el rotor, es decir, un área perpendicular al flujo del viento) a una altura dada sobre el nivel del suelo.

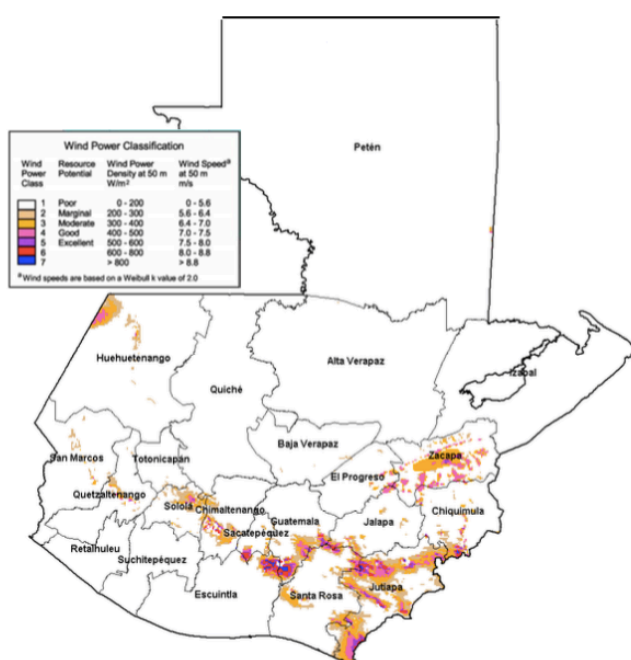


Figura 4.2: Mapa recurso eólico Guatemala. *Fuente: SWERA*

Las tablas de clases de vientos clasifican los vientos según su potencial de acuerdo a los rangos de densidad de potencia.

Clase	Potencial del Recurso	Velocidad del viento m/s 30 m de altura	Densidad de potencia del viento W/m ² 30 m de altura	Velocidad del viento m/s 50 m de altura	Densidad de potencia del viento W/m ² 50 m de altura
1	Pobre	0.0 - 5.1	0 - 160	0 - 5.6	0 - 200
2	Marginal	5.1 - 5.9	160 - 240	5.6 - 6.4	200 - 300
3	Moderado	5.9 - 6.5	240 - 320	6.4 - 7.0	300 - 400

4	Bueno	6.5 – 7.0	320 – 400	7.0 - 7.5	400 – 500
5	Excelente	7.0 – 7.4	400 – 480	7.5 – 8.0	500 – 600
6	-	7.4 – 8.2	480 – 640	8.0 – 8.8	600 – 800
7	-	8.2 – 11.0	640 – 1600	8.8 – 11.9	800 - 2000

*Nota : La densidad de potencia se expresa en watts por metro al cuadrado (W/m^2) de área barrida perpendicular al flujo del viento.

Tabla 4.1: Definiciones estándar de clases de viento (utilizado en EE.UU.). *Fuente: Asociación danesa de la industria eólica.*

La utilización de mapas de recurso renovable ayuda a ahorrar tiempo, ya que son localizados los posibles emplazamientos como resultado de las prospecciones geográficas, reduciendo una gran región a unos kilómetros cuadrados concretos dentro de la región.

4.1.2 Cuantificación indirecta del recurso eólico a partir de información recopilada por estaciones meteorológicas cercanas y bases de datos.

Para la correlación de datos de una estación meteorológicas con los del emplazamiento objeto de estudio, es deseable una serie de mediciones de viento de las estaciones meteorológicas cercanas al sitio de interés:

- Elevación del sitio.
- Promedio mensual de la velocidad del viento.
- Rosa de viento (distribuciones de velocidades del viento y la frecuencia de variación de las direcciones del viento).
- Exposición del sitio (terreno local, montañas, valles, cobertura vegetativa y estructuras construidas por el hombre).
- Rugosidad de la superficie.
- Alturas sobre el nivel del suelo.
- Recuperación de datos (número de horas de datos válidos versus total de horas posibles).
- Localización del sitio con respecto a el emplazamiento objeto de análisis.

Una vez validados los datos se pueden interpolar para estimar el recurso del viento en el lugar deseado.

Esta metodología presenta un proceso simplificado para la evaluación del potencial eólico y es empleada habitualmente en el estudio de pequeños sistemas de conversión de energía eólica. Además puede aportar una idea general del potencial del emplazamiento para proyectos de mayor envergadura.

Para el desarrollo de esta metodología se debe tener en cuenta que la superficie del terreno influye de forma sustancial en el viento. Tanto el tipo de terreno, los cambios de rugosidad superficial y los obstáculos presentes tienen una influencia significativa.

Como regla general, las estaciones meteorológicas de las cuales se van a interpolar los datos deben estar entre 30-120 km de distancia del punto de estudio para que la

correlación sea lo suficientemente fiable. En cualquier caso, la distancia adecuada para aplicar cualquier correlación depende de las superficies de los terrenos en que se quiere aplicar, siendo necesario que sea más corta cuanto mayor sea la diferencia entre las rugosidades superficiales de ambos sitios, y viceversa.

La rugosidad del terreno es caracterizada por un indicador conocido como longitud de rugosidad superficial.

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad en m	Tipo de paisaje
0	0.0002	Superficie del agua
0.5	0.0024	Terreno completamente abierto con una superficie lisa, p.ej., pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0.03	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas .
1.5	0.055	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 1250 m.
2	0.1	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 500 m.
2.5	0.2	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 250 m.
3	0.4	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con muchos o altos setos resguardantes, bosques y terreno accidentado y muy desigual
3.5	0.8	Ciudades más grandes con edificios altos
4	1.6	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos

*Nota: Definiciones de acuerdo con el Atlas Eólico Europeo, WAsP.

Tabla 4.2: Clases y de longitudes de rugosidad. *Fuente: Atlas Europeo WAsP.*

En la práctica una ecuación empírica que resulta útil para realizar esta correlación es la siguiente (WAsP):

$$V_z = V_{zr} \frac{\ln\left(\frac{60}{Z_{or}}\right) \ln\left(\frac{Z}{Z_o}\right)}{\ln\left(\frac{60}{Z_o}\right) \ln\left(\frac{Z_r}{Z_{or}}\right)}$$

Donde:

V_z: Velocidad media anual en el sitio donde se desea instalar la máquina a una altura del eje z.

V_{zr}: Velocidad media anual en la estación de referencia a un altura Z_r.

Z: Altura del eje del rotor de la máquina eólica.

Z_r: Altura del anemómetro en la estación de referencia.

Z_o: Longitud de la rugosidad superficial en el sitio donde se desea instalar la máquina.

Z_{or}: Longitud de la rugosidad superficial en la estación de referencia.

En el caso de que la estación meteorológica más cercana se encuentre muy alejada o esta situada en un terreno muy diferente al del emplazamiento objeto de estudio, deben realizarse mediciones en el lugar seleccionado. Después de realizadas las mediciones, estas deben ser comparadas con las estaciones meteorológicas. Conociendo la diferencia entre los datos del sitio y los datos de la estación meteorológica pueden ser ajustados para predecir velocidades del viento en el sitio seleccionado.

4.1.3 Cuantificación cualitativa del recurso mediante la observación del área.

El recurso eólico se puede medir de forma cualitativa mediante la observación de diferentes fenómenos y ser clasificado éste de acuerdo a diversas escalas existentes.

Conforme a la observación de los fenómenos producidos por el viento podemos medir cualitativamente la velocidad del viento empleando la Escala de Beaufort del Viento adaptada para tierra.

Fuerza Beaufort	Velocidad del Viento (m/s)	Indicadores	Tipo
0	0.0 - 0.56	Calma; el humo sube verticalmente.	Calma
1	0.56 - 1.4	La dirección se puede apreciar por la dirección del humo, pero no por medio de veletas	Ventolina
2	1.7 - 3.3	El viento se siente en el rostro, las hojas se mueven ligeramente, las veletas ordinarias se mueven con el viento.	Ligero
3	3.6 – 5.6	Las hojas y las ramas delgadas se mueven constantemente; el viento extiende las banderas ligeras.	Suave
4	5.8 – 8.1	Levanta polvo y papeles sueltos; las ramas pequeñas se mueven.	Moderado
5	8.3 – 10.8	Los árboles pequeños empiezan a balancearse; en los lagos pequeños se observan olas con crestas.	Fresco
6	11.1 – 13.9	Se mueven las ramas grandes; los cables telefónicos silban; es difícil usar sombrillas.	Fuerte
7	14.16 – 16.9	Los árboles enteros se mueven; es incómodo caminar contra el viento.	Muy fuerte

8	17.2 – 20.5	Se rompen las ramas de los árboles; generalmente no se puede avanzar.	Ventarrón
---	-------------	---	-----------

Tabla 4.3: Escala de Beaufort del Viento. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional de España. Adaptación propia.

Otras observaciones que también permitirían obtener una aproximación del potencial serían las siguientes:

- Los árboles, especialmente, las coníferas pueden deformarse permanentemente por vientos fuertes. Esta deformación se conoce como “flagging” y puede ser utilizada para estimar la velocidad del viento promedio en un área.

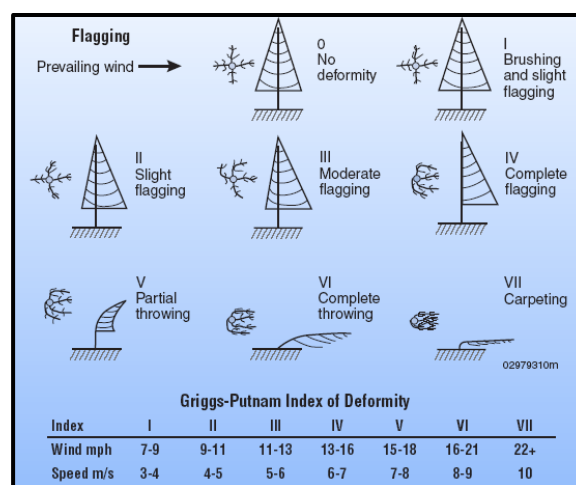


Figura 4.3: Índice de deformidad (“flagging”) de Griggs-Putnam.

- Las aves utilizan corrientes de sustentación de aire para planear a baja altura. Zonas en las que de forma habitual se observan a las aves planear se pueden considerar candidatas para ser objeto de estudio.
- Las observaciones empíricas de habitantes del lugar en el caso de que así sea posible pueden ser de ayuda para la determinación de una zona viable.

4.2 Factores que favorecen el aprovechamiento del recurso eólico

Hay una serie de factores relacionados con las características del viento y la fisionomía del terreno que contribuyen a un mejor aprovechamiento del potencial eólico de un emplazamiento.

4.2.1 Características del viento adecuadas

Para que un emplazamiento sea considerado óptimo para su aprovechamiento del recurso eólico, el viento en ha de cumplir una serie de características:

- Elevada velocidad media del viento. Además el emplazamiento ha de tener una buena exposición al flujo de aire y no presentar obstáculos.
- Aceptables variaciones diurnas y estacionales del viento.

- Aceptables niveles de turbulencias y vientos extremos. Elevadas turbulencias y vientos excesivamente fuertes puede afectar a la integridad y vida útil del sistema.

4.2.2 Orografía y vegetación

Los emplazamientos que suelen cumplir con características orográficas y tipos de vegetación que benefician el aprovechamiento de recurso eólico son:

- Pasos entre zonas montañosas localizadas en áreas de altos gradientes de presión.
- Largos valles que descienden de cadenas montañosas.
- Llanuras y valles con fuertes vientos asociados a zonas de altos gradientes de presión.
- Elevaciones con alta exposición a flujo de aire, cimas de montañas de áreas de fuertes vientos de altura.
- Lugares cercanos a la costa con una buena exposición en áreas de fuertes vientos de altura o zonas con altos gradientes térmicos o de presión.
- Lugares con vegetación destacadamente deformada debido a la acción de los vientos dominantes.

4.2.3 Pendiente y orientación

Pendiente: Factor interesante a tener en cuenta a nivel técnico y económico ya que debido a la inclinación es posible que se precisen de mayores trabajos para fijar de forma segura las máquinas aerogeneradoras al terreno.

Orientación: Factor enfocado a un mayor rendimiento de la máquina aerogeneradora, a mayor horas de exposición al flujo de aire, mayor producción de energía eléctrica.

4.3 Criterios para la selección de zonas para el estudio cuantitativo del recurso eólico

Los estudios cuantitativos conllevan habitualmente una inversión significativa de tiempo y capital. Antes del llevarse a cabo esta parte del estudio es fundamental confirmar que los emplazamientos permiten el desarrollo de proyectos de este tipo. Además es conveniente dar prioridad entre aquellos que con recursos eólicos aparentemente similares, las características de su localización favorezcan el desarrollo de la actividad de las instalaciones de generación.

4.3.1 Exclusión de espacios protegidos y uso de suelos

Tanto espacios naturales protegidos como el uso del suelo (residencial, hidrológico, etc.), son factores de un gran interés de protección por su valor asociado. Debido a la afección que las instalaciones de energía eólica, y su actividad asociada pueden generar sobre los mismos, es necesario un estudio de la localización de los emplazamientos, el cual permitirá descartar aquellas zonas clasificadas de acuerdo a la legislación como protegidas o no aptas para el desarrollo de las actividades propuestas.

4.3.2 Proximidad a red eléctrica y red vial.

De los aspectos que tienen mayor influencia en la estructura de costes de los parques eólicos son la distancia al punto de conexión y la construcción de vías de acceso. Con el propósito de minimizar los costes producidos por la conexión al sistema y por la construcción de infraestructura vial. Se buscan emplazamientos con proximidad a subestaciones con capacidad para la conexión del parque. En el caso de que estos no sea posible se buscarán aquellos que tengan menor distancia a la línea de transmisión. Además, habitualmente los posibles emplazamientos para la instalación de centrales de energía eólica no poseen vías de acceso, se busca por esto evaluar la distancia mínima que se debe construir entre el emplazamiento destinado a la generación y la vía de acceso más cercana, minimizando con ello la inversión necesaria.

4.4 Análisis Cuantitativo

Los proyectos eólicos suelen conllevar una gran inversión de capital y el recurso eólico juega un papel crucial en la amortización de éste. Los estudios cuantitativos del recurso tienen suma importancia a la hora de considerar si el desarrollo del proyecto será viable económicamente o no, por ello los datos de recurso empleados en él han de tener una alta fiabilidad.

Según la cantidad y calidad de datos de los que se dispone para este tipo de estudio podrá realizarse un análisis del potencial directamente mediante programas informáticos diseñados para dicho fin, o será necesaria la instalación de equipos de medida en los propios emplazamientos que aporten una base de datos que permitan la estimación del potencial.

4.4.1 Análisis mediante programas informáticos

Si se dispone de una base de datos adecuada, esto es con un cantidad de datos registrados lo suficiente extensa y de una fiabilidad acorde a la precisión necesaria para el cálculo de potencial eólico en el emplazamiento objeto de estudio, podrán ser empleados para dicho fin una serie de programas informáticos presentes en el mercado como puede ser WASP.

4.4.2 Análisis mediante datos obtenidos en estaciones de medición en la zona

Si no se dispone de una base de datos adecuada que permita extrapolar los cálculos al emplazamiento seleccionado con un margen de error bajo, será necesaria la instalación de una estación de medición en la zona de estudio. Ésta tendrá como objetivo la generación de una base de datos lo suficientemente extensa y de fiabilidad suficiente para la estimación adecuada del recurso eólico.

Las estaciones de medición instaladas deben registrar una serie de parámetros representativos del recurso durante un tiempo concreto y con una frecuencia determinada para que estos resulten de utilidad en los cálculos del potencial del recurso. Para ello, la instrumentación utilizada y la localización de los sensores empleados deben cumplir una serie de requisitos que garanticen el correcto registro de los datos.

4.4.2.1 Frecuencia y duración de las medidas

La obtención de datos más fiables se obtiene a través de mediciones en el emplazamiento objeto de estudio. Requiere de periodos de tiempo de entre 6 meses a varios años para obtener una base de datos considerable.

La duración de las medidas depende en gran parte del objetivo de las mismas. Para la instalación de aerogeneradores un emplazamiento determinado, las directrices a seguir serán:

- Medir durante periodos de tiempo lo más largos, práctica y económicamente posible.
- Medir en cada estación del año, pues los patrones de velocidad y dirección del viento son relativamente estacionales.
- Compara las medidas efectuadas con las tomadas en otros lugares cercanos donde se disponga de series de datos con periodos más largos de medición.
- Comparar los datos tomados con las tendencias de la región a largo plazo, pues está comprobado que se dan importantes variaciones de la velocidad del viento asociada a variaciones climatológicas.

4.4.2.2 Parámetros representativos del potencial eólico

Para determinar mediante las mediciones las características del viento en el emplazamiento hay que considerar una serie de condiciones y aspectos.

- Condiciones generales del viento en el emplazamiento (medias diarias, estacionales y anuales)

Datos tomados de 10 minutos a 1 hora de promedio.

- Datos de condiciones meteorológicas:
 - Temperatura
 - Presión atmosférica
 - Humedad relativa
 - Densidad del aire
- Distribución de frecuencia de dirección.
- Distribución temporal de velocidades.
- Potencial eólico disponible.

- Características del viento influyentes en el funcionamiento del sistema

Datos tomados de 10 minutos a 1 hora de promedio.

- Perfil vertical de velocidad horizontal.
 - Variación temporal
 - Relación con la dirección
- Variación de la velocidad vertical.
 - Relación viento vertical-dirección
 - Relación viento vertical-horizontal

Datos tomados de 1 minuto a 10 minutos de promedio.

- Factores de ráfaga.
 - Relación velocidad-dirección-factor de ráfaga

- Características de la turbulencia.
 - Relación dirección-turbulencia
 - Relación velocidad-turbulencia
- Desviación de la velocidad.

4.4.2.3 Instrumentación

A la hora de la elección de los instrumentos, los factores fundamentales a tener en cuenta son los siguientes:

- Coste y fiabilidad.
- Sensibilidad.
- Calibración adecuada (garantía en la fiabilidad de los datos).
- Robustez (soportar posibles daños).
- Compatibilidad de las especificaciones de sensibilidad y calidad del sistema global.
- Accesibilidad del emplazamiento y calidad de datos.

Los instrumentos básicos necesarios para determinar el potencial eólico son:

- Anemómetro (velocidad del viento).
- Veleta (dirección del viento).
- Termómetro (temperatura ambiental).
- Barómetro (presión atmosférica ambiental).

Generalmente, los datos que provienen de los instrumentos de medida son almacenados en sistemas de registro de diversos tipos:

- Dispositivo de integración.
- Indicador.
- Dispositivo de grabación (soporte magnético o electrónico).

Los instrumentos básicos necesarios para la determinación del potencial eólico son descritos con más detalle en el **Anexo II**.

4.4.2.4 Ubicación de los sensores

Los sensores han de ubicarse en lugares bien expuestos al flujo de aire en cualquier dirección y sin obstáculos a su alrededor. Se entiende por terreno libre de obstáculos aquel en el que la distancia entre el dispositivo de medida y cualquier obstáculo es mayor o igual a 10 veces la altura del obstáculo.

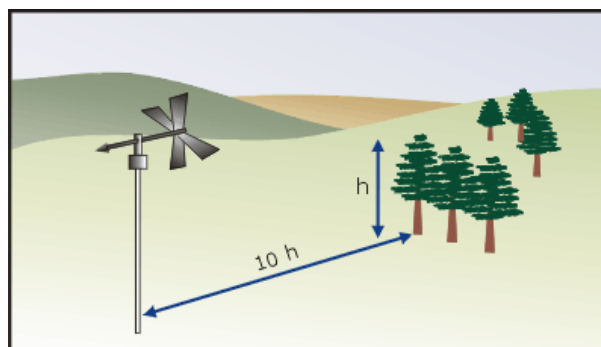


Figura 4.4: Criterios de distancia para la ubicación de los instrumentos de medición.

Fuente: Agencia de Protección Ambiental de los EEUU - EPA

Los sensores deben ser instalados sobre elementos que no alteren las condiciones del emplazamiento, habitualmente se emplean torres con una estructura que permita el flujo de iguales condiciones físicas a las que se dan en el entorno o postes cilíndricos delgados, tensados con vientos.

Se recomienda ubicar los instrumentos de medición de viento en la parte superior de la torre o mástil o, si se ubican en uno de los lados, se debe ubicar en botavaras a una distancia de al menos dos veces el diámetro diagonal de la torre, extendidas en la dirección del viento predominante.

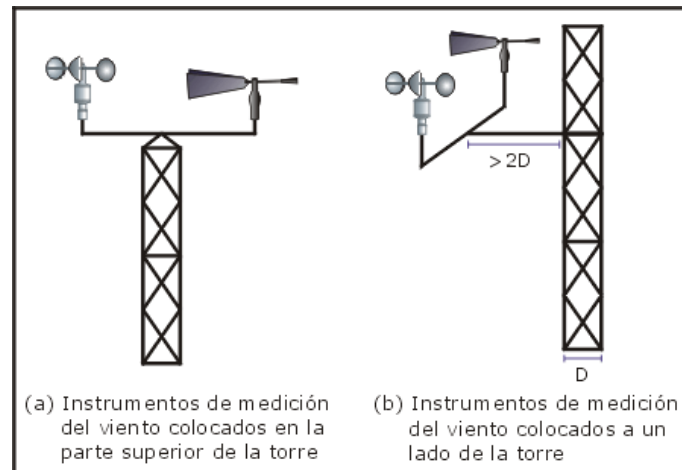


Figura 4.5: Ubicación recomendada para instrumentos de medida del viento. *Fuente:* Agencia de Protección Ambiental de los EEUU - EPA

En cualquier caso la torre seleccionada debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Altura vertical suficiente para lograr un nivel de medición adecuado.
- Resistencia a viento y cargas de hielo esperados en el emplazamiento.
- Estabilidad estructural para minimizar las vibraciones provocadas por el viento.
- Adecuado tipo de anclaje de los cables de acuerdo al tipo de suelo.
- Equipamiento de protección de relámpagos incluso de pararrayos, cable, y vara conectada a tierra.
- Afianzado contra el vandalismo y ascenso desautorizado.
- Marcado adecuado de todos los componente del terreno para evitar riesgo de colisión.
- Protección contra efectos de corrosión.
- Protección del ganado u otros animales.

En el caso de evaluación de una determinada máquina, conviene realizar las medidas a la altura del buje, con el fin de reducir las posibles incertidumbres.

4.4.3 Tratamiento y análisis de datos

Los datos obtenidos en las mediciones son analizados y tratados estadísticamente, con el fin de obtener diferentes parámetros que permiten determinar las características del viento en el emplazamiento y su potencial eólico.

4.4.3.1 Depuración de datos

Los instrumentos de medición, sensores o equipos de medida, así como otras causas, pueden producir anomalía en los datos, por lo que hay que revisarlos y eliminar los posibles errores de medición. Con esto, los datos erróneos o anómalos no son considerados para que no afecten a los valores medios.

4.4.3.2 Validación de datos

Los datos ya depurados se someten a un proceso de validación, en el cual se comparan los datos obtenidos con las mediciones de otras estaciones meteorológicas cercanas. Serán validados aquellos datos que se compruebe que son coherentes.

4.4.3.3 Organización de los datos de viento

La información promedio horaria de velocidad del viento almacenada en el *datalogger*, se organiza habitualmente en tablas similares a las del **Anexo III**. Dichas tablas son el punto de partida del análisis de la velocidad del viento. A partir de ellas se pretende extraer los promedios de velocidad del viento, tanto diarios como horarios, dando una primera aproximación del comportamiento diurno y nocturno del viento. Con el análisis de promedios horarios, se puede obtener información relevante sobre ráfagas de vientos fuertes, periodos de calmas, así como duración y frecuencia de estas.

4.4.3.4 Cálculo de la distribución de frecuencias del viento

Los datos de series mensuales son ordenados y clasificados en intervalos de 1 m/s de acuerdo a la tabla del **Anexo III**. Consecutivamente se puede calcular tanto el número de horas como el porcentaje de tiempo en el que el viento sopla cada intervalo, considerando que la totalidad de los datos de cada mes equivalen al 100% de la información.

$$\% (i) = \frac{N(i)}{N}$$

Donde:

% (i) = Porcentaje de tiempo que el viento sopla en el intervalo “i”.

N (i) = Número de horas que el viento sopla en el intervalo “i”.

N = Número de horas totales de medición.

A partir de estos porcentajes se puede obtener la probabilidad de ocurrencia de la velocidad del viento en cada intervalo.

$$P (i) = \frac{\% (i)}{100}$$

Donde:

P (i) = Probabilidad de ocurrencia de velocidad del viento en el intervalo “i”.

% (i) = Porcentaje de tiempo que el viento sopla en el intervalo “i”.

Así como el número de horas en que una velocidad es excedida.

$$N(v_i < v) = \sum N(v_i + n) \quad \text{siendo } n = 1, 2, 3 \dots$$

Donde:

$N(v_i < v)$ = Número de horas que una velocidad v_i es excedida.

$N(v_i + n)$ = Número de horas de la velocidad es mayor a la velocidad v_i .

4.4.3.5 Cálculo de la velocidad media del viento

Multiplicando cada una de las velocidades promedio horarias con su respectiva probabilidad de ocurrencia se obtiene la velocidad del viento específica, el sumatorio de todas estas da como resultado la velocidad media del viento.

$$\sum \bar{V} = \sum v_i P(v_i)$$

Donde:

\bar{V} = Velocidad del viento específica.

v_i = Velocidad promedio horaria del viento.

$P(v_i)$ = Probabilidad de la velocidad promedio.

4.4.3.6 Análisis de la dirección del viento

La forma más habitual en el análisis de las variaciones en la distribución de velocidades y de direcciones del viento es la utilización de rosas de los vientos.

La rosa de los vientos muestra la distribución de la dirección y velocidad del viento mediante un diagrama. Esta se compone de una gráfica con barras o extensiones que parten desde el centro del centro de un círculo hacia un punto concreto las cuales representan la variación porcentual de la dirección. Estas barras o extensiones son representadas en ocho direcciones primarias y ocho secundarias formando en total una circunferencia de 360°. Cada barra representa por tanto el porcentaje de tiempo que una velocidad dada lleva en una dirección determinada.

4.4.4 Estimación del potencial del viento

Una vez realizado el proceso de tratamiento, análisis y validación de datos, es posible utilizar dichos datos para estimar el potencial contenido en el viento de ese emplazamiento.

4.4.4.1 Cálculo de la densidad de potencia eólica

La densidad de potencia se puede estimar mediante la ecuación (UPME, 2003):

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{N} \sum_1^N v_i^3$$

Donde:

$\frac{P}{A}$ = Densidad de potencia eólica específica.

ρ = Densidad del aire a la altura de la zona de estudio.

N = Número de horas de estimación.

v_i = Velocidad promedio horaria del viento.

Siendo la densidad de aire estimable mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{P M_a}{Z R T} (1 - x_v) \left(1 - \frac{M_v}{M_a}\right)$$

Donde:

P = Presión atmosférica.

Z = Factor de compresibilidad.

R = Constante de los gases ideales.

T = Temperatura.

M_a = Masa molar del aire húmedo ($M_a = 0.028963512440 \text{ kg mol}^{-1}$).

M_v = Masa molar del agua ($M_v = 0.018015 \text{ kg mol}^{-1}$).

x_v = Fracción molar de vapor de agua (determinada a partir de la humedad relativa y la presión atmosférica).

4.4.4.2 Ajuste de la potencia eólica teórica mediante probabilidad de Weibull

Con el objetivo de realizar un tratamiento estadístico de los datos de densidad de potencia, habitualmente en la industria eólica se emplea la función de probabilidad de Weibull, ya que permite un buen ajuste con los datos de velocidad del viento.

Para proceder al ajuste, los datos de velocidad del viento deben ser organizados en intervalos que varíen de 0,5 a 1 m/s, para poder calcular la probabilidad de Weibull de cada una de las velocidades. Además, para el cálculo es necesario conocer los parámetros de forma y escala (k y c), los cuales se obtienen mediante una transformación logarítmica y un ajuste de mínimos cuadrados de la función acumulativa de Weibull. (Ricardo Ricardo, 2010).

$$W(v) = 1 - e^{-\frac{v^k}{c}}$$

Donde:

v = Velocidad del viento.

k = Parámetro de forma.

c = Parámetro de escala.

Aplicando una transformación de doble logaritmo se puede escribir la ecuación como:

$$\ln \ln (1 - W(v)) = k \ln(v) - k \ln(c)$$

De este modo se puede obtener los parámetros k y c , mediante la gráfica de $\ln(v)$ vs $\ln[1 - W(v)]$, donde la pendiente es k y la ordenada en el origen es $-k \ln(c)$.

A partir de la ecuación lineal de la función de probabilidad de Weibull se puede obtener la gráfica $\ln(v)$ vs $\ln(-\ln(1 - p(v)))$, donde $p(v)$ es la frecuencia relativa acumulada de cada uno de los intervalos de viento.

Mediante la gráfica se pueden obtener pues los factores de forma y escala. Conocidos estos factores, se puede calcular la probabilidad de Weibull para cada intervalo de velocidades y con ello, se puede estimar la densidad de potencia eólica específica ajustada mediante a ecuación (UPME, 2003):

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho P(w) \sum_1^N v_i^3$$

Donde $P(w)$ es la probabilidad de Weibull.

La suma de las densidades de potencia eólica específica para cada intervalo de velocidades será la densidad de potencia teórica.

5 METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE ZONAS CON ABUNDANCIA DE RECURSO SOLAR PARA LA INSTALACIÓN DE CAMPOS FOTOVOLTAICOS

En el siguiente apartado se establece y describe un procedimiento estándar para la determinación de la capacidad de explotación de un emplazamiento para la instalación de un proyecto solar, el cual se basa en los siguientes pasos representados en la figura.

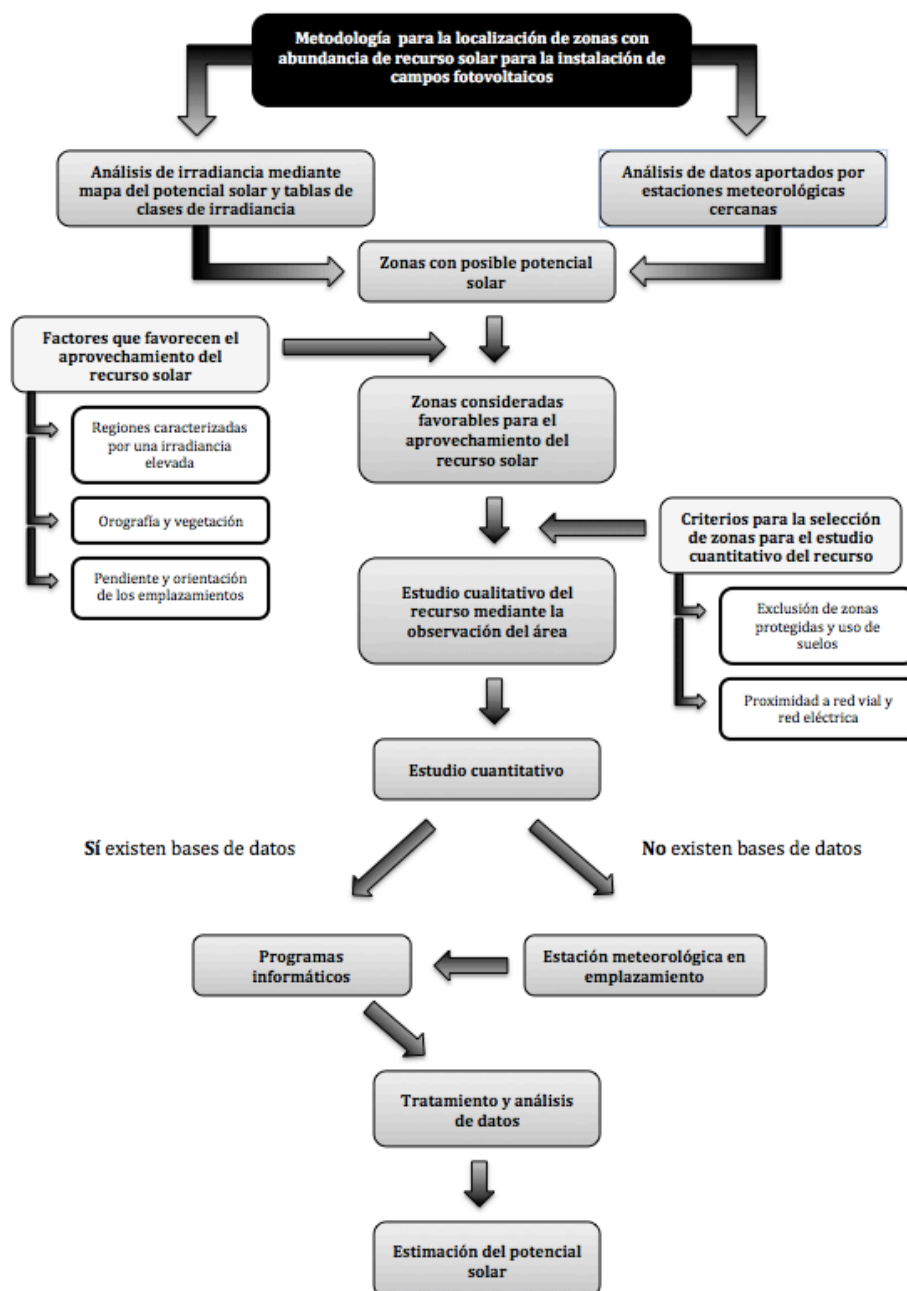


Figura 5.1: Metodología para la localización de zonas con alta abundancia de recurso solar. Fuente: *Elaboración propia*

5.1 Análisis Cualitativo

En una primera etapa se realiza un análisis cualitativo del recurso mediante el uso de mapas de irradiancia, tablas de recurso solar y la información recopilada por estaciones meteorológicas de la región objeto de estudio. Esto acotará las zonas con posible potencial solar. Este primer estudio será completado con la evaluación cualitativa del recurso mediante la observación de las áreas con posible potencial y el análisis de las características que favorecen el aprovechamiento del recurso en dichos emplazamientos.

5.1.1 Uso de mapas y tablas de recurso solar

En los mapas y tablas de recurso solar se representan los datos de irradiación solar global, energía solar recibida por unidad de superficie en un tiempo determinado ($\text{kJ/m}^2 \text{ día}$).

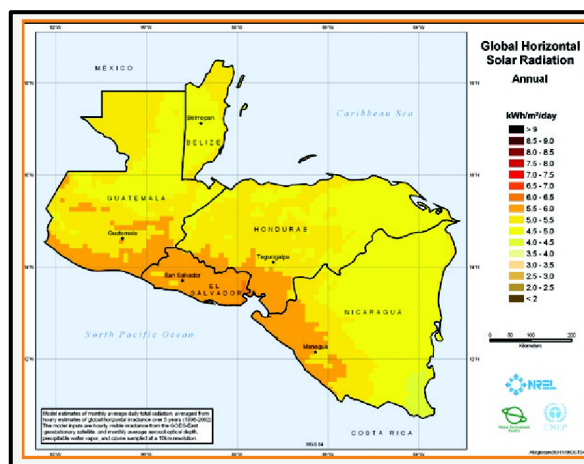


Figura 5.2: Mapa radiación Global Horizontal Anual Centroamérica. *Fuente:* SWERA.

Algunas tablas contienen datos sobre superficies totalmente horizontales, mientras que otras ofrecen datos de diferentes ángulos de inclinación. Además estos datos pueden ser obtenidos para diferentes intervalos de tiempo, ya sean mensuales o anuales.

5.1.2 Cuantificación indirecta del recurso solar a partir de información recopilada por estaciones meteorológicas cercanas y bases de datos

Para la correlación de datos de estaciones meteorológicas con los del emplazamiento objeto de estudio, es preciso que las características de las zonas sean similares.

Gran parte de las estaciones meteorológicas se encuentran próximas a zonas urbanas. Esto es ventajoso a la hora de utilizar esos datos en instalaciones solares urbanas. Sin embargo, en el caso de instalaciones ubicadas lejos de estos núcleos urbanos, es precisa una interpolación de las variables, dichas variables suelen mantenerse constantes en un determinado radio de acción por lo que al contrario que en los parques eólicos, no suele ser preciso la instalación de una estación de monitoreo para el desarrollo de este tipo de proyectos.

5.2 Factores que favorecen el aprovechamiento del recurso solar

Hay una serie de factores relacionados con las características del recurso solar y la fisionomía del terreno que contribuyen a un mejor aprovechamiento del potencial solar de un emplazamiento.

5.2.1 Características de radiación adecuadas

Para que un emplazamiento sea considerado adecuado para el aprovechamiento del recurso solar, debe cumplir una serie de características:

- Valores de irradiancia solar global elevados.
- Latitud, factor que caracteriza la localización del emplazamiento, adecuada para un potencial de radiación incidente elevado.
- Condiciones atmosféricas tales como la nubosidad y las partículas en suspensión (tanto naturales, como debidas a la contaminación) adecuadas. Estos factores dificultan la radiación solar directa.
- Zonas en la que las variaciones de radiación en función de la hora del día y del día del año sean adecuadas.

5.2.2 Orografía y vegetación

Los emplazamientos que suelen cumplir con las características topográficas que benefician el aprovechamiento del recurso solar son:

- Grandes áreas de terreno llano.
- Zonas localizadas lejos de edificios u obstáculos que puedan ocasionar sombras.
- Lugares con poca vegetación que no genere sombras y no dificulte el montaje de los captadores.

5.2.3 Pendiente y orientación

La orientación, inclinación y posibles sombras en la superficie de los captadores solares determina el potencial solar aprovechable por lo que estos factores deben ser estudiados para encontrar el balance óptimo y con ello la mayor captación de recurso.

5.3 Criterios para la selección de zonas para el estudio cuantitativo del recurso solar

Los estudios cuantitativos conllevan habitualmente una inversión significativa de tiempo y capital. Antes del llevarse a cabo esta parte del estudio es fundamental confirmar que los emplazamientos permiten el desarrollo de proyectos de este tipo. Además es conveniente dar prioridad entre aquellos que con recurso solar aparentemente similar, las características de su localización favorezcan el desarrollo de la actividad de las instalaciones de generación.

5.3.1 Exclusión de espacios protegidos y uso de suelos

Tanto espacios naturales protegidos como el uso del suelo (residencial, hidrológico, etc.), son factores de un gran interés de protección por su valor asociado. Debido a la afección que las instalaciones de energía solar, y su actividad asociada pueden generar sobre los mismos, es necesario un estudio de la localización de los

emplazamientos, el cual permitirá descartar aquellas zonas clasificadas de acuerdo a la legislación como protegidas o no aptas para el desarrollo de las actividades propuestas.

5.3.2 Proximidad a red eléctrica y red vial

De los aspectos que tienen mayor influencia en la estructura de costes de los campos solares es la distancia al punto de conexión y la construcción de vías de acceso. Con el propósito de minimizar los costes producidos por la conexión al sistema y por la construcción de infraestructura vial. Se buscan emplazamientos con proximidad a subestaciones con capacidad para la conexión del proyecto. En el caso de que estos no sea posible se buscarán aquellos que tengan menor distancia a la línea de transmisión. Además es posible que los emplazamientos considerados viables para la instalación de centrales de energía solar no posean vías de acceso, se busca por esto evaluar la distancia mínima que se debe construir entre el emplazamiento destinado a la generación y la vía de acceso más cercana, minimizando con ello la inversión necesaria.

5.4 Análisis Cuantitativo

Los proyectos de energía solar suelen conllevar una gran inversión de capital y el recurso solar juega un papel importante en la amortización de éste. En una segunda etapa se llevan a cabo los estudios cuantitativos del recurso, ya que tienen gran importancia a la hora de considerar si el desarrollo del proyecto será viable económicamente o no, por ello los datos de recurso empleados en él han de tener una fiabilidad adecuada.

Según la cantidad y calidad de datos de los que se dispone para este tipo de estudio podrá realizarse un análisis del potencial directamente mediante programas informáticos diseñados para dicho fin, o será necesaria la instalación de equipos de medida en los propios emplazamientos que aporten una base de datos que permitan la estimación del potencial.

5.4.1 Análisis mediante programas informáticos

Si se dispone de una base de datos adecuada, esto es con una cantidad de datos registrados lo suficiente extensa y de una fiabilidad acorde a la precisión necesaria para el cálculo de potencial solar en el emplazamiento objeto de estudio, podrán ser empleados para dicho fin una serie de programas informáticos presentes en el mercado como puede ser CTE-Solar.

5.4.2 Análisis mediante datos de estaciones de medición en la zona

Si no se dispone de una base de datos adecuada que permita extrapolar los cálculos al emplazamiento seleccionado con una fiabilidad considerable, será necesaria la instalación de una estación de medición en la zona de estudio. Ésta tendrá como objetivo la generación de una base de datos lo suficientemente extensa y de fiabilidad suficiente para la estimación adecuada del recurso solar.

Las estaciones de medición instaladas deben registrar una serie de parámetros representativos del recurso durante un tiempo concreto y con una frecuencia determinada para que estos resulten de utilidad en los cálculos del potencial. Para

ello, la instrumentación utilizada y la localización de los sensores empleados deben cumplir una serie de requisitos que garanticen el correcto registro de los datos.

5.4.2.1 Frecuencia y duración de medidas

Las medidas meteorológicas se miden con una periodicidad determinada. Lo ideal es que la toma de datos se realizase cada pocos segundos, pero por cuestiones de capacidad de almacenamiento principalmente, se realizan en orden de minutos.

Habitualmente el *datalogger* toma varias medidas en un minuto del cual se almacena el valor medio de los datos medidos en ese minuto. Suelen quedarse almacenados además los máximos y mínimos de estos valores instantáneos.

Para alcanzar un grado de fiabilidad adecuado, las mediciones deben realizarse por periodos largos de tiempo. Se considera que a partir de 10 años de mediciones diarias se tiene una base de datos que permite una precisión muy elevada.

5.4.2.2 Parámetros representativos del potencial solar

La mayoría de fabricantes de captadores fotovoltaicos suministran curvas de eficiencia basadas en la irradiancia y la temperatura ambiente, variables climáticas que afectan en el aprovechamiento del recurso solar.

Irradiancia: Con un aumento de la irradiancia, se produce un incremento del valor de la corriente de cortocircuito (siendo la variación de tensión de carga casi inexistente), por lo que la potencia generada también es mayor.

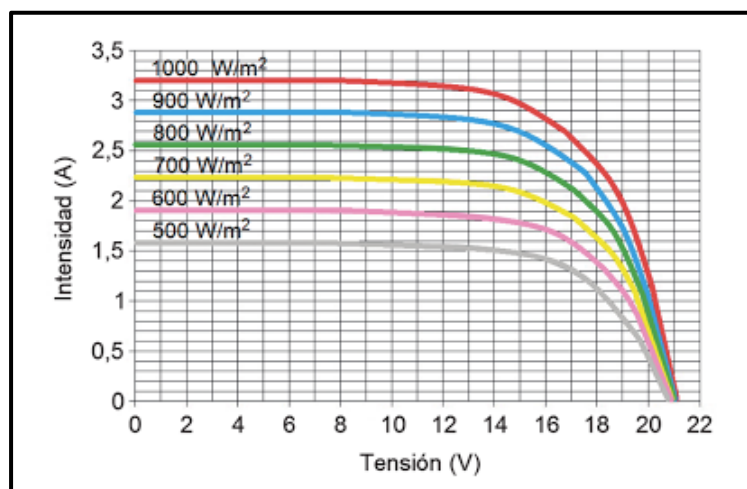


Figura 5.3: Curvas de tensión-intensidad de los módulos en función de la irradiancia.
Fuente: Configuración de Instalaciones Solares Fotovoltaicas. Julián Cantos Serrano.

Temperatura ambiente: Con un aumento de la temperatura ambiente, se produce un incremento de la temperatura de las células, pues la disipación de calor es menor. Esto conlleva un descenso de la tensión sin carga, disminuyendo la potencia generada.

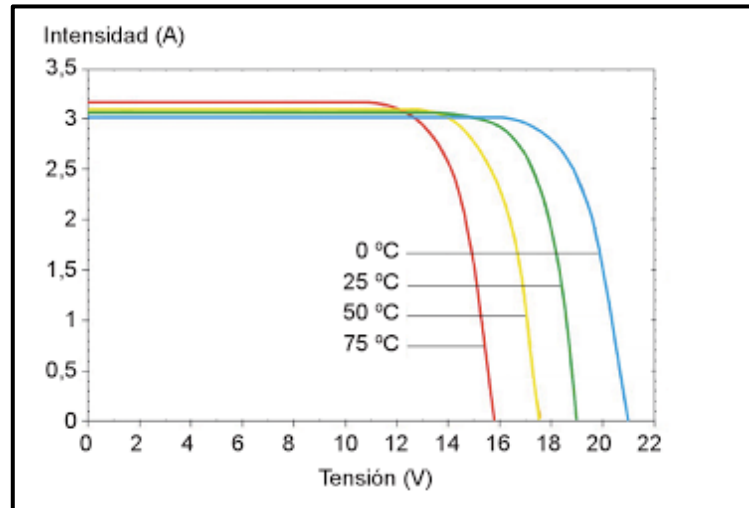


Figura 5.4: Curvas de tensión-intensidad de los módulos en función de la temperatura del módulo. *Fuente: Configuración de Instalaciones Solares Fotovoltaicas. Julián Cantos Serrano.*

5.4.2.3 Instrumentación

A la hora de la elección de los instrumentos, los factores fundamentales a tener en cuenta son los siguientes:

- Coste y fiabilidad.
- Sensibilidad.
- Calibración adecuada (garantía en la fiabilidad de los datos).
- Robustez (soportar posibles daños).
- Compatibilidad de las especificaciones de sensibilidad y calidad del sistema global.
- Accesibilidad del emplazamiento y calidad de datos.

Los instrumentos básicos necesarios para determinar el potencial solar son:

- Piranómetro (radiación solar global y difusa).
- Pirheliómetro (radiación solar directa).
- Termómetro (temperatura ambiental).

Generalmente, los datos que provienen de los instrumentos de medida son almacenados en sistemas de registro de diversos tipos:

- Dispositivo de integración.
- Indicador.
- Dispositivo de grabación (soporte magnético o electrónico).

Los instrumentos básicos necesarios para la determinación del potencial solar son descritos con más detalle en el **Anexo IV**.

5.4.3 Tratamiento y análisis de datos

Los datos obtenidos en las mediciones son analizados y tratados estadísticamente, con el fin de obtener diferentes parámetros que permiten determinar las características del recuso en el emplazamiento y su potencial solar.

5.4.3.1 Depuración de datos

Los instrumentos de medición, sensores o equipos de medida, así como otras causas, pueden producir anomalía en los datos, por lo que hay que revisarlos y eliminar los posibles errores de medición. Con esto, los datos erróneos o anómalos no son considerados para que no afecten a los valores medios. Algunos de los datos que se eliminan son:

- Datos de radiación en periodos nocturnos, pues no tienen sentido.
- Datos de radiación difusa que sean superiores a los de radiación global, los cuales son obviamente erróneos.
- Errores debidos a la calibración incorrecta, mala orientación de los dispositivos, suciedad en sensores, etcétera.
- Errores debidos al ruido en la señal de los sensores.

5.4.3.2 Validación de datos

Los datos ya depurados se someten a un proceso de validación, en el cual se comparan los datos obtenidos con las mediciones de otras estaciones meteorológicas cercanas. Serán validados aquellos datos que se compruebe que son coherentes.

5.4.3.3 Tratamiento estadístico de datos

Habitualmente los datos que resultan interesantes son los valores máximos, mínimos y medias diarias, mensuales y anuales, tanto de temperatura como de irradiación. Los máximos y mínimos permiten determinar rangos de valores, mientras que las medias permiten observar las tendencias.

5.4.3.4 Organización de los datos de irradiación

Los datos suelen organizarse para que su uso en tablas de radiación solar. La mayoría de ellas proporcionan los datos de irradiación solar global, es decir, la energía solar recibida por una superficie en un tiempo determinado.

Se pueden encontrar tablas de datos diarias o mensuales, en las que se presentan los valores medios radiación en cada hora o en cada mes durante varios años.

Algunas de las tablas contienen la información para superficies horizontales mientras que en otras se pueden obtener datos sobre diferentes ángulos de inclinación. Se presentan ejemplos de estas en el **Anexo V**.

Con estas tablas es posible calcular los valores de irradiación en superficies inclinadas mediante métodos que varían en complejidad, de acuerdo al grado de exactitud que se precise obtener.

5.4.4 Estimación del potencial fotovoltaico

Una vez realizado el proceso de tratamiento, análisis y validación de datos, es posible utilizar dichos datos para estimar el potencial solar de ese emplazamiento. Se

desarrolla el proceso de estimación de acuerdo al Código Técnico de la Edificación (España).

5.4.4.1 Cálculo de la irradiación anual

La irradiación global anual sobre una superficie inclinada con orientación sur, partiendo de los datos de irradiación global de una superficie horizontal, se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$G_a(\beta) = \frac{G_a(0^\circ)}{1 - 4.46 \cdot 10^{-4} \beta - 1.19 \cdot 10^{-4} \beta^2}$$

Donde:

$G_a(\beta)$ = Valor medio de la irradiación global anual sobre una superficie con inclinación β (kW h/m²).

$G_a(0^\circ)$ = Valor medio de la irradiación global anual sobre una superficie horizontal (kW h/m²).

β = Inclinación de la superficie

Siendo la inclinación óptima (β) para cierta latitud (Φ):

$$\beta = 3.7 + 0.69 \Phi$$

5.4.4.2 Cálculo de pérdidas

Para el diseño de las instalaciones fotovoltaicas es necesario un estudio técnico que analiza las posibles pérdidas por radiación debidas a la orientación, inclinación o sombras. Siendo, de acuerdo al Código Técnico de la Edificación (España), las pérdidas límite que se pueden dar las siguientes:

Caso	Definición	Orientación e inclinación	Sombras	Total
General	Instalación de módulos en suelo, terraza o superficie horizontal.	10%	10%	15%
Superposición arquitectónica	Instalación de los módulos paralelos a la envolvente del edificio, es decir, con igual inclinación que cubiertas, tejados o fachadas.	20%	15%	30%
Integración arquitectónica	Instalación de los módulo en sustitución a elementos constructivos o partes de cerramiento.	40%	20%	50%

Tabla 5.1: Pérdidas límite por orientación, inclinación y sombras. *Fuente: Código Técnico de la Edificación. Adaptación propia.*

En cualquiera de los casos se deben cumplir las tres condiciones: pérdidas por orientación e inclinación, sombras y pérdidas totales, inferiores a los límites establecidos.

Cálculo de las pérdidas por orientación e inclinación

Las pérdidas debidas a la orientación e inclinación se calculan en función de:

- Ángulo de inclinación (β) = ángulo que forma la superficie de los módulos fotovoltaicos con el plano horizontal.

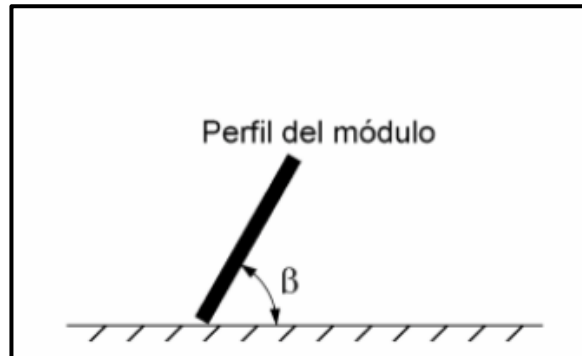


Figura 5.5: Ángulo de inclinación (β). Fuente: Código Técnico de la Edificación.

- Ángulo de azimut (α) = ángulo entre la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie del módulo y el meridiano del lugar.

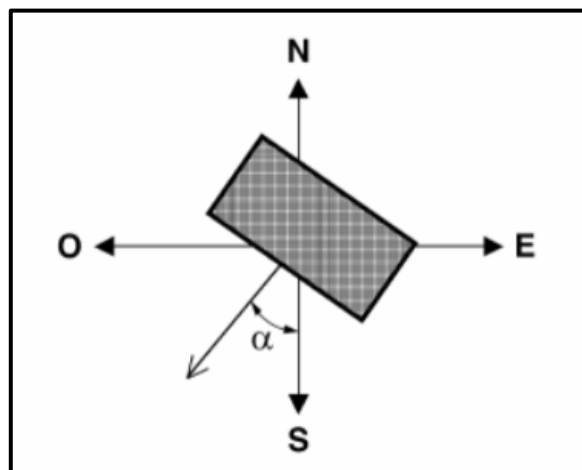


Figura 5.6: Ángulo de azimut (α). Fuente: Código Técnico de la Edificación.

Determinado el azimut y conocidas las pérdidas máximas de acuerdo al caso de estudio, se calcularán los límites de inclinación en el caso de $\phi = 41^\circ$ mediante la figura 5.7.

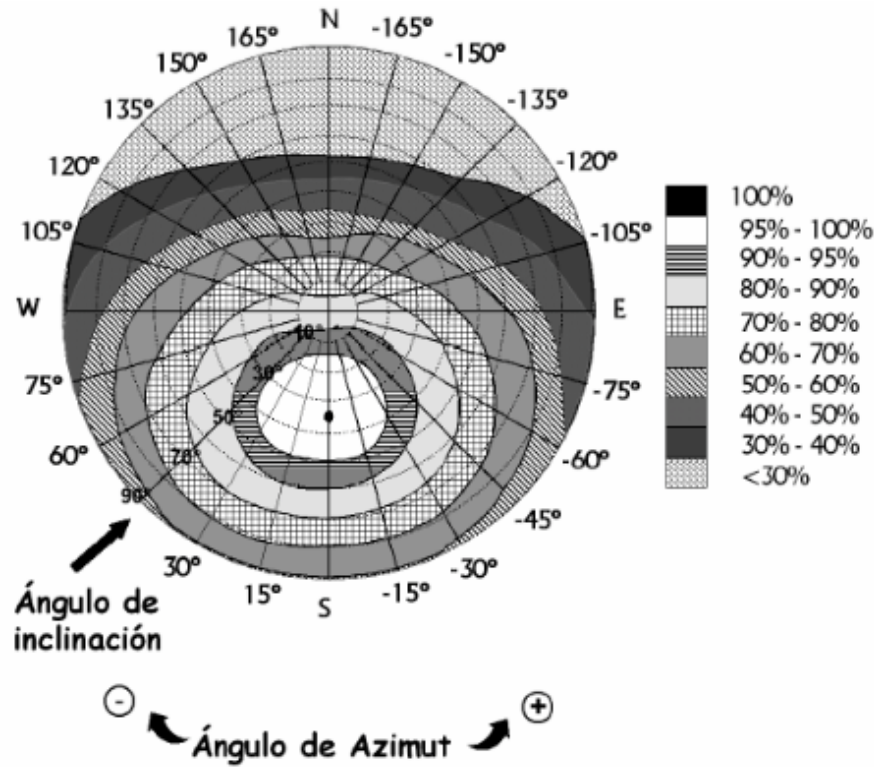


Figura 5.7: Gráfica de inclinación máxima y mínima. Fuente: Código Técnico de la Edificación.

Los puntos de intersección del límite de pérdidas con la recta de azimut determina los valores de inclinación máxima y mínima.

Si no se produce intersección entre el límite de pérdidas y la recta del azimut, las pérdidas serán mayores a las permitidas y la instalación no se considera viable.

En el caso de las curvas se interseccionen, se obtendrán los valores para la latitud $\phi = 41^\circ$, que deberán corregirse a la latitud objeto de estudio de la siguiente forma:

$$\text{Inclinación máxima} = \text{Inclinación} (\phi = 41^\circ) - (41^\circ - \text{latitud})$$

$$\text{Inclinación mínima} = \text{Inclinación} (\phi = 41^\circ) - (41^\circ - \text{latitud})$$

(siendo 0° el valor mínimo)

En los casos en los que los resultados estén cerca de los límites, y como instrumento de validación, se emplearán las siguientes fórmulas.

$$\text{Pérdidas (\%)} = 100 [1.2 \cdot 10^{-4} (\beta - \phi + 10)^2 + (3.5 \cdot 10^{-5}) \alpha^2]$$

$$\text{Para } 15^\circ < \beta < 90^\circ$$

$$\text{Pérdidas (\%)} = 100 [1.2 \cdot 10^{-4} (\beta - \phi + 10)^2]$$

$$\text{Para } 15^\circ \leq \beta$$

Donde α , β y ϕ se expresan en grados.

Cálculo de pérdidas por sombra

Las pérdidas de radiación por sombra se expresan como el porcentaje de la radiación solar global que incidiría sobre una superficie de no existir ninguna sombra.

El procedimiento se basa en la comparación del perfil de obstáculos que afectan a la superficie objeto de estudio con el diagrama de trayectoria del sol. La metodología a seguir es la siguiente:

1. Obtención del perfil de obstáculos: localización de los principales obstáculos que interactúan con la superficie objeto de estudio, en función de su posición azimut y elevación (ángulo de inclinación con respecto al plano horizontal).
2. Representación del perfil de obstáculos: El perfil se representa mediante la utilización del diagrama de la **figura 5.8**, el cual muestra la banda de trayectorias del sol durante todo el año. Esta banda está dividida en segmentos, correspondientes a las horas solares (negativas antes del medio día y positivas después) y clasificadas con una letra un número.

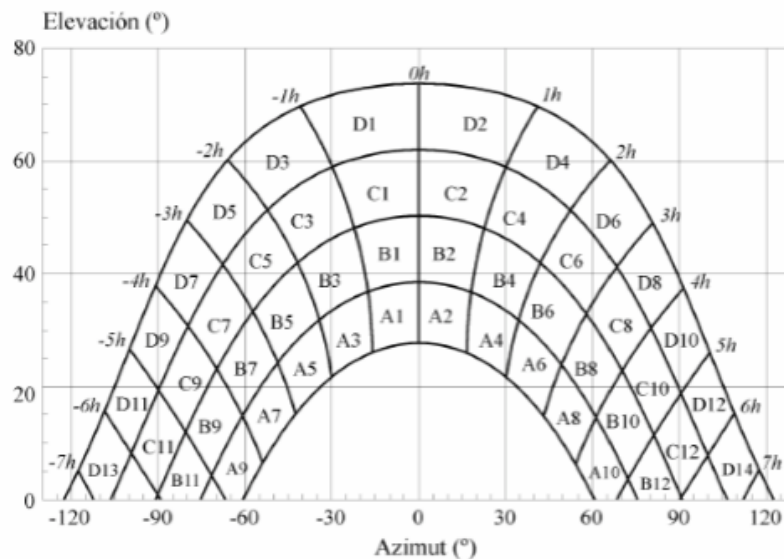


Figura 5.8: Diagrama de trayectorias del sol (escalas en grados sexagesimales).

Fuente: Código Técnico de la Edificación.

3. En cada una de las posiciones de la figura, las cuales representan el recorrido del sol durante un periodo de tiempo, la contribución a la irradiación global incidente en la superficie objeto de estudio tendrá un valor determinado. Se seleccionará para el cálculo la tabla de valores de referencia, entre las que se encuentran en el **Anexo VI**, que más se adecue al estudio.
4. Cálculo final: con la comparación del perfil de obstáculos y el diagrama de trayectorias del sol se calcularán las pérdidas por sombras. Para este cálculo se sumarán las contribuciones de aquellos segmentos que están total o parcialmente ocultos por el perfil de obstáculos. En el caso de que la ocultación sea parcial, se emplearán factores de relleno (fracción oculta respecto al total del segmento), más próximos a 0.25, 0.5, 0.75 o 1.

Distancia mínima entre filas de módulos o de captadores

Una de las fuentes de sombras si no existe una separación adecuada entre filas de módulos o de captadores, pueden ser los propios módulos o captadores, por lo que deben instalarse a una distancia adecuada. La distancia (d) mínima que debe dejarse entre filas, depende de la latitud del emplazamiento (ϕ) y de la altura (h) que existe entre el punto más alto de la fila y la parte más baja de la fila siguiente, de acuerdo a la **figura 5.9** mediante la siguiente expresión:

$$d = \frac{h}{\operatorname{tg}(61 - \phi)}$$

Esta expresión también es aplicable en el cálculo de la distancia entre una fila y un obstáculo, siendo la altura desde la base de los módulos o captadores hasta el punto más alto del obstáculo.

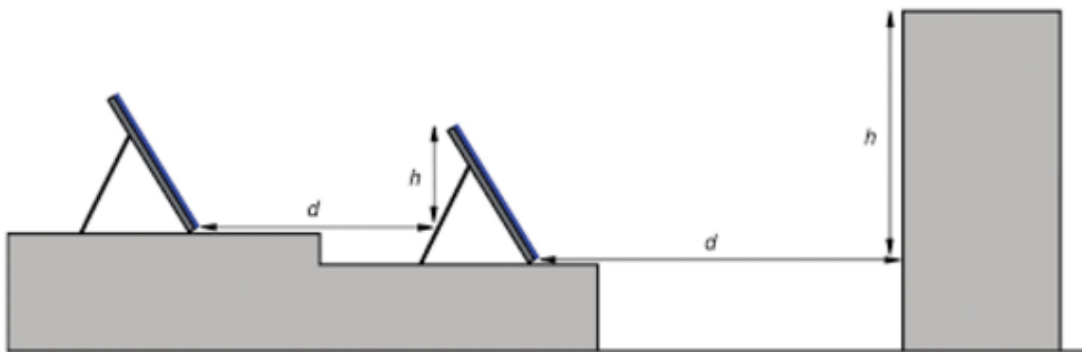


Figura 5.9: Separación entre filas y entre filas y objetos. *Fuente: Código Técnico de la Edificación.*

6 DESARROLLO DEL ESTUDIO DE POTENCIAL RENOVABLE EN EL MUNICIPIO DE QUETZALTENANGO

El siguiente estudio pretende ser el punto de partida para la promoción y desarrollo de la energía eólica y fotovoltaica en el municipio de Quetzaltenango. En él se analizan los recursos y las zonas viables con mayor potencial eólico y solar para la ubicación de instalaciones meteorológicas. Estas instalaciones podrán generar una base datos, hasta ahora muy escasa, necesaria para los estudios de evaluación de viabilidad de proyectos con dichas tecnologías renovables, en estos emplazamientos y otros cercanos.

6.1 Descripción zona de estudio

El departamento de Quetzaltenango se halla ubicado en la Región VI o Región Sur Occidente de Guatemala, limitando al Norte con el departamento de Huehuetenango; al Sur con los departamentos de Retalhuleu y Suchitepéquez; al Este con Totonicapán y Sololá y al Oeste con el departamento de San Marcos, y contando con una superficie de 1,951 km² equivalentes al 1.8% del territorio nacional.

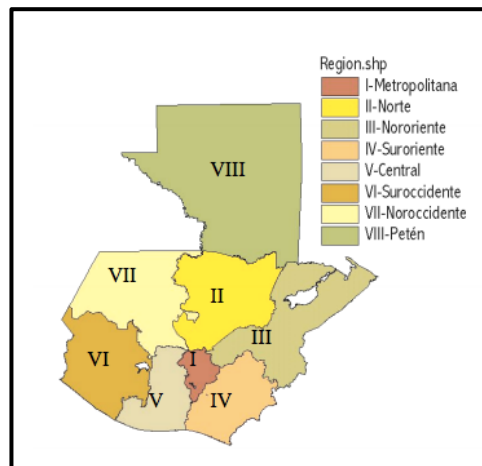


Figura 6.1: División por regiones *Fuente: Ley preliminar de regionalización 1987 (Guatemala).*

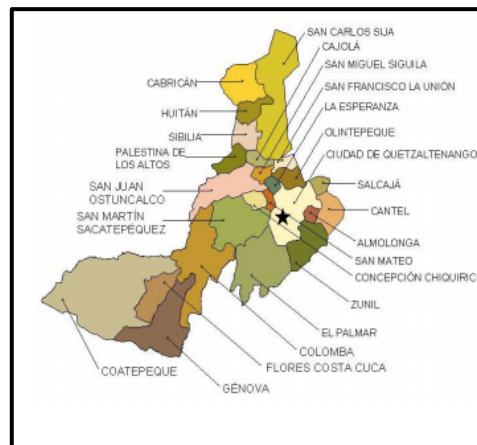


Figura 6.2: 24 municipios del departamento de Quetzaltenango. *Fuente: Instituto Geográfico Nacional (Guatemala 2000)*

El municipio de Quetzaltenango (latitud 14° 50' 16" y longitud 91° 31' 03") es la cabecera municipal del departamento con una población, de acuerdo a los datos del SIGSA, de aproximadamente cerca de 162.200 habitantes en 2016.

Se encuentra ubicada en el valle montañoso del altiplano occidental de Guatemala con una altitud media de 2333 msnm y cuenta con una extensión territorial de 126.85 km². Dicha extensión se divide, de acuerdo al mapa de zonas del municipio de Quetzaltenango adjuntado en el **Anexo VII**, en un núcleo urbano dividido en 11 zonas, además de 13 caseríos, 2 aldeas y extensiones de bosque, cerros y regiones volcánicas, entorno a ese núcleo todas ellas.

Éste posee una variedad de climas que van desde el templado hasta el frío húmedo. Debido a la altura a la que se encuentra sobre el nivel del mar, la ciudad presenta un clima de montaña frío lluvioso, cuya temperatura media es de 14.7°C. Las temperaturas más altas se suelen dar en los últimos días de primavera cuando en ocasiones se superan los 26°C, mientras que en invierno, entre diciembre y febrero, suelen darse las más frías llegando a bajar a -4°C en el centro histórico de la ciudad, a -6°C en zonas periféricas y a -8°C en las zonas más altas. Esto conlleva la presencia ocasional de nevadas en la zona urbana del municipio.

Se distinguen dos estaciones claramente diferenciadas, la temporada de lluvias que se da desde mayo hasta la mitad del mes de noviembre, donde de forma habitual, los meses con mayores precipitaciones son junio, agosto y septiembre. Y la estación seca, desde diciembre hasta abril.

A lo largo de la temporada de lluvias, las precipitaciones se dan de forma continua, habitualmente por las tardes. La lluvia normalmente es más abundante en los lugares con mayor altitud. Por ello, las cumbres cercanas a la ciudad suelen ser más húmedas que la zona oriental. Cuando la temporada de lluvias finaliza, se inicia la temporada de heladas. Durante dicha temporada, desde noviembre, diciembre, enero y febrero, se dan mañanas frías con depósitos de hielo en el suelo y árboles. Este fenómeno se ve incrementado por los frentes fríos que alcanzan la ciudad, principalmente vientos con dirección norte.

6.2 Descripción de patrón de vientos de Guatemala

Durante los meses de octubre a febrero principalmente, debido al sistema de presiones que se da en EEUU y a través del Golfo de México y de la península del Yucatán; Guatemala es afectada por vientos Alisios, los cuales se desplazan con componente Norte (NNE, NE, NNO). Estas corrientes de aire entran desde el Golfo de México a través del departamento de Izabal y se introducen entre las Sierras del Meredón y Las Minas, provocándose una aceleración del viento, luego se introducen en la zona central y se dirigen a la parte noroeste donde van disminuyendo su velocidad de forma considerable.

Durante los meses de marzo a junio, el viento predominante es de componente sur, debido a los sistemas de bajas presiones que se dan a lo largo del Océano Pacífico, responsables de las corrientes de aire que se generan. En las ocasiones en que estos sistemas de presiones son lo suficientemente elevados, provocan que el viento sobrepase los macizos montañosos del Pie Monte y de la Sierra de los Cuchumatanes, llegando hasta los departamentos de Alta Verapaz, Huehuetenango y

El Quiché.

En los meses de julio a septiembre, el viento mantiene una componente Norte, debido al anticiclón que se da de forma semipermanente en el Atlántico, el cual mantiene un flujo a través del departamento de Izabal; excepto cuando se dan fenómenos como huracanes o tormentas tropicales, los cuales hacen que de forma transitoria se cambien los flujos de aire.

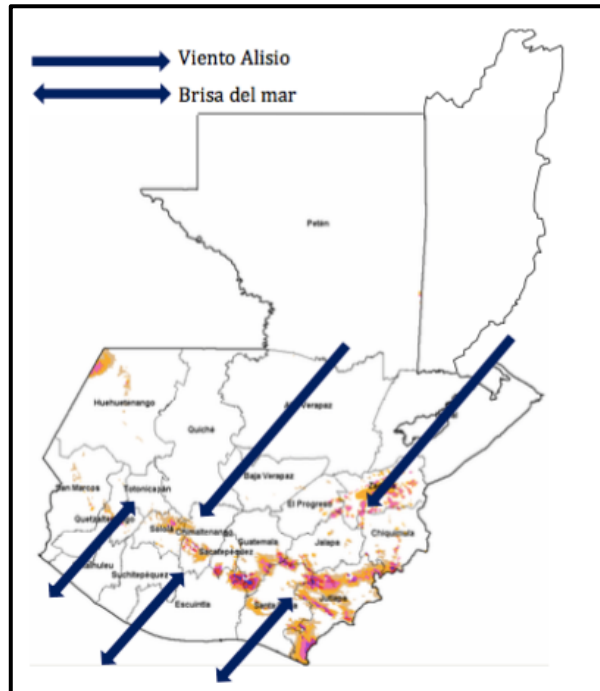


Figura 6.3 : Patrón de vientos en Guatemala. *Fuente: Ministerios de Energías y Minas (Guatemala).*

6.3 Fuentes de datos e información empleadas

Se describen a continuación cuales han sido las fuentes de datos e información empleadas para el desarrollo del estudio.

6.3.1 Mapas de potencial renovable

El NREL (National Renewable Energy Laboratory) ha llevado a cabo junto con la colaboración de UNEP (United Nations Environment Programme), Global Environment Facility y SUNY (Universidad Estatal de Nueva York) el proyecto SWERA. Dentro de dicho proyecto se generaron mapas de recurso eólico y solar.

6.3.1.1 El mapa eólico del proyecto SWERA

Uno de los resultados del proyecto SWERA, fue la generación de un mapa de recurso eólico de Guatemala con una resolución de 1 km por 1 km. Aunque el mapa no fue diseñado para el cálculo de emplazamiento concretos puede ser empleado con el fin de hacer más sencilla la identificación e implementación de proyectos eólicos.

La metodología de NREL combina métodos analíticos, numéricos y empíricos. Los datos luego se proyectan sobre un mapa usando un sistema de información geográfica (SIG).

Con el modelo MASS⁵ se simularon condiciones climatológicas globales y se calculó su efecto en el viento local con el modelo de flujo eólico WindMap, usando datos topográficos y de rugosidad de la tierra. Los resultados del modelo fueron revisados por NREL y mejorados a través de datos empíricos y métodos analíticos.

Los datos principales que se usaron para MASS son del NCEP/NCAR. Además se hizo uso de otros datos: datos del viento de estaciones meteorológicas superficiales (NCDC DATSAV), datos del viento de estaciones meteorológicas de los estratos altos de la atmósfera, datos satelitales de viento sobre el océano y mediciones locales.

6.3.1.2 El mapa solar del proyecto SWERA

Uno de los conjuntos de datos generado en el marco del proyecto SWERA fue llevado a cabo por la universidad estatal de Nueva York. El mapa generado a partir del modelo solar de SUNY tiene una resolución de 10 por 10 km. Este modelo determina datos promedio horarios, diarios y mensuales de radiación directa normal, global horizontal y difusa tomando como base de datos registros de los satélites GOES de 1998 hasta 2002. Dicho modelo usa datos horarios de irradiancia visible, vapor de agua y gases atmosféricos y concentración de aerosoles en la atmósfera. Para la verificación del modelo se hizo uso de datos de mediciones de referencia de las estaciones meteorológicas de La Aurora, Huehuetenango y Flores.

El margen de error con respecto a las mediciones terrestres es del 12%. Además, dicho margen de error aumenta cuanto mayor es la distancia entre el lugar calculado y el sitio de referencia. El factor limitante es la exactitud de las observaciones de los satélites. Por otro lado, la nubosidad de la zona y con ellos la radiación local, puede tener variaciones significativas dentro de una celda de rejilla debido a los microclimas que se generan.

6.3.2 Datos de estaciones meteorológicas locales y bases de datos

Se obtuvo para el estudio eólico la información meteorológica en formato digital de las estaciones instaladas en el Centro Universitario de Occidente. Además se empleó el estudio *“Medición de la velocidad del viento en el área de la zona tres de la ciudad de Quetzaltenango. Autor: Romeo Vinicio Lorenzo Cupil “*, donde se tomaron medidas desde tres puntos distintos de la ciudad. El Instituto Tecnológico Privado de Occidente (ITPO), la Escuela Nacional de Ciencias Comerciales (ENCO), y la Quinta Compañía de Bomberos Voluntarios de Quetzaltenango.

Para el caso solar no se disponía de datos de estaciones meteorológicas, pero se hizo uso de datos aportados por la NASA y empleados como base de datos del programa RETSreen.

6.3.3 Datos de observaciones de campo

Mediante la visita a los diferentes emplazamientos se realizó una base de datos fotográfica y se registraron una serie de notas acerca de las características de dichos emplazamientos.

6.4 Metodología empleada en el caso eólico

La metodología seguida, basada en la implementada en este documento, para la selección de las zonas con viabilidad ha sido la siguiente:

- I. Análisis de los vientos mediante el mapa eólico generado por el NREL para el país de Guatemala como parte del proyecto SWERA y la información meteorológica disponible en las estaciones meteorológicas locales en formato digital, así como un estudio previo existente de velocidades del viento en la ciudad.
- II. Consideración de factores que favorecen el aprovechamiento del recurso eólico para determinar los emplazamientos más interesantes:
 - Ubicación en regiones con densidades de potencial eólico de al menos 300 W/m^2 (7 m/s y a una altura de 50 m) de acuerdo con el mapa de NREL, dentro del departamento de Quetzaltenango.
 - Estudio orográfico y de vegetación para identificar emplazamientos con características que contribuyen a mejorar los recursos de viento. (tipo de vegetación, rugosidad del terreno, etc).
 - Pendiente y orientación de los emplazamientos.
- III. Aplicación de criterios para la selección de zonas para el estudio cuantitativo del recurso eólico:
 - Exclusión de áreas protegidas y uso de suelos.
 - Proximidad a red vial y red de eléctrica.
- IV. Con apoyo de personal de la Universidad San Carlos de Guatemala, se visita la localización que de acuerdo al estudio se cataloga como candidata para el estudio de viabilidad en campo.
- V. Después de aplicar los criterios anteriores se procede a la selección de las zonas consideradas más viables para el aprovechamiento eólico.
- VI. Debido a la ausencia de una base de datos de mediciones del viento, no se puede proceder al análisis cuantitativo, por lo que se propone la instalación de una estación de medición en la zona para poder continuar con el análisis del emplazamiento.

6.5 Localización de zonas de alta abundancia de recurso eólico

En una primera etapa se realiza un análisis cualitativo del recurso mediante el uso de mapas de recurso eólico, tablas de clases de vientos y la información recopilada por estaciones meteorológicas de la región objeto de estudio. Con ello se acotan las zonas con posible potencial eólico. Este primer estudio teórico es completado con la cuantificación cualitativa del recurso mediante la visita y observación de las áreas con posible potencial.

6.5.1 Uso de mapas de recurso eólico y tablas de clases de vientos.

Mediante el mapa interactivo generado por el proyecto SWERA para el país de Guatemala, se procede a la determinación de las zonas con potencial eólico próximas a la ciudad de Quetzaltenango.

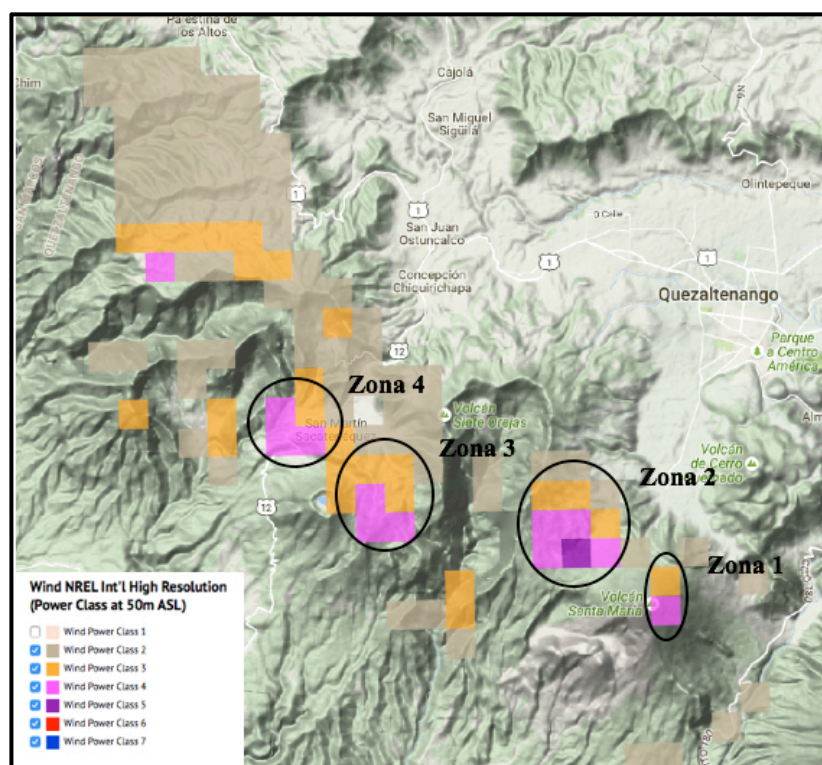


Figura 6.4: Mapa de zonas con potencial eólico. *Fuente: SWERA. Adaptación propia.*

Se determinan de acuerdo a la **figura 6.4**, cuatro zonas con un potencial catalogado de acuerdo a la tablas de viento como “Moderado” o superior, esto es con un potencial de 300 W/m^2 a 50 m o superior (7 m/s o superior a 50 m).

Queriendo únicamente considerar zonas que pertenecen al municipio de Quetzaltenango y evitar así mayores dificultades burocráticas con otros municipios, se descartan las zonas 3 y 4, siendo por lo tanto las zonas 1 y 2 las zonas objeto de estudio.

Se procede mediante el programa Google Earth Pro a la determinación de las localizaciones exactas de las zonas. Para ello se emplea la superposición de imágenes extraídas del mapa de proyecto SWERA a los mapas interactivos de dicho

programa y mediante las herramientas de éste, se determinan las coordenadas en las que se localizan las zonas con potencial eólico.

Zona 1:

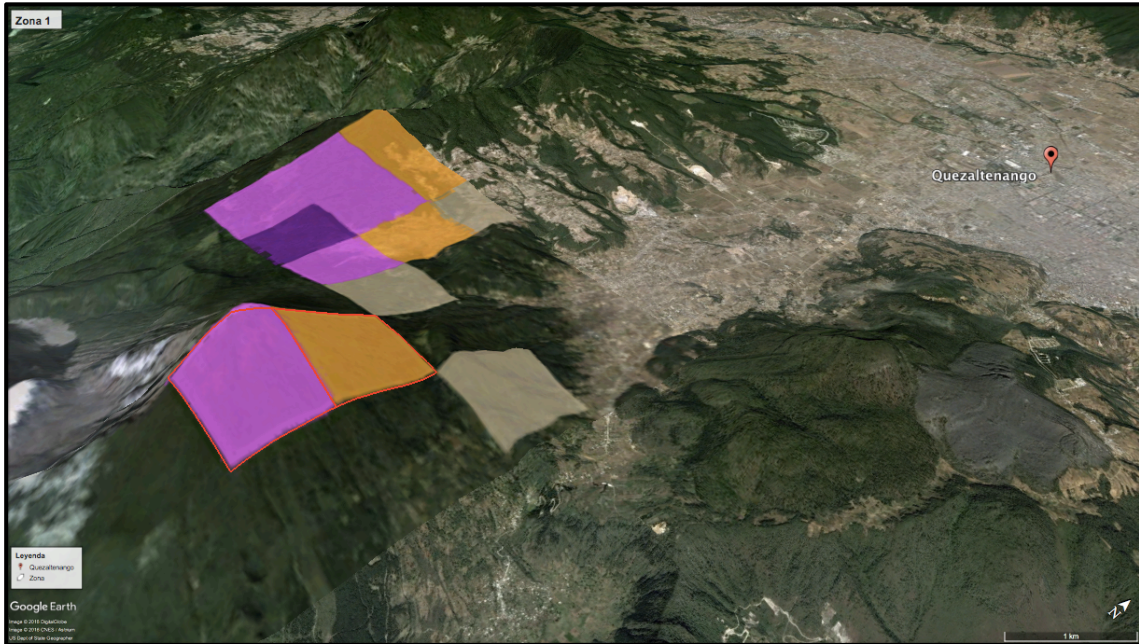


Figura 6.5: Zona de estudio 1. Fuente: SWERA Y Google Earth Pro. Adaptación propia.

Zona 2:

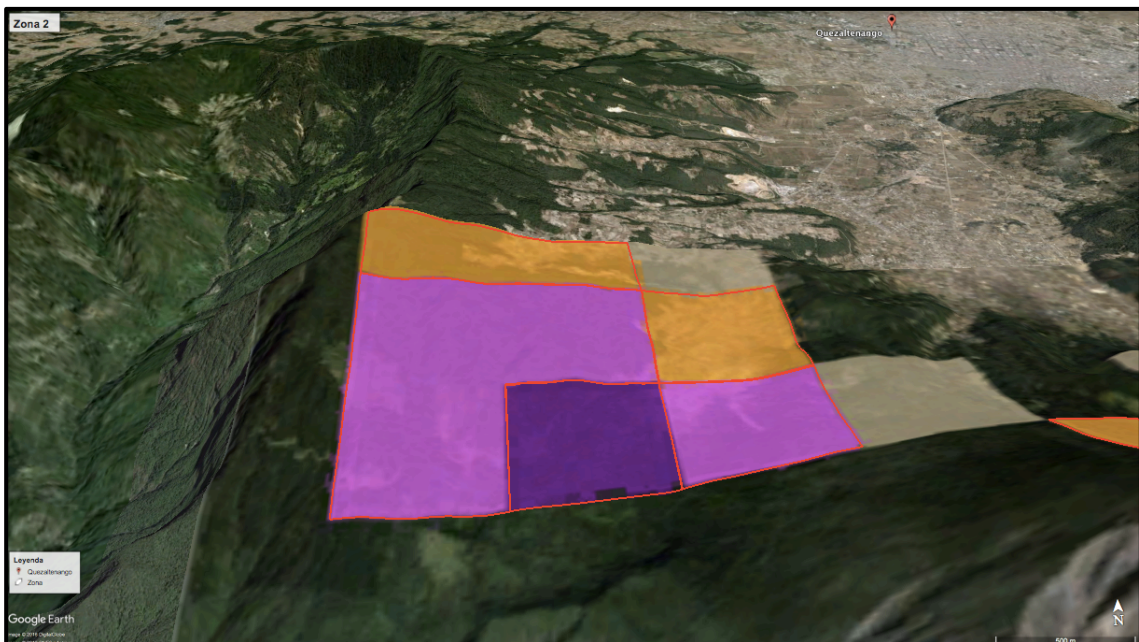


Figura 6.7: Zona de estudio 2. Fuente: SWERA Y Google Earth Pro. Adaptación propia.

Las coordenadas de ambas zonas se adjuntan en el **Anexo VIII**.

6.5.2 Cuantificación indirecta del recurso eólico a partir de información recopilada por estaciones meteorológicas cercanas y bases de datos

Para la correlación de datos de las estaciones meteorológicas y estudios existentes en la región con los de los emplazamientos objeto de estudio, se procede al análisis de los datos meteorológicos de las estaciones localizadas en el Centro Universitario de Occidente (CUNOC), coordenadas polares 14°50'42.40"N 91°32'06-31"O. Además se emplea el estudio “Medición de la velocidad del viento en el área de la zona tres de la ciudad de Quetzaltenango”. Autor: Romeo Vinicio Lorenzo Cupil, donde se tomaron medidas desde tres puntos distintos de la ciudad. El Instituto Tecnológico Privado de Occidente (ITPO), coordenadas polares 14°51'17.21"N 91°32'28.60"O; la Escuela Nacional de Ciencias Comerciales (ENCO), coordenadas polares 14°50'42.35"N 91°30'52.82"O; y la Quinta Compañía de Bomberos Voluntarios de Quetzaltenango, coordenadas polares 14°50'27.53"N 91°31'02.20"O.

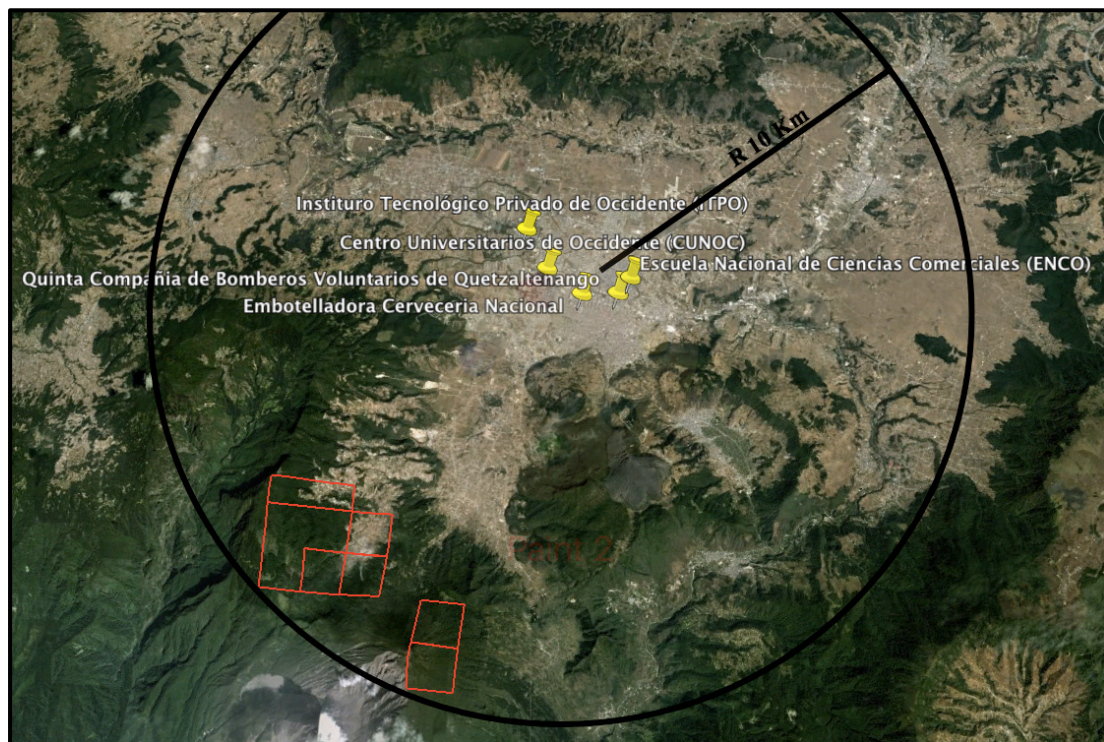


Figura 6.8: Distancia estaciones meteorológicas a emplazamientos de estudio.

Fuente: Google Earth Pro. Adaptación propia.

Se puede comprobar que de acuerdo a los criterios aplicables para la interpolación de datos a zonas cercanas, cumplen ambas con los requisitos de proximidad (entre 30-120 km), pues se encuentran a menos de 10 km de los emplazamientos de estudio. Sin embargo, se observan grandes diferencias en las condiciones del terreno de las zonas donde se localizan las estaciones meteorológicas con respecto a los emplazamientos de estudio. Esto, unido a que después del análisis de los datos de la estación meteorológica de la universidad se comprobó la falta de registros en ciertas franjas horarias, se concluye que no será adecuado hacer uso de estas fuentes como base de datos para la interpolación.

Los datos citados pueden aportar información tal como las direcciones predominantes de los vientos, las cuales tiene componente norte mayoritariamente (N,NNE,NE). Además podrían ser empleados para realizar una comparación con ciertos datos que se tomen en el futuro en el emplazamiento de estudio, pero no se puede extraer una interpolación fiable que aporte una visión general del potencial en los emplazamientos objeto de estudio antes de las mediciones, ni es aconsejable la utilización de ellos como base de datos de referencia.

6.5.3 Cuantificación cualitativa del recurso mediante la observación del área.

Se procede a la cuantificación del recurso eólico mediante la observación de los fenómenos producidos por el viento, clasificando las siguientes imágenes tomadas en la zona de acuerdo al índice de deformidad de Griggs-Putnam:



Imagen 6.1: Índice III: Flagging Leve



Imagen 6.2 :Índice III: Flagging Moderado



Imagen 6.3: Índice III: Flagging Moderado



Imagen 6.4: Índice IV: Flagging Completo

Se observa que en la zona de estudio el “flagging” es catalogado entre leve y completo, esto es una velocidad del viento de entre 4 a 7 m/s en la superficie.

6.6 Factores que favorecen el aprovechamiento del recurso eólico

Se analizan a continuación aquellos factores relacionados con las características del viento y la fisionomía del terreno que contribuyen a un mejor aprovechamiento del potencial eólico en los emplazamientos.

6.6.1 Características del viento adecuadas

Las zonas seleccionadas cuentan con un potencial catalogado de acuerdo al mapa eólico SWERA y a la tablas de viento como “Moderado” o superior, esto es con un potencial de 300 W/m² a 50 m o superior y teóricamente presentan una velocidad media de viento elevada.

Los datos tomados en emplazamiento determinarán si las variaciones diurnas y estacionales son aceptables, así como si sus niveles de vientos extremos son adecuados para la instalación de las máquinas generadoras.

6.6.2 Orografía y vegetación

Se analizan las características orográficas y el tipo de vegetación de los emplazamientos para determinar si estos factores favorecen o perjudican el aprovechamiento del recurso eólico.

De acuerdo a un primer análisis mediante el mapa de relieve adjuntado en el **Anexo VII**, se puede comprobar que la zona 1 se encuentra en una región del cono volcánico del Volcán Santa María, mientras que la zona 2 se encuentra en regiones onduladas e inclinadas.

Se procede a un análisis más exhaustivo de las zonas mediante las imágenes obtenidas del programa Google Earth Pro.

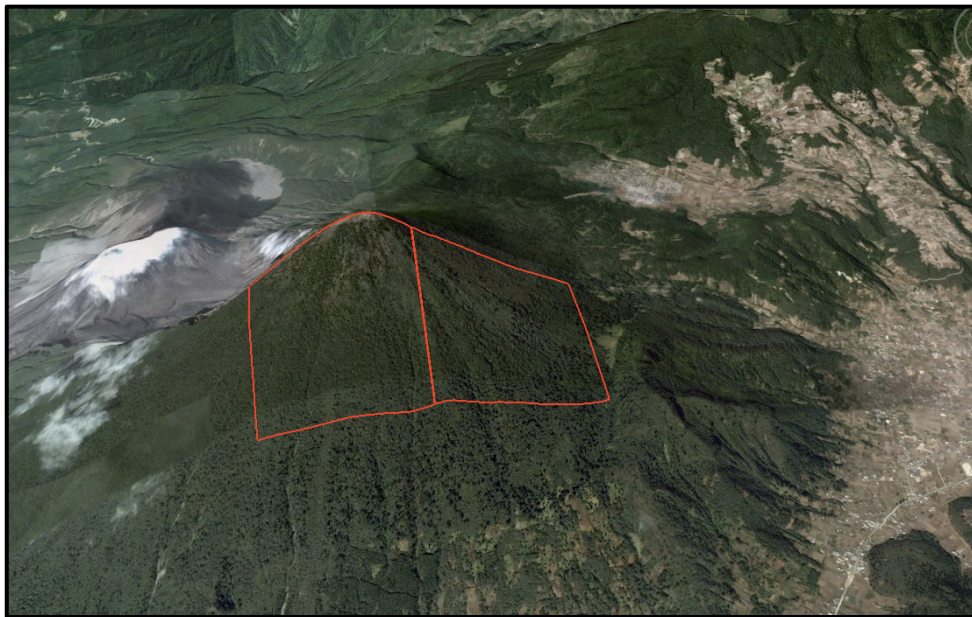


Figura 6.9: Orografía zona 1. Fuente: Google Earth Pro. Adaptación propia.

Como se puede observar en la **figura 6.9**, la zona 1 se localiza en la cara Noreste del Volcán Santa María, zona que favorece el recurso eólico al tratarse de un área montañosa de fuertes vientos y de alta exposición al flujo de aire.



Figura 6.10: Orografía zona 1. *Fuente: Google Earth Pro. Adaptación propia.*

La zona 2, como se observa en la **figura 6.10**, se encuentra situada en la falda sureste del cerro Siete Orejas y la falda Noroeste del volcán Santa María. Se puede catalogar éste como paso entre montañas con una alta exposición a flujo de aire procedente de la costa del pacífico.

Ambas zonas objeto de estudio están catalogadas como “Bosques montañosos de Centro América”, característicos de la mayor parte del altiplano. Estos son representativos de las vegetación neártica, donde abundan las coníferas. Las especies que se pueden encontrar son pinares, robledales, bosque de pajón y escobillo y en las partes más altas las praderas subalpinas, abundan las gramíneas. Es posible encontrar en ambos emplazamientos zonas con vegetación de poca altura que no alteran de forma significativa el flujo de aire.

6.6.3 Pendiente y orientación

Se estudia la pendiente y orientación de las regiones de mayor potencial dentro de cada una de las zonas objeto de estudio.

De acuerdo a un primer análisis mediante el mapa de pendiente adjuntado en el **Anexo VII**, se puede comprobar que la zona 1 se encuentra en una región con pendiente mayor al 50%, mientras que la zona 2 se encuentra en regiones con un rango de pendientes que van de menos del 5% al 30% dependiendo de la situación exacta.

Se procede a un análisis más exhaustivo de las zonas mediante la herramienta de cálculo de nivel de Google Earth Pro.

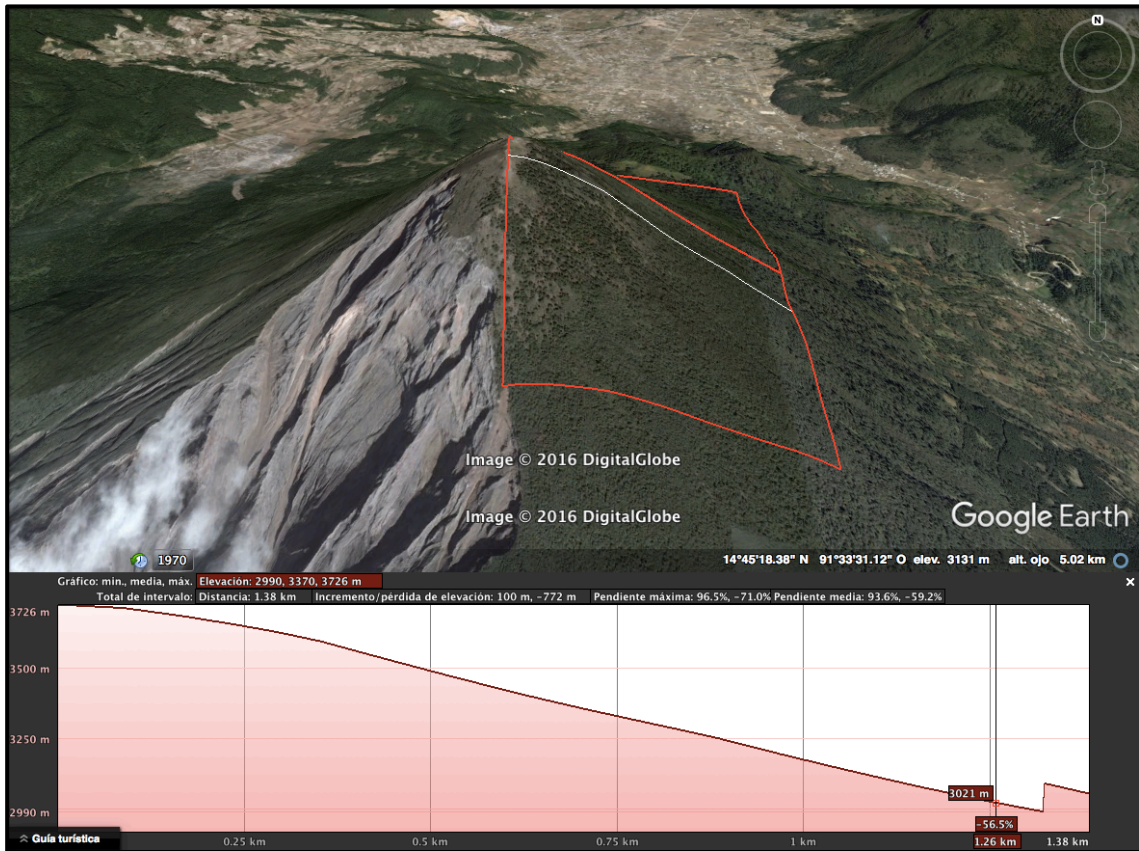


Figura 6.11: Perfil de elevación zona 1. *Fuente: Google Earth Pro. Adaptación propia.*

De acuerdo a la **figura 6.11** en la zona 1, la región con mayor potencial presenta una pendiente media del 93.6%. Esto supone una inclinación muy elevada que puede dificultar la instalación de las máquinas generadoras, incrementando los trabajos técnicos y los costes de la instalación. En cuanto a la orientación es óptima para el aprovechamiento de los viento predominante procedente éste de la costa, el cual tiene dirección norte.

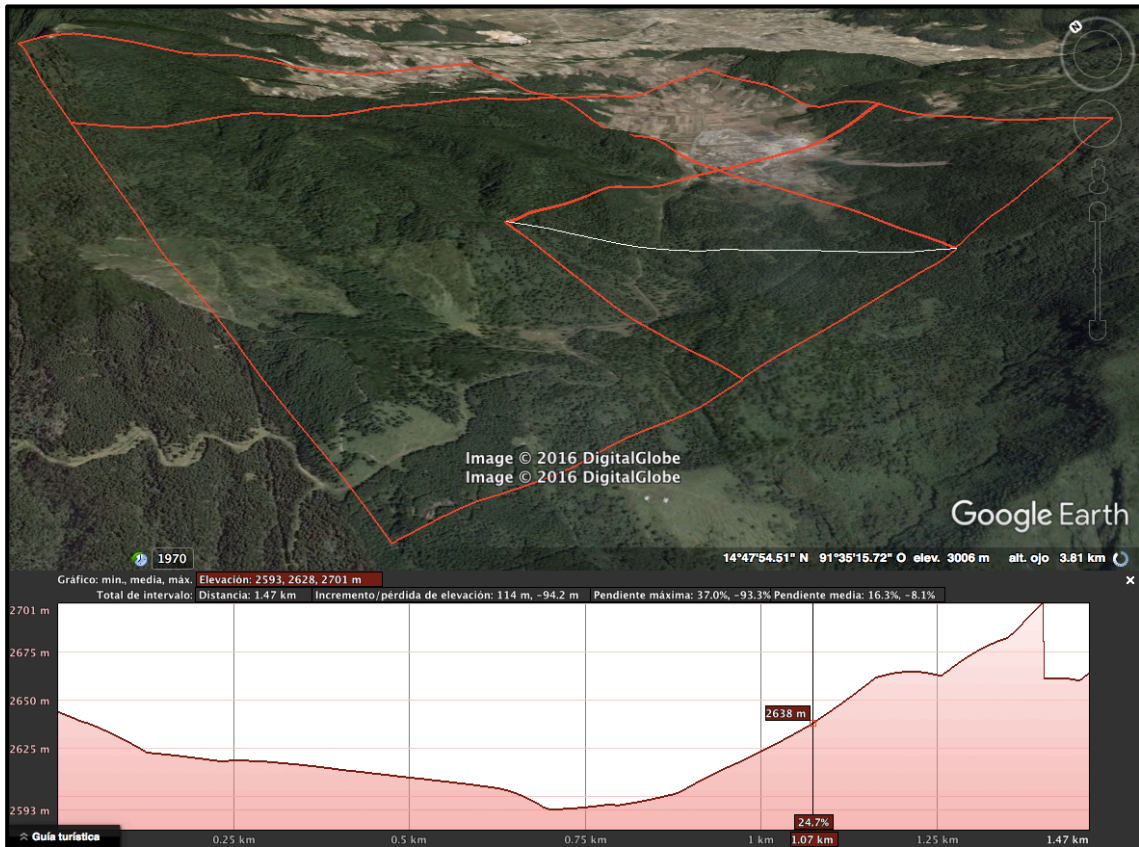


Figura 6.12: Perfil de elevación zona 2. Fuente: Googel Earth Pro. Adaptación propia.

De acuerdo con la **figura 6.12**, la región con mayor potencial dentro de la zona 2 presenta una pendiente media del 16.3%. Se puede comprobar en el perfil topográfico que hay regiones en las que la inclinación es pequeña lo que favorece la instalación y el desarrollo de proyectos de este tipo. En lo que respecta a la orientación, el valle formado entre los dos volcanes presenta una orientación Noreste, adecuada para el aprovechamiento de los vientos que entran del Pacífico con la misma dirección.

6.7 Criterios para la selección de zonas para el estudio cuantitativo del recurso eólico

Con el objetivo de disminuir la inversión de tiempo y capital que conllevan los estudios cuantitativos, se comprueba que los emplazamientos permiten el desarrollo de este tipo de actividades y se prioriza en aquellos que con características para el aprovechamiento del recurso eólico similar, las características de su localización favorecen la instalación de un parque eólico.

6.7.1 Exclusión zonas protegidas y uso de suelos

Se procede a determinar cual es el tipo de actividad permitida en los emplazamientos objeto de estudio, con ello se pretende excluir las zonas que pertenecientes a áreas protegidas o con una categoría legal que no permite el desarrollo de la actividad que se pretende.

6.7.1.1 Zonas protegidas y espacios naturales

El departamento de Quetzaltenango cuenta con 5.755 hectáreas de zonas protegidas, las cuales tienen la categoría de Parque Regional según la resolución CONAP 22-98, bajo la administración de la municipalidad de Quetzaltenango a través de su Departamento de Áreas Protegidas (DAP). Representadas estas en el mapa de uso adecuado de suelos en el **Anexo VII**.

Dentro del municipio de Quetzaltenango se encuentran las áreas de los volcanes Siete Orejas, Santa María y Santiaguito y la de los cerros Candelaria y Volcán Cerro Quemado. Las coordenadas que determinan los espacios protegidos se encuentran en el **Anexo IX**.

6.7.1.2 Zonificación y uso de suelos

De acuerdo al Plan Maestro llevado a cabo en el 2001 por el DAP y con el apoyo de CONAP, el PRMQ y adjuntado en el **Anexo X**. Las zonas objeto de estudio se encuentran dentro del Parque Regional Municipal de Quetzaltenango (PRMQ).

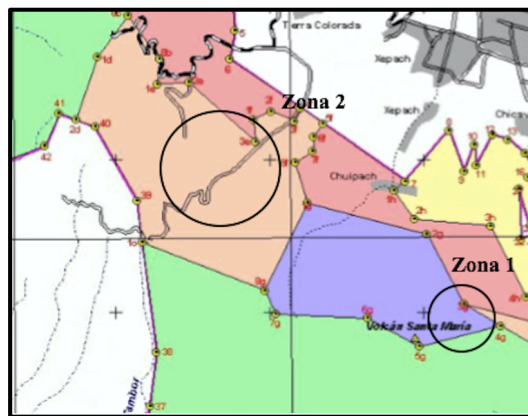


Figura 6.13: Zonificación zonas de estudio. Fuente: *Plan Maestro PRMQ (Probosques 2001)*. Adaptación propia

La zona 1, de acuerdo a la zonificación establecida se encuentra en una región catalogada como zona de uso público, establecidas estas para realizar actividades de Ecoturismo y/o educación ambiental.

La zona 2 se encuentra en una zona definida como zona de uso especial, áreas que están siendo operadas de manera especial y en las que se realizan actividades que mediante acuerdos suscritos con la Municipalidad se llevan a cabo por un periodo de tiempo determinado. En la actualidad, de acuerdo al mapa de uso actual del suelo presente en el **Anexo VII**, parte de esta zona esta siendo utilizada como vertedero municipal.

6.7.2 Proximidad a red eléctrica y red vial

Se procede a analizar la proximidad de los emplazamientos a la red eléctrica y la red vial, con ello se pretende introducir un criterio de optimización de capital para el desarrollo del proyecto de instalación del parque eólico posterior, ya que la construcción de una subestación y/o de infraestructura vial suele suponer un incremento sustancial en los costos de dichos proyectos.

6.7.2.1 Proximidad a red eléctrica

De acuerdo al mapas de la red eléctrica del municipio de Quetzaltenango y al mapa de obras de generación y transmisión, adjuntados en el **Anexo VII**, se puede determinar que la zona 1, se encuentra cerca de la subestación Santa María, la cual ha sido ampliada recientemente y cuyo voltaje es de 230 kV. Por otro lado, la zona 2, esta situada en una región en la que no existen ni subestaciones ni líneas de transmisión cercanas.

6.7.2.2 Proximidad a red vial

Mediante la observación de los mapa de red vial del municipio y departamento de Quetzaltenango, adjuntados en el **Anexo VII**, se puede determinar que la zona 1, aunque con cierta proximidad a la carretera nacional 9s que une Zunil-Almolonga-Quetzaltenango, se encuentra en una región de difícil acceso. Por otro lado, la zona 2, se encuentra atravesada por una carretera en la actualidad constituida por un pavimento de terracería, la cual se puede ver en la **imagen 6.5** y que está proyectada asfaltar.



Imagen 6.5: Carretera de terracería. *Fuente: Archivo propio.*

6.8 Selección de emplazamiento para el desarrollo del proyecto de medición

De acuerdo al análisis cualitativo del potencial eólico, se consideran que las zonas viables para la explotación del recurso dentro del municipio de Quetzaltenango son aquellas definidas como “zona 1” y “zona 2” dentro de este estudio.

De acuerdo al análisis de los factores que pueden favorecer el aprovechamiento de este recurso, se comprueba que ambas zonas tienen un potencial eólico catalogado como “Moderado” o superior, es decir, el recurso es adecuado para su explotación. En cuanto a la orografía, ambas favorece el aprovechamiento del recurso además de disponer de regiones en las que la vegetación no tiene una influencia negativa para el aprovechamiento. Por otro lado, en el análisis de la pendiente y orientación, aunque ambas zonas tienen una orientación adecuada para el aprovechamiento de las corrientes de aire predominantes; mientras que la zona 2 la inclinación es adecuada para la instalación de los aerogeneradores, la zona 1 cuenta con una pendiente demasiado pronunciada, lo que conllevaría mayores trabajos técnicos y mayor capital para la instalación de la maquinaria.

Si se estudia la catalogación del uso de suelos en los que se encuentran ambos emplazamientos, de acuerdo al Plan Maestro llevado a cabo en el 2001 por el DAP y

con el apoyo de CONAP. La zona 1, se encuentra en una región definida como zona de uso público, establecidas estas para realizar actividades de Ecoturismo y/o educación ambiental, por lo que no estaría permitido el desarrollo de la actividad de generación eléctrica. Sin embargo, la zona 2 se encuentra en una zona definida como zona de uso especial, áreas que están siendo operadas de manera especial y en las que se realizan actividades que mediante acuerdos suscritos con la Municipalidad se llevan a cabo por un periodo de tiempo determinado, por lo que en esta sí se podría llevar a cabo este tipo de proyectos.

Analizando la proximidad de las zonas a la red eléctrica y vial, se puede extraer que la zona 1 cuenta con la proximidad de la subestación Santa María pero no con un acceso vial adecuado. Por otro lado, la zona 2 no cuenta con un acceso a la red eléctrica próximo, pero sí con un acceso vial que puede cumplir con las características necesarias para el desarrollo del proyecto de construcción de la instalación.

Queda por lo tanto definida la zona 2, de acuerdo a los criterios aplicados anteriormente, como el emplazamiento más adecuado para el desarrollo del estudio cuantitativo mediante la instalación de una estación meteorológica cuya localización se adjunta en el **Anexo XII**. A partir de los datos registrados por dicha estación, se comprobará si en lo referente al recurso eólico, dicho zona seleccionada es viable para la instalación de un parque eólico.

6.9 Propuesta de equipos de medición de recurso eólico

Para el emplazamiento seleccionado se propone la instalación de un sistema de medición **34m XHD NOW System** proporcionado por la empresa Renewable NRG Systems con los siguientes dispositivos:

Componente	Modelo	Altura de instalación (m)
Torre con tensores y anclas	34m TallTower Kit	–
Datalogger	SymphoniePRO + caja protectora	–
Anemometro x 3	NRG // 40C	10, 20 Y 30
Veleta	NRG // 200P	30
Sensor de temperatura	NRG// 110S	5
IPackGPS	Symphonie	–
Sensor de radiación	Symphonie PV panet 15W	5

Tabla 6.1: Componentes torre de medición. *Elaboración propia.*

El desglose total de los elementos que componen el la instalación y el kit de montaje, así como el presupuesto y la descripción técnica de estos, se adjuntan en el **Anexo XII**.

6.10 Metodología empleada para el caso solar

La metodología seguida, basada en la implementada en este documento, para la selección de las zonas con viabilidad ha sido la siguiente:

- I. Análisis de la radiación mediante el mapa de recurso solar generado por el NREL para el país de Guatemala como parte del proyecto SWERA y la información meteorológica disponible en las bases de datos de la NASA.
- II. Consideración de factores que favorecen el aprovechamiento del recurso solar para determinar los emplazamientos más interesantes
 - Ubicación en regiones con irradiancia elevada dentro del departamento de Quetzaltenango y velocidad del viento adecuada.
 - Estudio orográfico y de vegetación para identificar emplazamientos con características que contribuyen a mejorar los recursos solar.
 - Pendiente y orientación de los emplazamientos.
- III. Aplicación de criterios para la selección de zonas para el estudio cuantitativo del recurso eólico:
 - Identificación de terrenos propiedad de la municipalidad.
 - Exclusión de áreas protegidas y uso de suelos.
 - Proximidad a red vial y red de eléctrica.
- IV. Con apoyo de personal de la Universidad San Carlos de Guatemala, se visita la localización considerada candidata para el estudio de viabilidad en campo.
- V. Después de aplicar los criterios anteriores se procede a la selección de las zonas consideradas más viables para el aprovechamiento solar.
- VI. Debido a la ausencia de una base de datos de mediciones de radiación, no se puede proceder al análisis cuantitativo, por lo que se propone la instalación de una estación de medición en la zona para poder continuar con el análisis del emplazamiento.

6.11 Localización de zonas de alta abundancia de recurso solar

En este apartado, se determinan y analizan los emplazamiento con posible potencial solar mediante un análisis cualitativo del recurso a través del uso de mapas de recurso solar, tablas de clases de irradiancia y la información recopilada en las bases de datos. Con ello se acotan las zonas con posible potencial solar.

6.11.1 Uso de mapas y tablas de radiación

Mediante el mapa interactivo generado por el proyecto SWERA para el país de Guatemala, se procede a la determinación de las zonas con mayor potencial solar dentro del municipio de Quetzaltenango.

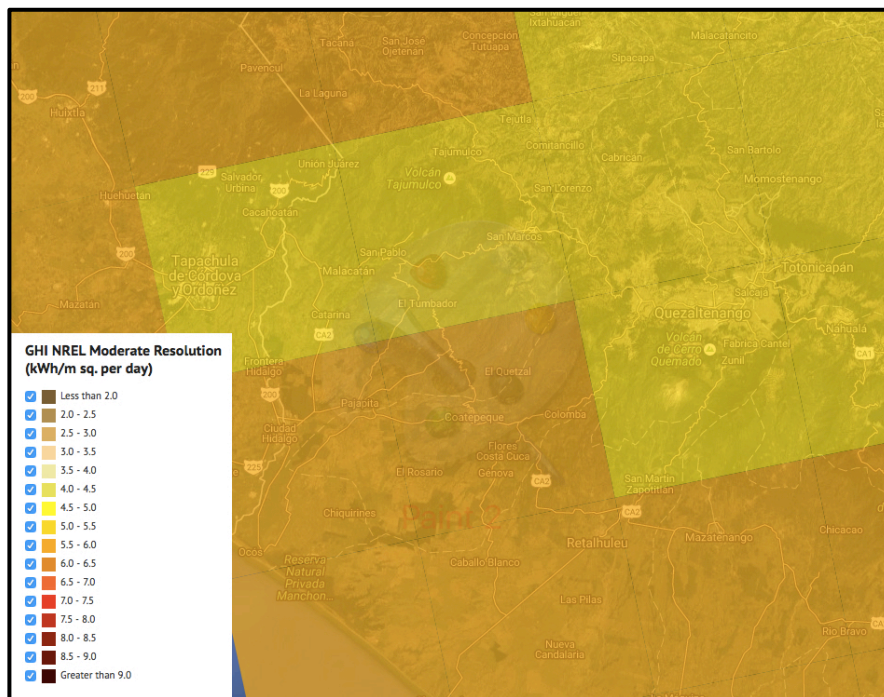


Figura 6.14: Mapa potencial solar. *Fuente: SWERA. Adaptación propia.*

Se determinan de acuerdo a la **figura 6.14**, que toda la región solar en la que se encuentra el municipio tiene una radiación horizontal media de entre 5.0 y 6.0 kWh/m²/día. Radiación considerada adecuada para la producción fotovoltaica.

Debido a que Guatemala se encuentra en el cinturón solar (latitudes 30 grados norte y sur), es de esperar un elevado recurso, sin embargo el recurso en Quetzaltenango no es tan elevado como lo esperado, debido en gran parte por la nubosidad del clima. En cualquier caso, aunque el recurso sea menor de lo que se podría esperar por su ubicación geográfica, éste es amplio y relativamente estable a lo largo del año.

6.11.2 Cuantificación indirecta del recurso solar a partir de información recopilada por estaciones meteorológicas cercanas y bases de datos.

Se pretende estimar el potencial fotovoltaico para el caso óptimo, esto es con orientación sur, inclinación óptima y considerando únicamente pérdidas por inclinación y orientación, en un emplazamiento genérico del municipio de Quetzaltenango

(coordenadas 14°50'40" latitud norte y 91°30'05" longitud oeste), de acuerdo al Código Técnico de Edificación (España).

Cálculo de la irradiación anual

Partiendo de los datos aportados por la NASA y empleados como base de datos del programa RETScreen, se calcula a partir del dato de radiación solar horizontal media diaria (r.s.h.m.d), la radiación solar horizontal media anual (r.s.h.m.a).

$$r.s.h.m.a = r.s.h.m.d \times 365 \text{ días}$$

$$r.s.h.m.a = 5.37 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ día}} \times 365 \text{ días} = 1960.05 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$$

A partir de este dato, se calcula la irradiancia global anual sobre una superficie con inclinación óptima y orientación sur.

Siendo la inclinación óptima (β) para cierta latitud (Φ):

$$\beta = 3.7 + 0.69 \Phi$$

$$\beta = 3.7 + 0.69 \times 14.5040 = 13.70776^\circ$$

$$G_a(\beta) = \frac{G_a(0^\circ)}{1 - 4.46 \cdot 10^{-4} \beta - 1.19 \cdot 10^{-4} \beta^2}$$

$$G_a(13.70776^\circ) = \frac{1960.05 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}}{1 - 4.46 \cdot 10^{-4} \cdot 13.70776 - 1.19 \cdot 10^{-4} \cdot 13.70776^2} = 2017.4964$$

Donde:

$G_a(\beta)$ = valor medio de la irradiación global anual sobre una superficie con inclinación β (kWh/m²).

$G_a(0^\circ)$ = valor medio de la irradiación global anual sobre una superficie horizontal (kWh/m²).

β = inclinación de la superficie

Cálculo de las pérdidas por orientación e inclinación

Considerando la orientación sur, esto es ángulo de azimut $\alpha = 0^\circ$ e inclinación óptima $\beta = 13.70776^\circ$ para la latitud $\phi = 14.5040^\circ$, así como las pérdidas máximas de acuerdo al caso de estudio, esto es 10% orientación e inclinación, se calcularán los límites de inclinación en el caso de $\phi = 41^\circ$ mediante la **figura 6.15**.

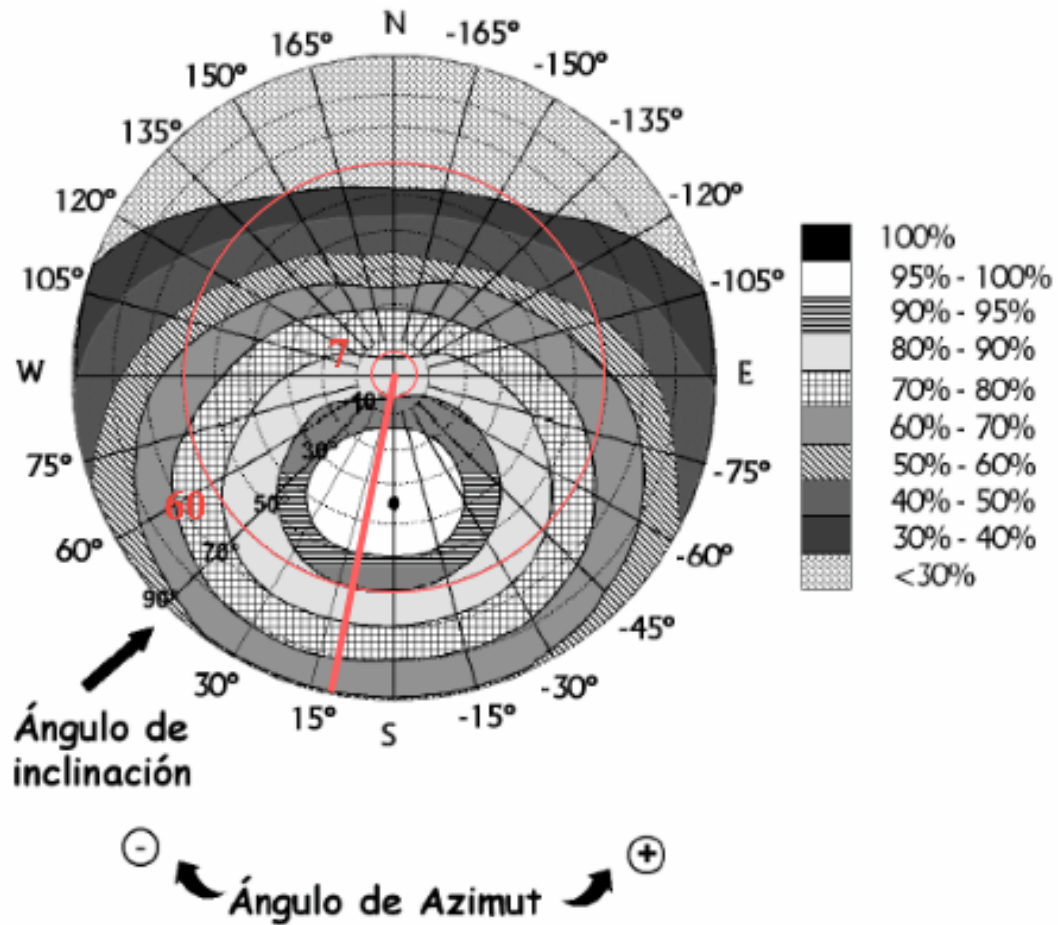


Figura 6.15: Gráfica cálculo de inclinación máxima y mínima. Fuente: : Código Técnico de la Edificación. Adaptación propia.

Los puntos de intersección del límite de pérdidas con la recta de azimut determina los valores de inclinación máxima y mínima siendo estos aproximadamente 60° y 7° respectivamente.

Los valores obtenidos son para la latitud $\phi = 41^\circ$, que deben corregirse para la latitud objeto de estudio de la siguiente forma:

$$\text{Inclinación máxima} = \text{Inclinación } (\phi = 41^\circ) - (41^\circ - \text{latitud})$$

$$\text{Inclinación máxima} = 60^\circ - (41^\circ - 14.5040^\circ) = 33.504^\circ$$

$$\text{Inclinación mínima} = \text{Inclinación } (\phi = 41^\circ) - (41^\circ - \text{latitud})$$

(siendo 0° el valor mínimo)

$$\text{Inclinación mínima} = 7^\circ - (41^\circ - 14.5040^\circ) = -19.496^\circ < 0^\circ ;$$

$$\text{Inclinación mínima} = 0^\circ$$

Como instrumento de validación, se emplearán las siguientes fórmula:

$$\text{Pérdidas (\%)} = 100 [1.2 \cdot 10^{-4} (\beta - \phi + 10)^2]$$

$$\text{Para } 15^\circ \leq \beta$$

$$\text{Pérdidas (\%)} = 100 [1.2 \cdot 10^{-4} (13.70776 - 14.5040 + 10)^2] = \mathbf{1.0165\%}$$

Como era de esperar, para el punto óptimo las pérdidas por orientación e inclinación serán muy reducidas.

Considerando el mejor de los escenarios para el cálculo de potencial solar, se puede concluir con que el valor medio de la irradiación global anual sobre una superficie con inclinación y orientación óptima y sin pérdidas por sombra, para un emplazamiento en Quetzaltenango, será de aproximadamente:

$$G_{opt} = G_a (\beta) - \text{Pérdidas (\%)}$$

$$G_{opt} = 2017.4964 - (0.010165 \times 2017.4964) = \mathbf{1996.9885 \frac{kW h}{m^2}}$$

Donde:

G_{opt} = valor medio de la irradiación global anual sobre una superficie con inclinación y orientación óptima (kW h/m²).

$G_a (\beta)$ = valor medio de la irradiación global anual sobre una superficie con inclinación β (kW h/m²).

6.12 Criterios para la selección de zonas para el estudio cuantitativo del recurso solar

Con el objetivo de disminuir la inversión de tiempo y capital que conllevan los estudios cuantitativos y minimizar los costos de la construcción de la instalación, se comprueba la disponibilidad de emplazamientos propiedad de la municipalidad que permiten el desarrollo de este tipo de actividades, y se prioriza en aquellos que con características para el aprovechamiento del recurso solar similar, las características de su localización favorecen la instalación de una planta fotovoltaica.

6.12.1 Terrenos propiedad de la municipalidad

Para disminuir el coste del estudio y considerando que las características de la radiación se mantienen constantes dentro de un radio considerable, se procede a la evaluación de terrenos o propiedades de la municipalidad o instituciones gubernamentales que puedan albergar la estación meteorológica.

De acuerdo al análisis de estos, se llega a la conclusión de que dos localizaciones podrían ser viables para albergar la estación de monitoreo. La azotea del edificio de la División de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala,

localizada en la calle Rodolfo Robles 29-99 Zona 1 Quetzaltenango, Guatemala. Y la estación Ovalle, situada en el kilómetro 13.5 de la carretera a Olinstepeque, en la finca Labor Ovalle, apartado nº7, Quetzaltenango., propiedad de INSIVUMEH.

6.12.2 Exclusión zonas protegidas y uso de suelos

En ambos emplazamientos se cuentan ya con estaciones para el registro de ciertas variables meteorológicas por lo que a priori son localizaciones favorables para el estudio de éstas. No se encuentran por lo tanto en zonas protegidas ni en suelos que no permitan dicha actividad.

6.13 Factores que favorecen el aprovechamiento del recurso solar

Se analizan a continuación aquellos factores relacionados con las características de irradiancia y la fisonomía del terreno contribuyen a un mejor aprovechamiento del potencial solar en los emplazamientos.

6.13.1 Características de radiación y viento adecuadas

Las zonas seleccionadas cuentan con un potencial solar de 5.0 y 5.5 kWh/m²/día, radiación catalogada como apta para la producción fotovoltaica.

De acuerdo al mapa eólico SWERA, la mayor parte del territorio del municipio de Quetzaltenango, presentan una velocidad media de viento catalogada como “Pobre”, entre 0 y 5,1 m/s a 30 m de altura, por lo que las velocidades que se dan pueden considerarse adecuadas para el desarrollo de la actividad.

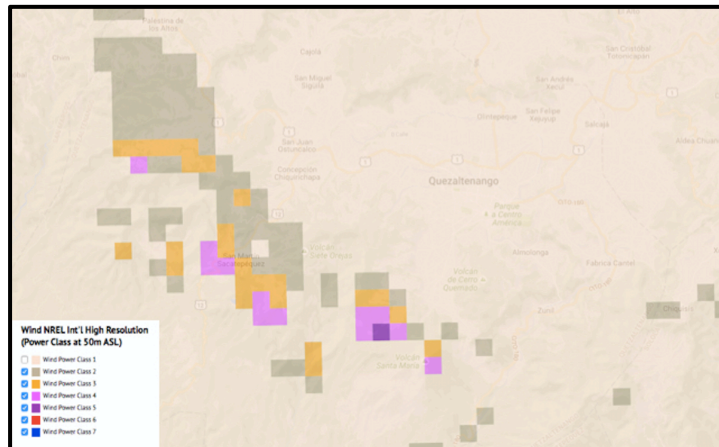


Figura 6.16: Velocidades del viento en el municipio de Quetzaltenango. *Fuente: SWERA. Adaptación propia.*

Los datos tomados en emplazamiento determinarán si las variaciones de radiación provocadas por la nubosidad de la zona y las variaciones de temperatura estacionales son aceptables, así como si sus niveles de vientos extremos son adecuados para la instalación de los paneles fotovoltaicos.

6.13.2 Orografía y vegetación

Se analizan las características orográficas y el tipo de vegetación de los emplazamientos para determinar si estos factores favorecen o perjudican el aprovechamiento del recurso solar.

En ambos casos se trata de localizaciones en las que se dispone de una plataforma cimentada, sin ningún accidente orográfico o edificación cercana que pueda generar sombras o que pueda interferir en las mediciones. En cuanto a la vegetación, en el caso del Edificio de la División de Ingeniería no hay ningún tipo de vegetación en ella misma o próxima a ella que sea relevante. Por otro lado, cercanos a la estación Labor Ovalle hay plantados algunos árboles, pero que no afectarían en cualquier caso a las mediciones.

6.13.3 Pendiente y orientación

En ambos casos las localizaciones presentan cimentaciones sobre terrenos planos con una inclinación menor del 5%, pudiéndose orientar los detectores necesarios en cualquiera de las direcciones.

6.14 Selección de emplazamiento para el desarrollo del proyecto de medición

De acuerdo al análisis cualitativo del potencial solar, se consideran que todo el municipio de Quetzaltenango cuenta con condiciones viables para la explotación del recurso solar, siendo además las características de la radiación similares en todo el territorio que éste.

De acuerdo al análisis de los factores que pueden favorecer el aprovechamiento de este recurso, se comprueba que toda la región solar en la que se encuentra el municipio tiene una radiación horizontal media de entre 5.0 y 6.0 kWh/m²/día. Radiación considerada adecuada para la producción fotovoltaica.

En cuanto a la orografía y vegetación, ambas localizaciones son adecuadas para un estudio correcto del recurso. De la misma forma, en el análisis de la pendiente y orientación, ambos lugares satisfacen los requisitos para un estudio adecuado.

Siendo que en ambas localizaciones ya son destinadas al monitoreo de variables meteorológicas no se encuentra ningún conflicto entre la catalogación del uso de suelos y la instalación de una nueva estación de medición.

Se puede concluir que de acuerdo a los criterios establecidos, ambas localizaciones pueden de igual forma considerarse adecuadas para el desarrollo del estudio.

Se propone en este caso la instalación de la estación de medición en la azotea de la División de Ciencias de la Ingeniería, cuya ubicación se adjunta en el **Anexo XII**, atendiendo a un criterio de proximidad al núcleo urbano. La cercanía de los datos que se registren a las localizaciones en las que a posteriori se desarrollen proyectos de este tipo dentro de dicho núcleo urbano favorece la exactitud de los estudios de factibilidad. Por otro lado, la División de Ciencias de la Ingeniería es uno de los agentes principales en el desarrollo de éste tipo de proyectos en la región por lo que la presencia de la estación de medición en sus instalaciones puede agilizar la

accesibilidad a los datos por parte del personal, así como asegurar el mantenimiento y administración de la instalación reduciendo con ellos costes y asegurando el correcto funcionamiento.

6.15 Propuesta de equipos de medición de recurso solar

Para el emplazamiento seleccionado se propone la instalación de un sistema de medición **SRA System** proporcionado por la empresa Renewable NRG Systems con los siguientes dispositivos:

Componente	Modelo
Torre	2.2m Tower Kit
Datalogger	SymphoniePRO + caja protectora
Piranómetro x 2	LP02 Hukseflux
Anemómetro	–
Veleta	–
Pluviómetro	–
Sensor de humedad relativa	–
Sensor de temperatura	–
Sensor presión barométrica	–
IPackGPS	Symphonie
Sensor de radiación	Symphonie PV panet 15W

Tabla 6.2: Componentes torre de medición. *Elaboración propia*

El desglose total de los elementos que componen el la instalación y el kit de montaje, así como el presupuesto y la descripción técnica de estos, se adjuntan en los **Anexo XI**.

7 PRESUPUESTO

7.1 Consideraciones previas

Se desarrolla a continuación el presupuesto del estudio. El periodo de dicho estudio, considerando la documentación previa, el estudio de la zona, el tratamiento y análisis de datos, y la obtención de conclusiones, es de, aproximadamente 5 meses.

7.2 Costes de Recursos humanos

Los recursos humanos necesarios para el desarrollo del estudio, son un ingeniero junior y un docente investigador con conocimiento en la materia y en la zona donde este se desarrolla.

El ingeniero junior se encarga del desarrollo del estudio, análisis de los resultado y preparación de la memoria.

El docente investigador se encarga de la revisión del trabajo realizado por el ingeniero junior, de aportar documentación y de la logística para el estudio de campo.

En la siguiente tabla se presentan los costes totales de recursos humanos:

Persona	Tiempo empleado	Coste unitario	Coste total
Ingeniero junior	470h	21€/h	9870€
Docente ingeniero investigador	30h	65€/h	1950€
TOTAL			11.820€

Tabla 7.1: Costes de recursos humanos en el estudio.

7.3 Amortización de equipos informáticos

Los equipos informáticos utilizados son dos, los empleados por el ingeniero junior y el docente investigador. Además de el uso ocasional de una impresora.

En la siguiente tabla se muestran los coste de amortización de los equipos informáticos:

Concepto	Precio	Periodo de amortización	Periodo amortizado	Coste de amortización
Macbook Air 13' (ingeniero junior)	890€	5 años	5 meses	73€
Acer Aspire TC- 280 (docente investigador)	499€	4 años	1 mes	10,25€
TOTAL				83,25€

Tabla 7.2: Amortización de equipos informáticos.

7.4 Amortización de vehículos y costes de desplazamientos internos

Se hizo uso de un vehículo para los desplazamientos a las zonas de estudio y determinadas instituciones para la recopilación de información.

En la siguiente tabla se muestran los costes de desplazamiento y la amortización del vehículo utilizado:

Concepto	Precio	Km de amortización	Km amortizados	Coste de amortización
Toyota 4runner	6.120€	120.000 km	442 km	22,55€
Concepto	Km amortizados	Coste del combustible	Consumo del vehículo	Coste
Combustible	442 km	0,75 €/l	12,4 l/100km	41,10€
TOTAL				63,65€

Tabla 7.3: Amortización de vehículos y costes de desplazamientos internos.

7.5 Costes generales

En este apartado se consideran los costes generales de desplazamientos, alojamiento, manutención conexión a internet, material de oficina y luz.

En la siguiente tabla se presentan los costes generales:

Concepto	Cantidad	Coste unitario	Coste total
Vuelos ES-GUA//GUA-ES	1	596€	596€
Bus Guatemala-Quetzaltenango	2	7,5€	15€
Alojamiento	5 meses	290 €/mes	1.450€
Manutención	5 meses	150 €/mes	750€
Conexión internet+ luz	5 meses	12 €/mes	70€
TOTAL			2.881€

Tabla 7.4: Costes generales.

7.6 Resumen del presupuesto

Una vez vistos los cuatro apartados anteriores, se presenta el presupuesto total del estudio.

Concepto	Importe
Costes de recursos humanos	11.820€
Amortización de equipos informáticos	83,25€
Amortización de vehículos y costes de desplazamientos internos	63,65€
Costes generales	2.881€
Presupuesto Ejecución material	14.847,9€
Beneficio industrial (5%)	742,4€
Presupuesto industrial	15.590.3€
IVA (21%)	3.273,96€
Presupuesto por contrato	18.864,26€

El presupuesto de ejecución por contrato asciende a DIECIOCHO MIL OCHOCIENTOS SESENTA Y CUATRO EUROS Y VEINTISEIS CÉNTIMOS.

8 RECOMENDACIONES ADICIONALES

- Es de conocimiento popular que la región donde se sitúa el emplazamiento seleccionado para el estudio cuantitativo del recurso eólico fue una zona minada durante el conflicto bélico del país. Años atrás se ha producido algún accidente por la detonación de algún artefacto explosivo. Se recomienda por lo tanto, que antes del desarrollo del proyecto, se lleven a cabo por personal especializado exploraciones del terreno.
- A lo largo del desarrollo del estudio se mantuvieron reuniones con Steve Crowe, director de Ingenieros Sin Fronteras EE.UU de Guatemala, con el que se llegaron a acuerdos acerca de la posible donación de material de medición utilizado en instituciones norteamericanas. Para reducir los costos del proyecto de medición sería interesante hacer uso de este posible material donado.
- Para reducir el costos en material de medición del recurso eólico, en el caso de que no se dispongan de los recursos económicos necesarios. se propone la instalación de los dispositivos de medición en una torre de comunicaciones localizada próxima al emplazamiento objeto de estudio. Se adjunta de forma más detallada su localización en el **Anexo XIII**.
- Se propone para el estudio del recurso solar la ampliación de la estación de medición Labor Ovalle, propiedad del INSIVUMEH, situada en el km 13.5 de la carretera de Olinstepeque, Finca Labor Ovalle, apartado N°7, Quetzaltenango. Actualmente, dicha estación de monitoreo, registra datos de calidad de aire y velocidad y dirección del viento. Se propone el estudio y instalación del material necesario para incluir el monitoreo de la radiación solar.

9 CONCLUSIONES

En este trabajo se consigue constituir una metodología a nivel anteproyecto para la localización, selección y posterior comparación de emplazamientos para centrales de producción eléctrica mediante energía eólica y fotovoltaica. Implementada, en una primera fase, en el municipio de Quetzaltenango.

Respecto a las diferentes etapas de la metodología que se plantea, cabe destacar la similitud, en cuanto a los requerimientos económicos y logísticos que favorecen el desarrollo de los proyectos de generación con las tecnologías estudiadas. Esto simplifica el estudio en paralelo de ambos tipos de proyecto.

El desarrollo de proyectos de generación eléctrica con energías renovables en Quetzaltenango puede ser una solución viable a los problemas que se les plantean en los próximos años debido al aumento de la tarifa eléctrica. Es fundamental, por lo tanto, para el desarrollo de estas tecnologías en el municipio, la inversión en este ámbito, concretamente en estaciones de monitoreo y material para la medición pues suponen la base para posteriores estudios. Se convierte por lo tanto este trabajo también, en un documento que sirve de punto de partida para el desarrollo de proyectos posteriores.

10 BIBLIOGRAFÍA

- “Diagnóstico y análisis de las dinámicas territoriales”. Secretaria de Planificación y Programación de la Presidencia (SEGEPLAN); Programa de ordenamiento territorial de Quetzaltenango.
- M. Pazmiño, R. Hidalgo, P. Jácome; “Medición del Potencial Eólico para Construcción del Futuro Parque Eólico en el Campus Prosperina”. Revista Tecnológica ESPOL, Vol 20, n 1, 123-130 (octubre 2007).
- Joaquín Mur Amada; “Curso energía eólica”. Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza.
- José Simeón Cañas; “Determinación del potencial solar y eólico en El Salvador”. Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET/MARN).
- Hugo Arturo Pirique López; “Estudio de factibilidad de realización de un proyecto de energía eólica a realizarse en el instituto tecnológico universitario de Guatemala-sur. ITUGS de Palín, Escuintla”. Guatemala (2013).
- Jose Alfonso Avellaneda Cusarúa; “Estudio del potencial de generación eólica en la zona de Páramo de Chontales, municipios de Paipa y Sotaquirá. Departamento de Bocayá”. Universidad Libre de Colombia (2012).
- MEM, DEG; “SWERA Informe Nacional de Guatemala”. (2005)
- “Sistemas eólicos pequeños para generación de electricidad” (2007). Departamento de Energía EEUU. www.windpoweringamerica.gov.
- Andrés Fernández Roa; “Método para la localización óptima de centrales de energía renovable”. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. (2011).
- “Estadísticas Subsector Eléctrico”. Ministerio de Energías y Minas. Dirección General de Energía Eléctrica. (2016).
- “Mercado de energía eléctrica. Guía del inversionista”. Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE). (2015).
- “Política Energética 2013-2027”. Ministerio de Energías y Minas. (2012).

- “Segunda Comunicación Nacional Sobre Cambio Climático Guatemala”. Gobierno de Guatemala. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2015).
- Julián Cantos Serrano. “Configuración de instalaciones solares fotovoltaicas”. 1ª edición. (2016)
- Windpower wiki. Danish wind industry association. www.windpower.org.
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología y Hidrología. www.insivumeh.got.gt.
- “Sección H5. Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica”. Código Técnico de la Edificación. (España).

ANEXOS

Anexo I: Aspectos más importantes en los costos y rentabilidad de los proyectos de energía eólica y solar.

Estructura de costes de los proyectos:

El costo total de un proyecto se divide en una serie de elementos necesarios para el desarrollo de la actividad, los cuales pueden ser mitigados o incluso evitarse si se selecciona un emplazamiento adecuado.

Distribución de costes totales (%)	
Turbinas	74-82
Cimentaciones	1-6
Instalaciones eléctricas	1-9
Conexión a red	2-9
Consultoría	1-3
Terreno	1-3
Costes financieros	1-5
Construcción de acceso	1-5

Tabla 11.1.1 : Estructura de costes de un proyecto eólico de 1.5 MW. *Fuente: EWERA. Adaptación propia.*

De la estructura de costes de una instalación eólica, el único coste no evitable es el de las turbinas, el coste del resto de elementos puede ser eventualmente reducido.

Distribución de costes totales (%)	
Celdas	40-60
Cimentaciones	10-15
Instalaciones eléctricas	1-9
Conexión a red	20
Inversores	10-15
Materiales eléctricos y electrónicos	5-10
Costes financieros	1-5
Construcción de acceso	1-5

Tabla 11.1.2: Estructura de costes de un proyecto fotovoltaico. *Fuente: Relight. Adaptación propia.*

De forma similar al caso eólico, en un proyecto fotovoltaico el único coste no evitable es el de las celdas, el resto puede ser reducido gracias a las características del emplazamiento.

En conclusión, un lugar óptimo para el emplazamiento de este tipo de proyectos de acuerdo a los costes que conlleva, es aquel localizado cerca de un punto de conexión a red, con accesos ya construidos o próximo a ellos, cuyo terreno no sea de uso urbano, industrial o agrícola de tal forma que el coste de oportunidad sea mínimo, además de poseer una topografía adecuada evitando así la necesidad de construcción de cimentaciones y el montaje de estructuras.

Abundancia de recurso:

Es el aspecto más influyente en la rentabilidad del proyecto. En particular en el caso eólico ya que la potencia producida tiene una relación cúbica con la velocidad del viento, por lo tanto, la energía producida será muy sensible a las variaciones de ésta. En el caso fotovoltaico la relación entre radiación y potencia generada es lineal, pero sigue siendo el aspecto más determinante en la rentabilidad del proyecto.

Anexo II: Instrumentos para la medición del potencial eólico.

a) Anemómetro

Los tipos de sensores más empleados en la medición de la velocidad horizontal del viento son los anemómetros de copela y hélice.

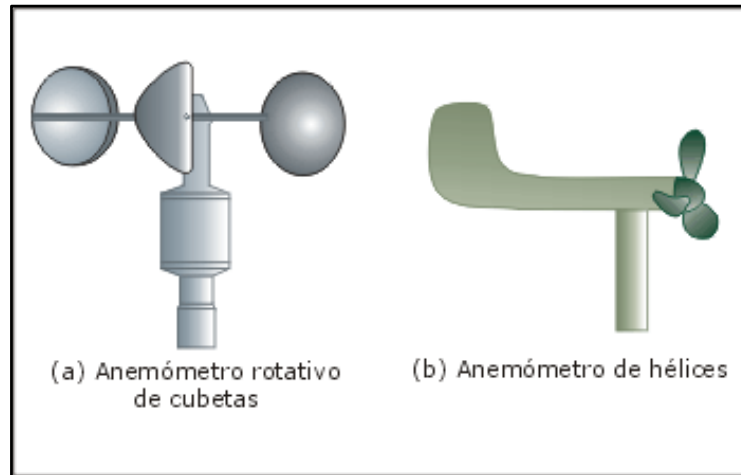


Figura 11.2.1: Tipos de anemómetros. *Fuente: BVSDE*

Anemómetro de copela: Este dispositivo está compuesto por un conjunto de tres copelas conectadas por su centro a un eje vertical de rotación. Gracias a este diseño, siempre al menos una de las copelas está enfrentada al viento. La forma aerodinámica de estas transforma la fuerza de presión del viento en momento de fuerza rotatorio. La rotación del dispositivo es prácticamente linealmente proporcional a la velocidad del viento sobre un rango determinado. Un transductor instalado dentro del anemómetro transforma este movimiento de rotación en una señal eléctrica que es enviada a un *datalogger*. El *datalogger* emplea entonces un “multiplicador” que, a través del constante movimiento de las copelas puede calcular la velocidad real del viento.

Anemómetro de hélice: Este instrumento consiste en una hélice instalada sobre un eje horizontal que es orientado con el viento por medio de una veleta. El anemómetro de hélice genera en este caso también una señal eléctrica proporcional a la velocidad del viento.

b) Veleta

La veleta es empleada para medir la dirección del viento. El tipo de veleta que se emplea habitualmente usa una aleta que se conecta a un eje vertical. La veleta constantemente busca una posición de equilibrio de fuerza con respecto al viento. La gran parte de las veletas de viento emplean un tipo de transductor potenciómetro cuya potencia de salida se corresponde con una señal eléctrica indicativa de la posición de la veleta. Esta señal es transmitida a un *datalogger*.

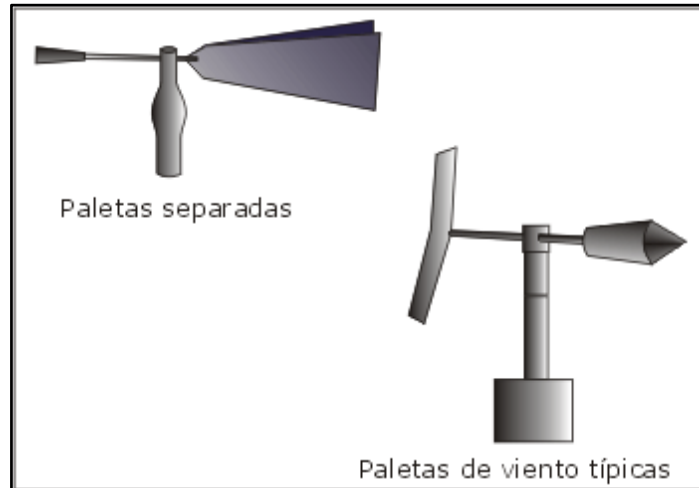


Figura 11.2.2: Tipo de veleta. *Fuente: BVSDE*

c) Termómetro

Generalmente los sensores de temperatura del aire ambiente están compuestos por tres partes: el transductor, un dispositivo de interfaz, y un escudo o casilla protectora contra la radiación. El transductor contiene un elemento material (habitualmente níquel o platino) con una relación conocida entre su resistencia y temperatura. Termistores, detectores térmicos de resistencia (RTDS), y semi-conductores son los elementos recomendados para su uso. El valor de resistencia del material es moderado por el *datalogger* (o un dispositivo de interfaz) que usa una relación conocida para el cálculo de la temperatura real del aire.

d) Barómetro

El barómetro es un dispositivo que mide la presión atmosférica. La mayoría de los dispositivos comerciales emplean un transductor piezoeléctrico que proporciona un rendimiento estándar a un *datalogger*. Estos dispositivos pueden requerir de una fuente de potencia externa para un correcto funcionamiento.

e) Datalogger

Cada *datalogger* electrónico tiene instalado un software interno que incluye una memoria interna de datos para guardar el incremento temporal de los datos. Los algoritmos internos usan dicha memoria para calcular y almacenar los parámetros de los datos deseados. Los valores de los datos que se graban se guardan en un dispositivo de almacenamiento. Dentro de los programas de los *datalogger* algunos lo tienen fijo, es decir no puede alterarse, mientras que otros son interactivos y pueden programarse para tareas específicas. Este programa, así como el almacenamiento de datos se guarda en una memoria volátil. Esto tiene como inconveniente que este tipo de memorias precisan de una fuente de potencia continua para retener los datos. Existen *dataloggers* que incorporan el uso de baterías interiores de *backup* o memorias no-volátiles. Este tipo se prefiere porque los datos no pueden perderse debido a una falta en el voltaje de la batería.

Anexo III: Tablas para la organización de la información de velocidad promedio horaria del viento.

Día/Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23		
1																										
2																										
3																										
4																										
5																										
6																										
7																										
8																										
9																										
10																										
11																										
12																										
13																										
14																										
15																										
16																										
17																										
18																										
19																										
20																										
21																										
22																										
23																										
24																										
25																										
26																										
27																										
28																										
29																										
30																										
31																										

Tabla 11.3.1: Formato para la organización de viento de cada mes

Hora	Media (m/s)	Max (m/s)	Min (m/s)	Moda (m/s)	Mediana (m/s)
0					
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
Total					

Tabla 11.3.2: Formato para la organización de las medidas de tendencia central de la velocidad del viento en cada mes.

Velocidad	Intervalo	Horas	Porcentaje	Probabilidad	Horas Excedidas
0	0-1				
1	1-2				
2	2-3				
3	3-4				
4	4-5				
5	5-6				
6	6-7				
7	7-8				
8	8-9				
9	9-10				
10	10-11				
11	11-12				
12	12-13				

Tabla 11.3.3: Formato de tabla de cálculo de la distribución de frecuencia del viento.

Anexo IV: Instrumentos para la medición del potencial solar

a) Piranómetro

La radiación global es aquella radiación solar recibida en un ángulo sólido de 2π estereorradianes sobre una superficie horizontal. Esta radiación global incluye la radiación directa y difusa.

Estos dispositivos son los encargados de medir tanto la global como la difusa. Pueden emplearse para medir la radiación incidente sobre superficies inclinadas y disponiéndolo en posición invertida permite medir la radiación global reflejada (albedo). Para obtener medidas de la componente difusa de la radiación, la componente directa es cubierta mediante un sistema de pantallas o sombreado.

b) Pirheliómetro

Instrumento de tipo telescópico con una apertura de pequeño diámetro, empleado para la medición de la radiación solar directa. La construcción de este tipo de dispositivos es tal que solamente es captada la radiación procedente del disco solar y una estrecha franja anular entorno suya.

La superficie receptora debe mantenerse perpendicular a la dirección de la radiación solar, por lo que la utilización de un sistema de seguimiento es imprescindible.

c) Termómetro

Generalmente los sensores de temperatura del aire ambiente están compuestos por tres partes: el transductor, un dispositivo de interfaz, y un escudo o casilla protectora contra la radiación. El transductor contiene un elemento material (habitualmente níquel o platino) con una relación conocida entre su resistencia y temperatura. Termistores, detectores térmicos de resistencia (RTDS), y semiconductores son los elementos recomendados para su uso. El valor de resistencia del material es moderado por el *datalogger* (o un dispositivo de interfaz) que usa una relación conocida para el cálculo de la temperatura real del aire.

Anexo V: Tablas de irradiación solar global

Localización	Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual

Tabla 11.5.1: Datos de irradiación solar diaria sobre una superficie horizontal.

Inclinación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
0 ⁰													
5 ⁰													
10 ⁰													
15 ⁰													
20 ⁰													
25 ⁰													
30 ⁰													
35 ⁰													
40 ⁰													
45 ⁰													
50 ⁰													
55 ⁰													
60 ⁰													
65 ⁰													
70 ⁰													
75 ⁰													
80 ⁰													
85 ⁰													
90 ⁰													

Tabla 11.5.2: Datos de irradiación solar diaria sobre una superficie inclinada para una latitud ϕ .

Anexo VI: Tablas de valores de referencia del diagrama de trayectoria del sol

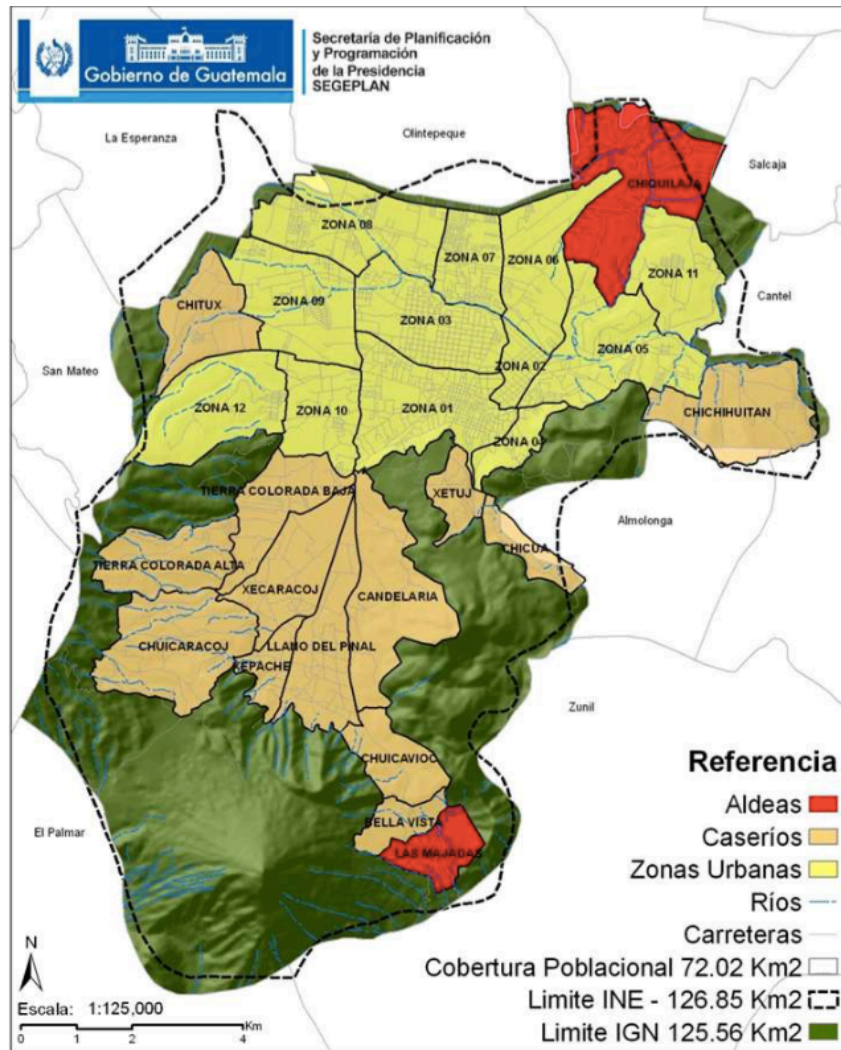
	$\beta=35^\circ; \alpha=0^\circ$				$\beta=0^\circ; \alpha=0^\circ$				$\beta=90^\circ; \alpha=0^\circ$				$\beta=35^\circ; \alpha=30^\circ$			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,10
11	0,00	0,01	0,12	0,44	0,00	0,01	0,18	1,05	0,00	0,01	0,02	0,15	0,00	0,00	0,03	0,06
9	0,13	0,41	0,62	1,49	0,05	0,32	0,70	2,23	0,23	0,50	0,37	0,10	0,02	0,10	0,19	0,56
7	1,00	0,95	1,27	2,76	0,52	0,77	1,32	3,56	1,66	1,06	0,93	0,78	0,54	0,55	0,78	1,80
5	1,84	1,50	1,83	3,87	1,11	1,26	1,85	4,66	2,76	1,62	1,43	1,68	1,32	1,12	1,40	3,06
3	2,70	1,88	2,21	4,67	1,75	1,60	2,20	5,44	3,83	2,00	1,77	2,36	2,24	1,60	1,92	4,14
1	3,17	2,12	2,43	5,04	2,10	1,81	2,40	5,78	4,36	2,23	1,98	2,69	2,89	1,98	2,31	4,87
2	3,17	2,12	2,33	4,99	2,11	1,80	2,30	5,73	4,40	2,23	1,91	2,66	3,16	2,15	2,40	5,20
4	2,70	1,89	2,01	4,46	1,75	1,61	2,00	5,19	3,82	2,01	1,62	2,26	2,93	2,08	2,23	5,02
6	1,79	1,51	1,65	3,63	1,09	1,26	1,65	4,37	2,68	1,62	1,30	1,58	2,14	1,82	2,00	4,46
8	0,98	0,99	1,08	2,55	0,51	0,82	1,11	3,28	1,62	1,09	0,79	0,74	1,33	1,36	1,48	3,54
10	0,11	0,42	0,52	1,33	0,05	0,33	0,57	1,98	0,19	0,49	0,32	0,10	0,18	0,71	0,88	2,26
12	0,00	0,02	0,10	0,40	0,00	0,02	0,15	0,96	0,00	0,02	0,02	0,13	0,00	0,06	0,32	1,17
14	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,00	0,22

Tabla C.2

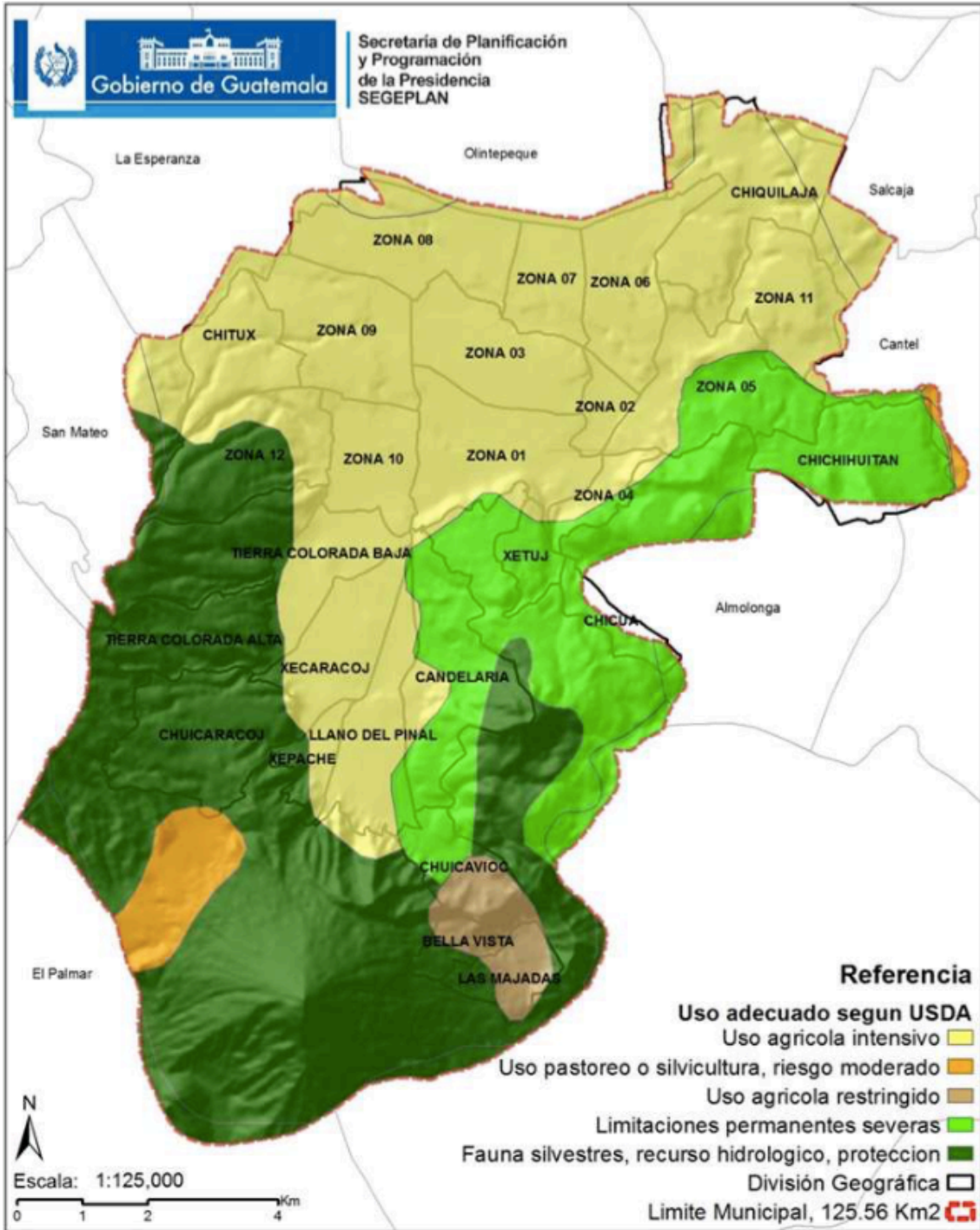
	$\beta=90^\circ; \alpha=30^\circ$				$\beta=35^\circ; \alpha=60^\circ$				$\beta=90^\circ; \alpha=60^\circ$				$\beta=35^\circ; \alpha=-30^\circ$			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
13	0,10	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00	0,22
11	0,06	0,01	0,15	0,51	0,00	0,00	0,08	0,16	0,00	0,01	0,27	0,78	0,00	0,03	0,37	1,26
9	0,56	0,06	0,14	0,43	0,02	0,04	0,04	0,02	0,09	0,21	0,33	0,76	0,21	0,70	1,05	2,50
7	1,80	0,04	0,07	0,31	0,02	0,13	0,31	1,02	0,21	0,18	0,27	0,70	1,34	1,28	1,73	3,79
5	3,06	0,55	0,22	0,11	0,64	0,68	0,97	2,39	0,10	0,11	0,21	0,52	2,17	1,79	2,21	4,70
3	4,14	1,16	0,87	0,67	1,55	1,24	1,59	3,70	0,45	0,03	0,05	0,25	2,90	2,05	2,43	5,20
1	4,87	1,73	1,49	1,86	2,35	1,74	2,12	4,73	1,73	0,80	0,62	0,55	3,12	2,13	2,47	5,20
2	5,20	2,15	1,88	2,79	2,85	2,05	2,38	5,40	2,91	1,56	1,42	2,26	2,88	1,96	2,19	4,77
4	5,02	2,34	2,02	3,29	2,86	2,14	2,37	5,53	3,59	2,13	1,97	3,60	2,22	1,60	1,73	3,91
6	4,46	2,28	2,05	3,36	2,24	2,00	2,27	5,25	3,35	2,43	2,37	4,45	1,27	1,11	1,25	2,84
8	3,54	1,92	1,71	2,98	1,51	1,61	1,81	4,49	2,67	2,35	2,28	4,65	0,52	0,57	0,65	1,64
10	2,26	1,19	1,19	2,12	0,23	0,94	1,20	3,18	0,47	1,64	1,82	3,95	0,02	0,10	0,15	0,50
12	1,17	0,12	0,53	1,22	0,00	0,09	0,52	1,96	0,00	0,19	0,97	2,93	0,00	0,00	0,03	0,05
14	0,22	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00	0,00	0,55	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,08

	$\beta=90^\circ; \alpha=-30^\circ$				$\beta=35^\circ; \alpha=-60^\circ$				$\beta=90^\circ; \alpha=-60^\circ$			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
13	0,00	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00	0,00	0,56	0,00	0,00	0,00	1,01
11	0,00	0,05	0,60	1,28	0,00	0,04	0,60	2,09	0,00	0,08	1,10	3,08
9	0,43	1,17	1,38	2,30	0,27	0,91	1,42	3,49	0,55	1,60	2,11	4,28
7	2,42	1,82	1,98	3,15	1,51	1,51	2,10	4,76	2,66	2,19	2,61	4,89
5	3,43	2,24	2,24	3,51	2,25	1,95	2,48	5,48	3,36	2,37	2,56	4,61
3	4,12	2,29	2,18	3,38	2,80	2,08	2,56	5,68	3,49	2,06	2,10	3,67
1	4,05	2,11	1,93	2,77	2,78	2,01	2,43	5,34	2,81	1,52	1,44	2,22
2	3,45	1,71	1,41	1,81	2,32	1,70	2,00	4,59	1,69	0,78	0,58	0,53
4	2,43	1,14	0,79	0,64	1,52	1,22	1,42	3,46	0,44	0,03	0,05	0,24
6	1,24	0,54	0,20	0,11	0,62	0,67	0,85	2,20	0,10	0,13	0,19	0,48
8	0,40	0,03	0,06	0,31	0,02	0,14	0,26	0,92	0,22	0,18	0,26	0,69
10	0,01	0,06	0,12	0,39	0,02	0,04	0,03	0,02	0,08	0,21	0,28	0,68
12	0,00	0,01	0,13	0,45	0,00	0,01	0,07	0,14	0,00	0,02	0,24	0,67
14	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,36

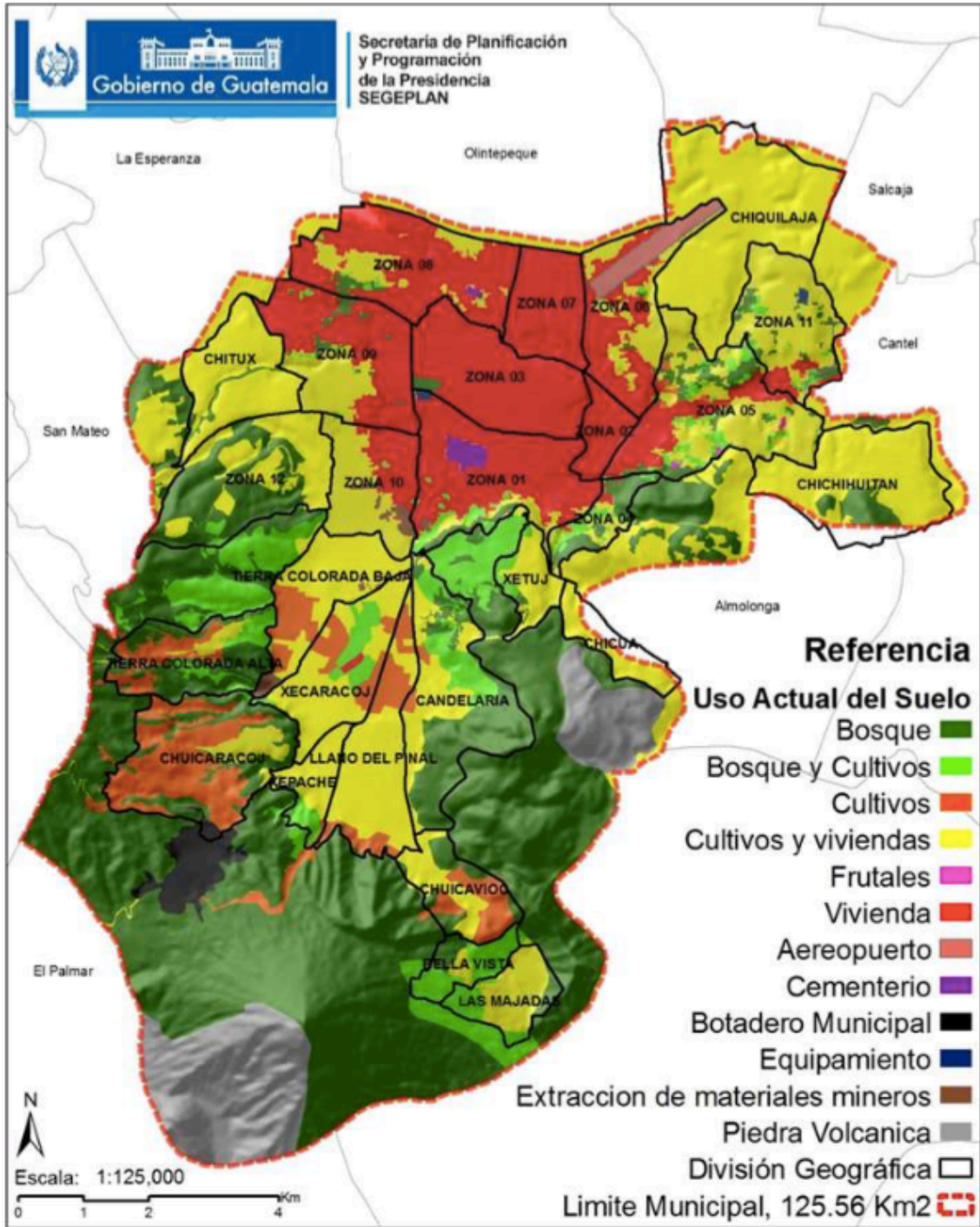
Anexo VII: Mapas municipio de Quetzaltenango



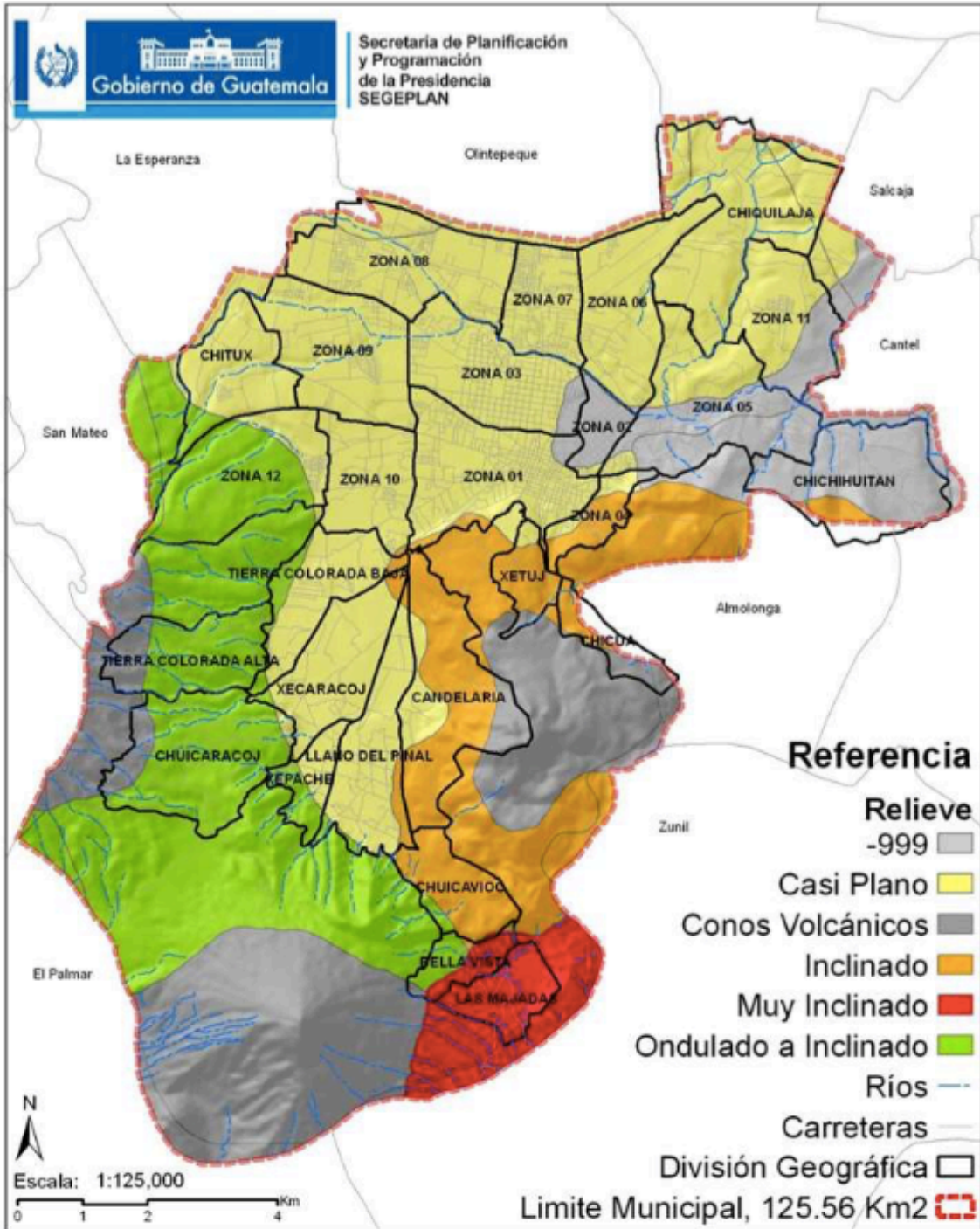
Mapa 11.7.1: Zonas municipio de Quetzaltenango. *Fuente: Secretaria de Planificación y Programación Presidencia (SEGEPLAN)*



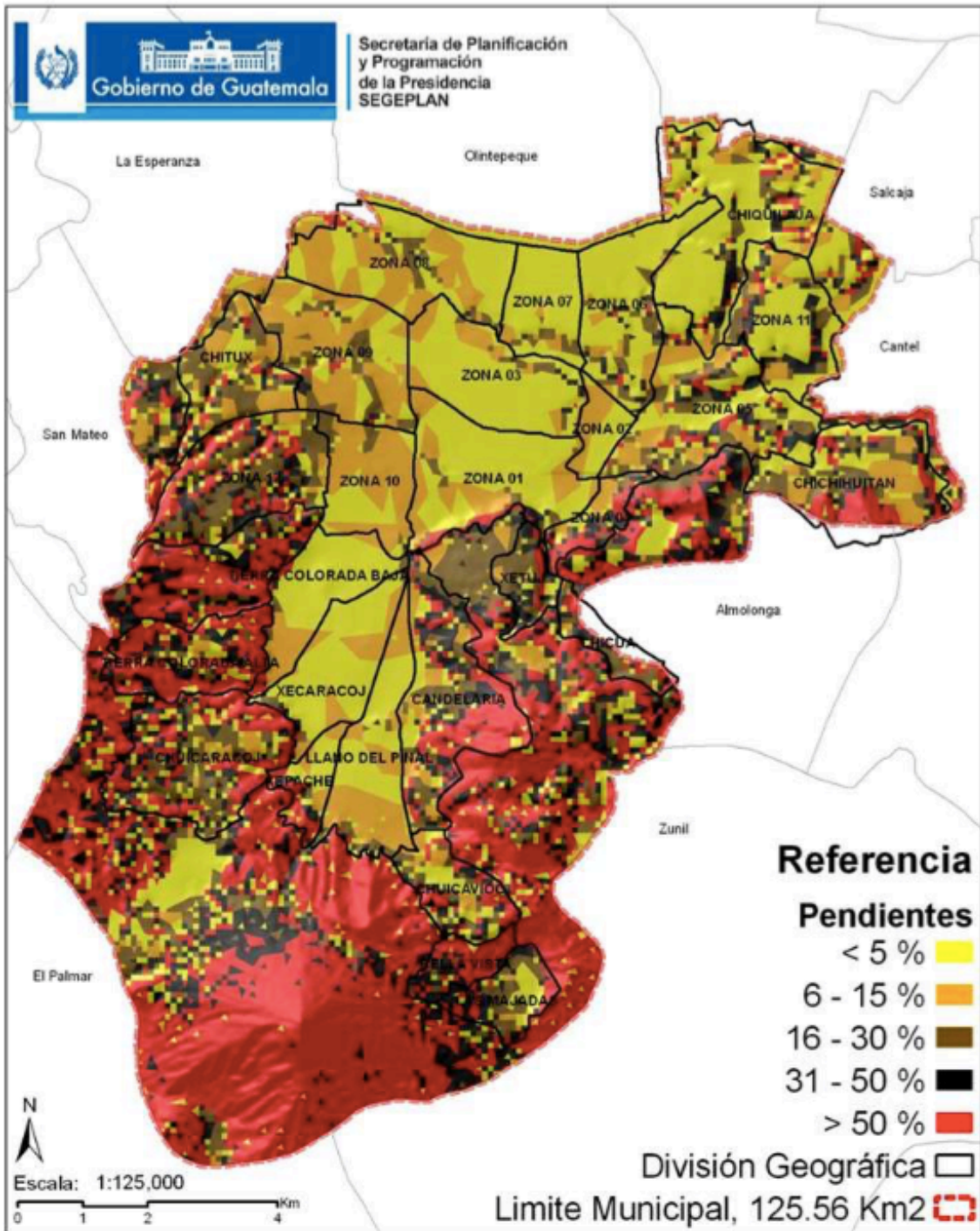
Mapa 11.7.2: Uso adecuado de suelos de Quetzaltenango. Fuente: Secretaría de Planificación de la Presidencia (SEGEPLAN)



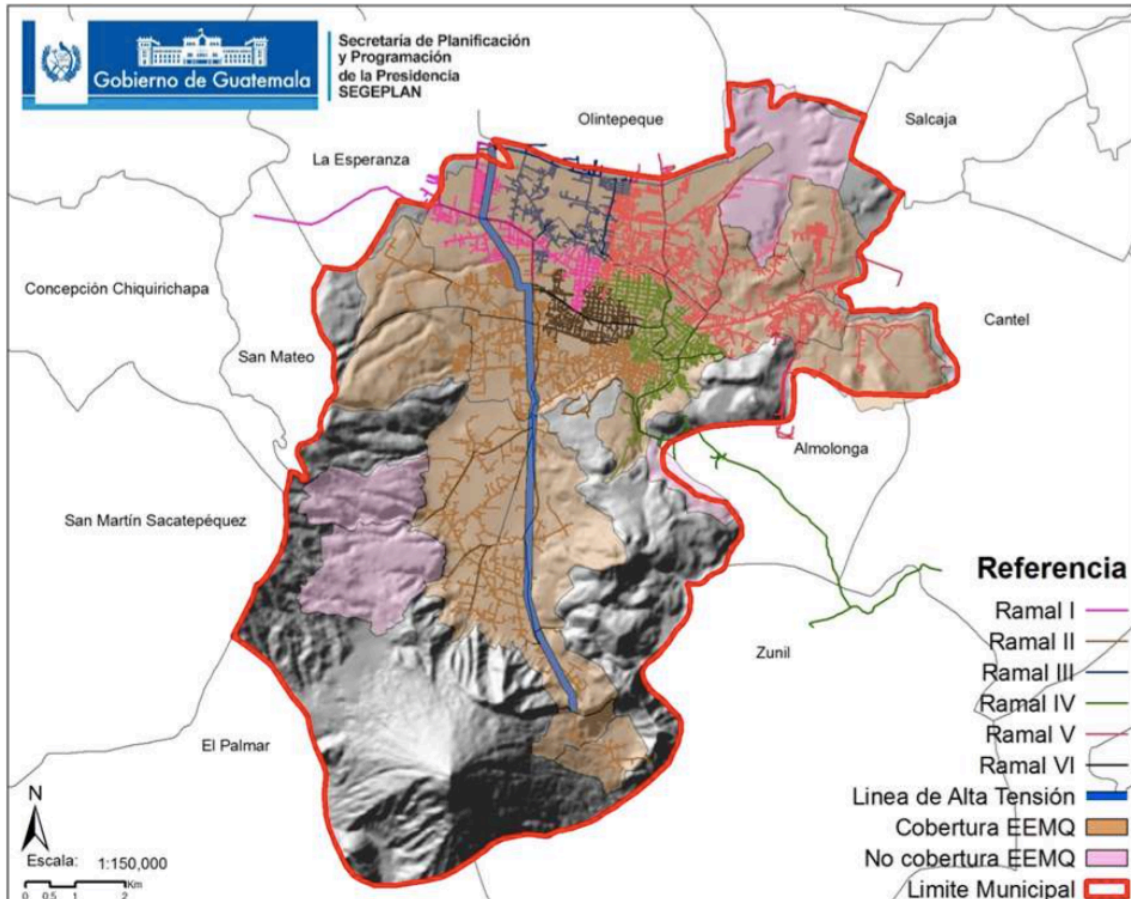
Mapa 11.7.3: Uso actual del suelo: Fuente: Secretaría de Planificación de la Presidencia (SEGEPLAN)



Mapa 11.7.4 : Relieve: Fuente: Secretaria de Planificación de la Presidencia (SEGEPLAN)



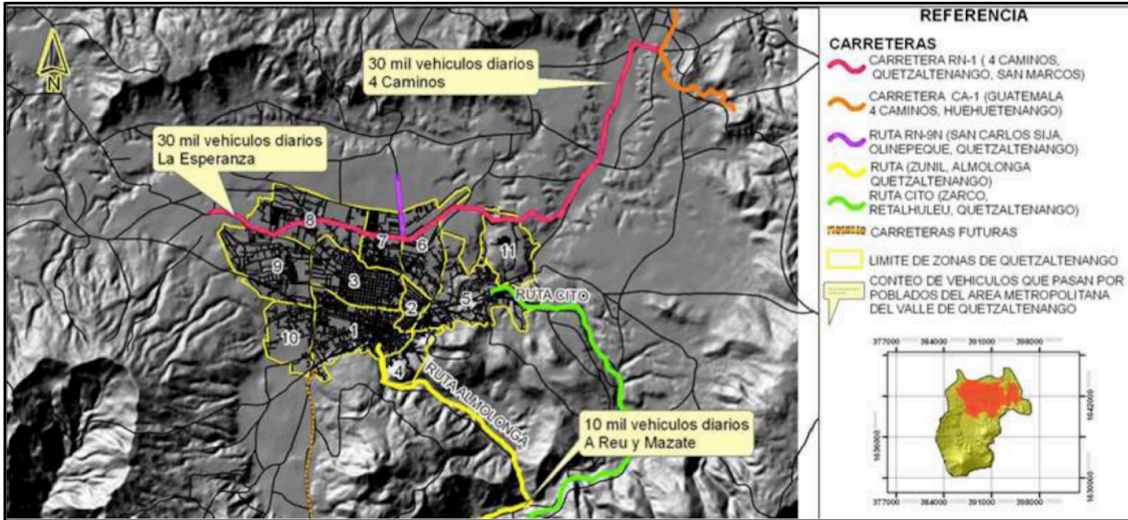
Mapa 11.7.5 : Pendiente: Fuente: Secretaría de Planificación de la Presidencia (SEGEPLAN)



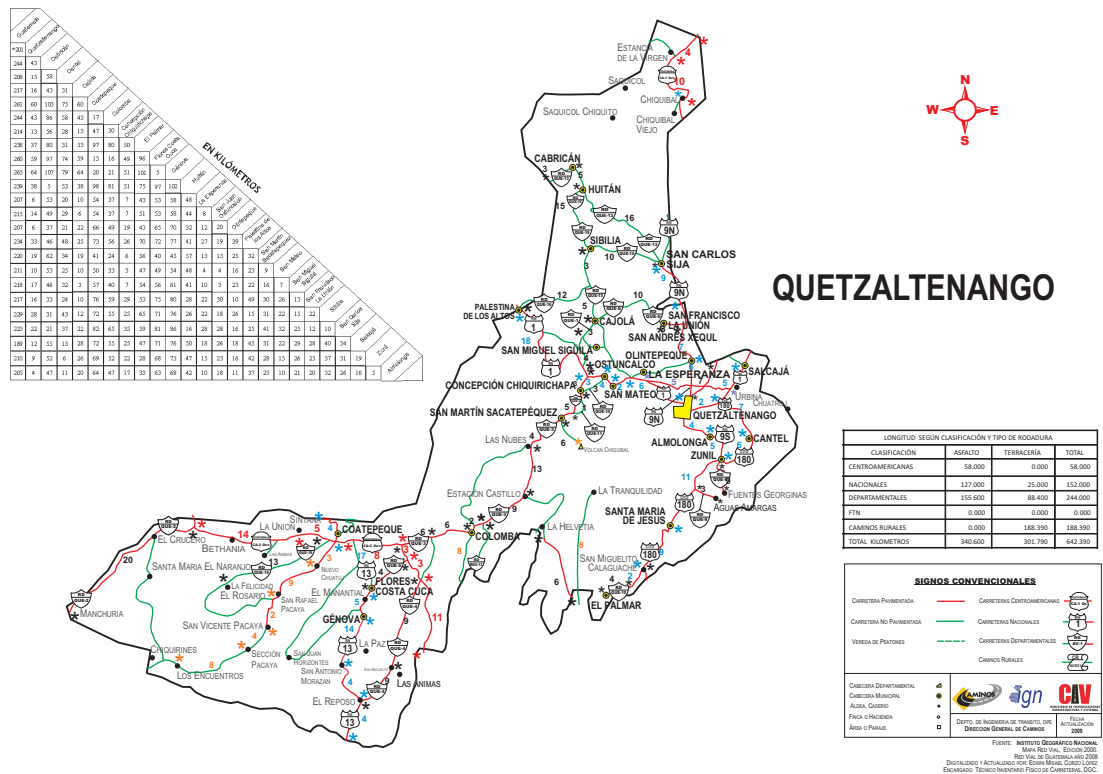
Mapa 11.7.6: Red eléctrica municipio de Quetzaltenango. Fuente: Secretaria de Planificación de la Presidencia (SEGEPLAN)



Mapa 11.7.7: Obras de transmisión y generación. Fuente: Planes indicativos de generación y transmisión de 2016. MEM



Mapa 11.7.8: Red vial municipio Quetzaltenango. Fuente: Secretaria de Planificación de la Presidencia (SEGEPLAN).



Mapa 11.7.9: Red vial departamento de Quetzaltenango. Fuente: Instituto Geográfico Nacional (2000)

Anexo VIII: Coordenadas zonas con potencial eólico

Zona 1 :

Área con potencial Bueno (400-500 W/m ² a 50 m)	
14 ⁰ 45'01.54" N	91 ⁰ 32'32.49" O
14 ⁰ 45'33.71" N	91 ⁰ 32'32.81" O
14 ⁰ 45'34.19" N	91 ⁰ 33'06.74" O
14 ⁰ 45'01.15" N	91 ⁰ 33'06.30" O

Área con potencial Moderado (300-400 W/m ² a 50 m)	
14 ⁰ 45'33.71" N	91 ⁰ 32'32.81" O
14 ⁰ 46'07.00" N	91 ⁰ 32'33.32" O
14 ⁰ 46'06.10" N	91 ⁰ 33'07.21" O
14 ⁰ 45'34.19" N	91 ⁰ 33'06.74" O

Zona 2:

Área con potencial Excelente (500-600 W/m ² a 50 m)	
14 ⁰ 46'04.67" N	91 ⁰ 34'14.92" O
14 ⁰ 46'36.69" N	91 ⁰ 34'15.15" O
14 ⁰ 46'36.35" N	91 ⁰ 34'48.13" O
14 ⁰ 46'03.76" N	91 ⁰ 34'47.10" O

Área con potencial Bueno (400-500 W/m ² a 50 m)	
14 ⁰ 46'05.60" N	91 ⁰ 33'41.64" O
14 ⁰ 46'37.11" N	91 ⁰ 33'41.52" O
14 ⁰ 46'36.69" N	91 ⁰ 34'15.15" O
14 ⁰ 46'04.67" N	91 ⁰ 34'14.92" O
14 ⁰ 46'36.69" N	91 ⁰ 34'15.15" O
14 ⁰ 47'08.92" N	91 ⁰ 34'14.90" O
14 ⁰ 47'08.90" N	91 ⁰ 35'22.14" O
14 ⁰ 46'04.28" N	91 ⁰ 35'21.31" O
14 ⁰ 46'03.76" N	91 ⁰ 34'47.10" O
14 ⁰ 46'36.35" N	91 ⁰ 34'48.13" O

Área con potencial Moderado (300-400 W/m ² a 50 m)	
14 ⁰ 46'37.11" N	91 ⁰ 33'41.52" O
14 ⁰ 47'10.43" N	91 ⁰ 33'42.30" O
14 ⁰ 47'08.92" N	91 ⁰ 34'14.90" O
14 ⁰ 46'36.69" N	91 ⁰ 34'15.15" O
14 ⁰ 47'08.92" N	91 ⁰ 34'14.90" O
14 ⁰ 47'29.81" N	91 ⁰ 34'16.60" O
14 ⁰ 47'29.67" N	91 ⁰ 35'21.93" O
14 ⁰ 47'08.90" N	91 ⁰ 35'22.14" O

Anexo IX: Áreas protegidas de Quetzaltenango

Volcanes Siete Orejas, Santa María y Santlaguito

Tomando como punto de partida La Estancia de la Cruz Latitud 14° 44' 55" Longitud 91° 30' 35" siguiendo la ruta con dirección a Sta. María de Jesús por carretera tres kilómetros

REFERENCIA

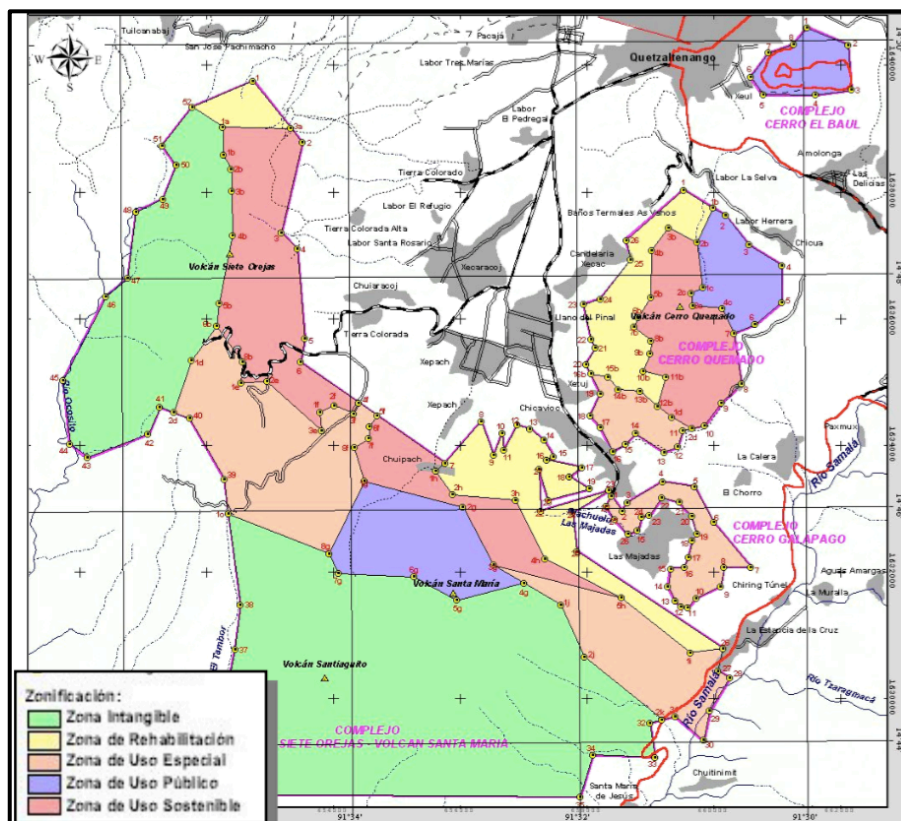
Latitud 14° 43' 53" Longitud 91° 31' 05". De este punto en línea recta al oeste siete kilómetros hasta llegar punto Latitud 14° 43' 53" Longitud 91° 35' 12". De este punto al norte siguiendo el cauce del Río Concepción o El Tambor hasta el punto Latitud 14° 46' 05" Longitud 91° 35' 00". Luego siguiendo al noroeste los puntos: Latitud 14° 46' 35" Longitud 91° 35' 12" Latitud 14° 46' 40" Longitud 91° 35' 15", Latitud 14° 46' 45" Longitud 91° 35' 25", Latitud 14° 46' 52" Longitud 91° 35' 32", Latitud 14° 46' 50" Longitud 91° 35' 40". De este punto tomando el cauce que entronca con el Río Ocosito, al noroeste el punto Latitud 14° 49' 05" Longitud 91° 35' 40" y Latitud 14° 49' 28" Longitud 91° 35' 25". De este punto al nordeste Latitud 14° 49' 38" Longitud 91° 34' 50", al sudeste Latitud 14° 49' 08" Longitud 91° 34' 25", de este punto al sudoeste Latitud 14° 48' 25" Longitud 91° 34' 35", al sudeste Latitud 14° 48' 15" Longitud 91° 34' 28", al sur Latitud 14° 47' 30" Longitud 91° 34' 22", al sudoeste Latitud 14° 47' 20" Longitud 91° 34' 25", de este punto al sudeste en línea recta ocho kilómetros al punto origen Latitud 14° 44' 55" Longitud 91° 30' 35".

Cerros Candelaria y Volcán Cerro Quemado:

PUNTO	LATTUD	LONGITUD
1	14° 48' 02"	91° 30' 00"
2	14° 47' 30"	91° 30' 30"
3	14° 47' 22"	91° 30' 25"
4	14° 47' 08"	91° 30' 30"
5	14° 47' 04"	91° 30' 35"
6	14° 46' 45"	91° 30' 48"
7	14° 46' 42"	91° 31' 02"
8	14° 46' 33"	91° 31' 08"
9	14° 46' 36"	91° 31' 25"
10	14° 46' 38"	91° 31' 30"
11	14° 46' 48"	91° 31' 35"
12	14° 46' 45"	91° 31' 45"
13	14° 46' 55"	91° 31' 48"
14	14° 47' 02"	91° 31' 50"
15	14° 47' 08"	91° 31' 52"
16	14° 47' 20"	91° 31' 55"
17	14° 47' 15"	91° 31' 58"
18	14° 47' 22"	91° 31' 54"
19	14° 47' 30"	91° 31' 50"
20	14° 47' 43"	91° 31' 53"
21	14° 47' 48"	91° 31' 52"

Figura 11.9.1: Resolución No SE/022-98. Fuente: Consejo Nacional de Guatemala de Áreas Protegidas

Anexo X: Plan Maestro PRMQ (Probosques 2001).



Mapa 11.10.1: Zonificación Parque Regional Quetzaltenango. *Fuente: Plan Maestro PRMQ (Probosques 2001).*

	Zona Intangible	En esta zona los recursos naturales se han mantenido en buen estado de conservación natural; contienen ecosistemas frágiles o funcionan como receptores de agua, nichos ecológicos de algunas especies endémicas en peligro de extinción.
	Zona de Rehabilitación	En donde los recursos naturales han sufrido severas intervenciones de las poblaciones aledañas, siendo áreas que es necesario recuperar con medios artificiales para acelerar el proceso de sucesión vegetal, el cual es muy lento. También establece áreas como bosques energéticos para los pobladores.
	Zona de Uso Especial	Estas son áreas que actualmente están bajo manejo especial y realizan actividades que mediante acuerdos suscritos con la Municipalidad se Realizarán por un periodo de tiempo determinado.
	Zona de uso público	Son áreas con potencial para realizar Ecoturismo y/o educación ambiental. Son áreas que cuentan con senderos y en algunos casos con instalaciones para atender visitantes.
	Zona de uso sostenible	Son áreas circundantes a la zona intangible, que cumplen la función de amortiguar los impactos sobre ella. Incluye los bosques con potencial de ser manejados como rodales semilleros.

Tabla 11.10.2: Descripción de zonas. *Fuente: Plan Maestro PRMQ (Probosques 2001). Adaptación propia*

Anexo XI: Presupuestos de instalaciones de medición



Renewable NRG Systems
110 Riggs Road
Hinesburg, VT 05461 USA
Tel: 802.482.2255 Fax: 802.482.2272
info@nrgsystems.com

Quote Number Q0057031
Date: 11/22/2016
Customer ID:
Purchase Order No: 34m tower
Salesperson: August W. Gruner
Shipping Method: OCEANFREIGHT
Payment Terms: Prepayment
Expiration Date 1/21/2017

Page 1 of 1

Sales Quotation

Bill To: Universidad San Carlos de Guatemala
Address: Calle Rodolfo Robles 29-99
Zona 1

Quetzaltenango, Guatemala

jose.lezsiz@gmail.com
Your final invoice will be sent to the above email address. Paper invoices are available upon request.

Ship To: Universidad San Carlos de Guatemala
Attn. To: Jose Saiz
Address: Calle Rodolfo Robles 29-99
Zona 1

Quetzaltenango, Guatemala

502 47592618

Item	Description	Unit	Quantity	Unit Price	Adj. Price	(\$)	Ext. Price (\$)
4258	34m XHD NOW System TallTower Kit Anchors, No Paint	Each	1	5,245.00	5,245.00		5,245.00
9298	34m XHD NOW System Logger Kit SymphoniePRO includes SymphoniePRO and shelter box	Each	1	1,915.00	1,915.00		1,915.00
4259	34m XHD NOW System Sensor Kit 40C includes x3 #40C anemometers, x1 200P vane, temp sensor, cables and booms	Each	1	1,795.00	1,795.00		1,795.00
4723	Symphonie iPackGPS GSM/GPRS	Each	1	1,295.00	1,295.00		1,295.00
8633	USB Cable 15 FT, A to B Type Program cable for SymphoniePRO	Each	1	18.00	18.00		18.00
9112	Symphonie PV Panel 15W, Tubular	Each	1	220.00	220.00		220.00
8495	SD Card 2 GB for SymphoniePRO®	Each	1	60.00	60.00		60.00
4300	Winch 4500 lb. - 34m Towers	Each	1	908.00	908.00		908.00
2710	Freight, Handling, Insurance-International CIF Port of Puerto Barrios, GUATEMALA. Ocean Freight, Door-to-Port - ***ESTIMATED SHIPPING CHARGES***	Each	1		1,000.00		1,000.00

Subtotal: 12,456.00

Tax: 0.00

Grand Total: \$ 12,456.00
Currency: US Dollars only

Renewable NRG Systems
110 Riggs Road
Hinesburg, VT 05461
Phone: (802) 482-2255 Fax: (802)482-2272

Figura 11.11.1: Presupuesto estación de medición eólica



Renewable NRG Systems
 110 Riggs Road
 Hinesburg, VT 05461 USA
 Tel: 802.482.2255 Fax: 802.482.2272
 info@nrgsystems.com

Quote Number Q0057033
Date: 11/22/2016
Customer ID:
Purchase Order No: SRA Second class
Salesperson: August W. Gruner
Shipping Method: TRANS-BORDER
Payment Terms: Prepayment
Expiration Date 1/21/2017

Page 1 of 1

Sales Quotation

Bill To: Universidad San Carlos de Guatemala
Address: Calle Rodolfo Robles 29-99
 Zona 1

 Quetzaltenango, Guatemala

 jose.lezsiz@gmail.com
 Your final invoice will be sent to the above email
 address. Paper invoices are available upon request.

Ship To: Universidad San Carlos de Guatemala
Attn. To: Jose Saiz
Address: Calle Rodolfo Robles 29-99
 Zona 1

 Quetzaltenango, Guatemala

 502 47592618

Item	Description	Unit	Quantity	Unit Price	Adj. Price	(\$ Ext. Price (\$))
9118	SRA System 2.2m Tower Kit	Each	1	930.00	930.00	930.00
9117	SRA System SymphoniePRO Logger Kit includes SymphoniePRO and shelter box	Each	1	2,065.00	2,065.00	2,065.00
9119	SRA System 2xGHI SC Sensor Kit includes x2 LP02 Hukseflux pyranometers - second class, anemometer, wind vane, rain gauge, RH, Temp and BP sensors - cables and boom for sensors	Each	1	4,360.00	4,360.00	4,360.00
4723	Symphonie iPackGPS GSM/GPRS	Each	1	1,295.00	1,295.00	1,295.00
9112	Symphonie PV Panel 15W, Tubular	Each	1	220.00	220.00	220.00
5372	Tool Kit Solar Resource Assessment Systems	Each	1	96.00	96.00	96.00
8495	SD Card 2 GB for SymphoniePRO®	Each	1	60.00	60.00	60.00
8633	USB Cable 15 FT, A to B Type	Each	1	18.00	18.00	18.00
2710	Freight, Handling, Insurance-International To be determined	Each	1		0.00	0.00



Subtotal: 9,044.00
Tax: 0.00
Grand Total: \$ 9,044.00
 Currency: US Dollars only

Renewable NRG Systems
 110 Riggs Road
 Hinesburg, VT 05461
 Phone: (802) 482-2255 Fax: (802)482-2272

Figura 11.11.2: Presupuesto estación de medición solar

Anexo XII: Futura localización estaciones de medición

Estación de medición caso eólico



Figura 11.12.1: Localización zona 2 del estudio. Fuente: Googel Earth Pro. Adaptación propia



Figura 11.12.2: Localización futura estación de medición eólica. Fuente: Googel Earth Pro. Adaptación propia

Coordenadas: 14°46'19" N
91°34'18" O

Estación de medición caso fotovoltaico



Figura 11.12.3: Localización CUNOC. Fuente: Google Earth Pro. Adaptación propia



Figura 11.12.3: Localización futura estación de medición solar. Fuente: Google Earth Pro. Adaptación propia

Coordenadas: 14°50'45.62" N
91°32'10.97" O

Anexo XIII: Localización torres de comunicación

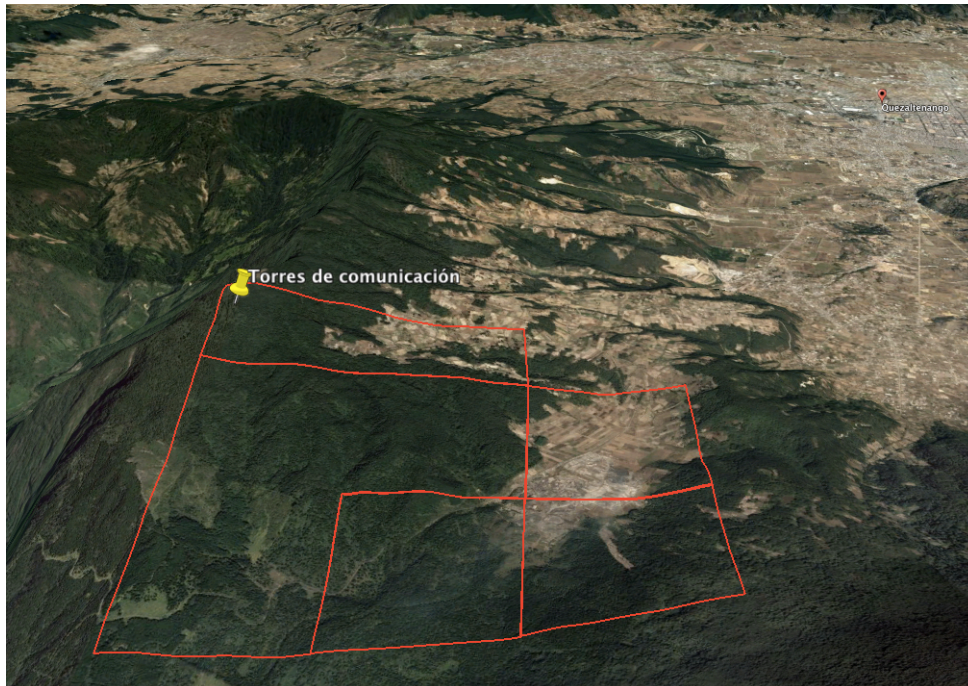


Figura 11.13.1: Localización torres de comunicación. *Fuente: Googel Earth Pro.
Adaptación propia*



Figura 11.13.2: Torres de comunicación. *Fuente: Archivo propio.*

Coordenadas: 14°47'23" N
91°35'43" O