

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA



POSGRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

**LOCALIZACIONES CON MAYOR FACTIBILIDAD EN EL
ESTADO DE SONORA PARA LA INSTALACIÓN DE
PLANTAS TERMOSOLARES TIPO TORRE CENTRAL**

T E S I S

PRESENTADA POR

RAMÓN FERNANDO NAVARRO TRUJILLO

**Desarrollada para cumplir con uno de los
requerimientos parciales para obtener
el grado de Maestro en Ingeniería**

DIRECTOR DE TESIS: DR. JORGE LUIS TADDEI BRINGAS

HERMOSILLO, SONORA, MEXICO

AGOSTO 2012

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

RESUMEN

El propósito de este documento es determinar las localizaciones con mayor factibilidad para la instalación de plantas termosolares tipo torre central, en el estado de Sonora. Actualmente la decisión para localizar una nueva instalación de una compañía u organización, es de vital importancia. Por dicha razón se ha contemplado resolver el problema de esta investigación, desde el enfoque de la ingeniería industrial.

Para ello se ha realizado un análisis literario considerando al cambio climático, desarrollo sustentable y sustentabilidad energética como temas claves relacionados con la instalación de plantas termosolares tipo torre central. Después, se consideran temas ligados con la instalación de este tipo de plantas, como lo son: energía, energías renovables, el Sol, radiación solar en México, energía solar térmica de concentración, tecnologías de concentración solar y sus comparaciones, plantas termosolares a nivel mundial, proyectos de energía solar en México, métodos de localización de instalaciones de servicio y finalmente, se analiza el área de estudio de esta investigación, el estado de Sonora.

Posteriormente, se presenta la metodología propuesta para resolver el problema de esta investigación, la cual constó de cinco etapas. En seguida, se aplicó la metodología para determinar las localizaciones con mayor factibilidad en el estado de Sonora y el orden para la instalación de las plantas termosolares tipo torre central. Después de aplicada la metodología, se determinó que las mejores localizaciones están ubicadas en Hermosillo, Cajeme, Navojoa, Guaymas, Santa Ana, Magdalena, Puerto Peñasco, Ures, Caborca e Ímuris.

Por último, se presentan las conclusiones, recomendaciones, trabajos futuros y anexos utilizados como soporte.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to determine the most feasible locations for the installation of type central tower solar thermal plants, in the state of Sonora. Currently the decision to locate a new facility of a company or organization is of vital importance. For this reason it has been considered to solve the problem of this research, from the viewpoint of industrial engineering.

For this, there has been a literary analysis considering climate change, sustainable development and energy sustainability as key issues related to the installation of type central tower solar thermal plants. Then consider issues related to the installation of this plants type, such as: energy, renewable energy, the Sun, solar radiation in Mexico, concentrating solar power, concentrating solar technologies and comparisons, level solar thermal plants global, solar energy projects in Mexico, methods of locating service facilities and finally, we analyze the study area of this research, the state of Sonora.

Subsequently, the proposed methodology is presented to solve the problem of this research, which consisted of five stages. Next, we applied the methodology to determine the most feasible locations in the state of Sonora and the order of installation for type central tower solar thermal plants. After application of the methodology, we determined that the best locations are located in Hermosillo, Cajeme, Navojoa, Guaymas, Santa Ana, Magdalena, Puerto Penasco, Ures, Caborca and Imuris.

Finally, we present the conclusions, recommendations, future works and annexes used as support.

DEDICATORIA

A mis Padres:

Jesús y Laura

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme finalizar una etapa más en mi vida y darme la gracia para poder continuar con mi camino.

A mis Padres: Jesús y Laura, Muchas Gracias por su valioso apoyo y por el amor brindado a su hijo Fernando.

A mis hermanas y hermano: María Jesús, Erika y Juan Eduardo, Muchas Gracias por sus apoyos desinteresados para su hermano Fernando.

A la UNISON por darme la oportunidad de haber estudiado la Maestría en Ingeniería Industrial.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Programa Integral para el Fortalecimiento Institucional (PIFI 2011), por su apoyo económico.

A los Profesores del Posgrado en Ingeniería Industrial, Muchas Gracias por compartir sus conocimientos y experiencias con su servidor.

A mis compañeras y compañeros de la Maestría, Muchas Gracias por su amistad y apoyos académicos.

A mí Director de Tesis: Dr. Jorge Luis Taddei Bringas, Muchas Gracias por su gran soporte académico para poder finalizar con éxito esta Tesis de Maestría.

A mí Asesor Externo: Dr. Rafael Enrique Cabanillas López, Muchas Gracias por sus apoyos académicos relacionados con el Área de Energía Solar.

Al M.C. Porfirio Sosa León, un agradecimiento muy especial por su ayuda y soporte desinteresado en la utilización del Sistema de Información Geográfica.

A la Casa del Estudiante Urense, Muchas Gracias por ser mi hogar en Hermosillo, Sonora.

ÍNDICE GENERAL

Pág.

| | |
|--------------------------------------|------|
| RESUMEN..... | i |
| ABSTRACT..... | ii |
| DEDICATORIA..... | iii |
| AGRADECIMIENTOS..... | iv |
| CONTENIDO..... | v-ix |
| | |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. Antecedentes..... | 1 |
| 1.2. Planteamiento del Problema..... | 6 |
| 1.3. Objetivo General..... | 6 |
| 1.3.1. Objetivos Específicos..... | 6 |
| 1.4. Hipótesis..... | 7 |
| 1.5. Alcances y Delimitaciones..... | 7 |
| 1.6. Justificación..... | 7 |
| 2. MARCO DE REFERENCIA..... | 9 |
| 2.1. Cambio Climático..... | 9 |
| 2.2. Sustentabilidad Energética..... | 12 |
| 2.3. Energía..... | 15 |
| 2.4. Energías Renovables..... | 15 |

| | |
|--|----|
| 2.4.1. Tipos de Energías Renovables..... | 17 |
| 2.5. El Sol..... | 30 |
| 2.6. Radiación Solar en México..... | 32 |
| 2.7. Energía Solar Térmica de Concentración..... | 33 |
| 2.7.1. Requisitos para la ESTC..... | 34 |
| 2.8. Tecnologías de Concentración Solar..... | 35 |
| 2.8.1. Tecnología de Canal Parabólico..... | 36 |
| 2.8.2. Tecnología de Fresnel Lineal..... | 37 |
| 2.8.3. Tecnología de Disco Parabólico..... | 38 |
| 2.8.4. Tecnología de Torre Central..... | 40 |
| 2.9. Comparación Entre las Tecnologías de Concentración Solar..... | 41 |
| 2.10. Plantas Termosolares Tipo Torre Central a Nivel Mundial..... | 45 |
| 2.11. Primera Planta Termosolar Comercial en el Mundo Tipo Torre Central | |
| Con Receptor de Sales..... | 50 |
| 2.12. Proyectos de Energía Solar en México..... | 52 |
| 2.12.1. Proyecto UNAM..... | 53 |
| 2.12.2. Proyecto Agua Prieta II..... | 54 |
| 2.12.3. Laboratorio Nacional del Sistema de Concentración Solar y | |
| Química Solar (LNCSQS)..... | 54 |
| 2.13. Método de Localización de Instalaciones de Servicio..... | 56 |

| | |
|---|----|
| 2.13.1. Método de Calificación de Factores..... | 57 |
| 2.13.2. Método del Centro de Gravedad..... | 58 |
| 2.13.3. Método SIG..... | 60 |
| 2.14. Área de Estudio: Estado de Sonora..... | 62 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 67 |
| 3.1. Tipo de Investigación..... | 67 |
| 3.2. Modelo Metodológico Propuesto..... | 67 |
| 4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA..... | 70 |
| 4.1. Identificación de los Criterios y Parámetros de Localización..... | 70 |
| 4.1.1. Radiación Solar..... | 71 |
| 4.1.2. Nubosidad..... | 73 |
| 4.1.3. Superficie y Topografía..... | 73 |
| 4.1.4. Disponibilidad de Agua..... | 74 |
| 4.1.5. Accesibilidad..... | 75 |
| 4.1.6. Mano de Obra..... | 75 |
| 4.1.7. Temperatura..... | 76 |
| 4.1.8. Investigación Sobre Áreas con Potencial para la Instalación de Plantas Termosolares en Chile..... | 76 |
| 4.2. Establecimiento de los Criterios y Parámetros de Localización..... | 77 |
| 4.2.1. Consulta a Experto..... | 77 |

| | |
|---|-----|
| 4.3. Aplicación de los Criterios y Parámetros de Localización en el SIG..... | 80 |
| 4.3.1. Red Eléctrica..... | 83 |
| 4.3.2. Disponibilidad de Agua..... | 85 |
| 4.3.3. Red Vial..... | 87 |
| 4.3.4. Pendiente..... | 89 |
| 4.3.5. Usos de Suelo..... | 91 |
| 4.3.6. Distancia a Poblaciones Mayores a 3,000 Habitantes..... | 93 |
| 4.4. Obtención de las Áreas Finales con Potencial en el Estado de Sonora..... | 96 |
| 4.5. Determinación de las Localizaciones con Mayor Factibilidad en el | |
| Estado de Sonora..... | 98 |
| 4.5.1. Aplicación del Método de Calificación de Criterios Estratégicos..... | 98 |
| 5. CONCLUSIONES..... | 108 |
| 5.1. Recomendaciones..... | 109 |
| 5.2. Trabajos Futuros..... | 110 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA..... | 111 |
| 7. ANEXOS..... | 118 |
| 7.1. Tabla de Calificaciones y Ponderaciones de la Zona I..... | 118 |
| 7.2. Tabla de Calificaciones y Ponderaciones de la Zona II..... | 119 |
| 7.3. Tabla de Calificaciones y Ponderaciones de la Zona III..... | 119 |
| 7.4. Tabla de Calificaciones y Ponderaciones de la Zona IV..... | 120 |

| | |
|--|-----------|
| 7.5. Tabla de Calificaciones y Ponderaciones de la Zona V..... | 120 |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | x-xiii |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | xiv |
| ÍNDICE DE ECUACIONES..... | xv |
| ÍNDICE DE ABREVIATURAS Y SIGLAS..... | xvi-xviii |

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

| | |
|--|----|
| Figura 2.1. Dimensiones del Desarrollo Sustentable..... | 13 |
| Figura 2.2. Dimensiones de la Sustentabilidad Energética..... | 14 |
| Figura 2.3. Participación Mundial de la Generación Eléctrica..... | 16 |
| Figura 2.4. Esquema de una Planta Hidroeléctrica..... | 17 |
| Figura 2.5. Miniplanta Hidráulica..... | 18 |
| Figura 2.6. Aerogenerador de Eje Horizontal con Tres Palas..... | 19 |
| Figura 2.7. Planta Geotermoeléctrica Cerro Prieto, Baja California, México..... | 20 |
| Figura 2.8. Planta de Cogeneración (Calor y Energía Eléctrica)..... | 21 |
| Figura 2.9. Central Mareomotriz en Race, Francia..... | 22 |
| Figura 2.10. Las Olas..... | 23 |
| Figura 2.11. Planta Mini-OTEC, Cerca de las Costas de Hawai..... | 24 |
| Figura 2.12. Aplicaciones de la Energía Solar a la Arquitectura de una Vivienda..... | 25 |
| Figura 2.13. Tecnología Solar Activa de Baja Temperatura..... | 25 |
| Figura 2.14. Colector Cilindro Parabólico..... | 26 |
| Figura 2.15. Concentrador de Disco Parabólico con Motor Stirling..... | 26 |
| Figura 2.16. Concentrador en Torre Central y Sistemas de Helióstatos..... | 27 |
| Figura 2.17. Concentrador Lineal de Fresnel..... | 27 |
| Figura 2.18. Sistema Fotovoltaico..... | 28 |
| Figura 2.19. Potencial Solar en el Mundo..... | 29 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.20. El Sol, Fuente Ilimitada de Energía..... | 30 |
| Figura 2.21. Mapas de Radiación Solar Global, para América y Europa..... | 32 |
| Figura 2.22. Mapa de la RDN en Norteamérica..... | 33 |
| Figura 2.23. Esquema de Funcionamiento de la Tecnología Termosolar..... | 35 |
| Figura 2.24. Concentradores de Canal Parabólico de la Planta Sistema de Generación Eléctrica Solar (SGES)..... | 37 |
| Figura 2.25. Concentradores de Fresnel Lineal FRESDEMO (visto desde el receptor), en la Plataforma Solar de Almería, España..... | 38 |
| Figura 2.26. Concentradores de Plato Parabólico de la Planta Sistemas de Energía Stirling (SES) en California, E.U.A..... | 39 |
| Figura 2.27. Concentradores de Helióstatos y Torre Central de la Planta Solar One, en Barstow, California..... | 40 |
| Figura 2.28. Planta Termosolar Eurelios..... | 47 |
| Figura 2.29. Planta Termosolar Sunshine..... | 47 |
| Figura 2.30. Planta Termosolar Themis..... | 48 |
| Figura 2.31. Planta Termosolar Solar Two..... | 49 |
| Figura 2.32. Planta Termosolar SSPP-5..... | 49 |
| Figura 2.33. Planta Termosolar PS-10/PS-20..... | 50 |
| Figura 2.34. Planta Termosolar Gemasolar en Fuentes de Andalucía, Sevilla, España..... | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.35. Campo Solar: 2,650 Helióstatos en 185 Hectáreas..... | 51 |
| Figura 2.36. Horno Solar de Alto Flujo Radiativo..... | 55 |
| Figura 2.37. Panorámica Superior del CPH desde la Torre Central, en Hermosillo, Sonora..... | 56 |
| Figura 2.38. Estado de Sonora (Color Negro)..... | 63 |
| Figura 2.39. División Municipal del Estado de Sonora..... | 64 |
| Figura 2.40. Climas del Estado de Sonora..... | 64 |
| Figura 3.1. Metodología Propuesta..... | 69 |
| Figura 4.1. Tipos de Radiación..... | 72 |
| Figura 4.2. Radiación Solar Global Horizontal Anualizada en kW/hr/m ² - día para el Estado de Sonora..... | 80 |
| Figura 4.3. Diagrama del Proceso de Aplicación en el SIG..... | 82 |
| Figura 4.4. Red Eléctrica en Sonora..... | 83 |
| Figura 4.5. Disponibilidad de Agua en Sonora..... | 85 |
| Figura 4.6. Red Vial en Sonora..... | 87 |
| Figura 4.7. Pendiente del Terreno en Sonora..... | 89 |
| Figura 4.8. Usos de Suelo en Sonora..... | 91 |
| Figura 4.9. Distancia a Poblaciones Mayores a 3,000 Habitantes en Sonora..... | 93 |
| Figura 4.10. Esquema del Proceso Metodológico para Obtener las Áreas Finales con Potencial..... | 95 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.11. Áreas Finales con Potencial en Sonora..... | 96 |
| Figura 4.12. Pasos del Método de Calificación de Criterios Estratégicos..... | 99 |
| Figura 4.13. Resultados Totales de la Zona I..... | 101 |
| Figura 4.14. Resultados Totales de la Zona II..... | 101 |
| Figura 4.15. Resultados Totales de la Zona III..... | 102 |
| Figura 4.16. Resultados Totales de la Zona IV..... | 102 |
| Figura 4.17. Resultados Totales de la Zona V..... | 103 |
| Figura 4.18. Calificaciones Promedio de la Zona I..... | 103 |
| Figura 4.19. Calificaciones Promedio de la Zona II..... | 104 |
| Figura 4.20. Calificaciones Promedio de la Zona III..... | 104 |
| Figura 4.21. Calificaciones Promedio de la Zona IV..... | 105 |
| Figura 4.22. Calificaciones Promedio de la Zona V..... | 105 |
| Figura 4.23. Localizaciones con Mayor Factibilidad..... | 106 |

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

| | |
|---|-----|
| Tabla 2.1. Ficha Descriptiva del Sol..... | 31 |
| Tabla 2.2. Comparación Entre las Principales Tecnologías de Concentración Solar..... | 42 |
| Tabla 2.3. Experiencia Operativa: Potencias Instaladas y Electricidad Producida por Tipo de Tecnología..... | 45 |
| Tabla 2.4. Proyectos a Nivel Mundial de Plantas Termosolares Tipo Torre Central..... | 46 |
| Tabla 2.5. Factores y Rangos Porcentuales para la Localización de una Refinería..... | 57 |
| Tabla 4.1. Criterios y Parámetros de Localización de Áreas con Potencial Para la Instalación de Plantas Termosolares en Chile..... | 77 |
| Tabla 4.2. Criterios Establecidos por el Experto..... | 78 |
| Tabla 4.3. Criterios y Parámetros Establecidos por el Experto..... | 81 |
| Tabla 4.4. Criterios Estratégicos y sus Ponderaciones..... | 100 |
| Tabla 4.5. Localizaciones con Mayor Factibilidad y Orden de Instalación..... | 107 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

Pág.

Ecuación 2.1. $C_x = \sum X_i W_i / \sum W_i$59

Ecuación 2.2. $C_y = \sum Y_i W_i / \sum W_i$59

ÍNDICE DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

Pág.

| | |
|--|----|
| CPH: Campo de Pruebas de Helióstatos..... | 1 |
| UNISON: Universidad de Sonora..... | 1 |
| TWh: Tera Watt hora..... | 1 |
| IEA: Agencia Internacional de Energía..... | 1 |
| CO ₂ : Dióxido de Carbono..... | 2 |
| SIG: Sistemas de Información Geográfica..... | 4 |
| INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía..... | 5 |
| GW _e : Giga Watt Eléctrico..... | 5 |
| GEI: Gases de Efecto Invernadero..... | 8 |
| CC: Cambio Climático..... | 9 |
| CH ₄ : Metano..... | 10 |
| N ₂ O: Óxido Nitrosos..... | 10 |
| CCl ₂ F ₂ : Freón..... | 10 |
| HCFC-21: Hidroclorofluorocarbono..... | 10 |
| NO _x : Óxidos de Nitrógeno..... | 10 |
| CO: Monóxido de Carbono..... | 10 |
| SO ₂ : Bióxido de Azufre..... | 10 |
| COVNM: Compuestos Orgánicos Volátiles No Metánicos..... | 10 |
| CG: Calentamiento Global..... | 10 |
| PICC: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático..... | 10 |
| CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático..... | 11 |
| PK: Protocolo de Kioto..... | 11 |
| HFCS: Hidrofluorocarbonos..... | 11 |

| | |
|--|----|
| HFCS: Perfluorocarbonos..... | 11 |
| SF ₆ : Hexafluoruro de Azufre..... | 11 |
| COP: Conferencias de las Partes..... | 11 |
| CEPAL: Comisión Económica para América Latina y el Caribe..... | 13 |
| OLADE: Organización Latinoamericana de Energía..... | 13 |
| GTZ: Sociedad Alemana de Cooperación Técnica..... | 13 |
| LAER: Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables..... | 14 |
| ER: Energías Renovables..... | 16 |
| MW: Mega Watt..... | 18 |
| H ₂ S: Gas Sulfhídrico..... | 20 |
| kW: Kilo Watt..... | 23 |
| °C: Grados Centígrados..... | 23 |
| W/m ² : Watt por Metro Cuadrado..... | 29 |
| km: Kilómetro..... | 30 |
| ton: Tonelada..... | 31 |
| UA: Unidad Astronómica..... | 31 |
| kWh/m ² : Kilo Watt Hora por Metro Cuadrado..... | 32 |
| RDN: Radiación Directa Normal..... | 33 |
| ESTC: Energía Solar Térmica de Concentración..... | 33 |
| kWh/m ² -año: Kilo Watt Hora por Metro Cuadrado al Año..... | 34 |
| GWh: Giga Watt Hora..... | 34 |
| SGES: Sistema de Generación Eléctrica Solar..... | 37 |
| SES: Sistemas de Energía Stirling..... | 39 |
| m ² : Metros Cuadrados..... | 40 |

| | |
|--|-----|
| MW/h: Mega Watt por Hora..... | 46 |
| kWh: Kilo Watt por Hora..... | 46 |
| E.U.A: Estados Unidos de América..... | 48 |
| UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México..... | 52 |
| SENER: Secretaría de Energía..... | 53 |
| CFE: Comisión Federal de Electricidad..... | 53 |
| FMMA: Fondo Mundial para el Medio Ambiente..... | 54 |
| LNSCSQS: Laboratorio Nacional del Sistema de Concentración Solar y Química Solar..... | 54 |
| HSAFR: Horno Solar de Alto Flujo Radiativo..... | 54 |
| CIE: Centro de Investigación en Energía..... | 54 |
| PSTFAR: Planta Solar para el Tratamiento Fotocatalítico de Aguas Residuales..... | 55 |
| CNAIG: Centro Nacional para el Análisis de la Información Geográfica..... | 60 |
| ha: Hectárea..... | 66 |
| m ³ : Metros Cúbicos..... | 74 |
| m.s.n.m.: Metros Sobre Nivel del Mar..... | 76 |
| ANES: Asociación Nacional de Energía Solar..... | 78 |
| SIES: Sociedad Internacional de Energía Solar..... | 78 |
| kWh/m ² -día: Kilo Watt Hora por Metro Cuadrado al Día..... | 78 |
| kV: Kilo Volts..... | 83 |
| ANP: Áreas Naturales Protegidas..... | 92 |
| CONANP: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas..... | 92 |
| GW _e : Giga Watt Eléctrico..... | 110 |
| C.E.: Criterio Estratégico..... | 118 |

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el estado de Sonora, México, es pionero a nivel Latinoamérica en el desarrollo de la tecnología de torre central por medio del Campo de Pruebas de Helióstatos (CPH); localizado en los terrenos de la Escuela de Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora (UNISON).

Dicha tecnología tiene su principal aplicación en la producción de energía eléctrica, por medio de una planta termosolar. Por tal motivo, esta investigación determina las localizaciones con mayor factibilidad que posee el estado de Sonora para instalar plantas termosolares tipo torre central.

En el presente capítulo se abordan los apartados referentes a los antecedentes del tema a desarrollar, el planteamiento del problema, objetivos, hipótesis, alcances y delimitaciones y, finalmente se presenta la justificación de esta investigación.

1.1. ANTECEDENTES

De acuerdo con IEA² (2011), en agosto de 2011 la población mundial alcanzó la cifra de 7,000 millones de personas. Ese crecimiento poblacional y la búsqueda por incrementar los estándares de vida han aumentado en forma acelerada el uso de energía. El consumo final total de energía primaria a escala mundial ha pasado de 71,117.45 TWh¹ en 1973 a 139,897.27 TWh en 2007, lo que representa un incremento de 96.7%.

¹1TWh (Un Tera Watt hora = 10^{12} Wh).

²IEA (Por sus siglas en inglés, Agencia Internacional de Energía).

Por otro lado, de la energía total consumida en 2008 a escala mundial, el 33.2% se obtuvo del petróleo, mientras que el gas natural aportó 21.1% y el carbón suministró 27.0%, por lo que aproximadamente 81% de la energía total consumida en el mundo en ese año provino de combustibles de origen fósil (IEA, 2011).

Según la misma Agencia, este uso intensivo de combustibles de origen fósiles para satisfacer la demanda mundial de energía es una de las principales fuentes de contaminación de la atmósfera; el uso de combustibles fósiles contribuye con ochenta por ciento del dióxido de carbono (CO₂) atribuible a la actividad humana. La producción anual de CO₂ por la quema de combustibles fósiles ha variado de 15,643 millones de toneladas en 1973 a 29,381 millones de toneladas en 2008.

Hinojosa (2010), señala que para contrarrestar las principales fuentes de contaminación de la atmósfera se han desarrollado las fuentes de energías renovables provenientes de recursos naturales como la luz solar, el viento, la biomasa, las mareas y el calor geotérmico. Su principal característica, como su nombre lo indica, es que se renuevan, por lo que prácticamente son inagotables. En 2008 alrededor de 19% del consumo final de energía provino de energías renovables, con 13% de la tradicional biomasa (leña), 3.2% de hidroelectricidad y 2.8% de las nuevas energías renovables (eólica, solar, geotérmica y biocombustibles), que están creciendo muy rápidamente.

El mismo autor refiere que actualmente la energía solar tiene una participación muy pequeña a nivel mundial, pero es una de las energías renovables que está teniendo las tasas de crecimiento más elevadas a escala mundial. La demanda de energía solar eléctrica ha crecido consistentemente de 20 a 25% por año durante los pasados veinte años. En la actualidad se podría decir que existen, para fines de aplicación práctica, básicamente tres ramas de tecnologías solares: a) sistemas fotovoltaicos, b) sistemas fototérmicos y c) sistemas fotoquímicos.

Según Estrada et al. (2005), en relación a los sistemas que convierten la energía solar en eléctrica, los autores distinguen tres tipos de sistemas térmicos: los sistemas de receptor central, los de canal parabólico y los de disco parabólico.

- En los sistemas de receptor central, grandes espejos que siguen al Sol (helióstatos) concentran la luz solar en un receptor localizado en una torre, para calentar un fluido. El fluido transfiere el calor a una máquina térmica conectada a un generador eléctrico.
- En los de canal parabólico, los espejos de canal parabólico siguen al Sol en un solo eje y enfocan la luz solar en el tubo receptor localizado en el foco de la parábola. El fluido dentro del tubo transporta a un sistema convertidor la energía térmica ganada.
- En los de discos parabólicos, una clase que tiene particularmente gran potencial, se emplea un receptor y un sistema de generación eléctrica (usualmente un sistema con motor Stirling) montado en el punto focal del disco parabólico. Además de su alta eficiencia, este último sistema ofrece la característica de modularidad; un solo disco puede operar en lugares remotos o muchos discos pueden interconectarse para formar plantas de generación de electricidad de cualquier tamaño.

De acuerdo con Cabanillas (2008), las experiencias a nivel mundial, en la construcción de plantas de torre central inician en los años 80's. Se han construido plantas de torre central en Francia, Israel, Australia, España y Estados Unidos. Actualmente, nuestro país presenta algunas ventajas importantes para el uso de tecnología de torre central; entre estas se pueden destacar las siguientes: insolación, ubicación, extensiones de terreno grandes, recurso humano e infraestructura industrial.

Según Krajewski et al. (2008), la localización de la instalación es el proceso de elegir un lugar geográfico para realizar las operaciones de una empresa. Las opciones de localización pueden tener importancia crucial para las organizaciones y producen un

profundo impacto en la cadena de valor de las mismas. Las tecnologías de información e internet a veces ayudan a superar las desventajas relacionadas con la localización de una compañía. Sin embargo, hay algo que queda muy claro: la localización de las instalaciones de una industria tiene impacto significativo en los costos de operación de la compañía, los precios que ésta cobra por los productos y servicio y la capacidad que tiene para competir en el mercado y penetrar nuevos segmentos de clientes.

Moreno (2008) argumenta que los sistemas de información geográfica (SIG), se han posicionado como una tecnología básica, imprescindible y poderosa, para capturar, almacenar, manipular, analizar, modelar y presentar datos espacialmente referenciados. Se trata, por tanto, de una categoría dentro de los sistemas de información que se especializa en manejar datos espaciales, con las particularidades y requerimientos que ello conlleva.

Un SIG puede hacer mapas y tiene ciertas funciones para dibujar, pero lo específico del SIG reside en rasgos tales como su capacidad para almacenar grandes masas de información georeferenciada o su potencia para el análisis de la misma, que le hacen idóneo para abordar problemas de planificación y gestión, es decir, para la toma de decisiones.

Krajewski et al.(2008) plantean que un SIG también puede integrar diferentes sistemas para crear una representación visual de las opciones de localización de una empresa. Entre otras cosas, se usan para: almacenar bases de datos, mostrar mapas y crear modelos que toman información de conjuntos existentes de datos, aplican funciones analíticas y escriben los resultados en nuevos conjuntos de datos derivados.

De acuerdo con estudios llevados a cabo por Orellana (2009), en la III Región de Atacama, Chile, para la determinación de áreas con potencial para la instalación de plantas termosolares, se consideraron los siguientes criterios y parámetros de localización: radiación solar (sobre los 1,700 KW/h año o 5 KW/h día promedio

anual), pendiente (menor a 3%), altitud (bajo los 2,800 m.s.n.m.), línea de falla (mínimo 3 kilómetros), nubosidad (30 kilómetros desde la línea de costa hacia el interior), usos de suelo (excluir zonas protegidas, áreas urbanas y cuerpos de agua), red hídrica (máxima distancia 50 kilómetros), red eléctrica (máxima distancia 50 kilómetros) y superficie (superficies mayores a 500 hectáreas).

Otra investigación denominada modelo de análisis espacial para la evaluación de la capacidad de acogida del territorio en la ubicación de plantas fotovoltaicas conectadas a red, en la región de Andalucía, España y desarrollada por Arán (2008); el autor plantea los siguientes factores de ubicación a considerar: temperaturas medias anuales diurnas, irradiación solar anual sobre superficie horizontal, irradiación solar difusa, horas equivalentes de sol anuales, ubicación de subestaciones eléctricas, impacto visual, pendientes y orientación.

Actualmente el estado de Sonora es una de las entidades del país que mayor consumo anual de energía eléctrica requiere, en relación con su cantidad de habitantes. Debido a que posee un clima extremoso con altas temperaturas en verano e intensos fríos en invierno (INEGI, 2011). Con estudios realizados en la UNISON, se ha determinado que el estado de Sonora es una de las regiones, no sólo de México sino también del mundo, que cuenta con mayor incidencia de rayos solares (Cabanillas, 2008).

El Dr. Jorge Luis Taddei Bringas de la Academia de Ingeniería Estratégica del Departamento de Ingeniería Industrial de la UNISON, está proponiendo un proyecto de investigación relacionado con las localizaciones con mayor factibilidad en el estado de Sonora, capacidad de generación de energía eléctrica, análisis costo-beneficio de la producción masiva de helióstatos, para la instalación de plantas termosolares tipo torre central en el estado de Sonora. Con este proyecto, se pretende incrementar la capacidad energética del mismo estado en 1GW_e^3 .

³ 1GW_e (Un Giga Watt Eléctrico = 10^9 = 1,000 Megawatts).

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estado de Sonora, es una de las regiones de México y del mundo, que cuenta con mayor incidencia de rayos solares. Por tal característica, se ha decidido instalar y desarrollar unCPHen Hermosillo, Sonora, México. Con la finalidad de concentrar la energía solar por medio de la utilización de la tecnología de torre central. Una de las capacidades que posee una planta termosolar tipo torre central, es la de generar energía eléctrica que puede ser utilizada comercialmente.

En un mediano plazo, se pretende utilizar la tecnología de torre central, para instalar plantas termosolares en el estado de Sonora; donde su principal función sea la generación de energía eléctrica.

Sin embargo, actualmente existe un desconocimiento sobre las localizaciones con mayor factibilidad en el estado de Sonora, que podrán ser utilizadas para instalar plantas termosolares tipo torre central.

1.3. OBJETIVO GENERAL

Determinar las localizaciones con mayor factibilidad en el estado de Sonora, que podrán ser utilizadas para la instalación de plantas termosolares tipo torre central.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer los criterios y parámetros de localización para delimitar las áreas con potencial en el estado de Sonora.
- Aplicar los criterios y parámetros de localización para obtener las localizaciones con potencial en el estado de Sonora.

- Aplicar un método de calificación para determinar las localizaciones con mayor factibilidad y el orden para la instalación de las plantas termosolares tipo torre central, en el estado de Sonora.

1.5. HIPÓTESIS

Es posible determinar localizaciones factibles, que cumplan con los criterios y parámetros fundamentales, para la instalación de plantas termosolares tipo torre central en el estado de Sonora.

1.6. ALCANCES Y DELIMITACIONES

El alcance de esta tesis es únicamente determinar las localizaciones con mayor factibilidad en el estado de Sonora, que podrán ser utilizadas para la instalación de plantas termosolares tipo torre central. Dicha tesis se realizó durante el período de Agosto 2011 – Julio 2012.

Las delimitaciones que se tuvieron para la elaboración de esta tesis, fue la base de datos existente en la UNISON y el Sistema de Información Geográfica (SIG) tipo ArcGIS versión 10, que posee el Departamento de Geología de la misma universidad.

1.7. JUSTIFICACIÓN

Al realizar y concluir satisfactoriamente esta investigación, se estará en condiciones de determinar las localizaciones con mayor factibilidad en el estado de Sonora, para instalar las plantas termosolares tipo torre central que se requieran para asegurar el futuro energético del mismo estado.

La instalación de plantas termosolares tipo torre central en el estado de Sonora traerá grandes beneficios, como incrementar la capacidad de almacenar la energía o la facilidad de hibridación con otros combustibles que permitirán aportar carga base al sistema de generación eléctrica; ello permitirá aumentar el aporte total de las energías renovables y por lo tanto su sostenibilidad.

Potenciar la introducción de este tipo de plantas traerá múltiples consecuencias productivas, como: aumentar el aporte de energías renovables en el sistema de generación de energía eléctrica nacional, conducir a la competitividad nacional con una tecnología que puede ser una pieza clave en la elaboración de un modelo de desarrollo sostenible para México y contribuir a la sostenibilidad mundial. Además, podremos situar a Sonora, México, en una situación privilegiada de cara al despegue de esta tecnología a nivel mundial.

El beneficio más significativo que se obtendrá para la población del estado de Sonora, al instalar comercialmente las plantas termosolares tipo torre central, será la disminución de la contaminación producida por los Gases de Efecto Invernadero (GEI) y los costos de la energía eléctrica para los usuarios, independientemente de los empleos que se generen con el proyecto.

2. MARCO DE REFERENCIA

Este capítulo desarrolla algunos tópicos fundamentales para el desarrollo sustentable de cualquier región o lugar. Entre ellos, se encuentran: el cambio climático, la sustentabilidad energética y los distintos tipos de energías renovables.

Posteriormente se abordan algunos tópicos relacionados con la energía solar, como son: la radiación solar en México, la energía solar térmica de concentración y sus requisitos, los distintos tipos de tecnologías de concentración solar y la comparación entre ellas mismas, las plantas termosolares tipo torre central a nivel mundial, la primera planta termosolar tipo torre central comercial a nivel mundial y los proyectos de energía solar en México.

En la parte final de este capítulo, se abordan los diferentes métodos de localización de instalaciones de servicio y el área de estudio (estado de Sonora).

2.1. CAMBIO CLIMÁTICO

Actualmente, una de las mayores preocupaciones a nivel mundial, es el denominado “Cambio Climático” (CC). El cual es definido por Vargas (2009), como una modificación identificable y persistente del estado del clima por variabilidad natural o por efecto de la actividad humana. En la actualidad se viene usando este término para referirse al acelerado calentamiento que se viene produciendo en la superficie terrestre, como resultado de una mayor acumulación de GEI.

De acuerdo con Taddei y Luna (2010), las causas naturales que provocan el CC, son: las variaciones solares, las variaciones de la órbita terrestre y el impacto de meteoros, la deriva continental y la composición atmosférica. Por otro lado, las causas antropogénicas (actividades humanas) que provocan el CC, son: la deforestación de bosques, la producción de gases que, en teoría, generan efecto invernadero: CO₂, de centrales termoeléctricas -que utilizan combustibles fósiles- y de grandes plantas industriales como las siderúrgicas, refinerías, cementeras,

papeleras y medios de transporte (vehículos motorizados) e incendios forestales, así como metano en granjas de ganadería intensiva y arrozales.

Según Ruiz y Cruz (2004), los GEI se dividen en gases de efecto directo e indirecto. Los GEI directo son el bióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y los halocarbonos. Entre los halocarburos se encuentran los clorofluorocarbonos, como el freón (CCl_2F_2) y los hidroclorofluorocarbonos como el HCFC-21. Los compuestos de efecto invernadero indirecto son los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO), el bióxido de azufre (SO_2) y los compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM).

Los GEI son esenciales para la vida en la Tierra, pues hacen que parte del calor emitido por el Sol quede atrapado manteniendo una temperatura media global de 15°C , pues absorben el calor generado por el Sol (fotones infrarrojos), reteniéndolo dentro de la atmósfera, generando lo que se conoce como “Calentamiento Global” (CG). El problema actual se ha generado por la exagerada presencia de estos gases, ocasionando el aumento de la temperatura del aire y de la superficie terrestre más allá de los niveles normales (Colque y Sánchez, 2007).

Los mismos autores definen el término CG, como uno de los más grandes problemas del siglo XXI, con consecuencias económicas, sociales y ambientales de gran magnitud. El CG no es más que el incremento de la temperatura promedio de la Tierra, debido principalmente a la sobre acumulación de GEI en la atmósfera; los cuales son producidos principalmente por la actividad humana, provocando que gran cantidad (por encima de lo normal) de la energía solar emitida por la Tierra se vea atrapada dentro de esta capa de gases.

Cuatecontzi y Gasca (2004), señalan que el primer esfuerzo mundial para abordar la problemática referente al CC, fue el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (PICC), cuya función era evaluar la información científica disponible sobre el mismo, valorar los impactos ambientales y socioeconómicos del CC, y formular estrategias de respuesta. El primer Grupo de Trabajo del PICC se reunió en 1996,

para la elaboración de los Inventarios Nacionales de GEI, con el fin de asegurar que los que se sometan a la consideración de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), sean consistentes y comparables.

Posteriormente, en 1997 se aprobó el texto del Protocolo de Kioto (PK) de la CMNUCC, mediante el cual se controlarán las emisiones de seis GEI: bióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFCS), perfluorocarbonos (PFCS) y hexafluoruro de azufre (SF₆).

El PK entró en vigor el 16 de febrero de 2005 con la participación de México y otros 140 países. El PK prevé una reducción de GEI a un nivel inferior en no menos de 5% al de 1990, en el período de compromiso comprendido entre el año 2008 y el 2012 (Díaz, 2008).

Delakowitz (2010) menciona que en 1992, en New York, se originó la CMNUCC, que es una búsqueda para crear conciencia ambiental y mecanismos de regulación internacional sobre las actividades industriales. Esta Convención ha realizado 16 reuniones, que son las asambleas para la exposición de argumentos y la toma de decisiones, llamadas Conferencias de las Partes (COP, por sus siglas en inglés).

La COP 15 se realizó en Copenhague en 2009, resultando en un fracaso ante las expectativas del público, ya que se esperaba la firma de un nuevo protocolo que reafirmara el espíritu del que se firmó en Kioto en 1997.

La COP 16 se llevó a cabo en la ciudad de Cancún, México, en diciembre de 2010. Los acuerdos de Cancún fueron aceptados por todos los países con excepción de Bolivia. Los acuerdos más importantes que se lograron, fueron en los terrenos de financiamiento y deforestación. La próxima COP 17 se efectuará en diciembre de 2011, teniendo como sede Sudáfrica (Labarthe, 2010).

Según Platt (2010), México se encuentra en el puesto 14 de una lista de 25 países con mayores emisiones de GEI. Para esto, el gobierno mexicano ha comenzado a tomar acciones para reducir su impacto sobre las concentraciones de GEI en la atmósfera. Para abril de 2008 México ya contaba con un programa especial de reducción de GEI, el cual incluye la mejora en la eficiencia energética de las plantas de generación eléctrica, la utilización de energías renovables y programas de concientización ciudadana sobre el tema.

En el estado de Sonora, las emisiones de GEI, al igual que a escala nacional y global, provienen principalmente del sector energético y del transporte, ya que éstas son las áreas de mayor consumo de combustibles fósiles.

Las energías alternativas, como es el caso de las energías renovables, pueden desempeñar un papel importante para disminuir la problemática del CG (García, 2008). De acuerdo con Jara (2006), las energías renovables se caracterizan porque, en sus procesos de transformación y aprovechamiento en energía útil, no se consumen ni se agotan en una escala humana de tiempo. Entre estas energías están: la hidráulica, la solar (térmica y fotovoltaica), la eólica y la de los océanos. Además, dependiendo de su forma de explotación, también pueden ser catalogadas como renovables aquellas provenientes de la biomasa y de fuentes geotérmicas.

2.2. SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA

Como lo menciona Llamas (2005), fue en 1987 cuando por primera vez el concepto de desarrollo sostenible quedó recogido en un documento oficial por Gro Harlem Brundtland, ex Primera Ministra Noruega, que labora para las Naciones Unidas. El informe fue llamado “Nuestro Futuro Común”, conocido también como “Informe Brundtland” donde se daba la siguiente definición de desarrollo sustentable: “el desarrollo sustentable es aquel que satisface las necesidades de la generación

presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”.

Considerando el término sustentabilidad, García (2008) menciona que las diversas perspectivas de la sustentabilidad desarrolladas por las distintas ciencias sociales (como la economía, sociología, geografía y otras) y la ingeniería industrial, no han alcanzado todavía un estatus teórico y metodológico que permita conocer las necesidades de las generaciones presentes, mucho menos de las futuras.

Independientemente de las críticas que pueden realizarse a las diferentes perspectivas que abordan el concepto de desarrollo sustentable, la discusión de fondo en todas radica en encontrar una integración de objetivos económicos, sociales y ambientales (figura 2.1).

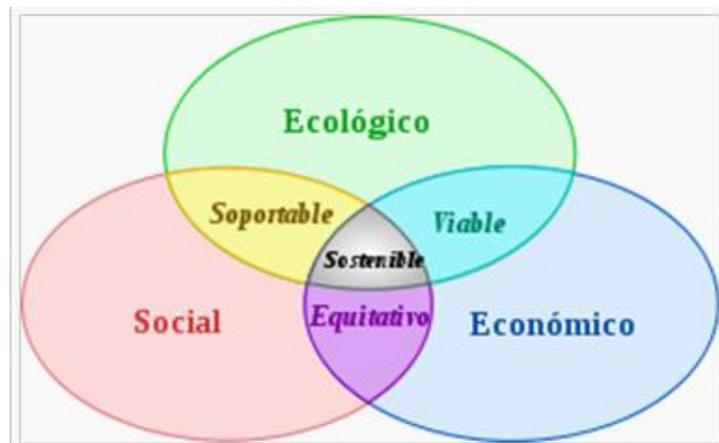


Figura 2.1. Dimensiones del desarrollo sustentable.

Considerando este mismo contexto, parece prudente utilizar el concepto de sustentabilidad energética, el cual es definido por CEPAL, OLADE y GTZ (2003) como el aporte que hace el sector energético a la sustentabilidad del desarrollo. Por lo tanto, la trilogía conceptual de la sustentabilidad energética estaría integrada entonces, como se puede observar en la figura 2.2 de la página siguiente, la cual muestra esquemáticamente cómo la energía cruza cada una de las dimensiones (García, 2008).

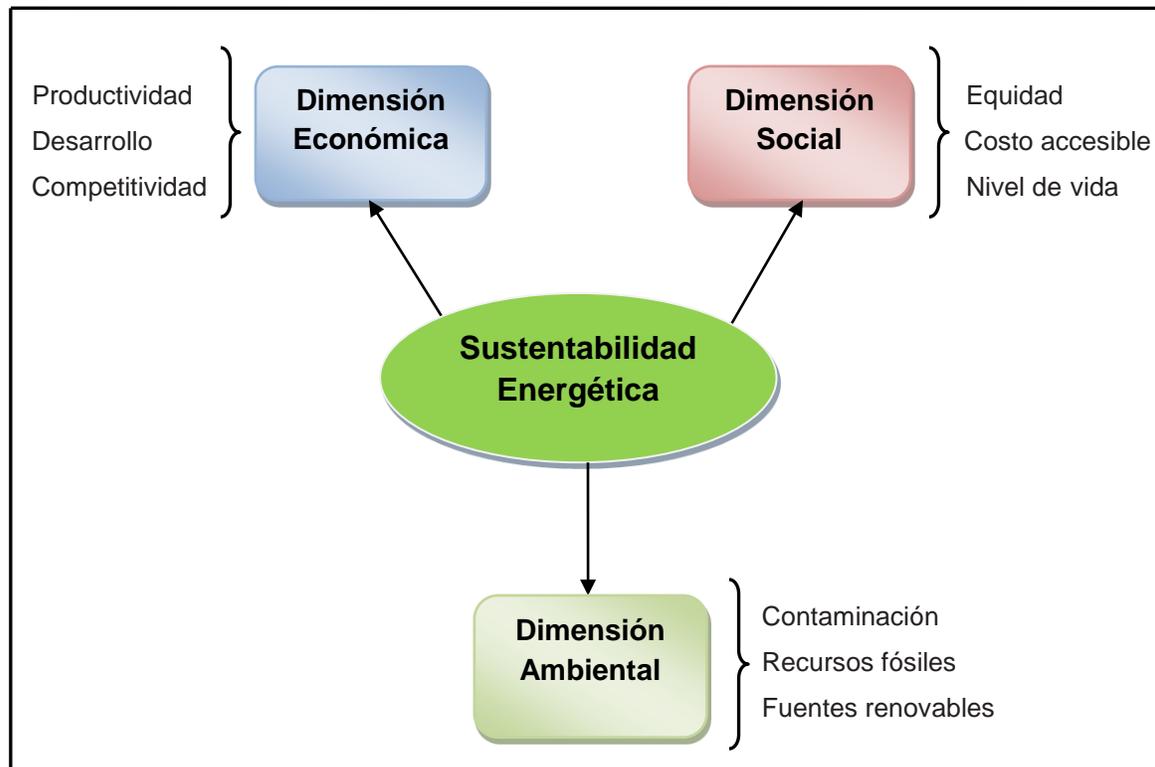


Figura 2.2. Dimensiones de la sustentabilidad energética.

Fuente: CEPAL, OLADE y GTZ, 2003.

El mismo autor toma como base los objetivos y alcances de la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables en México (LAER)⁴, para presentar las siguientes ideas respecto a las energías renovables en la política energética nacional:

En lo económico, la energía representa un elemento indispensable para todos los sectores productivos; pero si se pretende que las energías renovables cumplan con las expectativas de la dimensión económica de la sustentabilidad, deben ser competitivas en sus costos de producción y seguras en su suministro. Por lo tanto, las energías renovables presentan su lado más débil cuando se toma en cuenta sólo la dimensión económica.

⁴ Iniciativa de ley presentada el 13 de agosto de 2008 ante el Congreso de la Unión en México.

En lo social, la energía constituye un elemento que propicia una mayor calidad de vida en la población. El punto aquí es conocer si efectivamente los nuevos desarrollos tecnológicos en energías renovables pueden propiciar servicios de energía confiables y a precios accesibles para la población, de tal manera que se alcance una mayor equidad social en los usos energéticos.

En lo ambiental, el tipo de energía utilizada tiene repercusiones muy importantes a escala local y global. El modelo energético actual de México, está caracterizado por el uso excesivo de recursos fósiles, situación que produce la emisión de diversos tipos de contaminantes que afectan al medio ambiente a escala local y global. El uso más intensivo de fuentes de energía renovable tiene en este campo su principal fortaleza.

2.3. ENERGÍA

La energía es una propiedad asociada con la capacidad de realizar trabajo. Entre más energía posea un objeto, mayor será el trabajo que pueda realizar. Toda energía cae dentro de una de las tres categorías generales: energía cinética, energía potencial y energía de la masa en reposo. Las unidades de energía son las mismas que las de trabajo, es decir: el joule y el pie-libra (Beiser, 1990).

Existen diferentes tipos de energía, como lo son: energía química, energía nuclear, energía eléctrica y energía térmica o, como se llama en el lenguaje común, energía calorífica. Esta energía se encuentra presente en todos los objetos (Bueche, 1993).

2.4. ENERGÍAS RENOVABLES

El desarrollo acelerado de nuestra sociedad actual, comparada con la de hace pocas décadas, es cada vez más intensiva en el uso de energía para satisfacer sus necesidades y todo parece indicar que esta tendencia continuará en el futuro (Jara, 2006).

De acuerdo con el mismo autor, dependiendo de su forma de aprovechamiento, las Energías Renovables (ER) pueden generar impactos ambientales significativamente inferiores que las fuentes convencionales de energía. Además, las ER pueden contribuir a los objetivos de seguridad de suministro y sostenibilidad ambiental de las políticas energéticas. La magnitud de dicha contribución y la viabilidad económica de su implantación, dependen de elementos particulares en cada país, tales como el potencial explotable de los recursos renovables, su localización geográfica y las características de los mercados energéticos en los cuales competirán.

Las energías renovables a nivel mundial representan el 19.1% de la generación eléctrica (figura 2.3). La participación de las energías fotovoltaica, solar, eólica y la bioenergía ha crecido rápidamente en los últimos años, efecto que se atribuye a las inversiones en investigación y desarrollo que se iniciaron hace más de tres décadas (IEA⁵, 2011).

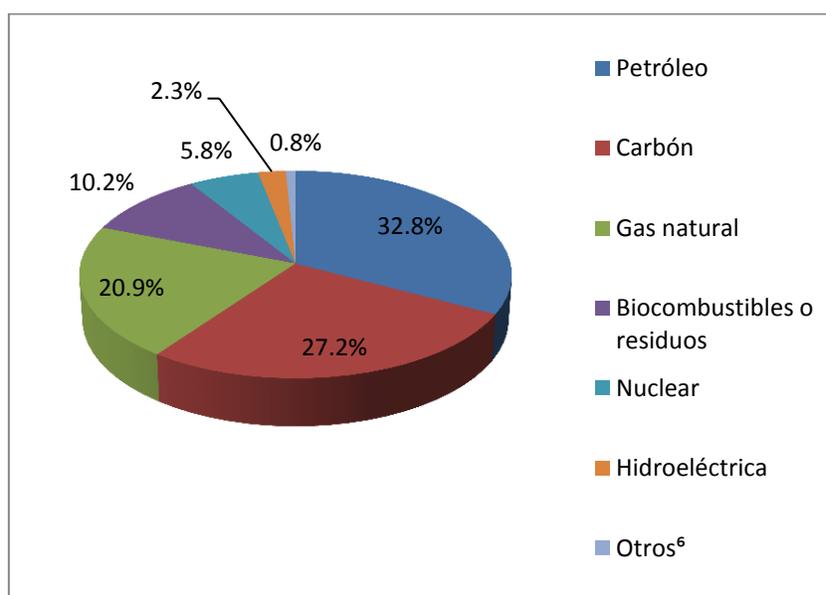


Figura 2.3. Participación mundial de la generación eléctrica.

Fuente: IEA, 2011.

⁵ IEA (por sus siglas en inglés), Agencia Internacional de Energía.

⁶ Otros incluyen: solar, eólica, geotérmica y del mar.

Según Jara (2006), los diferentes tipos de tecnologías relacionadas con el desarrollo de las ER, son: energía hidráulica, energía minihidráulica, energía eólica, energía geotérmica, energía de la biomasa, energía del mar y energía solar. A continuación se presenta un resumen acerca de los diferentes tipos de ER que existen en la actualidad, desde la perspectiva del mismo autor.

2.4.1. Tipos de Energías Renovables

A continuación se enlistan los distintos tipos de ER:

- **Energía Hidráulica**

Actualmente, la energía hidráulica es la de mayor desarrollo en la mayoría de los países. El proceso de generación de potencia eléctrica en una planta hidroeléctrica, inicia con el embalsamiento de agua. Posteriormente, el agua con su potencia hidráulica disponible, pasa por una turbina, la cual la transforma en potencia mecánica y ésta a través de un generador, es transformada en potencia eléctrica. Desde ahí pasa a los transformadores, para luego iniciar su viaje a los centros de consumo (figura 2.4).

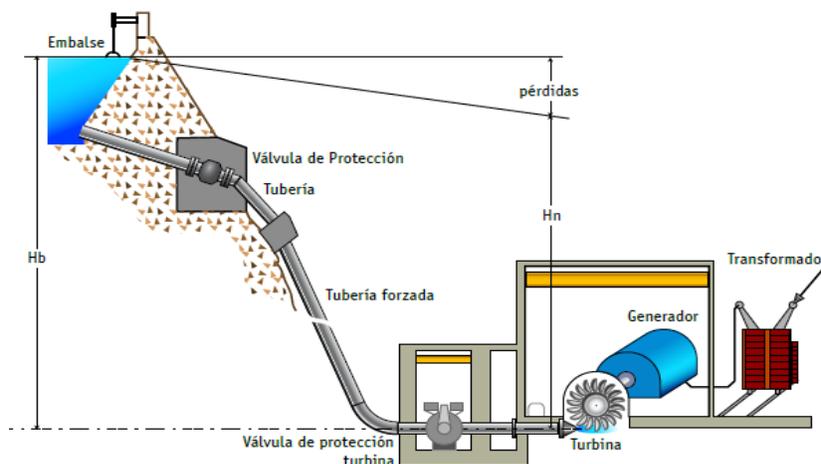


Figura 2.4. Esquema de una planta hidroeléctrica.

En relación con los aspectos ambientales de las plantas hidroeléctricas, los impactos que las actividades pueden generar en el medio ambiente se presentan en las etapas de construcción y operación de las instalaciones.

- **Energía Minihidráulica**

Frente a lo presentado anteriormente, se puede pensar en instalaciones de pequeña escala (miniplantas) que no requieren grandes instalaciones y -por ende- su impacto ambiental es mínimo. No existe un criterio único para definir el rango de las miniplantas, en algunos países son hasta 5 MW, en otros 10 MW (figura 2.5).



Figura 2.5. Miniplanta hidráulica.

La energía minihidráulica puede ser una buena alternativa de suministro de electricidad en comunidades aisladas de los países en desarrollo. Además, las miniplantas hidráulicas pueden proporcionar otros servicios a las comunidades, como es el caso del suministro de agua para usos sanitarios o para la agricultura.

- **Energía Eólica**

La energía cinética del viento puede transformarse en energía útil, tanto mecánica como eléctrica. La energía eólica, transformada en energía mecánica ha sido históricamente aprovechada, pero su uso para la generación de energía eléctrica es más reciente.

En el desarrollo actual de la energía eólica y el diseño de aerogeneradores, se consideran áreas de interés aquellas que presentan velocidades medias del viento entre 6 m/s y 12 m/s. En relación con la producción de energía eléctrica, los diseños más utilizados corresponden a los aerogeneradores de eje horizontal de tres palas (figura 2.6).



Figura 2.6. Aerogenerador de eje horizontal de tres palas.

La energía eólica es una opción limpia, pero la instalación de un parque (granja eólica) puede producir un impacto ambiental que es necesario evaluar de acuerdo a las condiciones del entorno, tanto físico, biológico y social.

- **Energía Geotérmica**

La energía geotérmica, como su nombre lo indica, es energía calorífica proveniente del núcleo de la Tierra, la cual se desplaza hacia la superficie terrestre a través de las fisuras existentes en las rocas sólidas y semisólidas del interior de la Tierra.

En general, son tres los tipos de plantas geotérmicas, cuya elección de tecnología y tamaño depende fundamentalmente de las condiciones del yacimiento geotérmico y de los recursos disponibles. Estos tipos de plantas corresponden a: unidades a contrapresión, unidades a condensación y unidades de ciclo binario. Los países con

mayor aplicación de la energía geotérmica son: Estados Unidos, Filipinas, Nueva Zelanda, Indonesia, Italia, Japón y México (figura 2.7).



Figura 2.7. Planta Geotermoeléctrica Cerro Prieto, Baja California, México.

En cuanto a la contaminación atmosférica que una planta geotermoeléctrica puede producir, son las emisiones de gases de CO₂ y pequeñas cantidades de gas sulfhídrico (H₂S).

- **Energía de la Biomasa**

Por biomasa se entiende el conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma. La biomasa se usa principalmente como combustible para los medios de transporte, establecimientos industriales (por ejemplo, plantas de cogeneración, figura 2.8) y en el sector doméstico para calefacción, cocina y agua caliente.

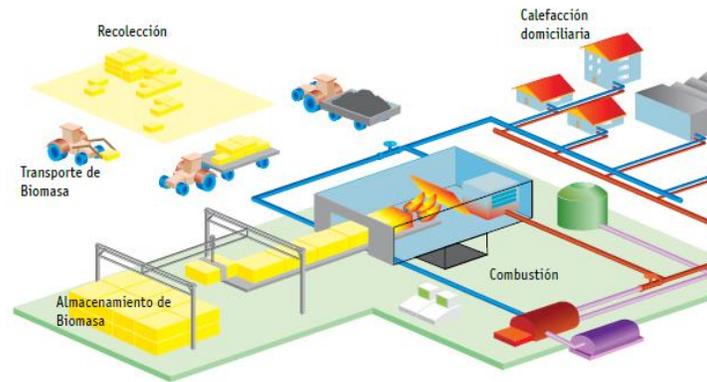


Figura 2.8. Planta de cogeneración (calor y energía eléctrica).

Como aplicación en la generación de electricidad, la energía contenida en la biomasa se puede utilizar para accionar diferentes turbinas de vapor, motores diesel o motores de combustión externa Stirling.

Con respecto a los aspectos ambientales, la utilización de la biomasa con fines energéticos tiene las siguientes ventajas ambientales: disminución de las emisiones de CO₂ y contaminantes sulfurados o nitrogenados (precursores de la lluvia ácida).

- **Energía del Mar**

El aprovechamiento de la energía del mar puede ser de tres tipos: energía de las mareas (mareomotriz), energía de las olas y energía térmica oceánica. La explotación de esta energía es antigua, aunque la producción de electricidad no se encuentra desarrollada, más allá de casos puntuales.

Las principales ventajas de obtener energía eléctrica del mar es su carácter renovable, no emite contaminantes o residuos durante la explotación y presenta baja agresividad con el medio natural.

A continuación se enlistan los distintos tipos de energías del mar:

- **Energía de las Mareas (Mareomotriz)**

Para generar energía eléctrica a partir de las mareas se requiere construir un dique que almacena agua convirtiendo la energía potencial de ésta en electricidad por medio de una turbina. La energía producida es proporcional a la cantidad del agua desalojada y a la diferencia de altura existente.

La primera gran planta mareomotriz para la producción de energía eléctrica comercial se construyó en 1967 en el estuario de Rance, Francia (figura 2.9). Se construyeron después tres plantas experimentales, en 1968 en Murmansk, en el mar de Barents, en 1983 en Jiangxi, China, y en 1984 en Anápolis, Canadá.



Figura 2.9. Central Mareomotriz en Rance, Francia.

Las ventajas de esta fuente de energía es que es una fuente muy abundante y renovable, y además es una energía limpia que no genera GEI. Entre los inconvenientes cabe destacar que no es una tecnología desarrollada y que las labores de instalación y mantenimiento son complejas y costosas.

- **Energía de las Olas**

Las olas (figura 2.10) se forman por la acción del viento, después crecen y se entremezclan en el mar. La altura de las olas es variable según los océanos. Las distribuciones geográficas y temporales de los recursos energéticos de las olas están

controladas por los sistemas de viento que las generan (tormentas, alisios y monzones).



Figura 2.10. Las olas.

La tecnología de conversión de movimiento oscilatorio de las olas en energía eléctrica, se fundamenta en que la ola incidente crea un movimiento relativo entre un absorbedor y un punto de reacción que impulsa un fluido a través del generador.

Actualmente, se puede nombrar el Convertidor de Kvaener de Noruega, basado en la columna de agua oscilante, con una potencia instalada de 500 kW que abastece de energía eléctrica a unas cincuenta viviendas. También, existe la planta hindú de Wizhinja con una potencia de 150 kW y la planta japonesa de Sanaka, con una potencia de 60 kW.

- **Energía Térmica Oceánica**

La conversión de energía térmica oceánica es un método para transformar en energía útil la diferencia de temperatura entre el agua de la superficie y el agua que se encuentra a 100 m de profundidad. En las zonas tropicales esta diferencia varía entre 20 y 24 °C. Para el aprovechamiento energético es suficiente una diferencia de 20°C. Existen dos tipos de sistemas para el aprovechamiento de esta fuente de energía: sistemas de circuito abierto y cerrado.

En 1979, cerca de las islas Hawai, comenzó a funcionar una Mini-OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) con potencia máxima de 53 kW (figura 2.11).



Figura 2.11. Planta Mini-OTEC, cerca de las costas de Hawai.

La energía térmica de los océanos es una técnica que produce entusiasmo y, a la vez, oposición. Los que se alinean a su favor la ven como una aplicación provechosa de una fuente abundante, y los que se oponen esgrimen el costo de sus fallas técnicas.

- **Energía Solar**

En estricto rigor, las energías renovables tienen su origen en la energía solar; es decir, la energía eólica, geotérmica, mareomotriz, e incluso la biomasa, son aprovechamientos indirectos de la energía aportada por el Sol.

La energía solar puede ser pasiva o activa. La primera se caracteriza por hacer uso de la luz y el calor del Sol captándolos, almacenándolos y distribuyéndolos de forma natural, sin necesidad de elementos mecánicos. Una aplicación de este tipo de energía solar, es lo que hoy se conoce como arquitectura bioclimática (figura 2.12).



Figura 2.12. Aplicaciones de la energía solar a la arquitectura de una vivienda.

La segunda, la activa, consiste en el uso de la luz y el calor del Sol mediante procedimientos técnicos, que permiten captarla, almacenarla y transmitirla a otros usos derivados. Las aplicaciones en este concepto pueden ser para bajas y altas temperaturas.

La tecnología solar activa de baja temperatura basada en colectores de placa plana es la más desarrollada. Se utiliza en aplicaciones que requieren temperaturas inferiores a los 50-60°C. El sistema está constituido por un colector que capta la radiación, un subsistema de almacenamiento, un sistema de transporte de energía (tuberías, bombas, intercambiadores) y otro de utilización (consumo) de la energía solar captada. Un ejemplo de esta tecnología se presenta en la figura 2.13.



Figura 2.13. Tecnología solar activa de baja temperatura.

La tecnología solar activa de media y alta temperatura está menos desarrollada. En efecto, apartir de los 80°C la eficiencia de los colectores solares de placa plana es baja, y por ello es necesario el uso de otro tipo de colectores, por ejemplo, cilíndricos parabólicos (figura 2.14). Además, para temperaturas altas se precisa mayor cantidad de radiación solar y, por lo tanto, una mayor concentración de ésta, así como la utilización de nuevos elementos para conseguirlo. Estos elementos son costosos y todavía están en proceso de desarrollo.

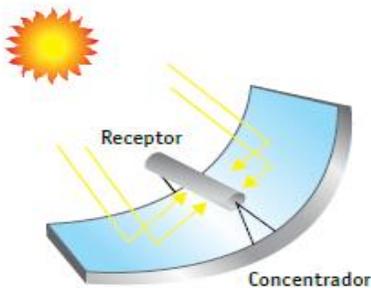


Figura 2.14. Colector cilíndrico parabólico.

Últimamente se han desarrollado las tecnologías de los concentradores de disco parabólico con motor (combustión externa) Stirling, especiales para su aplicación en zonas aisladas, los sistemas de helióstatos con concentración en torre central y los concentradores lineales de Fresnel. Las figuras 2.15, 2.16 y 2.17 muestran estas tres últimas tecnologías.

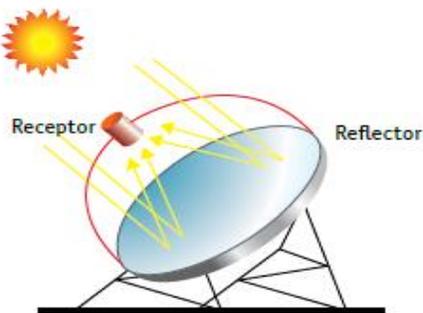


Figura 2.15. Concentrador de disco parabólico con motor Stirling.

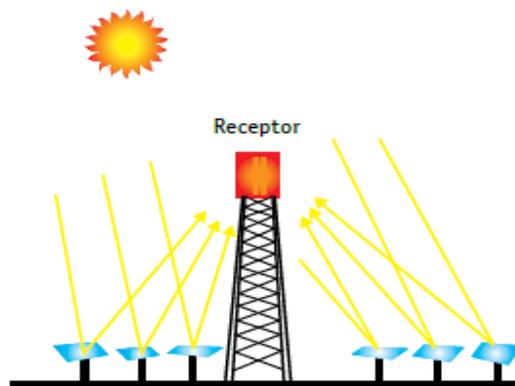


Figura 2.16. Concentrador en torre central y sistema de helióstatos.

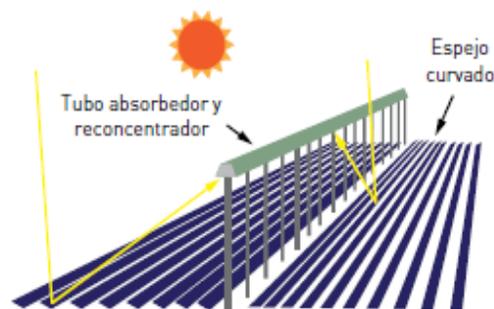


Figura 2.17. Concentrador lineal de Fresnel.

La energía solar ofrece dos formas de producción de electricidad: térmica y fotovoltaica. La primera se basa en la concentración de la radiación solar, a fin de llevar un fluido a suficiente temperatura para accionar motores (turbinas) térmicos que van acoplados a generadores eléctricos. En este tipo de utilización juegan un papel relevante las tecnologías indicadas precedentemente.

También se han desarrollado sistemas híbridos, que combinan dos sistemas: uno tradicional, sobre la base de un combustible convencional, más el vapor, proveniente de una fuente solar activa de alta temperatura, que conforman lo que se conoce como ciclo combinado.

La energía solar fotovoltaica consiste en la conversión directa de la radiación solar en electricidad mediante sistemas fotovoltaicos. Un sistema fotovoltaico (figura 2.18) está formado por las células solares (que transforman la luz en electricidad), un acumulador, un regulador de carga (que impide que llegue más energía al acumulador cuando ha alcanzado su máxima carga) y un sistema de adaptación de corriente (que adapta a la demanda las características de la corriente generada). Es importante la posición de las células o paneles fotovoltaicos, que deben estar inclinados y orientados de forma determinada, con el fin de aprovechar al máximo la radiación solar a lo largo del año.



Figura 2.18. Sistema fotovoltaico.

Una ventaja importante de los sistemas fotovoltaicos es que no necesitan estar conectados a la red de distribución eléctrica, ya que generan la electricidad en el mismo lugar de consumo. Por esta razón, los paneles solares fotovoltaicos se utilizan -preferentemente- en lugares de difícil acceso a la red eléctrica, tales como repetidoras de radio y TV, sistemas de bombeo, iluminación, faros y, sobre todo, en zonas aisladas (zonas rurales, refugios de montaña y otros). La electricidad obtenida mediante los sistemas fotovoltaicos puede usarse en forma directa o bien ser almacenada en baterías, para utilizarla durante la noche.

La radiación solar es una forma de energía de baja concentración. Fuera de la atmósfera, la intensidad de radiación oscila entre 1,300 y 1,400 W/m². Las pérdidas en la atmósfera por absorción, reflexión y dispersión la reducen un 30%. Si las condiciones climatológicas son buenas, es posible llegar a tener 1,000 W/m². La radiación solar en el mundo (figura 2.19) varía según la ubicación geográfica y se encuentra concentrada con los mayores potenciales en los desiertos (Sahara, Atacama, Gobi, Altar, entre otros). México es un país con alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio; la zona norte es de las más soleadas del mundo (Hermosillo, 1995).

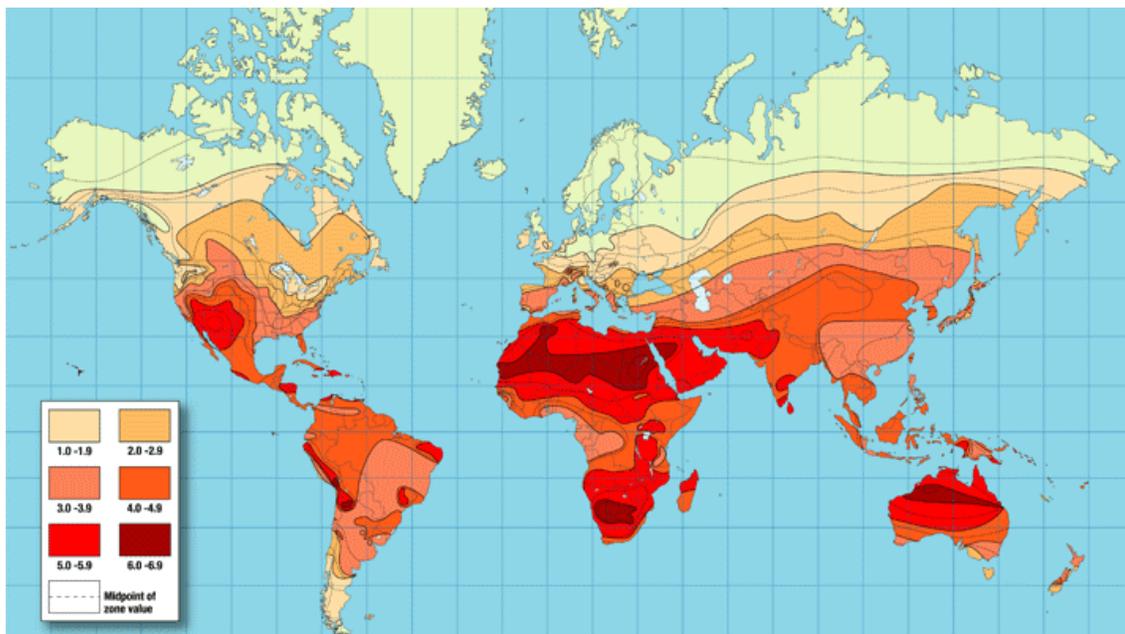


Figura 2.19. Potencial solar en el mundo.

En cuanto a los aspectos ambientales de la energía solar térmica (sistemas pasivos y activos), cabe indicar como aspecto positivo la desaparición de todos los impactos relacionados con los combustibles fósiles.

Como aspecto negativo se tiene el impacto visual. En el caso de energía solar pasiva, la introducción de nuevos elementos en el edificio no suele dar lugar a efectos

negativos; en cambio, con los paneles de energía solar activa se pueden producir efectos visuales no deseados, los cuales se pueden enmascarar o reducir adaptando estos elementos a su entorno. También en estos últimos es importante tener presente la superficie que ocupan las instalaciones.

2.5. EL SOL

Sobre la constitución del Sol hay una diversidad de conceptos interesantes. En la antigüedad, Ptolomeo calificó sencillamente al Sol de bola de fuego. El concepto actual es que el Sol es, en esencia, una bola o esfera de gas que contiene en sus capas exteriores un 75% de hidrógeno, 23% de helio y una cantidad residual de otros gases incandescentes. En realidad, es el horno luminoso de mayor potencia que conocemos (Rau, 1984).

De acuerdo con Guillén (2004), para fines de aprovechamiento de su energía, el Sol (figura 2.20) es una inmensa esfera de gases a alta temperatura, con un diámetro de 1,400,000 km, situado a la distancia media de 15×10^7 km con respecto a la Tierra. Se calcula que la temperatura en el interior del Sol debe ser de aproximadamente 60×10^6 °C, pero en la fotosfera, es decir, en la superficie externa del Sol, la temperatura es del orden de los 6000 °C.

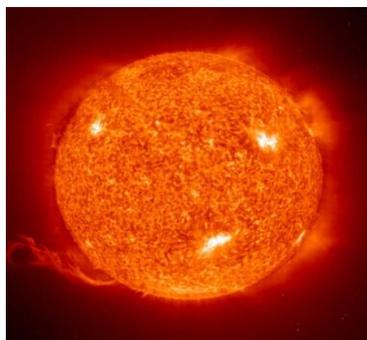


Figura 2.20. El Sol, fuente ilimitada de energía.

A continuación se presentan las características particulares del Sol:

| FICHA DESCRIPTIVA DEL SOL | |
|--|---|
| Masa: 2.2×10^{27} ton | 334,000 veces mayor que la Tierra |
| Diámetro: 1,400,000 km | 110 veces el de la Tierra |
| Distancia media Tierra-Sol: 15×10^7 km | Esta distancia constituye 1 UA (Unidad Astronómica) |
| Propiedades del núcleo: Produce 90% de la energía, diámetro 320,000 km, formado por hidrógeno y helio, 60 millones de grados Celsius. | |
| Zona de radiación: Transmite la energía originada en el núcleo 130,000 °C. | |
| Fotosfera: Formada por gases ionizados a 6000 °C aproximadamente. Se producen los fenómenos más característicos del Sol: protuberancias, manchas solares, viento solar, etc. | |
| Cromosfera: Altura 10,000 km. Temperatura superior a la fotosfera. | |
| Corona solar: Espesor 1,000,000 km. Temperatura aproximada a 1,000,000 °C. | |

Tabla 2.1. Ficha descriptiva del Sol.

Fuente: Guillén, 2004.

La radiación recibida fuera de la atmósfera terrestre es de $1,353 \text{ W/m}^2$, por lo que este valor recibe el nombre de constante solar extraterrestre. La radiación recibida en la superficie terrestre es del orden de $1,000 \text{ W/m}^2$. La disminución de la radiación se produce por el paso a través de la atmósfera, interviniendo fundamentalmente tres factores: gases atmosféricos, vapor de agua y polvo.

Se calcula que el Sol brillará 5,000 millones de años más, por lo que, al menos mientras el ser humano viva en la Tierra y mucho más, no tendrá cambios importantes. La energía solar es aprovechable térmicamente (calentando materiales sólidos, líquidos y gases) o fotovoltaicamente (generando electricidad mediante paneles especiales).

Sabady (1983) argumenta que el aprovechamiento del Sol como fuente de energía sólo es posible si volvemos a tener en cuenta las leyes de la naturaleza. La máxima ley natural sobre nuestra Tierra es el Sol. Sus radiaciones son las únicas que hacen posible la vida sobre el planeta. Son ellas las que determinan todos los procesos naturales imprescindibles para nuestra vida, como la lluvia, el viento, la fotosíntesis, las corrientes marinas y otros muchos más. Estas radiaciones determinan también unívocamente el funcionamiento de las instalaciones solares.

2.6. RADIACIÓN SOLAR EN MÉXICO

De acuerdo con Cabanillas (2008), México presenta altos valores de Radiación Solar Global, estos se encuentran en la franja de 1700 a más de 2100 kWh/m², que son de los valores más altos del mundo. Si se comparan los valores anteriores, por ejemplo con los valores de los países europeos, se tiene mínimo el 25% de mayor cantidad de radiación solar disponible (figura 2.21).

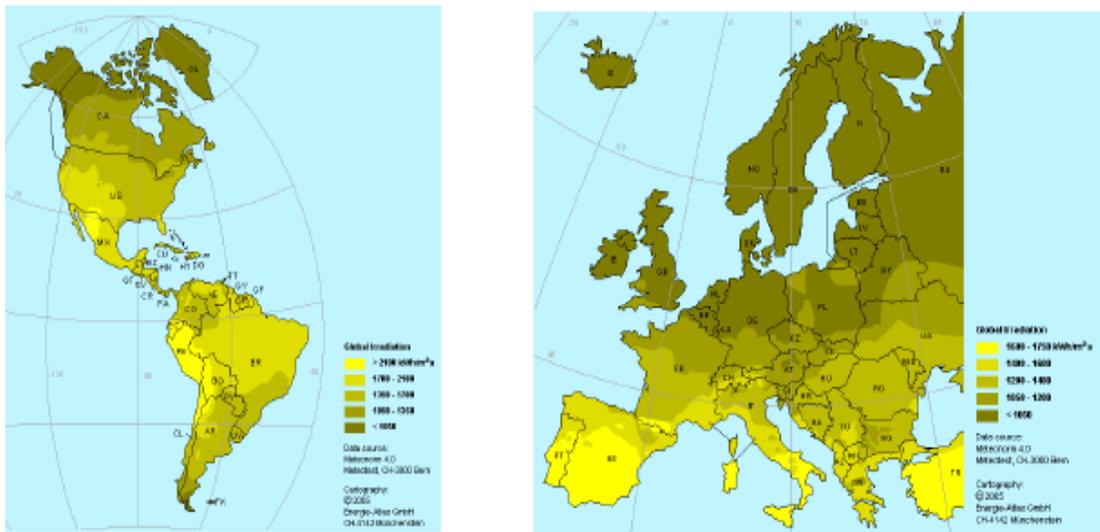


Figura 2.21. Mapas de radiación solar global, para América y Europa.

El mismo autor menciona que, en términos de Radiación Directa Normal (RDN), México también presenta valores muy convenientes para la explotación del recurso solar usando tecnología de concentración solar. En la figura 2.22, se presenta el mapa de Norteamérica con la cantidad de RDN, donde se puede observar que más de la mitad del país es susceptible de utilizar la RDN.

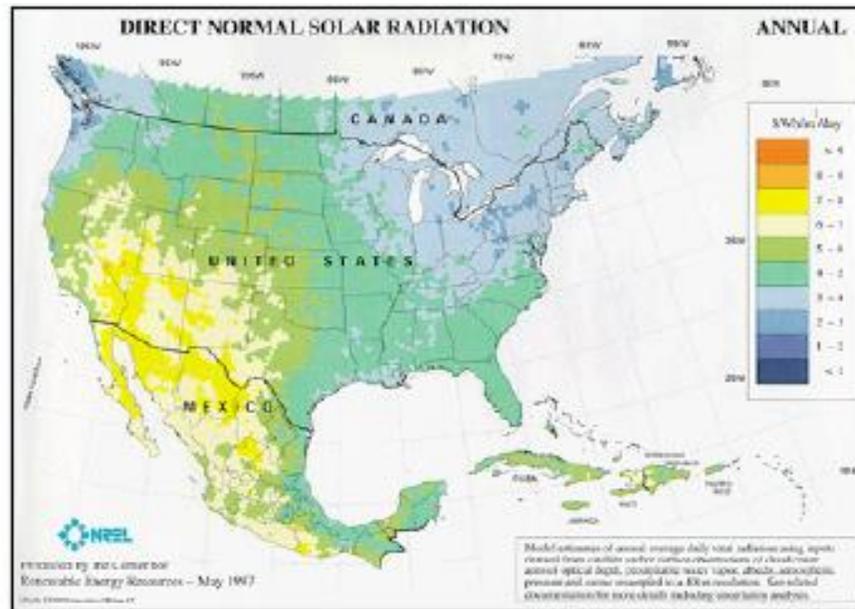


Figura 2.22. Mapa de la RDN en Norteamérica.

2.7. ENERGÍA SOLAR TÉRMICA DE CONCENTRACIÓN

De acuerdo con Richter et al. (2009), los sistemas de energía solar térmica de concentración (ESTC) producen calor o electricidad mediante el uso de cientos de espejos que concentran los rayos del sol a unas temperaturas que oscilan entre 400 y 1,000°C. Existe una gran variedad de formas de espejos, métodos de seguimiento solar y de generar energía útil, pero todos ellos funcionan bajo el mismo principio.

En la actualidad, una planta de energía solar térmica de concentración tiene una potencia entre 50 y 280 MW y aún podría ser mayor. Estas plantas solares pueden

integrarse con almacenamiento o en una operación híbrida con otros combustibles, y ofrecen una potencia firme y energía despachable a demanda. Son aptas para cargas punta y cargas base, y la electricidad generada se inyecta generalmente a la red eléctrica.

LaESTC es una forma viable desde el punto de vista comercial y, a gran escala, de generar electricidad. Es más aconsejable para aquellas áreas del mundo con más horas de sol: los países del sur de Europa, norte de África y Oriente Medio, partes de la India, China, el sur de Estados Unidos y Australia.

2.7.1. Requisitos para la ESTC

Según Richter et al. (2009), la energía termosolar utiliza la luz solar directa, denominada radiación directa o radiación directa normal. Se trata de la luz solar que no es desviada por nubes, humo o polvo suspendido en la atmósfera y que llega a la superficie terrestre en rayos paralelos para su concentración.

Los lugares más idóneos deben tener muchas horas de sol directo, al menos 2,000 kWh/m²-año de radiación solar. Las mejores instalaciones reciben más de 2,800 kWh/m²-año. Por lo tanto, se consideran como las mejores regiones aquellas sin mucha humedad atmosférica, polvo o humo, como estepas, zonas de matorral, sabanas, semi-desiertos y auténticos desiertos, localizados idealmente a menos de 40 grados de latitud norte o sur.

En esas regiones es suficiente un kilómetro cuadrado de terreno para generar hasta 100-130 Giga Watts hora (GWh) de energía solar por año, utilizando tecnología termosolar. La cual funciona de acuerdo a la figura 2.23 que se presenta en la página siguiente.

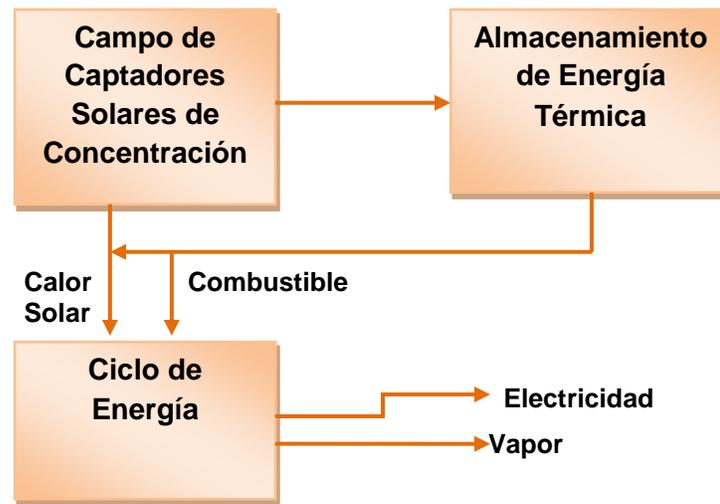


Figura 2.23. Esquema de funcionamiento de la tecnología termosolar.

Fuente: Richter et al., 2009.

2.8. TECNOLOGÍAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR

De acuerdo con lo publicado por Arancibia y Estrada (2010), en relación con las tecnologías de concentración solar, se presenta el siguiente resumen:

Existen diversas tecnologías para concentrar la radiación solar. Cada una de ellas tiene su nicho de aplicación dependiendo principalmente del nivel de temperaturas que permite alcanzar. Las aplicaciones solares térmicas se caracterizan por diferentes requerimientos de temperatura; en términos muy generales: calentamiento de agua para albercas; uso sanitario y climatización de espacios (27-60°C); cocción de alimentos (90-120°C); calor para procesos industriales (40-250°C); refrigeración y aire acondicionado solar (85-200°C); generación termosolar de potencia eléctrica (250-1,000°C), y producción de combustibles como el hidrógeno o gas de síntesis (500-2,500°C).

Probablemente el ejemplo más notorio de la utilización de tecnologías de concentración solar sean las plantas termosolares de generación de potencia

eléctrica. El principio general es el siguiente: en muchas plantas termoeléctricas la electricidad se produce haciendo pasar vapor a presión a través de turbinas, produciendo con esto energía mecánica, que a su vez permite mover generadores eléctricos. El calor requerido para producir este vapor puede ser suministrado mediante la quema de combustibles como petróleo, gas o carbón, o bien mediante reactores nucleares, o por supuesto, mediante radiación solar concentrada.

Existen diferentes tipos de plantas de concentración solar para la producción de electricidad, que se clasifican en cuatro tecnologías principales: canal parabólico, Fresnel lineal, disco parabólico y torre central. A continuación se describen las cuatro tecnologías termosolares principales:

2.8.1. Tecnología de Canal Parabólico

En la tecnología de canal parabólico, como su nombre lo indica, se utilizan espejos alargados que forman una canaleta con perfil parabólico (figura 2.24). El receptor donde enfoca la energía es un tubo que corre a lo largo del foco de la parábola. En este receptor la energía solar es absorbida y transformada en calor, el cual es removido por un fluido que circula en el interior del tubo. Este fluido puede ser un aceite térmico, sales fundidas o alguna otra sustancia con buena capacidad calorífica, buena estabilidad a alta temperatura y con suficiente fluidez para poder ser bombeada a lo largo de grandes longitudes de tubo. Incluso se ha llegado a circular agua por el receptor para producir directamente el vapor, aunque esto presenta mayor complejidad técnica.



Figura 2.24. Concentradores de canal parabólico de la planta Sistema de Generación Eléctrica Solar, (SGES), California, EUA.

Para mantener enfocados los rayos de luz en el receptor, los concentradores solares necesitan tener sistemas mecánicos de seguimiento del movimiento aparente del Sol. Mientras mayor sea el nivel de concentración de una cierta tecnología, más preciso tiene que ser dicho seguimiento. Por otro lado, un seguimiento demasiado preciso en un concentrador que no lo requiere sólo encarece la tecnología. En particular, los canales parabólicos tienen un nivel de concentración intermedio (hasta unos 40 soles) y requieren seguimiento en una sola dirección (este-oeste).

2.8.2. Tecnología de Fresnel Lineal

La tecnología de Fresnel lineal es similar a la de canal parabólico en el sentido de que ambas son tecnologías de foco lineal, es decir, donde el receptor es muy largo. Los niveles de concentración que se alcanzan son similares en ambos casos, pero la manera de conseguirlos es bastante diferente: en la tecnología de Fresnel lineal el foco se encuentra en una estructura fija elevada (figura 2.25), la cual es iluminada por tiras de espejo largas y estrechas, cada una de las cuales tiene su propia inclinación y se mueve por separado para mantener los rayos del Sol incidiendo en el foco fijo.



Figura 2.25. Concentradores de Fresnel lineal FRESDEMO (visto desde el receptor), en la Plataforma Solar de Almería, España.

Esto contrasta con el canal parabólico, donde el receptor suele moverse junto con toda la estructura del concentrador. Una ventaja de la configuración de Fresnel lineal es, precisamente, que para seguir el Sol se requiere mover muchos espejos pequeños y ligeros, en comparación con la de canal parabólico, donde se requiere mover un solo espejo de mucho mayor tamaño. Otra diferencia importante es que los colectores Fresnel lineales tienen ejes de seguimiento orientados en la dirección norte-sur.

2.8.3. Tecnología de Disco Parabólico

La tecnología de disco parabólico, es de aspecto similar a las antenas de telecomunicaciones, dichos discos son espejos de perfil paraboloidal, que enfocan la radiación solar en un receptor de tamaño reducido localizado en el foco de la parábola (figura 2.26).



Figura 2.26. *Concentradores de plato parabólico de la Planta Sistemas de Energía Stirling (SES), en California, E.U.A.*

A diferencia de las dos anteriores, esta tecnología es de foco puntual, ya que la zona donde se concentra la radiación es idealmente un punto. En general, los sistemas de foco puntual permiten alcanzar concentraciones y temperaturas mayores a los de foco lineal; mientras estos últimos tienen niveles de concentración de entre 15 y 40 soles y operan a temperaturas cercanas a 300°C, los primeros alcanzan niveles de concentración cercanos a 1,000 soles y operan hasta a 1,000°C.

La generación de electricidad con concentradores de disco parabólico se basa en el uso de motor Stirling, inventado por el Reverendo Escocés Joseph Stirling en 1816. En este motor se calienta un gas, el cual se expande y empuja un pistón conectado a un alternador eléctrico, para luego contraerse al enfriarse. El movimiento repetido de expansión y contracción da lugar a la generación de una corriente eléctrica alterna. Aquí ya no es necesario transportar un fluido caliente por largas tuberías, como en el canal parabólico y el Fresnel lineal; la electricidad sale directamente de la zona focal a través de cables.

2.8.4. Tecnología de Torre Central

La tecnología de torre central es de algún modo el equivalente a la tecnología de Fresnel lineal, pero en foco puntual. Una planta de este tipo consiste de un gran campo de helióstatos que concentran la radiación solar en lo alto de una torre (figura 2.27), donde se encuentra el receptor.



Figura 2.27. Concentradores de helióstatos y torre central de la Planta Solar One, en Barstow, California.

Los helióstatos son espejos planos que se mueven continuamente para dirigir el reflejo solar hacia el receptor, y cuyos tamaños máximos llegan a ser de alrededor de 120 m^2 . Aquí hay muchas tecnologías diferentes en investigación para los receptores. Se puede calentar aire, aceite, sales fundidas y partículas sólidas. En todos los casos, el fluido térmico no necesita circular por distancias muy grandes antes de ser utilizado, como en el canal parabólico o el Fresnel lineal, pues el bloque térmico de la planta se suele encontrar en la base de la torre (con alturas máximas de alrededor de 100 m).

Idealmente, las plantas solares de potencia deben ser instaladas en sitios donde el Sol brille prácticamente todos los días del año; es decir, en zonas desérticas o

semidesérticas. Aun así, puede haber días nublados, durante los cuales la planta en principio no podría operar. Por otro lado, una de las aplicaciones más interesantes para estas plantas en la actualidad es satisfacer el pico de demanda eléctrica que ocurre en las primeras horas de la noche, cuando tampoco hay radiación solar.

En ambas situaciones, para que la planta pueda operar es necesario almacenar parte del calor generado con el Sol durante el día, para usarlo como energía de respaldo en esos momentos. La manera más común de hacerlo es almacenando el mismo fluido que se ha calentado (aceite, sales fundidas) en un gran tanque bien aislado. De esta manera, se puede operar varias horas en ausencia de Sol.

Como el almacenamiento encarece los sistemas, una posibilidad muy socorrida en la actualidad es operar la planta solar de potencia de manera híbrida, respaldándola con quemadores de gas. En el futuro, sería deseable hacer esto utilizando hidrógeno generado a partir de energía solar como combustible de respaldo, en lugar de gas natural.

2.9. COMPARACIÓN ENTRE LAS TECNOLOGÍAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR

En la publicación denominada “Energía Solar Térmica de Concentración: Perspectiva Mundial 2009”, escrita por Richter et al. (2009), se expone una comparación entre las principales tecnologías de concentración solar, la cual se presenta en la siguiente tabla 2.2.

CANAL PARABÓLICO:

| APLICACIONES | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Plantas conectada a la red, calor de proceso a temperatura media a alta. (Máxima potencia por planta hasta la fecha: 80 MW). • Potencia total construida: más de 500 MW y más de 10 GW en construcción o propuesta). | <ul style="list-style-type: none"> • Existe en el mercado más de 16,000 millones de kWh de experiencia operativa; temperatura operativa potencial de hasta 500°C (400°C probado comercialmente). • Eficiencia neta anual de probado rendimiento de la planta del 14% (radiación solar a potencia eléctrica neta). • Inversión y costos operativos probados comercialmente. • Modularidad, buen uso del terreno, la menor demanda de materiales, concepto híbrido probado y capacidad de almacenamiento. | <ul style="list-style-type: none"> • El uso de medio de transferencia térmica a base de aceite, restringe hoy las temperaturas operativas a 400°C, por lo que se obtienen sólo moderadas calidades de vapor. |

TORRE CENTRAL:

| APLICACIONES | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Plantas conectadas a la red, calor de proceso de alta | <ul style="list-style-type: none"> • Buenas perspectivas a mediano plazo para grandes eficiencias de | <ul style="list-style-type: none"> • Los valores anuales de rendimiento |

| | | |
|---|--|---|
| <p>temperatura.(Máxima potencia por planta hasta la fecha: 20 MW en construcción.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potencia total aproximadamente 50 MW con al menos 100 MW en proceso de desarrollo). | <p>conversión, temperatura operativa potencial de más de 1,000°C (565°C probado a escala de 10 MW).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Almacenamiento a altas temperaturas, posible operación híbrida, mejores para refrigeración en seco que los canales parabólicos y Fresnel lineal. • Mejores opciones para usar en lugares no llanos. | <p>previstos, los costos de inversión y su operación necesitan pruebas a mayor escala en operaciones comerciales.</p> |
|---|--|---|

DISCO PARABÓLICO:

| APLICACIONES | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Sistemas pequeños independientes, sin conexión a red, o en parque más grandes de discos conectados a la red. • (Máxima potencia por planta hasta la fecha: 100 kW, propuestas para 100 MW y 500 MW en Australia y E.U.A. | <ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia de conversión muy alta. Conversión solar pico a electricidad neta de más del 30%. • Modularidad, integración de la forma más efectiva el almacenamiento térmico en una planta grande. • Experiencia operativa de primeros proyectos de demostración. Fácil fabricación y producción en serie de piezas | <ul style="list-style-type: none"> • No hay ejemplos de uso comercial a gran escala. Objetivos de costos previstos de producción en serie aún por probar. • Menor potencial de disponibilidad para integración a la red. • Receptores híbridos aún en |

| | | |
|--|--|--|
| | disponibles. <ul style="list-style-type: none"> No requiere agua para refrigerar el ciclo. | proceso de investigación y desarrollo. |
|--|--|--|

CONCENTRADOR LINEAL DE FRESNEL:

| APLICACIONES | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> Plantas conectadas a la red, o generación de vapor para su uso en plantas térmicas convencionales. (Máxima potencia por planta hasta la fecha: 5 MW en E.U.A. y 117 MW en proceso de desarrollo). | <ul style="list-style-type: none"> Ya disponible, pueden adquirirse espejos planos y doblarse in situ, menos costos de fabricación. Posible operación híbrida y muy alta eficiencia solar, alrededor del mediodía solar. | <ul style="list-style-type: none"> Reciente entrada en el mercado, sólo hay pequeños proyectos operativos. |

Tabla 2.2. Comparación entre las principales tecnologías de concentración solar.

Fuente: Richter et al., 2009.

Los mismos autores mencionan que, con respecto a las experiencias operativas a nivel mundial y tomando en consideración dos aspectos, como: la potencia instalada y electricidad producida por tipo de tecnología; se tienen las siguientes estadísticas hasta el año 2009 y las cuales se presentan en la página siguiente por medio de la tabla 2.3.

| Tecnología | Potencia instalada 2009 (MW) | Electricidad producida hasta 2009 (GWh) | Potencia aprox. en cons- trucción y propuesta (MW) |
|---------------------|---------------------------------|--|---|
| Canales parabólicos | 500 | >16,000 | >10,000 |
| Torre central | 40 | 80 | 3,000 |
| Fresnel lineal | 5 | 8 | 500 |
| Disco parabólico | 0.5 | 3 | 1,000 |

Tabla 2.3. Experiencia operativa: potencias instaladas y electricidad producida por tipo de tecnología.

Fuente: Richter et al., 2009.

2.10. PLANTAS TERMOSOLARES TIPO TORRE CENTRAL A NIVEL MUNDIAL

Las plantas termosolares tipo torre central se aplicaron a partir de la década de 1980, algunas con mayor éxito que otras, pero con gran trascendencia en la evolución de la tecnología termoeléctrica solar. La tabla 2.4 presenta dicha evolución, destacándose en los últimos años las mejoras en las potencias de las plantas y la variedad de fluidos en la transferencia de calor. También se destaca que sólo muy pocos países han incursionado en esta tecnología; un ejemplo es el caso de España, en donde en los últimos años se ha construido la mayoría de este tipo de plantas (Téllez, 2008).

| NOMBRE DEL PROYECTO | PAÍS | POTENCIA MW/h | FLUIDO DE TRANSFERENCIA DE CALOR | AÑO INICIO |
|---------------------|---------|---------------|----------------------------------|------------|
| SSPS | España | 0.5 | Sodio líquido | 1981 |
| Eurelios | Italia | 1 | Vapor | 1981 |
| Sunshine | Japón | 1 | Vapor | 1981 |
| Solar One | E.U.A. | 10 | Vapor | 1982 |
| CESA-1 | España | 1 | Vapor | 1982 |
| MSEE/CAT B | E.U.A. | 1 | Nitrato de sal | 1983 |
| Themis | Francia | 2.5 | Sales | 1984 |
| SSPP-5 | Rusia | 5 | Vapor | 1985 |
| TSA | España | 1 | Aire | 1993 |
| Solar Two | E.U.A. | 10 | Nitrato de sal | 1996 |
| Censolar | Israel | 0.5 | Aire | 2001 |
| Solgate | España | 0.3 | Aire | 2002 |
| PS-10 | España | 10 | Aire | 2006 |
| PS-20 | España | 20 | Aire | 2009 |

Tabla 2.4. Proyectos a nivel mundial de plantas termosolares tipo torre central.

Fuente: Téllez, 2008.

A continuación se describen de manera simplificada algunas de las plantas termosolares tipo torre central que estuvieron o están funcionando actualmente en el mundo, de acuerdo con lo publicado por Orellana (2009):

- a) Planta Termosolar Eurelios: La planta fue construida en Sicilia, Italia. Comenzó su operación en 1981. Aunque en principio fue diseñada para una potencia de 1 MW/h, por recortes presupuestarios el campo de helióstatos fue reducido y, tan sólo, llegó a producir 750 kW/h. Esta fue la primera planta de torre en funcionamiento (Peral y Valverde, 1999). En la figura 2.28 se puede observar esta planta.

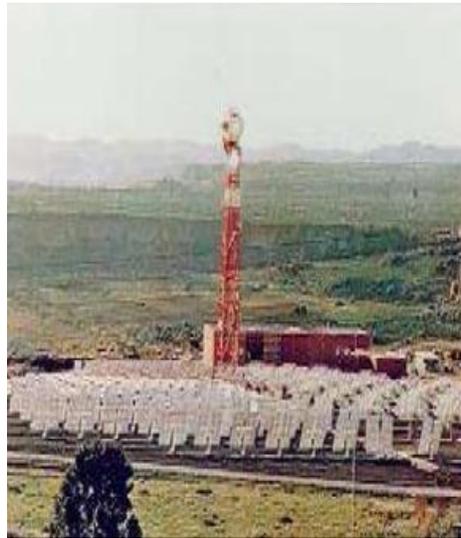


Figura 2.28. Planta termosolar Eurelios.

- b) Planta termosolar Sunshine: Japón fue uno de los primeros países en construir una planta termosolar. Esta se llamó Sunshine y se ubicó en Niho, localidad que se encuentra en la prefectura de Yamagushi, ubicándose en los 34° de latitud Norte. Comenzó su período de operación en septiembre de 1981. Su potencia era de 1 MW/h, poseía 12,900 m² de helióstatos y funcionó durante tres años (Peral y Valverde, 1999). En la figura 2.29 se puede apreciar una vista aérea de esta planta.



Figura 2.29. Planta termosolar Sunshine.

- c) Planta termosolar Themis: Situada en Targassonne, Francia. Esta planta poseía un receptor de sales fundidas y generaba 2.5 MW, con 11,800 m² de helióstatos. Produjo electricidad desde 1984 hasta 1986, deteniendo su generación el 30 de septiembre por falta de rentabilidad, en parte debido a problemas con el precio del líquido refrigerante (Peral y Valverde, 1999). En la figura 2.30 se presenta una vista superior de esta planta.

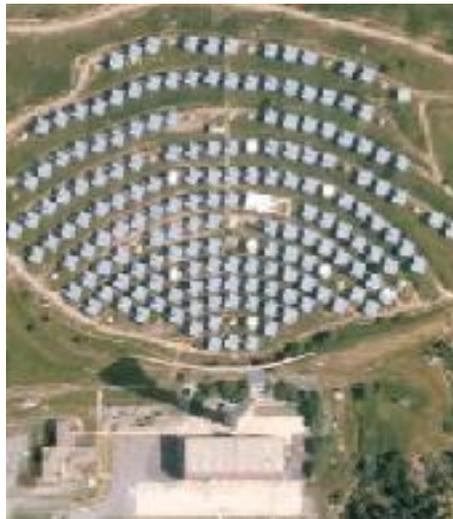


Figura 2.30. Planta termosolar Themis.

- d) Plantas termosolares Solar One/Two: La planta Solar One, situada en Barstow, California, E.U.A., entró en operación en 1982, con una potencia de 10 MW/h, ocupaba 71,500 m² de helióstatos. No poseía almacenamiento térmico y, en un principio, funcionó con vapor de agua. La planta Solar Two comenzó a funcionar en 1996, utilizó parte de la infraestructura de Solar One (torre y helióstatos). Su receptor era de sales fundidas y poseía un almacenamiento térmico de tres horas (Peral y Valverde, 1999). En la figura 2.31 podemos ver una vista aérea de la planta termosolar Solar Two.



Figura 2.31. Planta termosolar Solar Two.

- e) Planta termosolar SSPP-5: Esta planta heliotérmica estaba situada en la costa de Crimea, Rusia. Entró en funcionamiento en septiembre de 1985. Poseía un receptor de vapor de agua y generaba 5 MW con 40,000 m² de helióstatos (Peral y Valverde, 1999). La figura 2.32 muestra una vista lateral de esta planta.



Figura 2.32. Planta termosolar SSPP-5.

- f) Plantas termosolares PS-10/PS-20: La planta PS-10 fue construida por Abengoa en colaboración con el CIEMAT en Sanlúcar la Mayor, Sevilla, España. Actualmente, la planta está conectada a la red eléctrica, y produce energía desde el 28 de febrero de 2007. Se prevé una vida operativa de al menos 25 años. Es la primera planta de explotación comercial de su tipo. El receptor es de vapor saturado. La potencia es de 11 MW/h (624 helióstatos y torre de 114 metros de altura) y se espera una producción anual de 24.2 GW/h. La planta PS-20 (con 1,255 helióstatos, torre de 150 metros y receptor de vapor sobrecalentado) cuenta con una potencia de 20 MW/h y se encuentra localizada al oeste de PS-10 (Téllez, 2008). La figura 2.33 presenta una panorámica superior de estas dos plantas.



Figura 2.33. Plantas termosolares PS-10/PS-20.

2.11. PRIMERA PLANTA TERMOSOLAR COMERCIAL EN EL MUNDO TIPO TORRE CENTRAL CON RECEPTOR DE SALES

De acuerdo con Torresol Energy (2011), Gemasolar es el nombre de la primera planta termosolar tipo torre central con receptor de sales a nivel mundial (figura 2.34), que opera a escala comercial, a partir del 4 de octubre de 2011. Gemasolar se encuentra localizada en Fuentes de Andalucía, Sevilla, España. La importancia de

esta planta radica en su singularidad tecnológica, ya que abre el camino para la nueva generación de tecnología termosolar eléctrica.



Figura 2.34. Planta Termosolar Gemasolar en Fuentes de Andalucía, Sevilla, España.

Características de Gemasolar:

- Potencia nominal eléctrica: 19.9 MW.
- Producción eléctrica neta esperada: 110 GWh/año.
- Campo solar: 2,650 helióstatos en 185 hectáreas (figura 2.35).
- Sistema de almacenamiento de calor: El tanque de almacenamiento en sales fundidas, permite la generación de electricidad independiente, para un máximo de 15 horas sin ningún tipo de alimentación solar.



Figura 2.35. Campo solar: 2,650 helióstatos en 185 hectáreas.

La prolongación del tiempo de funcionamiento de la planta, en ausencia de radiación solar y la mejora de la eficiencia del uso del calor del Sol; hace que la producción eléctrica de Gemasolar sea mucho mayor que la que se entrega por otras tecnologías, considerando una planta con la misma potencia.

El notable incremento de la eficiencia energética de la planta Gemasolar, garantiza una producción eléctrica de 6,500 horas al año, obteniéndose con esto, un incremento de 1.5 a 3 veces más que otras energías renovables. Por lo tanto, la planta es una fuente de suministro limpia y segura para 25,000 hogares. Además, de la reducción de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, por más de 30,000 toneladas al año. La energía generada por Gemasolar, se envía a través de una línea de alta tensión de Villanueva del Rey, Andalucía, España y posteriormente, se inyecta a la red.

La tecnología de torre central utilizada en Gemasolar, incluye un sistema de almacenamiento de sales calientes fundidas, que permiten la producción de electricidad aún con la ausencia de radiación solar. El calor recogido por las sales (capaz de alcanzar temperaturas superiores a 500°C) genera vapor y produce energía eléctrica. El excedente de calor acumulado durante las horas de Sol, es almacenado en el tanque de sales fundidas. De esta manera, Gemasolar puede producir energía eléctrica las 24 horas del día durante muchos meses del año.

2.12. PROYECTOS DE ENERGÍA SOLAR EN MÉXICO

Los tres principales proyectos de energía solar que se han realizado en México, son: Proyecto UNAM, Proyecto Agua Prieta II y el Laboratorio Nacional del Sistema de Concentración Solar y Química Solar (Horno Solar de Alto Flujo Radiativo, Planta Solar para el Tratamiento Fotocatalítico de Aguas Residuales y el Campo de Pruebas de Helióstatos). A continuación se presenta una síntesis de estos proyectos:

2.12.1. Proyecto UNAM

De acuerdo con Ávalos (2010), desde 1975 hasta la fecha el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ha desarrollado el único proyecto para la generación de potencia eléctrica de canal parabólico. Inicialmente fue de 1 kW con un módulo de 10 m de longitud y 2 m de apertura. En este sistema se realizó generación directa de vapor de 1975 a 1979. Posteriormente se construyó una planta de 10 kW, la cual constaba de 16 módulos de canal parabólico con 14.5 m de longitud y 2.5 m de apertura cada módulo.

El área total de espejos fue de 1,400 m², circulando un aceite mineral a través de los tubos absorbedores, calentándose a 300 °C. Este aceite se almacenaba en tanques, y posteriormente se enviaban a un intercambiador de calor para generar vapor para usarlo en una turbina o motor de pistones con un generador eléctrico acoplado. Este sistema funcionó de 1982 a 1990.

Posteriormente de 1998 a 2003 se eliminaron almacenes y aceites como fluidos de transferencia de calor, para convertir al sistema en generador directo de vapor mediante un cambio de fase líquido-vapor en los tubos absorbedores. Se tuvo que eliminar la mitad de la planta solar, ya que la operación y mantenimiento salía muy cara. En la primera etapa hubo patrocinio de la Secretaría de Energía (SENER), mientras que en la segunda el patrocinio fue de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y de la UNAM.

También se realizó el estudio técnico-económico de un sistema híbrido solar-geotermia para Cerro Prieto por pedido de CFE del 2003 al 2008. En este proyecto se plantearon varias opciones para incrementar el vapor a partir de la salmuera de desecho.

2.12.2. Proyecto Agua Prieta II

Según Ávalos (2010), el proyecto Agua Prieta II pertenece a CFE, en conjunto con fondos internacionales, que se vienen gestionando desde 2006, y al parecer el proyecto estará listo en el 2013.

El proyecto consiste en una combinación de planta termosolar (tecnología de canales parabólicos) con ciclo combinado de gas. La primera tendrá una capacidad de generación de 30 MW, mientras que la de gas contará con 650 MW.

Parte de los recursos que serán destinados para el campo solar, serán donados por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (FMMA). La cantidad que aportará dicho Fondo, será de 49.35 millones de dólares.

El complejo se localizará en el municipio de Agua Prieta, Sonora. Estará a 6.3 km de la ciudad de Agua Prieta, y a 2 km de la frontera con Estados Unidos.

El impacto ambiental que tendrá el proyecto será evitar la emisión de más de 19,080 toneladas anuales de CO₂ y los responsables del proyecto son CFE y la firma internacional Abengoa (El Imparcial, 2011).

2.12.3. Laboratorio Nacional del Sistema de Concentración Solar y Química Solar (LNCSQS)

Arancibia y Estrada (2010), argumentan que el LNCSQS está formado por tres infraestructuras:

1) Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HSAFR): Este proyecto inició en el 2004 por el Centro de Investigación en Energía (CIE), como una herramienta de investigación de primer nivel sobre concentración solar. Un horno solar es esencialmente un sistema de alta concentración, formado por la combinación de un helióstato y un concentrador de foco puntual, muchas veces de tipo plato parabólico. Hacia la

segunda mitad de 2006, se definió el concepto de lo que sería el horno: sus dimensiones, su ubicación en el CIE, sus costos y su viabilidad de operación en el clima de Temixco. Para el mes de diciembre de 2010, se concluyó el HSAFR (figura 2.36).



Figura 2.36. Horno Solar de Alto Flujo Radiativo.

Esta instalación permite llevar a cabo investigación sobre diferentes temas, como: producción de combustibles, procesamiento de materiales, destrucción de residuos peligrosos, evaluación de materiales y componentes para sistemas de concentración solar.

2) Planta Solar para el Tratamiento Fotocatalítico de Aguas Residuales (PSTFAR): En esta instalación se podrán demostrar en escala piloto las tecnologías que se han venido desarrollando, para el tratamiento de diferentes efluentes reales de origen industrial. Con ello se pretende poder dar el paso final para transferir su tecnología para su aplicación en empresas que tengan necesidad de tratar agua contaminada con contaminantes orgánicos recalcitrantes. La instalación constará de alrededor de 100 m², con una capacidad de tratamiento de 800 litros diarios.

3) Campo de Pruebas de Helióstatos (CPH): En esta instalación se hará investigación sobre la tecnología de torre central para la producción de potencia eléctrica. El CPH está enfocado en desarrollar y probar tecnologías de heliostatos así como de receptores. El CPH (figura 2.37) se encuentra instalado a 20 km del centro de la ciudad de Hermosillo, Sonora, México; en un campo perteneciente a la UNISON.



Figura 2.37. Panorámica superior del CPH desde la torre central, en Hermosillo, Sonora.

En una primera etapa, constará de una torre de alrededor de 40 m de altura y 15 helióstatos de 36 m² cada uno. Para la segunda etapa, será expandido a una instalación con 80 helióstatos, es decir, a unos 2 MW térmicos y con un laboratorio de investigación anexo. En esta instalación se hará investigación sobre receptores térmicos para coleccionar el calor concentrado y, eventualmente, en una tercera etapa, podría llevarse hacia la demostración de generación eléctrica.

2.13. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES DE SERVICIO

De acuerdo con Krajewski et al. (2008), la localización de la instalación es el proceso de elegir un lugar geográfico para realizar las operaciones de una empresa. Las operaciones de localización pueden tener importancia crucial para las empresas y producen un profundo impacto en la cadena de valor de una empresa.

La localización de las instalaciones de una empresa tiene impacto significativo en los costos de operación de la compañía, los precios que ésta cobra por los productos y servicios y la capacidad que tiene para competir en el mercado y penetrar nuevos segmentos de clientes.

Según Heizer y Render (2009), se utilizan tres métodos principales para resolver problemas de localización de instalaciones de servicios: Método de Calificación de Factores, Método del Centro de Gravedad y Método Sistema de Información Geográfica (SIG). A continuación se describen estos métodos con la finalidad de resaltar las bondades de cada uno de ellos:

2.13.1. Método de Calificación de Factores

De acuerdo con Chase et al. (2009), el método de calificación de factores es quizá la técnica de localización generales que se utilizan con mayor frecuencia porque ofrecen un mecanismo para combinar diversos factores en un formato fácil de entender.

Por ejemplo, una refinería asignó el siguiente rango de valores porcentuales a los principales factores que afectan un grupo de sitios posibles; esta información se presenta en la tabla 2.5.

| | |
|--|---------|
| Combustibles en la región | 0 a 330 |
| Disponibilidad y confiabilidad de la energía | 0 a 200 |
| Clima laboral | 0 a 100 |
| Condiciones de vida | 0 a 100 |
| Transportes | 0 a 50 |
| Abastecimiento de agua | 0 a 10 |
| Clima | 0 a 50 |
| Suministro | 0 a 60 |
| Políticas y leyes fiscales | 0 a 20 |

Tabla 2.5. Factores y rangos porcentuales para la localización de una refinería.

Fuente: Chase et al., 2009.

Se calificó cada sitio con base en cada factor y se seleccionó un valor porcentual de su rango asignado. Luego se compararon las sumas de los puntos asignados para cada sitio y se eligió el sitio con más puntos.

Por su parte, Heizer y Render (2009) plantean que el método de calificación de factores consta de seis pasos:

1. Desarrollar una lista de los factores relevantes denominados factores críticos de éxito.
2. Asignar un peso a cada factor que refleje su importancia relativa en cuanto a los objetivos de la compañía.
3. Desarrollar una escala para cada factor (por ejemplo, de 1 a 10 o de 1 a 100 puntos).
4. Hacer que la administración califique cada factor para cada localización, usando la escala del paso 3.
5. Multiplicar la calificación por los pesos de cada factor y sumar los puntos de cada localización.
6. Hacer una recomendación basada en la calificación de mayor puntaje, considerando también los resultados de los enfoques cuantitativos.

2.13.2. Método del Centro de Gravedad

Según Collier y Evans (2009), el método del centro de gravedad determina las coordenadas X y Y (localización) de cierta instalación. Aunque dicho método no está pensado de forma específica para analizar los objetivos de servicio al cliente, se usa para auxiliar a los gerentes a equilibrar los objetivos del costo y los servicios.

El método del centro de gravedad toma en cuenta las localizaciones de la instalación y el mercado, la demanda y los costos del transporte para llegar a la mejor localización de una instalación determinada.

Parece razonable encontrar alguna localización central entre la instalación que produce los bienes o provee el servicio y los clientes a los que se destina la nueva instalación. Pero la sola distancia no debiera ser el criterio principal, puesto que la demanda (volumen, transacciones, entre otras.) de una localidad a otra también afecta los costos. Para incorporar a la distancia y la demanda, se define el centro de gravedad como la localidad que minimiza a la distancia ponderada entre la instalación y los puntos de suministro y demanda de ésta.

El primer paso del procedimiento es ubicar en un sistema de coordenadas los sitios de los puntos de suministro y demanda. El origen del sistema coordinado y la escala son arbitrarios, siempre que las distancias relativas se representen de manera correcta.

Una forma de representarlo es colocar una cuadrícula sobre un mapa ordinario. El centro de gravedad se determina con las ecuaciones (2.1) y (2.2), y se implementa con facilidad en una hoja de cálculo:

$$C_x = \sum X_i W_i / \sum W_i \quad (2.1)$$

$$C_y = \sum Y_i W_i / \sum W_i \quad (2.2)$$

donde

C_x = coordenada x del centro de gravedad

C_y =coordenada y del centro de gravedad

X_i = coordenada x de la localidad i

Y_i = coordenada y de la localidad i

W_i = volumen de los bienes o servicios movidos hacia, o desde, la localidad i

El método del centro de gravedad se utiliza por lo general para localizar instalaciones de servicio: por ejemplo, para conocer la localización de un depósito para eliminar residuos las coordenadas se ponderan según la cantidad promedio de basura

generada de los vecindarios residenciales y sitios industriales. De manera similar, para localizar una biblioteca, estación de bomberos, hospital u oficina de correos; serán las densidades de población las que definan las operaciones apropiadas en el modelo.

Otra aplicación importante del método del centro de gravedad en la actualidad es la localización de torres de comunicación en las áreas urbanas. Algunos ejemplos son las torres de radio, televisión y telefonía celular (Chase et al., 2009).

2.13.3. Método SIG

De acuerdo con Krajewski et al. (2008), un SIG es un sistema de software, hardware y datos que el personal de la empresa puede usar para manipular, analizar y presentar información relacionada con una decisión sobre localización. Un SIG también puede integrar diferentes sistemas para crear una representación visual de las opciones de localización de una empresa.

Gómez (2005) argumenta que los SIG pueden definirse como: una tecnología integradora que une varias disciplinas con el objetivo común del análisis, la creación, la adquisición, el almacenamiento, la edición, la transformación, la visualización, la distribución, entre otras de información geográfica.

Otra definición es la del Centro Nacional para el Análisis de la Información Geográfica (CNAIG), el cual los considera desde el punto de vista de las capacidades que tienen los SIG, como: un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos especialmente referenciados para resolver problemas concretos de planificación y gestión (Letelier, 2003).

- **Usos y Aplicaciones de SIG**

Según Krajewski et al. (2008), los SIG se usan para: almacenar bases de datos, mostrar mapas, y crear modelos que toman información de conjuntos existentes de datos, aplican funciones analíticas y escriben los resultados en nuevos conjuntos de datos derivados.

En conjunto, estas tres funcionalidades de almacenamiento de datos, presentación de mapas y creación de modelos, son partes cruciales de un SIG inteligente y se usan en diferentes medidas en todas las aplicaciones SIG. Un sistema SIG puede ser una herramienta muy útil para tomar decisiones porque muchas de las decisiones que las empresas toman en la actualidad tienen un aspecto geográfico. Un SIG almacena información en varias bases de datos que pueden relacionarse naturalmente con lugares, como las ventas y localizaciones de los clientes, o un sector censal, o el porcentaje de habitantes en ese sector que perciben ciertos ingresos al año.

Los datos demográficos, el sistema de caminos, la ubicación de los aeropuertos y puertos marítimos y el tipo de terreno; desempeñan una función importante en las decisiones sobre la localización de las instalaciones. Como tal, un SIG puede tener un conjunto de diversas aplicaciones relacionadas con la localización en diferentes industrias, como el comercio al detalle, bienes raíces, gobierno, transporte y logística.

La principal aplicación del SIG es el manejo de datos geográficos a través de un banco de datos, cuyo objetivo es la creación de modelos digitales y de mapas temáticos (Letelier, 2003).

Según Bosque y García (2000), los SIG pueden ser útiles en multitud de actividades, en conjunto las podríamos clasificar en dos grandes grupos:

- 1) Gestión y descripción del territorio: Algunos ejemplos de aplicación del SIG en este grupo son: El mantenimiento, cartografía y control de grandes infraestructuras (redes de abastecimiento y evacuación de aguas, red telefónica,

etc.), el control y gestión de datos catastrales, la gestión urbana y municipal, entre otros.

2) Ordenación y planificación del territorio: Algunos ejemplos de aplicación del SIG en este grupo son: las tareas de planificación urbana, la ordenación del territorio y la planificación integral, el análisis y preparación de políticas sobre el transporte: flujo de tráfico, delimitación de áreas de influencia, cálculo de rutas óptimas, etc., el Geomarketing y/o la Geodemografía.

- **Tipos de SIG**

De acuerdo con Arán (2008), existen grandes similitudes entre muchas de las herramientas de software desarrolladas para el manejo de SIG, también existen diferencias entre ellas que las hacen especialmente aptas en cada caso para un estudio muy particular, de esta manera, existen algunos SIG comerciales como ArcGIS que manejan datos en forma vectorial (puntos y líneas) y otros SIG como IDRISI o ArcView que trabajan con datos en forma raster (cuadrículas o píxeles).

Hay muchos tipos diferentes de paquetes SIG en el mercado, como ArcInfo (de ESRI), MapInfo (de MapInfo), SAS/GIS (de SAS Institute, Inc.), SiteAmerica (de Tactician), entre otros (Krajewski et al., 2008).

2.14. ÁREA DE ESTUDIO: ESTADO DE SONORA

Según INEGI (2011), Sonora es uno de los 31 estados que, junto con el Distrito Federal, conforman las 32 entidades federativas de México. Se ubica en la región noroeste del país. El estado de Sonora (figura 2.38) representa el 9.1% de la superficie del territorio mexicano y ocupa el segundo lugar nacional en extensión.



Figura 2.38. Estado de Sonora (color negro).

- **Localización**

De acuerdo con la misma dependencia gubernamental, el estado de Sonora se sitúa entre los 32°29' y los 26°14' de latitud Norte y entre los 108°26' y los 105°02' de longitud Oeste del meridiano de Greenwich. Sonora colinda al norte con Estados Unidos de América; al este con Chihuahua; al sur con Sinaloa; al oeste con el Golfo de California y Baja California. La capital del estado es Hermosillo y sus principales ciudades son: Ciudad Obregón, Nogales, San Luis Río Colorado y Navojoa.

Sonora se encuentra situada en una franja climática del hemisferio norte en la que se han formado diversos desiertos en torno del globo terráqueo. Si seguimos el paralelo 30° de latitud norte a través de un planisferio de la Tierra, podrá verse que el estado está situado en la misma latitud que los desiertos de África del Norte, Arabia Saudita, Irak, Kuwait y otros.

- **División Municipal**

Actualmente Sonora se encuentra dividido en 72 municipios (figura 2.39):



Figura 2.39. División municipal del estado de Sonora.

• **Climas**

El 48% del estado de Sonora presenta clima seco y semiseco, localizado en la Sierra Madre Occidental; el 46.5% presenta clima muy seco, localizado en las Llanuras Costeras del Golfo; el 4% es templado subhúmedo, se encuentra hacia el este del estado y el restante 1.5% presenta clima cálido subhúmedo, localizado hacia el sureste (figura 2.40).

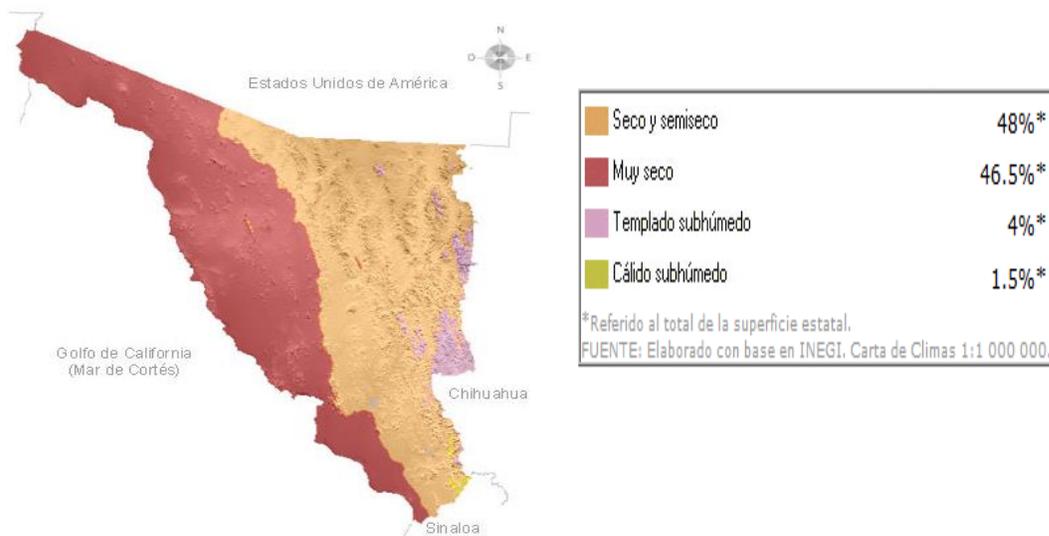


Figura 2.40. Climas del estado de Sonora.

- **Temperaturas**

La temperatura media anual es alrededor de 22°C, la temperatura máxima promedio es de 38°C y se presenta en los meses de junio y julio, la temperatura mínima promedio es de 5°C y se presenta en el mes de enero. La precipitación media estatal es de 450 mm anuales, las lluvias se presentan en verano; en los meses de julio y agosto.

- **Ríos y Presas**

Sonora cuenta con 19 ríos, los cuales son llamados: Bavispe, Río Colorado, Yaqui, Moctezuma, Sonora, Mátape, San Miguel de Horcasitas, Los Cedros, Magdalena, Altar, Mayo, Sahuaripa, Aros, El Plomo, Sonoyta, Bacoachi, San Francisco y Asunción.

Con respecto a otros cuerpos de agua, el estado cuenta con 4 presas, llamadas: Plutarco Elías Calles (El Novillo), Álvaro Obregón (Oviachic), Adolfo Ruiz Cortines (Mocúzari) y Lázaro Cárdenas (Angostura).

- **Fisiografía**

Su fisiografía está constituida en su mayoría por llanuras y sierras. El territorio es ancho en su parte septentrional y se va angostando poco a poco en su dirección al sur. El territorio sonorenses está conformado por cuatro provincias fisiográficas: la Sierra Madre Occidental, las Sierras y Valles Paralelos (también llamados Llanuras del Norte), el desierto y la costa del Golfo de California.

Las cuencas de los ríos del estado presentan un declive pronunciado hasta la costa, lo que origina la precipitación de sus aguas, las que van a perderse, a excepción de las del Yaqui y Mayo, en los arenales de la costa. Por esta razón, los valles que se forman fuera de la superficie plana y en las cuencas de los ríos y arroyos, son casi en su totalidad angostos y cortados por desfiladeros y lomeríos.

Figuran entre los principales valles: el del Yaqui, el del Mayo, el de Ures, el de la Costa de Hermosillo, el de Caborca, el de Cumpas, el de Guaymas-Empalme y el de San Luis Río Colorado. Los únicos grandes valles, atendiendo a la extensión en cultivo, son: el Yaqui y el Mayo. El primero con una superficie de 500,000 ha y el segundo con 220,000 ha.

La región del desierto es un desierto mayormente de matorrales, a excepción de la zona de Altar donde es arenoso. El desierto de Sonora, es el más rico y variado en vida y comunidades bióticas de toda América.

- **Población**

INEGI (2011) argumenta que la población total del estado de Sonora hasta el año 2010 era de 2,662,480 habitantes, de los cuales 1,322,868 eran mujeres y 1,339,612 eran hombres. Sonora ocupa el dieciocho lugar a nivel nacional por su número de habitantes. Entre los municipios con mayor número de habitantes se encuentran: Hermosillo, Cajeme, Nogales, San Luis Río Colorado, Navjoa, Guaymas, Agua Prieta, Caborca, Puerto Peñasco y Empalme.

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta el tipo de investigación que se realizó y la estrategia metodológica que se llevó a cabo para determinar las localizaciones con mayor factibilidad en el estado de Sonora, que podrán ser utilizadas para la instalación de plantas termosolares tipo torre central.

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Según Hernández et al. (2010), los diseños de investigación transeccional exploratorio pertenecen a los diseños no experimentales y se dedican a recolectar datos en un solo momento, en un tiempo único. Su propósito es describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado. Es como tomar una fotografía de algo que sucede.

El propósito del diseño transeccional exploratorio es comenzar a conocer una variable o un conjunto de variables, una comunidad, un contexto, un evento, una situación. Se trata de una exploración inicial en un momento específico. Por lo general, se aplican a problemas de investigación nuevos o poco conocidos, además constituyen el preámbulo de otros diseños (no experimentales y experimentales).

Para la presente investigación se utilizó el diseño de investigación transeccional exploratorio, ya que es un problema de investigación que se realizó en un momento específico y además, ha sido poco estudiado.

3.2. MODELO METODOLÓGICO PROPUESTO

En la página siguiente se presenta el modelo metodológico propuesto por medio de la figura 3.1, el cual consta de cinco etapas que conforman la metodología propuesta.

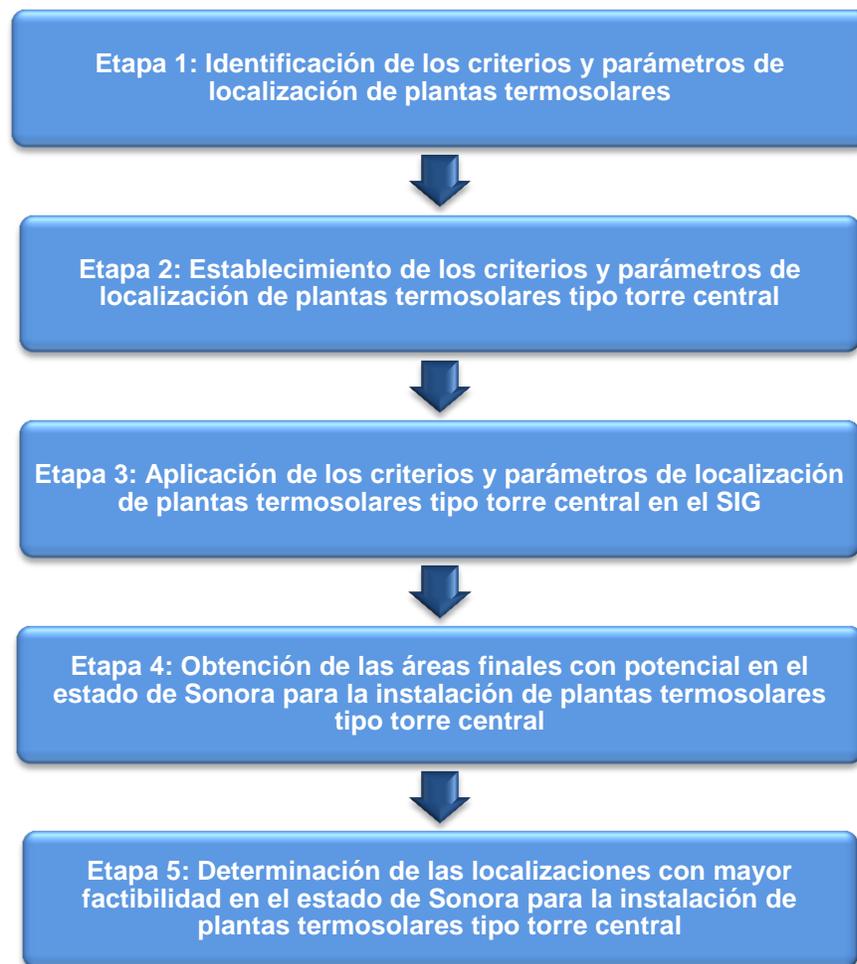


Figura 3.1. Metodología propuesta.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se explica brevemente lo que se realizó en cada una de las etapas de la metodología:

Etapa 1: Se identifican los criterios y parámetros de localización de plantas termosolares (radiación solar, nubosidad, superficie y topografía, disponibilidad de agua, accesibilidad, mano de obra y temperatura) propuestos por distintos autores en la revisión bibliográfica realizada.

Etapa 2: Se consideran los criterios y parámetros de localización de plantas termosolares identificados en la etapa 1. Posteriormente, dichos criterios y parámetros fueron planteados a un experto para definir si eran o no relevantes y apropiados considerando el estado de Sonora. Finalmente, el experto establece seis criterios y parámetros de localización de plantas termosolares tipo torre central considerando las características particulares del estado de Sonora.

Etapa 3: Se aplican en el SIG los seis criterios y parámetros de localización establecidos: red eléctrica (distancia máxima 10 km), disponibilidad de agua (distancia máxima 10 km), red vial (distancia máxima 10 km), pendiente (menor a 3%), usos de suelo (excluir áreas protegidas, zonas urbanas y cuerpos de agua) y distancia a poblaciones mayores a 3,000 habitantes (distancia máxima 15 km); dando como resultado seis capas de información.

Etapa 4: Se realiza una superposición en el SIG, considerando las seis capas de información obtenidas en la etapa 3. Para posteriormente, obtener las áreas finales con potencial en el estado de Sonora. Dichas áreas obtenidas pertenecen a veinticuatro municipios del mismo estado, que para efecto de esta tesis son llamados localizaciones con potencial.

Etapa 5: Se aplica el método de calificación de criterios estratégicos por medio de seis pasos, considerando tres criterios estratégicos y sus respectivas ponderaciones; a las veinticuatro localizaciones con potencial del estado de Sonora. Este método, se lleva a cabo por tres expertos y después de aplicarse, se determinan las localizaciones con mayor factibilidad en el estado de Sonora y el orden para la instalación de las plantas termosolares tipo torre central.

En el siguiente capítulo se desarrolla de forma detallada cada una de las etapas y su respectiva aplicación de la metodología propuesta.

4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

En el presente capítulo se abordan las diferentes etapas de la metodología, iniciando con la identificación de los criterios y parámetros de localización de plantas termosolares, esto se realizó por medio de una revisión bibliográfica. Posteriormente, se aborda el establecimiento de los criterios y parámetros de localización de plantas termosolares tipo torre central en el estado de Sonora, de acuerdo con la revisión bibliográfica y la consulta a un experto.

Después, se realizó la aplicación de los criterios y parámetros de localización en el SIG; obteniéndose capas de información de cada criterio evaluado con su respectivo parámetro y por último, se obtuvieron las áreas finales con potencial en el estado de Sonora, por medio de la superposición de las capas de información obtenidas anteriormente. Finalmente, se determinaron por medio de la aplicación del método de calificación de criterios estratégicos a un panel de expertos, las localizaciones con mayor factibilidad en el estado de Sonora y el orden para la instalación de las plantas termosolares tipo torre central.

4.1. IDENTIFICACIÓN DE LOS CRITERIOS Y PARÁMETROS DE LOCALIZACIÓN

Para cumplir con la primera etapa de la metodología, se llevó a cabo una revisión bibliográfica de los criterios y parámetros de localización de plantas termosolares; propuestos por distintos autores.

Un criterio es cierta base para la toma de decisión, la cual puede ser medida y evaluada a través de parámetros (Barredo, 1996).

Se considera a los criterios como los distintos aspectos de la realidad que inciden de alguna manera en las ventajas o inconvenientes de las alternativas disponibles como soluciones al problema (Bosque, 1996).

Tomando en cuenta los diferentes métodos de localización de instalaciones propuestos por la disciplina de la ingeniería industrial, al momento de seleccionar localizaciones para desarrollar una actividad se debe tomar en cuenta una serie de criterios y parámetros para lograr una localización de mínimo costo y un máximo aprovechamiento de los recursos. Es así como Richter et al. (2009), García y Lacal (2008), Sarmiento (1995), Romero (2007), Téllez (2008), Garmendia (2008), Daniels (1977), Guerra (2003), García (2001), Mulas (2005), Cohen (1999), Orellana (2009), Arán (2008), Collier y Evans (2009) y Chase et al. (2009) proponen ciertos criterios y parámetros a considerar al momento de instalar las plantas termosolares. Los criterios y parámetros de los diferentes autores son expuestos en los siguientes apartados:

4.1.1. Radiación Solar

La radiación es una de las formas de transporte de energía por medio de ondas electromagnéticas o fotones (Sarmiento, 1995). Es a través de esta forma de transporte como llega energía a la Tierra. Al llegar al planeta la radiación se distribuye en la superficie de forma desigual, producto de la curvatura de la Tierra y de la inclinación que tiene el planeta respecto al plano de la eclíptica (Uriarte, 2003).

Según Hermsillo (1995), la radiación solar sufre ciertas transformaciones al incidir sobre la atmósfera, y es por ello, que existen tres tipos diferentes de radiación: directa, difusa y terrestre; tal como se muestra en la figura 4.1. La primera es la que se recibe directamente del Sol, sin sufrir ninguna dispersión atmosférica. La segunda es la que se recibe del Sol, después de ser desviada por dispersión atmosférica. Es radiación difusa la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo azul. La tercera es la que proviene de objetos terrestres, por ejemplo, la que refleja una pared blanca, un charco o un lago, etc.

Por lo tanto, se conoce como radiación total, la suma de las radiaciones directa, difusa y terrestre que se reciben sobre una superficie. Por otro lado, la radiación global es la suma de la directa más la difusa. Para expresar la potencia solar –y en general, de cualquier radiación- se utiliza el término irradiancia. Esta misma, es medida en W/m^2 , que es la rapidez de incidencia de energía radiante sobre una superficie, por unidad de área.

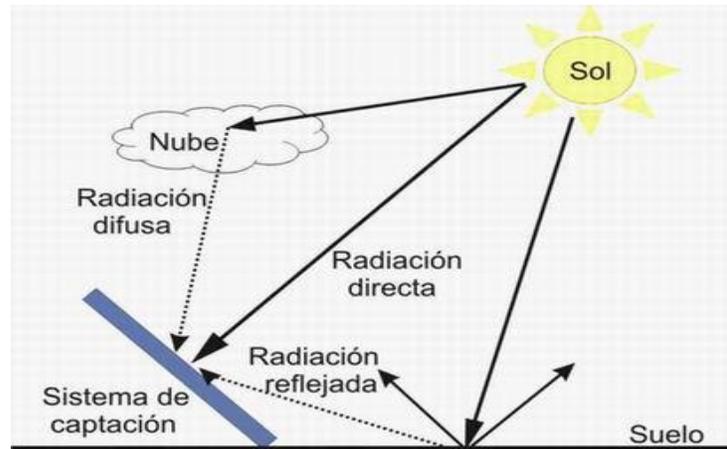


Figura 4.1. Tipos de radiación.

Algunos autores como Richter et al. (2009), García y Lacal (2008), Sarmiento (1995) y Romero (2007); plantean que para contar con una instalación de energía solar y que esta sea rentable, es necesario considerar como principal criterio la radiación directa con un determinado valor.

De acuerdo con Richter et al. (2009), García y Lacal (2008) y Romero (2007), los lugares adecuados para la instalación de plantas termosolares deben ofrecer al menos $2,000 \text{ kWh}/m^2$ de irradiación solar directa anual, cercanos a los trópicos y que se encuentren localizados entre los paralelos 15° y 35° de latitud sur y norte.

Algunas experiencias concretas en la toma de decisión para localizar una planta termosolar, se expone en los parámetros usados para la instalación de la planta termosolar de Almería en España, en la cual se seleccionaron áreas que poseían una irradiación solar del orden de $1,825 \text{ kWh}/m^2$ (Téllez, 2008). Otro ejemplo, es el

de la planta termosolar de Solnova en España, la cual se encuentra localizada en un área con un valor de irradiación solar de $2,120 \text{ kWh/m}^2$ (Garmendia, 2008).

Una experiencia en México, fue el caso de la planta híbrida solar-gas Agua Prieta II, donde se eligió la localización llamada Ejido Agua Prieta; por ser una de las áreas de radiación solar más intensa del mundo (El Imparcial, 2011).

4.1.2. Nubosidad

Según García y Lacal (2008), para que la instalación de una planta termosolar sea conveniente se necesita un área que reciba la mayor cantidad de radiación directa, esto quiere decir, que exista un alto porcentaje del año con días despejados. Daniels (1977) propone que las mejores zonas de aprovechamiento solar, son las áreas que poseen entre 2,300 y 3,000 horas de Sol al año.

Una experiencia exitosa es la de un aprovechamiento solar en el sur de Francia, donde se cuenta con 2,600 horas de Sol al año (Guerra, 2003). Esto quiere decir, que si se asume que el promedio de horas de Sol por día en un año son doce, tendríamos como resultado que la experiencia francesa se realizó con 217 días soleados, aproximadamente.

4.1.3. Superficie y Topografía

Algunos ejemplos de aplicación del criterio de superficie para encontrar localizaciones aptas para instalar plantas termosolares son: el caso de la planta Solar Tres en España, donde se requirió de un área aproximada de 142 ha para producir 17 MW/h (Romero, 2007).

Otro caso, es la planta PS10 de Sevilla, España donde se requirió un área aproximada de 55 hectáreas para producir 11MW/h, mientras que la planta PS20 que genera el doble de energía que la anterior, necesitó 95 ha. La planta termosolar de tipo cilindro parabólico de Solnova I en España, necesitó un área aproximada de 380

ha, la cual produce 100 MW/h incluyendo todas las instalaciones, además del área de almacenamiento para 7 horas de trabajo sin radiación solar (Garmendia, 2008).

Esto quiere decir, que se requieren grandes áreas de superficie para la localización de plantas termosolares y es lo que se plantea en el estudio de emplazamientos de la planta termosolar de Almería, la cual excluye del estudio todas las zonas con una superficie menor a los 5 km² (Téllez, 2008).

Respecto a la topografía requerida, las especificaciones de la planta Solnova I recomiendan terrenos extremadamente llanos (Garmendia, 2008). En los parámetros sugeridos para la localización de la planta termosolar de Almería, se propone que las superficies no excedan los valores de 1 a 3% de inclinación. También se deja afuera del estudio zonas urbanas, áreas protegidas medioambientalmente y cuerpos de agua (Téllez, 2008).

4.1.4. Disponibilidad de Agua

Según García (2001), para la generación de energía, las plantas termosolares requieren de vapor de agua. Este se consigue con los intercambiadores de calor en un proceso llamado ciclo Rankine, en el cual el fluido calentado evapora una cantidad de agua y el vapor resultante mueve una turbina que genera energía.

Mulás (2005) expone que con respecto a la cantidad de agua que necesitan las plantas termosolares, destaca las experiencias en México en donde se determina que la disponibilidad de agua puede ser un factor significativo en las regiones áridas donde pueden instalarse mejor las plantas termosolares, debido a que se requieren de 41 a 54 m³ de agua por MW/h.

Un caso de utilización de agua en la planta termosolar SGES en Estados Unidos, fue en el año de 1997 donde se llegó a ocupar tan sólo 3.4 m³ de agua por MW/h, de los cuales se utilizó un 1.4% en mantenimiento de la planta y más del 90% en el ciclo de

Rankine (Cohen, 1999). Considerando lo anterior, podemos decir que para una planta termosolar de 10 MW/h se necesitarían aproximadamente, según los criterios de SGES, 34 m³ diarios de agua.

4.1.5. Accesibilidad

Considerando el principio de localización de mínimo costo de Entremont (1997) la accesibilidad resulta un criterio muy importante para el funcionamiento de cualquier planta termosolar, tanto a las redes eléctricas como a los caminos.

La red vial hace posible que los trabajadores e insumos lleguen al emplazamiento de la planta, y la cercanía a la red de alta tensión abarata los costos de conexión. Por ello, la búsqueda de las rutas principales y las redes eléctricas de alta tensión, es uno de los desafíos más importantes para la localización de plantas termosolares (Orellana, 2009). Téllez (2008) plantea como uno de los criterios para la viabilidad de una planta termosolar, es que esta tenga una buena comunicación y accesibilidad.

4.1.6. Mano de Obra

Uno de los criterios a considerar en las decisiones de localización incluyen la disponibilidad de mano de obra, para esto, debe haber un suministro suficiente de mano de obra para cumplir los niveles de producción planeados; además, los trabajadores deben tener las destrezas apropiadas (Collier y Evans, 2009).

Otro de los criterios que influyen en la planeación de la localización de una planta es la calidad de mano de obra. La cual, se refiere a los niveles educativos y de habilidades de la mano de obra que deben estar de acuerdo con las necesidades de la compañía (Chase et al., 2009). Una experiencia mexicana donde se requerirán 250 empleos temporales, es el caso para la creación de la planta híbrida solar-gas Agua Prieta II en el municipio de Agua Prieta, Sonora, México (El Imparcial, 2011).

4.1.7. Temperatura

Según Arán (2008), las temperaturas altas de un lugar tienen una incidencia negativa en la producción eléctrica de las instalaciones de energía solar. El mismo autor plantea en su investigación denominada: “Modelo de análisis espacial para la evaluación de la capacidad de acogida del territorio en la ubicación de centrales fotovoltaicas conectadas a red”, que es conveniente incluir como criterio de localización los valores de las temperaturas medias anuales de las zonas de estudio.

4.1.8. Investigación Sobre Áreas con Potencial para la Instalación de Plantas Termosolares en Chile

En la investigación realizada por Orellana (2009), para determinar las áreas con potencial para la instalación de plantas termosolares⁷ en la III Región de Atacama, Chile; el autor utilizó los criterios y parámetros de localización que se presentan a continuación por medio de la tabla 4.1.

| CRITERIOS | PARÁMETROS |
|--------------------------|---|
| Radiación solar | Sobre los 1,700 kWh/m ² al año o 5 kWh/m ² día promedio anual |
| Pendiente | Menor a 3% |
| Altitud | Bajo los 2,800 m.s.n.m. |
| Línea de falla geológica | Mínimo 3 km |
| Nubosidad | 30 km desde la línea de costa hacia el interior |
| Usos de suelo | Excluir zonas protegidas, áreas urbanas y cuerpos de agua |
| Red hídrica | Máxima distancia 50 km |
| Red vial | Máxima distancia 50 km |
| Red eléctrica | Máxima distancia 50 km |
| Superficie | Superficies mayores a 500 ha. |

Tabla 4.1. Criterios y parámetros de localización de áreas con potencial para la instalación de plantas termosolares en Chile.

Fuente: Orellana, 2009.

⁷ Para cualquier tipo de tecnología (canales parabólicos, torre central, disco parabólico y/o Fresnel lineal).

4.2. ESTABLECIMIENTO DE LOS CRITERIOS Y PARÁMETROS DE LOCALIZACIÓN

Para cumplir con la segunda etapa de la metodología, se consideraron los criterios y parámetros de localización de plantas termosolares identificados por medio de la revisión bibliográfica. Posteriormente, dichos criterios y parámetros fueron planteados a un experto para definir si eran o no relevantes y apropiados. Finalmente, el experto estableció los criterios y parámetros de localización considerando las características particulares del estado de Sonora.

4.2.1. Consulta a Experto

De acuerdo con Van Gigch (2003), un experto es alguien quien, a través de la familiarización con una tarea y su medio, puede discernir la importancia relativa de las señales que se le presentan y puede penetrar en una situación al monitorear sólo unas cuantas variables clave.

Puede reconocerse un experto, de acuerdo con las siguientes medidas:

1. El número de variables que él considera importantes, para llegar a una decisión. El experto utiliza menos variables, que el que no lo es.
2. La importancia relativa que él concede a estas variables clave, en comparación al no experto.
3. La velocidad o eficiencia que muestra al identificar las señales importantes en la situación.
4. La exactitud de su decisión –qué tan cercanas o lejanas están sus respuestas del óptimo.
5. La confiabilidad de sus predicciones –cuántas veces toma la decisión correcta.

Se consideró como experto al fundador del Grupo de Energía de la UNISON, miembro de la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) y de la Sociedad Internacional de Energía Solar (SIES) y además, Responsable Técnico del CPH.

Para realizar la consulta a el experto, se llevó a cabo una sesión de trabajo donde se le planteó al mismo los criterios y parámetros de localización de plantas termosolares identificados en la revisión bibliográfica realizada por esta investigación.

Posteriormente, el experto tomó la decisión de definir la relevancia de los criterios que se le plantearon (tabla 4.2), considerando las características particulares del estado de Sonora.

| Criterios | Relevancia |
|--|------------|
| Radiación solar | No |
| Pendiente | Sí |
| Altitud | No |
| Línea de falla geológica | No |
| Nubosidad | No |
| Usos de suelo | Sí |
| Disponibilidad de agua | Sí |
| Red vial | Sí |
| Red eléctrica | Sí |
| Superficie | No |
| Temperatura | No |
| Distancia a poblaciones mayores a 3,000 habitantes | Sí |

Tabla 4.2. Criterios establecidos por el experto.

Durante la sesión de trabajo llevada a cabo, el experto estableció que el criterio de radiación solar no era necesario considerarlo para efectos de localización. Por estudios realizados por el Grupo de Energía de la UNISON, se ha determinado que Sonora posee una radiación solar global horizontal anualizada de 5.1 a 6.1kWh/m²-

día en su territorio; esto lo podemos comprobar por medio de la figura 4.2 que se presenta más adelante.

Por lo tanto, si consideramos 365 días de un año, la radiación solar anual que recibe Sonora es de 1,862 a 2,227 kWh/m²-año, aproximadamente. Esto quiere decir, que todo el estado de Sonora cumple con el criterio más importante (radiación solar), para poder instalar plantas termosolares tipo torre central.



Figura 4.2. Radiación solar global horizontal anualizada en kWh/m²-día para el estado de Sonora.

Fuente: Cabanillas (2008).

El experto decidió en base a las características particulares del estado de Sonora, que los criterios de altitud, línea de falla geológica, nubosidad, superficie y temperatura; no eran relevantes para ser establecidos como criterios de localización de plantas termosolares tipo torre central, en el estado de Sonora.

Finalmente, el experto estableció los parámetros apropiados de cada uno de los criterios definidos como relevantes anteriormente; esto lo podemos ver en la tabla 4.3 que se presenta a continuación:

| Criterios | Parámetros |
|--|---|
| Red eléctrica | Máxima distancia 10 km |
| Disponibilidad de agua | Máxima distancia 10 km |
| Red vial | Máxima distancia 10 km |
| Pendiente | Menor a 3% |
| Usos de suelo | Excluir zonas protegidas, áreas urbanas y cuerpos de agua |
| Distancia a poblaciones mayores a 3,000 habitantes | Máxima distancia 15 km |

Tabla 4.3. Criterios y parámetros establecidos por el experto.

Fuente: Elaboración propia.

4.3. APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS Y PARÁMETROS DE LOCALIZACIÓN EN EL SIG

Para cumplir con la tercera etapa de la metodología, se aplicaron los criterios y parámetros de localización en el SIG, dando como resultado capas de información de cada criterio evaluado con su respectivo parámetro.

La aplicación de los criterios y parámetros de localización se llevó a cabo de la siguiente manera:

- En primer lugar, cada criterio fue procesado de forma independiente en el SIG incorporando los parámetros de localización respectivos. Esto, generó una cobertura parcial de cada uno de ellos en las cuáles la información fue tratada de forma booleana, es decir, las áreas sin potencial tienen un identificador cero y las áreas con potencial poseen identificador uno.
- En segundo lugar, se procesaron estas coberturas booleanas a través de la superposición de imágenes, con lo cual se obtuvieron las áreas finales con potencial para la instalación de plantas termosolares tipo torre central, en el estado Sonora; aplicando todos los criterios y sus respectivos parámetros de localización.

La aplicación de los criterios y parámetros de localización en el SIG, se realizó considerando el diagrama de la figura 4.3 que se presenta en la página siguiente.

- Diagrama del Proceso de Aplicación en el SIG

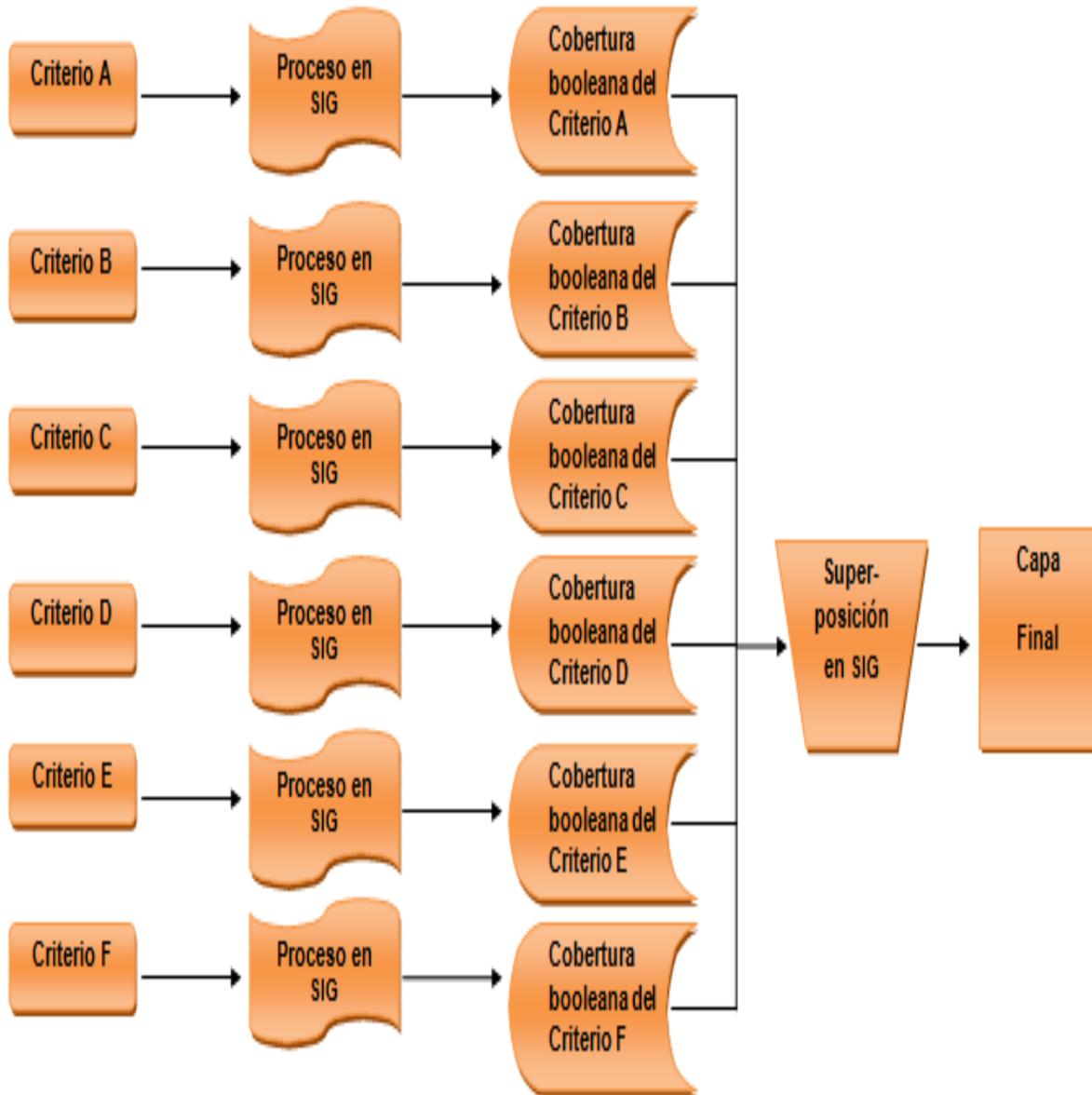


Figura 4.3. Diagrama del proceso de aplicación en el SIG.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.1. Red Eléctrica

A continuación se presenta la capa de información correspondiente al criterio de red eléctrica, después de haber sido procesado en el SIG:

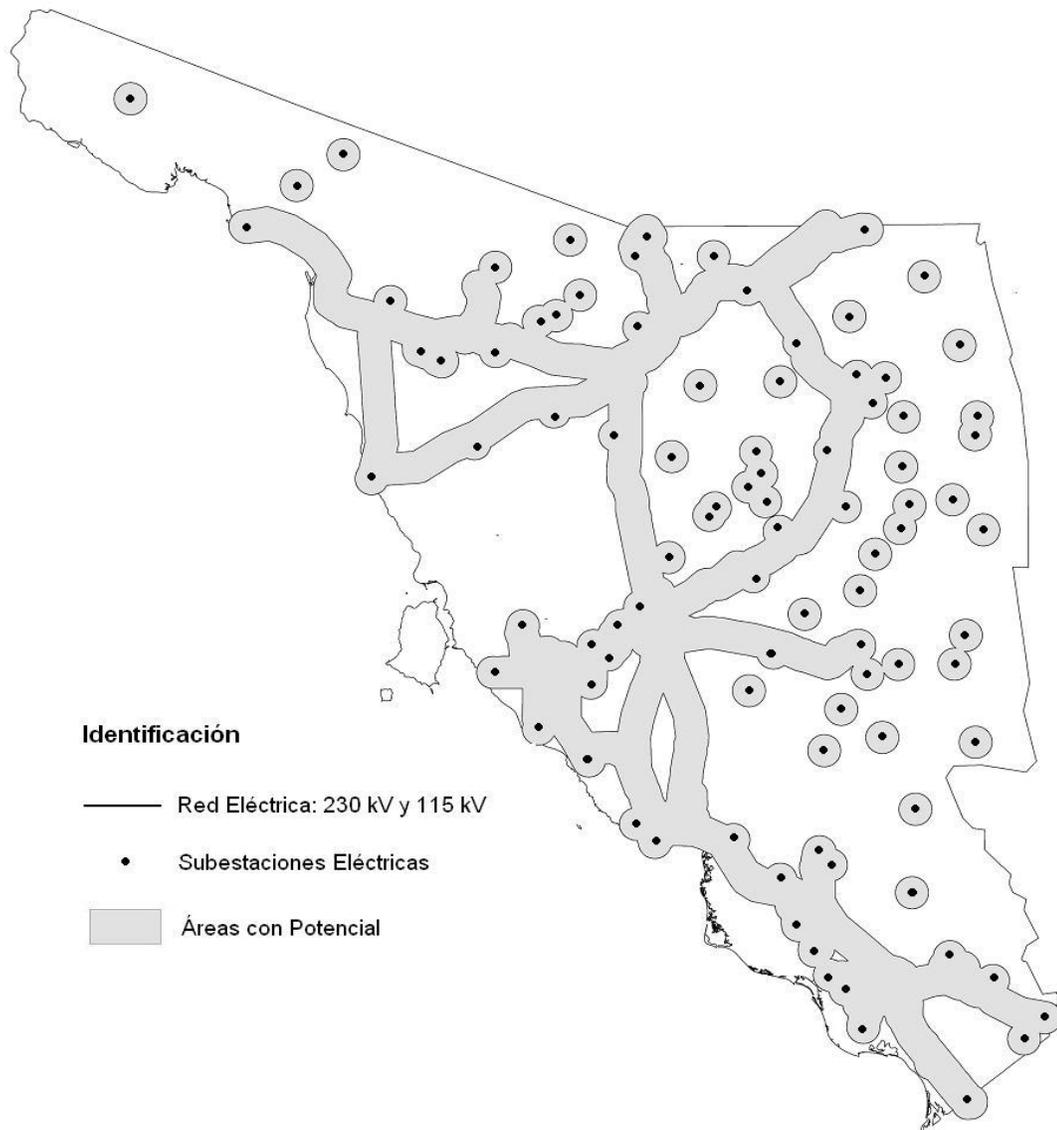


Figura 4.4. Red eléctrica en Sonora.

Fuente: Elaboración propia.

La cobertura de este criterio se generó a partir de la digitalización de las líneas de transmisión (230 kV) y distribución (115 kV) eléctrica. Además, se consideraron las subestaciones eléctricas de todo el estado de Sonora, de acuerdo con información proporcionada por CFE.

Al tener las líneas georeferenciadas, fueron convertidas a Shape para ser trabajadas con el análisis de corredores, generando la cobertura que se muestra en la figura 4.4.

Como se muestra en la misma figura, la red eléctrica fue sometida al análisis de corredores de valor 10 km; a partir de las líneas de transmisión, distribución y subestaciones eléctricas. De esta manera se generó como resultado las áreas con potencial (color gris) para la instalación de plantas termosolares tipo torre central, según el criterio de red eléctrica.

4.3.2. Disponibilidad de Agua

A continuación se presenta la capa de información correspondiente al criterio de disponibilidad de agua, después de haber sido procesado en el SIG:

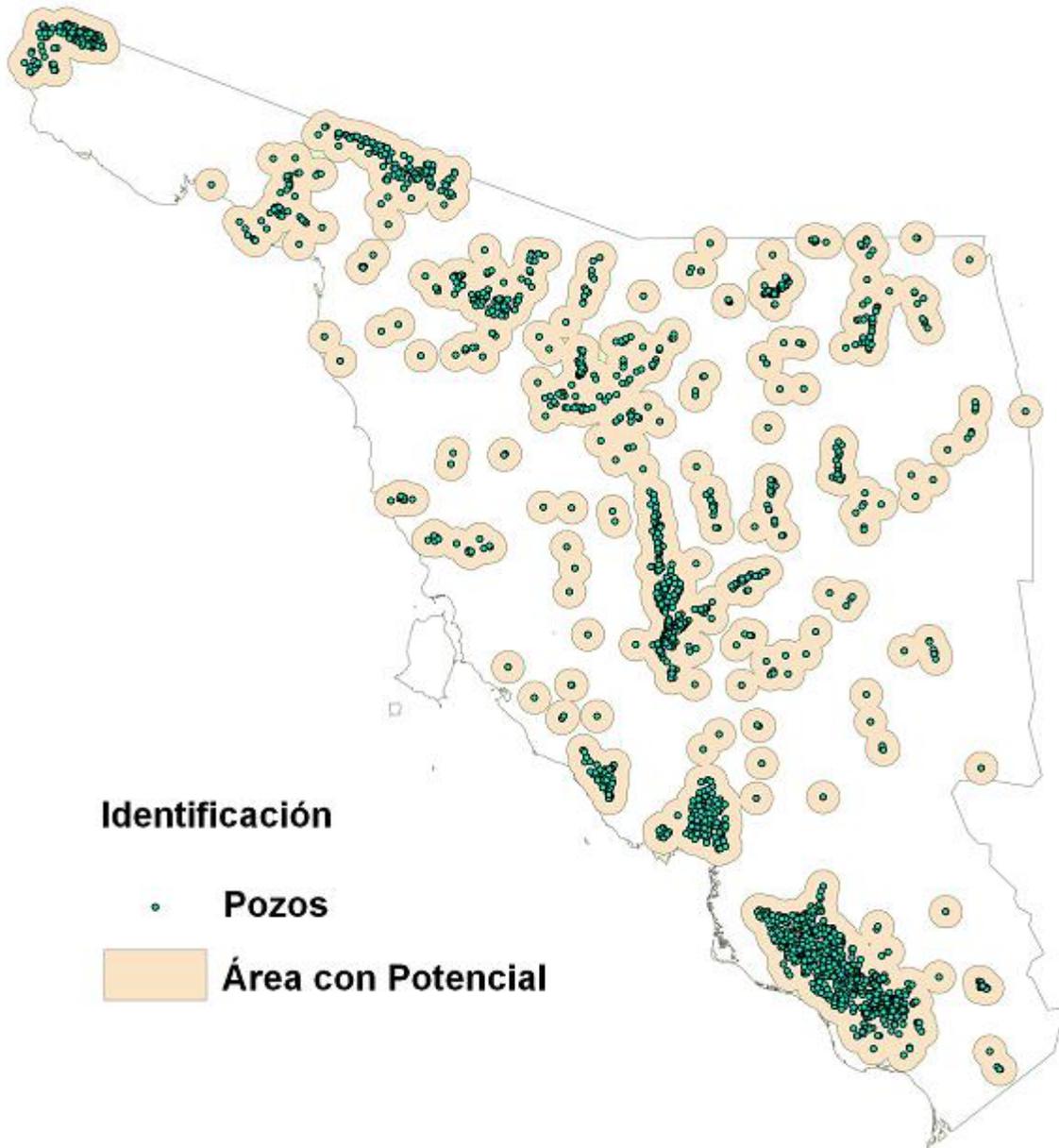


Figura 4.5. Disponibilidad de agua en Sonora.

Fuente: Elaboración propia.

Para este criterio se consideraron los pozos que cuentan con más de 250,000 litros de agua en Sonora, de acuerdo con información del Departamento de Geología de la UNISON, ya que las plantas termosolares con capacidad de producción eléctrica de 10 MW/h requieren al menos de 34 m³ diarios de agua.

Con las coberturas se realizó un análisis de corredores a partir de 10 km de distancia, tal como fue establecido en el parámetro de disponibilidad de agua. El resultado de esto se puede observar en la figura 4.5; donde los pozos son identificados de color negro y las áreas con potencial para la instalación de plantas termosolares tipo torre central de color gris, según el criterio de disponibilidad de agua.

4.3.3. Red Vial

A continuación se presenta la capa de información correspondiente al criterio de red vial, después de haber sido procesado en el SIG:

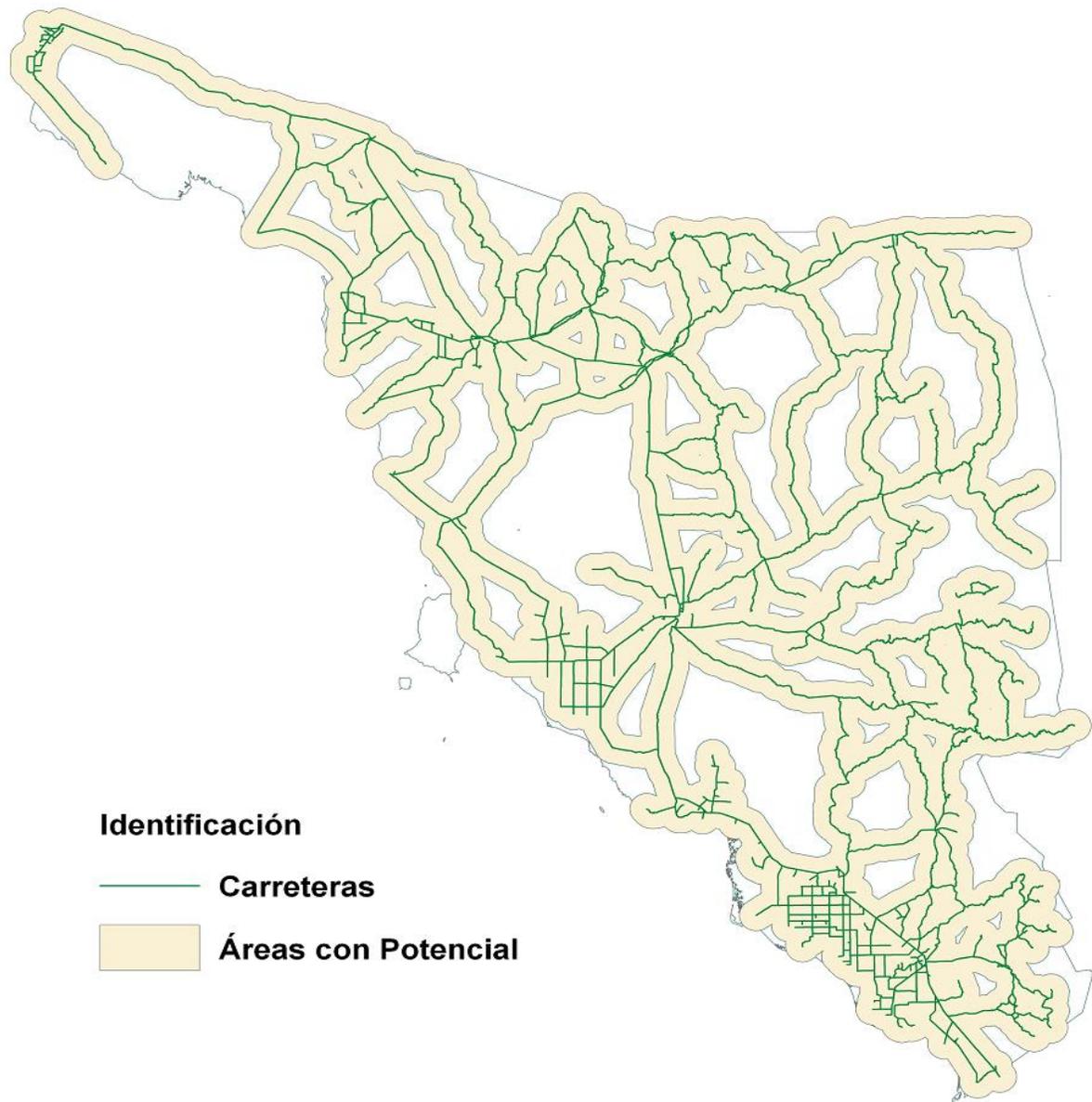


Figura 4.6. Red vial en Sonora.

Fuente: Elaboración propia.

Este criterio se trabajó sobre las principales rutas de comunicación (carreteras) que posee el estado de Sonora. Las coberturas de escala fueron obtenidas por medio de INEGI, con lo cual se generó a través del análisis de corredores un polígono de 10 km respecto a la red vial. Este resultado se muestra en la figura 4.6 de la página anterior.

Como se puede apreciar en la misma figura, las carreteras en Sonora representan las principales rutas de comunicación que sirven de conexión con las principales ciudades.

Tras el análisis de corredores, se pudo identificar las áreas con potencial (color gris) para la instalación de plantas termosolares tipo torre central, según el criterio de red vial.

4.3.4. Pendiente

A continuación se presenta la capa de información correspondiente al criterio de pendiente, después de haber sido procesado en el SIG:

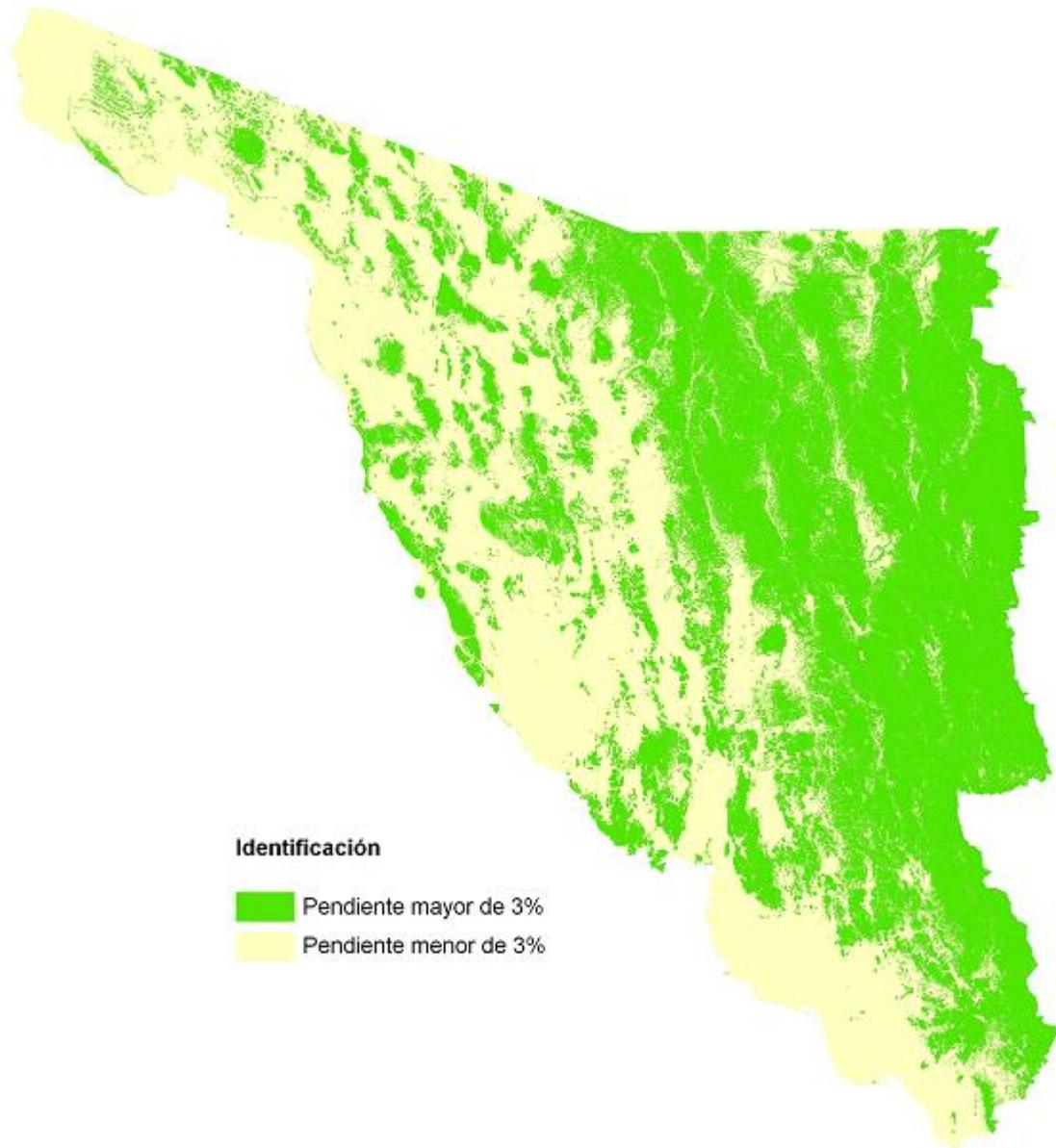


Figura 4.7. Pendiente del terreno en Sonora.

Fuente: Elaboración propia.

Para cumplir con lo especificado en el parámetro de este criterio, se utilizó información referente a la pendiente de terreno en Sonora, de acuerdo con el Departamento de Geología de la UNISON.

Con la información obtenida se determinaron las pendientes adecuadas a través del SIG, que arrojó como resultado una cobertura booleana que se muestra en la figura 4.7 de la página anterior, donde podemos identificar las áreas con más de 3% de pendiente del terreno (color negro) y con menos de 3% de pendiente del terreno (color gris); correspondientes estas últimas a las áreas con potencial para la instalación de plantas termosolares tipo torre central, según el criterio de pendiente del terreno.

4.3.5. Usos de Suelo

A continuación se presenta la capa de información correspondiente al criterio de usos de suelo, después de haber sido procesado en el SIG:

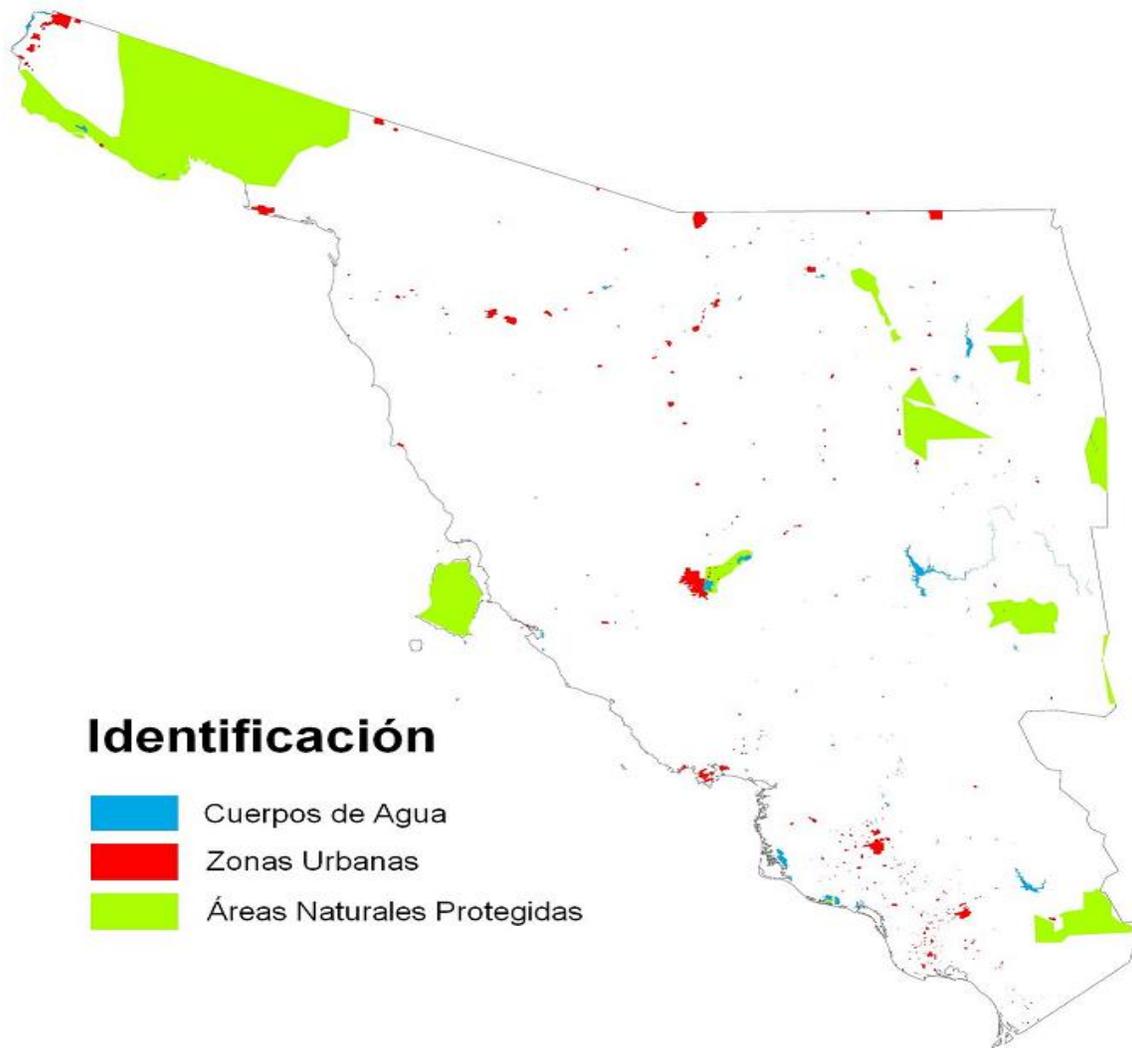


Figura 4.8. Usos de suelo en Sonora.

Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar este criterio en el SIG, se consideraron imágenes de las diferentes Áreas Naturales Protegidas (ANP) que posee el estado de Sonora, de acuerdo con la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP).

Según CONANP (2012), el estado de Sonora cuenta con las siguientes cuatro ANP federales y tres ANP estatales:

- Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado (Federal)
- El Pinacate y Gran Desierto de Altar (Federal)
- Sierra de Ajos – Bavispe (Federal)
- Sierra de Álamos – Río Cuchujaqui (Federal)
- Sistemas de Presas Abelardo Rodríguez Luján - El Molinito (Estatal)
- Arivechi Cerro Las Conchas (Estatal)
- Estero El Soldado (Estatal)

Con respecto a las imágenes de las zonas urbanas y cuerpos de agua (presas) que posee el estado de Sonora, fueron obtenidas por medio del Departamento de Geología de la UNISON.

Como se muestra en la figura 4.8 de la página anterior, los tres aspectos establecidos para el parámetro del criterio de usos de suelo fueron procesados en el SIG, para posteriormente ser excluidos de las áreas con potencial (color blanco) que posee el estado de Sonora para la instalación de plantas termosolares tipo torre central, según el criterio de usos de suelo.

4.3.6. Distancia a poblaciones mayores a 3,000 habitantes

A continuación se presenta la capa de información correspondiente al criterio de distancia a poblaciones mayores a 3,000 habitantes, después de haber sido procesado en el SIG:

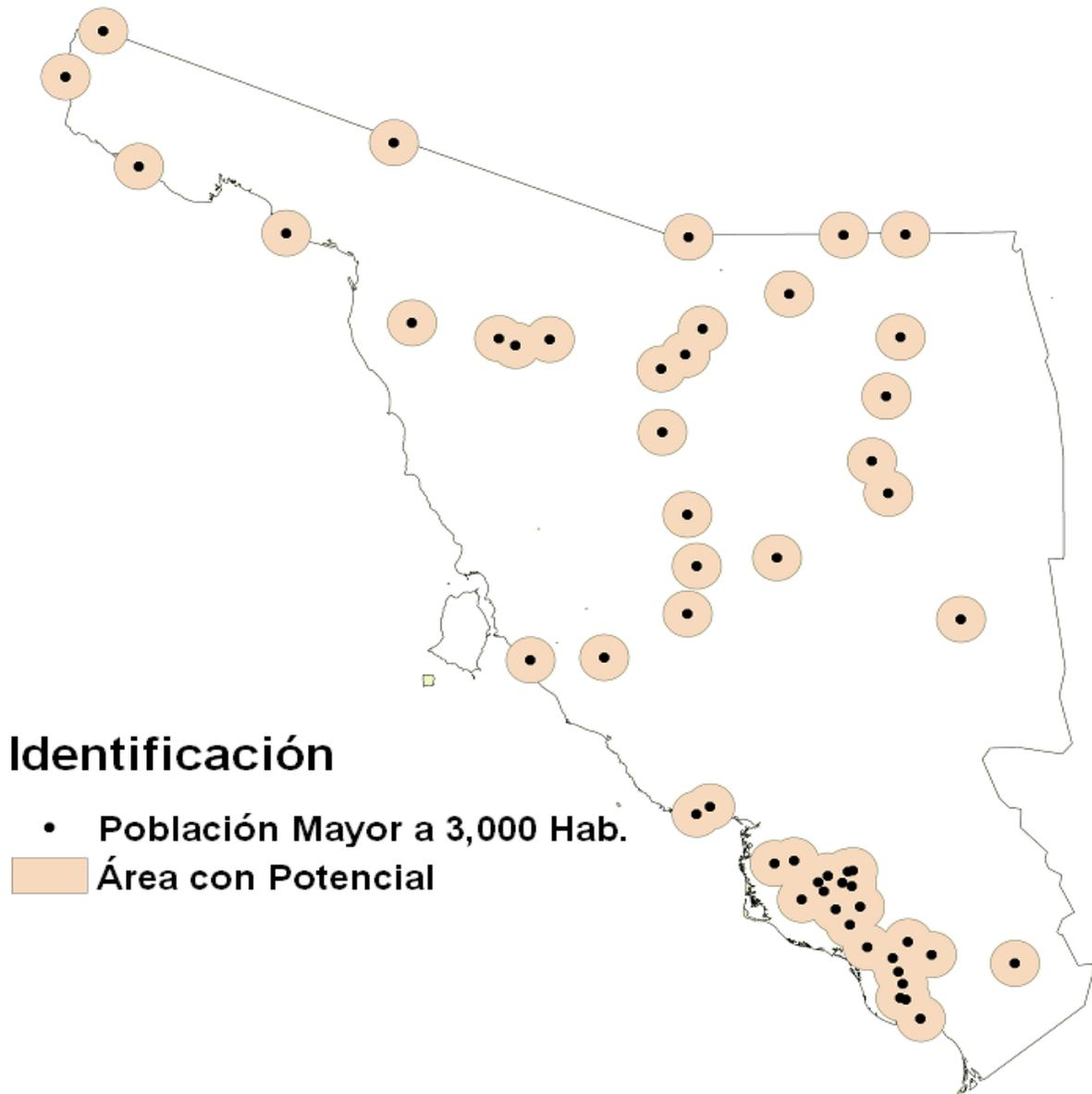


Figura 4.9. Distancia a poblaciones mayores a 3,000 habitantes en Sonora.

Fuente: Elaboración propia.

Para este criterio se consideraron las poblaciones mayores a 3,000 habitantes en el estado de Sonora. Las coberturas de escala fueron obtenidas por medio de INEGI, con lo cual se generó a través del análisis de corredores un círculo de 15 km con respecto a las poblaciones mayores a 3,000 habitantes. Este resultado se muestra en la figura 4.9 de la página anterior.

Como se puede apreciar en la misma figura, el estado de Sonora cuenta con más de 50 poblaciones mayores a 3,000 habitantes. Las cuales se pueden aprovechar para adquirir mano de obra en la construcción y mantenimiento de las plantas termosolares tipo torre central.

Tras el análisis de corredores, se pudo identificar las áreas con potencial (color gris) para la instalación de plantas termosolares tipo torre central, según el criterio de distancia a poblaciones mayores a 3,000 habitantes.

A continuación se presenta el proceso metodológico para obtener las áreas finales con potencial, esto se muestra por medio de la siguiente figura 4.10.

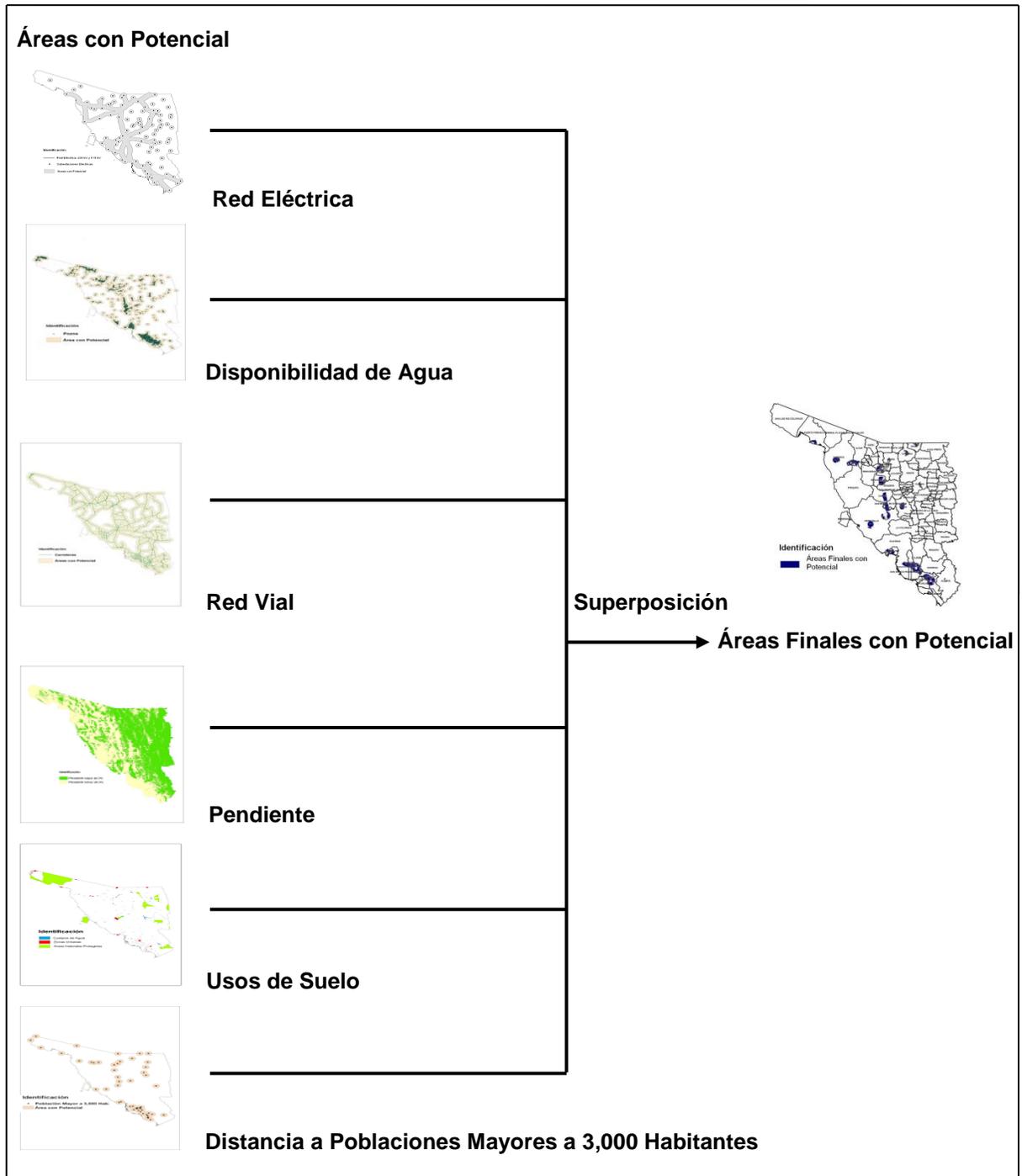


Figura 4.10. Esquema del proceso metodológico para obtener las áreas finales con potencial.

Fuente: Elaboración propia.

4.4. OBTENCIÓN DE LAS ÁREAS FINALES CON POTENCIAL EN EL ESTADO DE SONORA

Para cumplir con la cuarta etapa de la metodología, se realizó una superposición en el SIG, considerando las seis capas de información obtenidas en la etapa anterior. Dando como resultado final la siguiente figura 4.11.

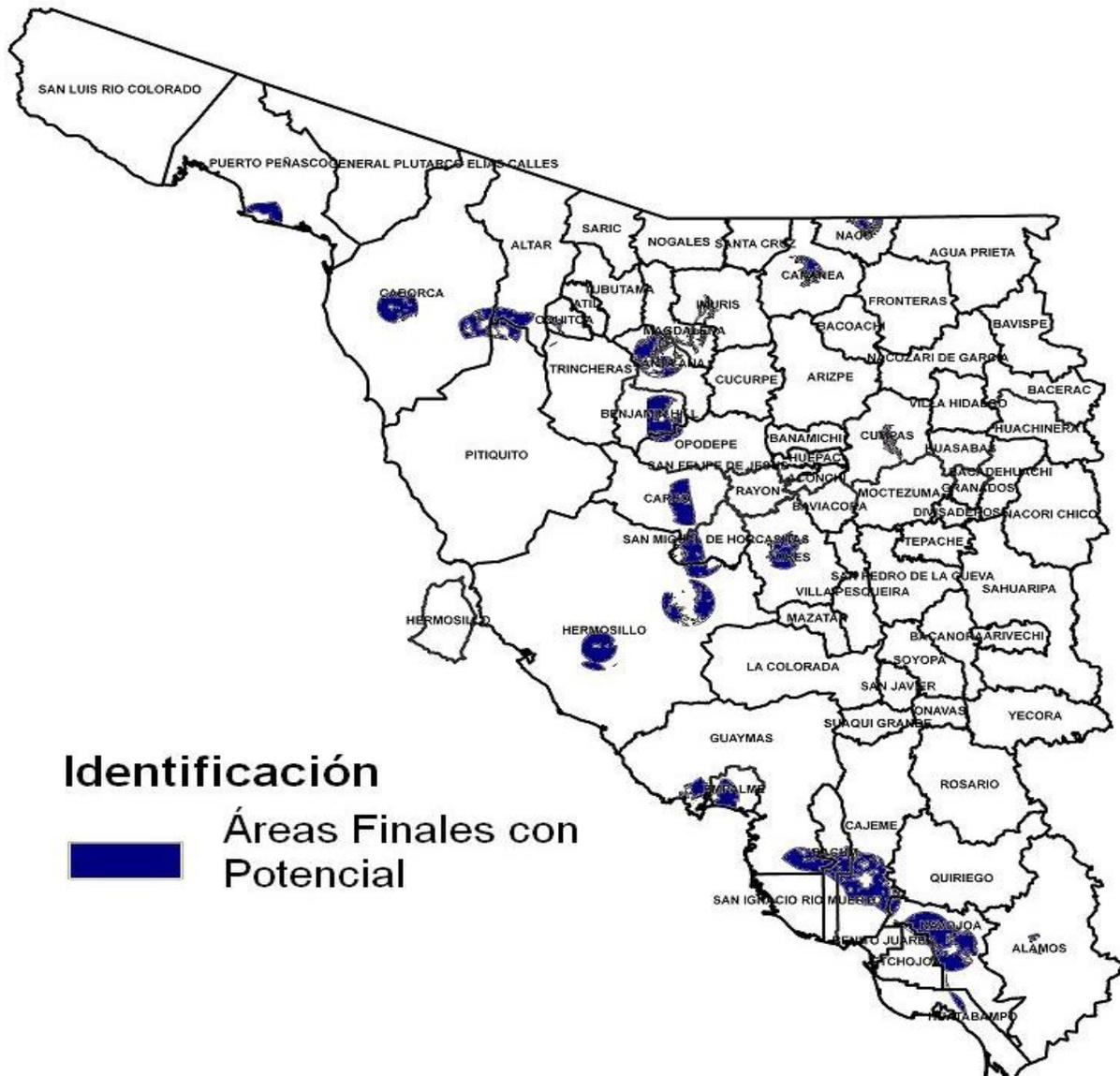


Figura 4.11. Áreas finales con potencial en Sonora.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 4.11 muestra las áreas finales con potencial para la instalación de plantas termosolares tipo torre central. Esto se realizó a través de las coberturas con potencial de cada criterio, las cuales están representadas en cada una de las capas de información de color gris (red eléctrica, disponibilidad de agua, red vial, pendiente y distancia a poblaciones mayores a 3,000 habitantes) y de color blanco (usos de suelo).

Tras la superposición de las áreas con potencial correspondientes a cada uno de los criterios, se generó la última capa de información llamada áreas finales con potencial en Sonora (figura 4.11); dichas áreas (color gris) cumplen con todos los criterios y parámetros de localización y las cuáles pertenecen a los siguientes veinticuatro municipios del estado de Sonora: Puerto Peñasco, Oquitoa, Altar, Pitiquito, Caborca, Naco, Cananea, Ímuris, Magdalena, Cumpas, Santa Ana, Benjamín Hill, Opodepe, Carbó, Ures, San Miguel de Horcasitas, Hermosillo, Guaymas, Empalme, Bácum, Cajeme, Navojoa, Huatabampo y Álamos.

Las áreas finales con potencial se encuentran ubicadas en la región del noroeste, norte, centro y sur (valle del yaqui y del mayo) del estado de Sonora.

4.5. DETERMINACIÓN DE LAS LOCALIZACIONES CON MAYOR FACTIBILIDAD EN EL ESTADO DE SONORA

Para cumplir con la quinta etapa de la metodología, fue necesario aplicar el método de calificación de criterios estratégicos por medio de seis pasos. Para posteriormente, ofrecer como resultado final las localizaciones con mayor factibilidad en el estado de Sonora y el orden para la instalación de las plantas termosolares tipo torre central.

4.5.1. Aplicación del Método de Calificación de Criterios Estratégicos

Se llevó a cabo un panel de expertos integrado por un Jefe del Departamento de Control y Operación de CFE División Noroeste, un Doctor en Energía Solar y un Doctor en Ingeniería Industrial Sustentable; con la finalidad de aplicar el método de calificación de criterios estratégicos.

Para esto, se decidió primeramente que las localizaciones con potencial corresponderían a los municipios del estado Sonora que presentaron áreas finales con potencial. Después, se dividió a Sonora en cinco zonas con sus respectivas localizaciones con potencial; quedando de la siguiente manera:

Zona I: Puerto Peñasco, Oquitoa, Altar, Pitiquito y Caborca.

Zona II: Naco, Cananea, Ímuris, Magdalena y Cumpas.

Zona III: Santa Ana, Benjamín Hill, Opodepe, Carbó y Ures.

Zona IV: San Miguel de Horcasitas, Hermosillo, Guaymas, Empalme y Bácum.

Zona V: Cajeme, Navojoa, Huatabampo y Álamos.

A continuación se presentan los pasos que integraron el método de calificación de criterios estratégicos (figura 4.12):

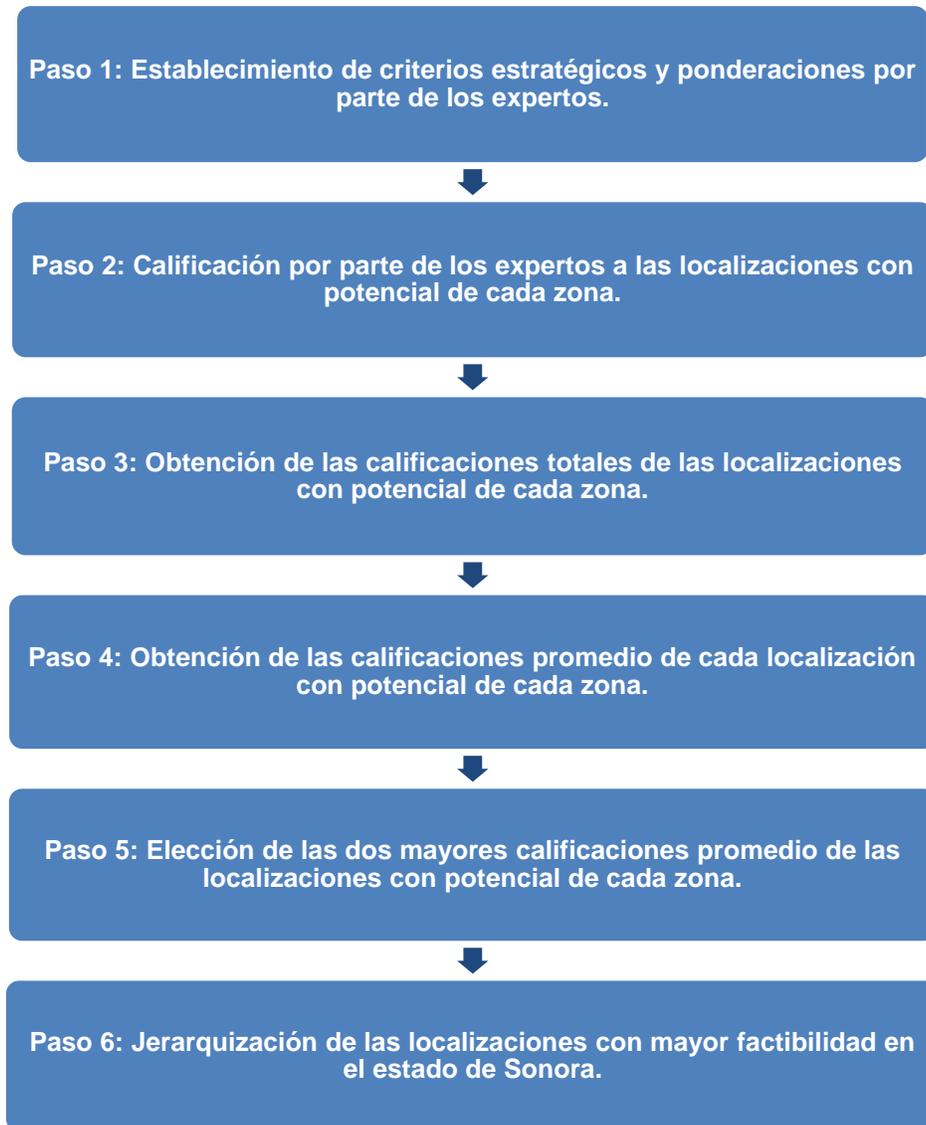


Figura 4.12. Pasos del método de calificación de criterios estratégicos.

El primer paso del método fue establecer los criterios estratégicos y sus respectivas ponderaciones (tabla 4.4) por parte de los expertos:

| Criterios Estratégicos | Ponderación |
|-------------------------------|--------------------|
| Costo del terreno | 20% |
| Infraestructura y servicios | 30% |
| Cercanía al consumidor | 50% |

Tabla 4.4. Criterios estratégicos y sus ponderaciones.

El segundo paso del método fue la participación de los expertos para calificar a cada zona con sus respectivas localizaciones con potencial, considerando una calificación desde 0 hasta el 10. Para esto, la calificación de 10 significa la mejor opción y la de 0 significa la peor opción.

La interpretación de las calificaciones considerando los tres criterios estratégicos es la siguiente:

- Costo del terreno: La calificación de 10 significa que el costo del terreno de una localización con potencial es más barato. Por lo tanto, la calificación de 0 significa que el costo del terreno de una localización con potencial es más caro.
- Infraestructura y servicios: La calificación de 10 significa que la localización con potencial posee mejor infraestructura y servicios. Por lo tanto, la calificación de 0 significa que la infraestructura y servicios de la localización con potencial es peor.
- Cercanía al consumidor: La calificación de 10 significa que la localización con potencial se encuentra lo más cerca del consumidor. Por lo tanto, la calificación de 0 significa que la localización con potencial se encuentra lo más alejada del consumidor.

El proceso de calificación fue realizado por parte de los tres expertos, considerando el formato que se muestra en los ANEXOS 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 y 7.5. El tercer paso del método fue obtener los resultados totales de las localizaciones con potencial por cada zona evaluada (figuras 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17), con base en los ANEXOS contestados por los expertos. Dichos resultados totales se muestran a continuación:

Zona I

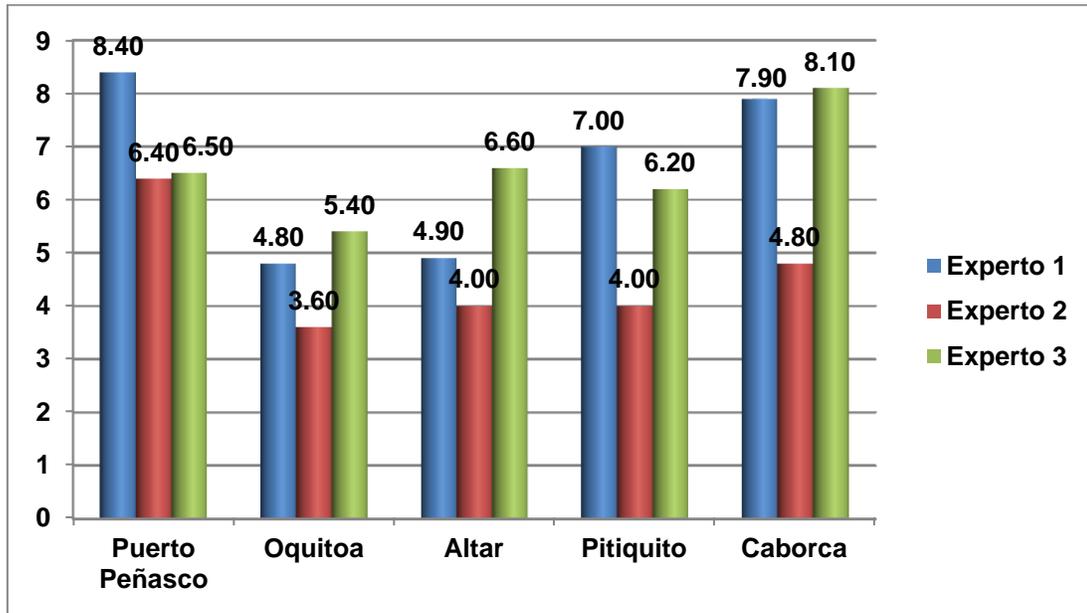


Figura 4.13. Resultados totales de la zona I.

Zona I

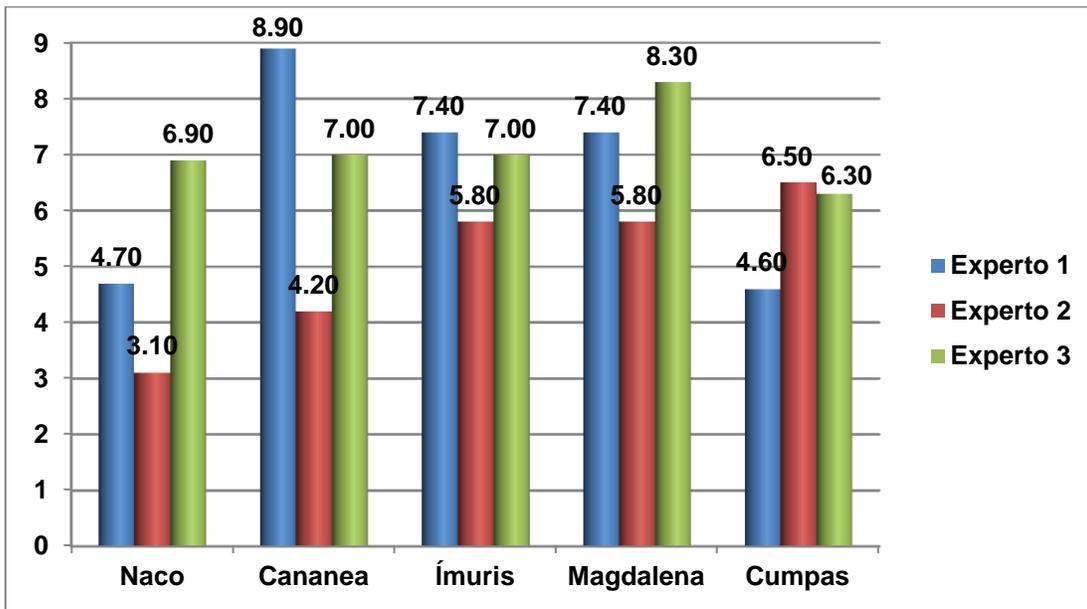


Figura 4.14. Resultados totales de la zona II.

Zona II

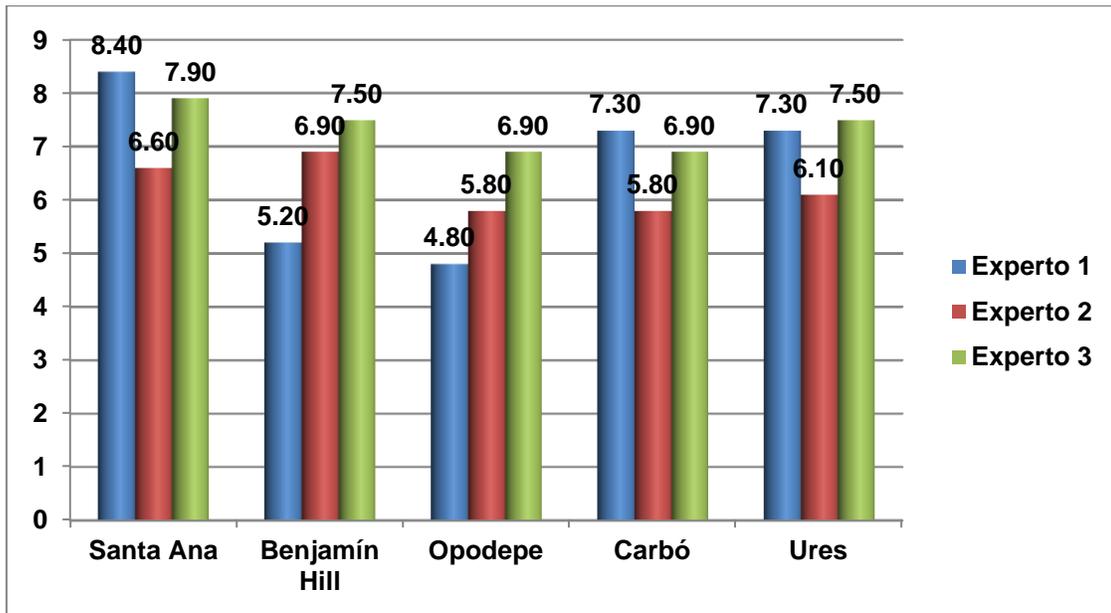


Figura 4.15. Resultados totales de la zona III.

Zona III

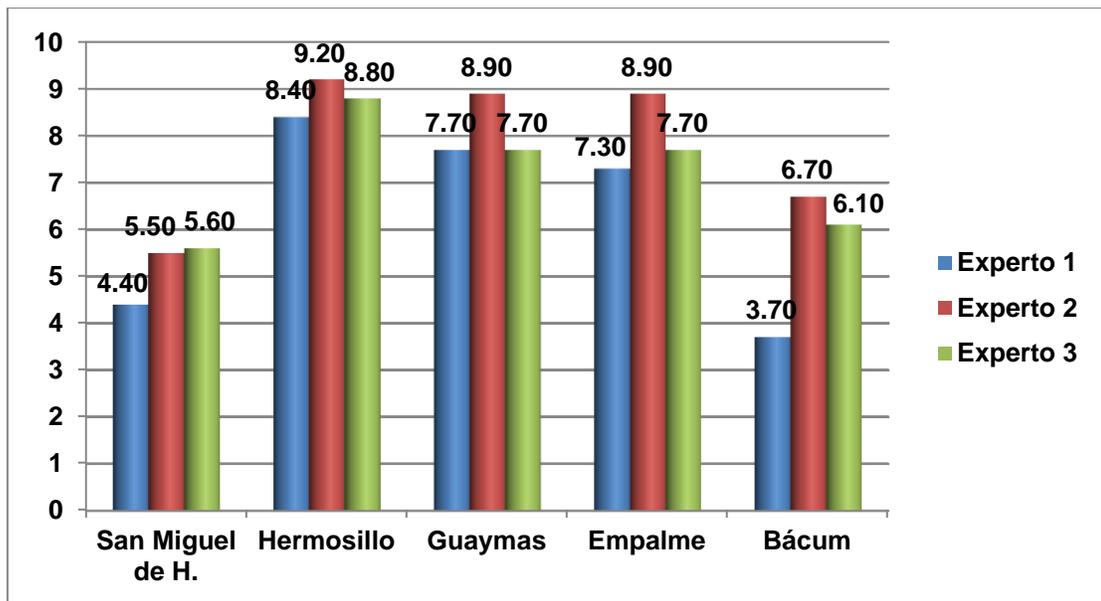


Figura 4.16. Resultados totales de la zona IV.

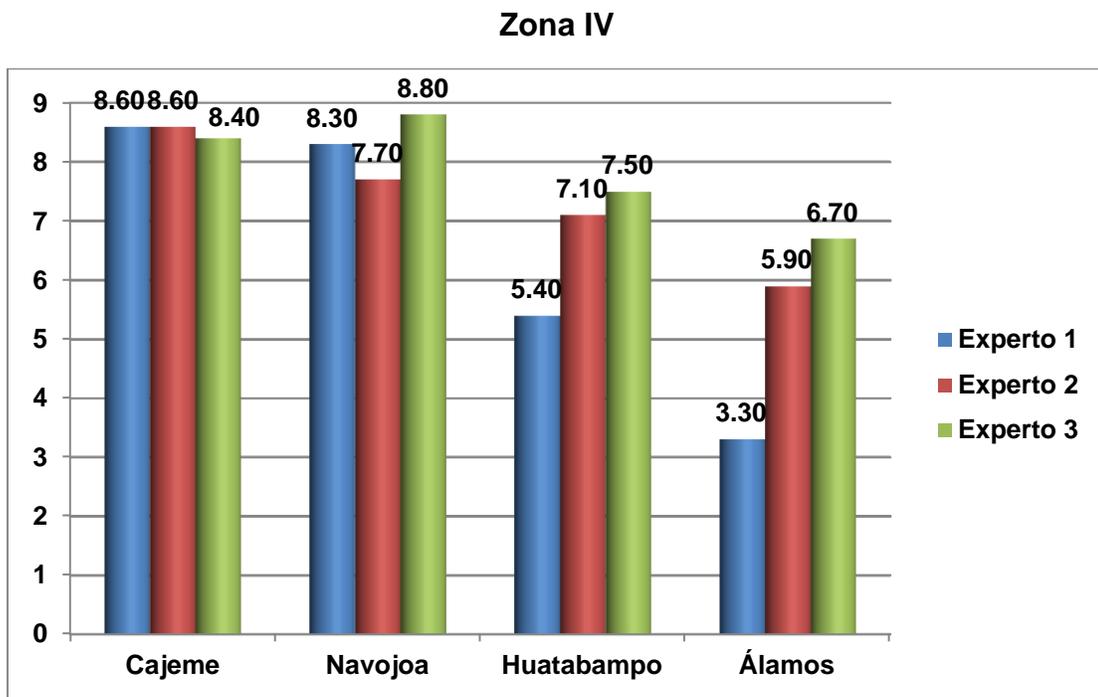


Figura 4.17. Resultados totales de la zona V.

El cuarto paso del método fue obtener las calificaciones promedio de las localizaciones con potencial de cada zona evaluada por los expertos (figuras 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22); dicha información se presenta a continuación:

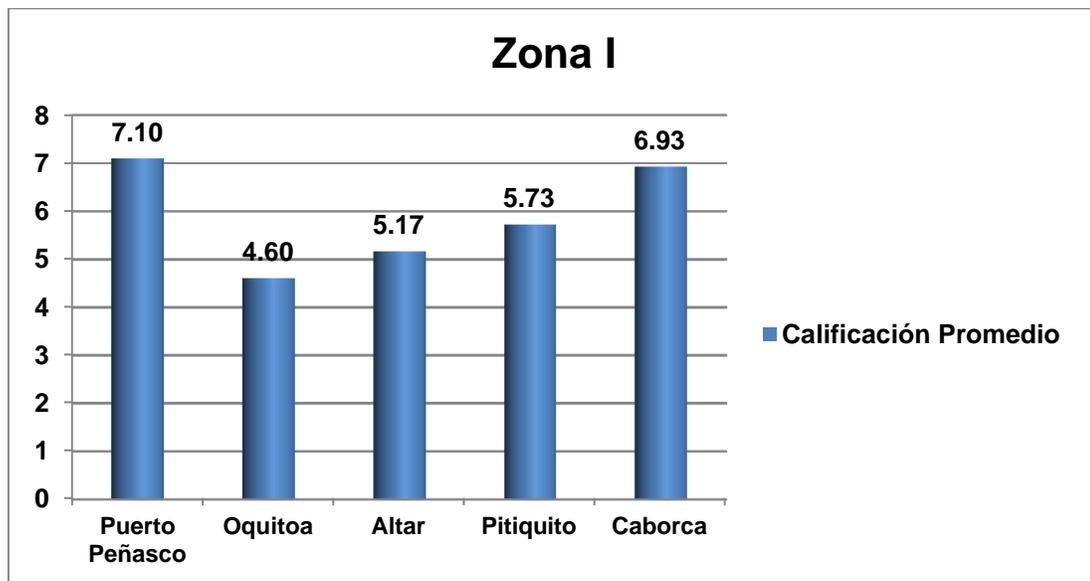


Figura 4.18. Calificaciones promedio de la zona I.

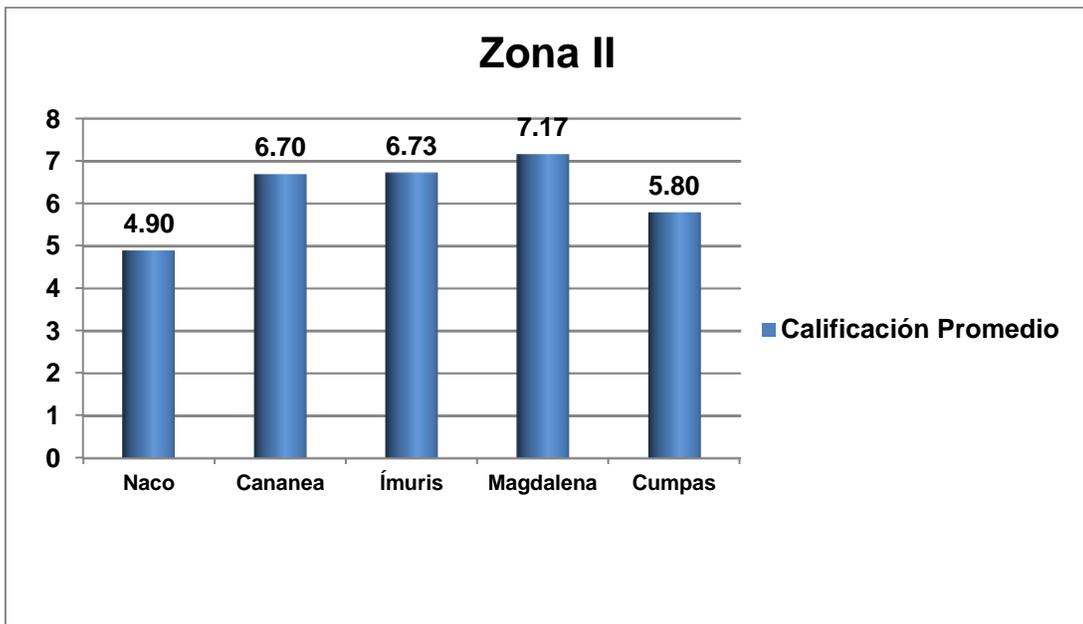


Figura 4.19. Calificaciones promedio de la zona II.

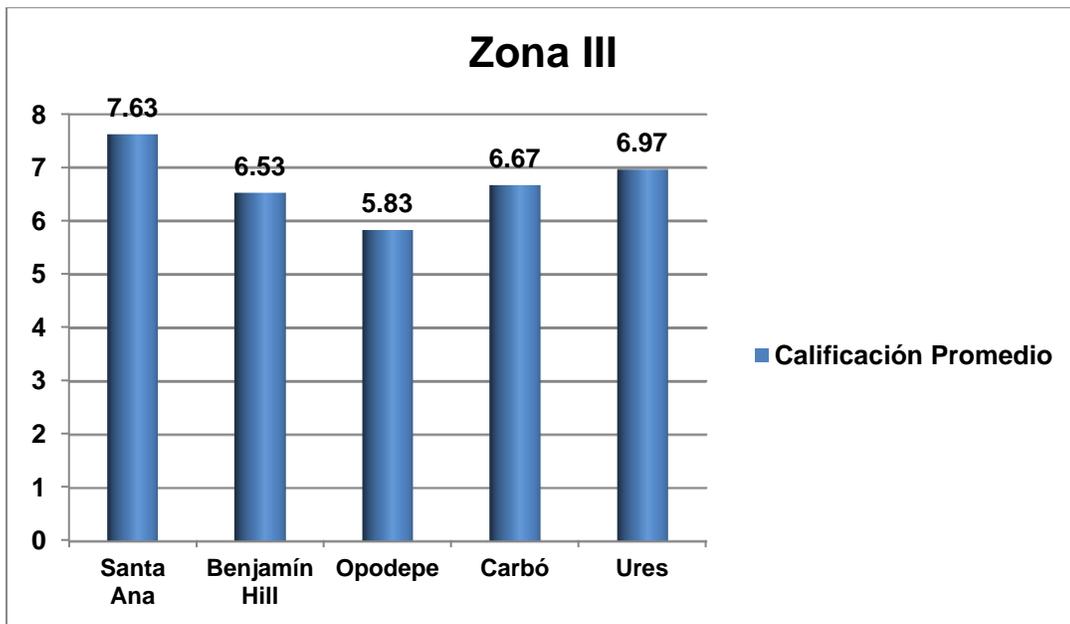


Figura 4.20. Calificaciones promedio de la zona III.

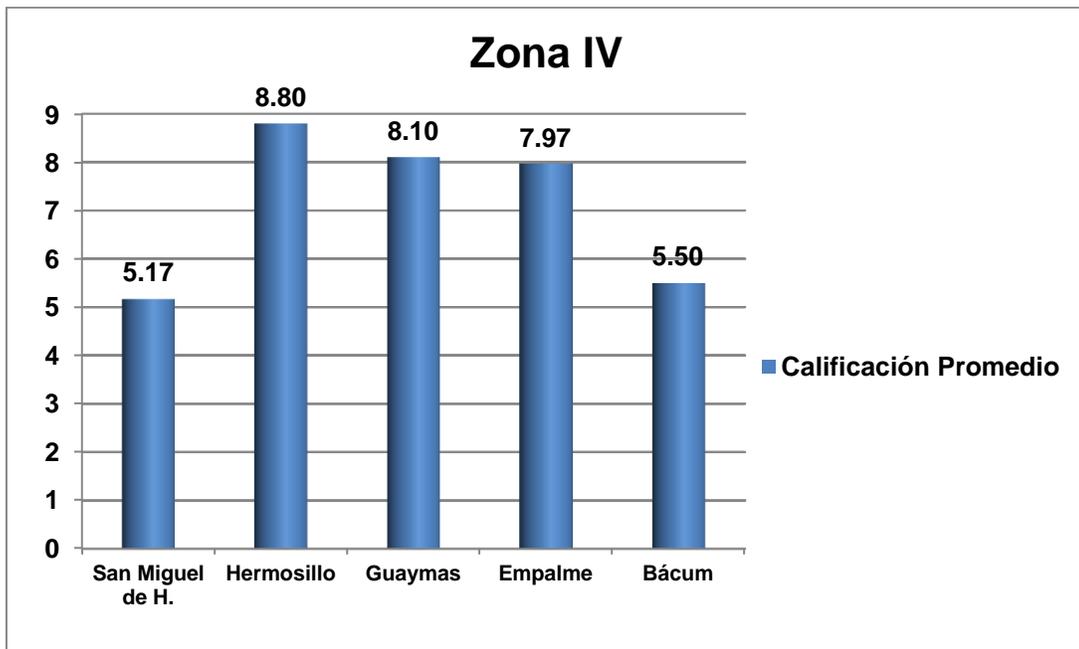


Figura 4.21. Calificaciones promedio de la zona IV.

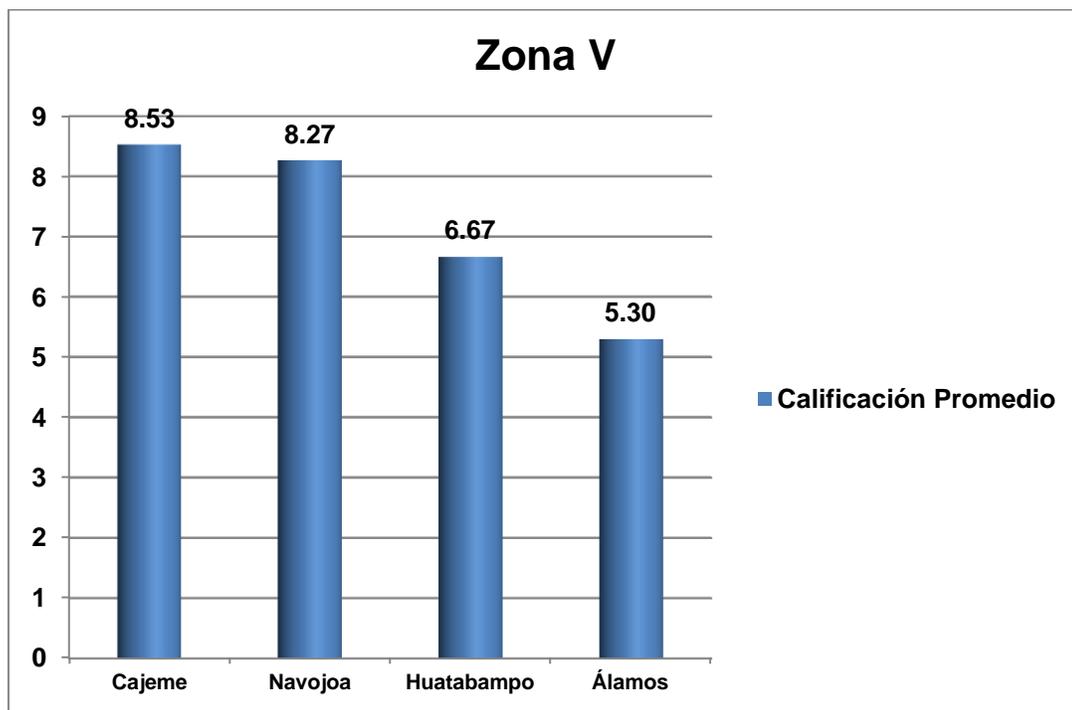


Figura 4.22. Calificaciones promedio de la zona V.

El quinto paso del método fue escoger las dos mejores localizaciones con potencial, que obtuvieron mayor calificación promedio en cada una de las zonas evaluadas y que a partir de aquí serán llamadas localizaciones con mayor factibilidad (figura 4.23), por ser las más importantes.

A continuación se presentan las localizaciones con mayor factibilidad en el estado de Sonora, que podrán ser utilizadas para instalar plantas termosolares tipo torre central:

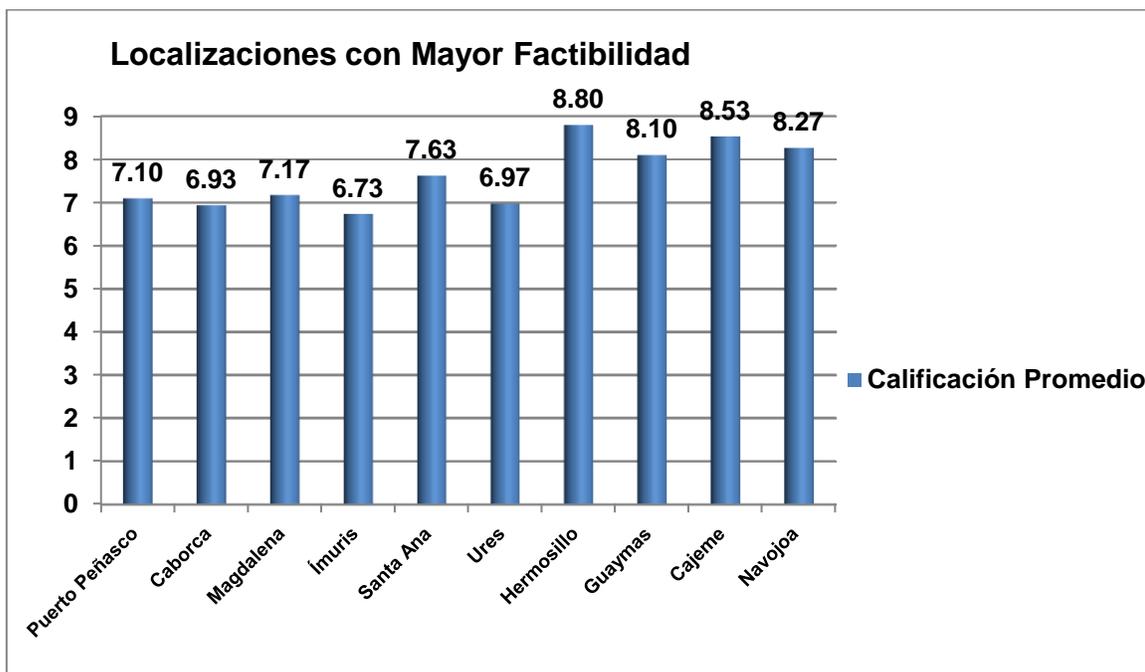


Figura 4.23. Localizaciones con mayor factibilidad.

El sexto paso del método fue realizar una jerarquización de las localizaciones con mayor factibilidad, de acuerdo a los resultados obtenidos en la figura 4.23. Esto, con la finalidad de determinar en cuál localización deberá instalarse la primera planta termosolar tipo torre central, en el estado de Sonora. En la tabla 4.5 de la página siguiente se presenta tal jerarquización.

| Orden de Instalación | Localización con Mayor Factibilidad |
|-----------------------------|--|
| 1 | Hermosillo |
| 2 | Cajeme |
| 3 | Navojoa |
| 4 | Guaymas |
| 5 | Santa Ana |
| 6 | Magdalena |
| 7 | Puerto Peñasco |
| 8 | Ures |
| 9 | Caborca |
| 10 | Ímuris |

Tabla 4.5. Localizaciones con mayor factibilidad y orden de instalación.

Con el resultado final obtenido por medio de la anterior jerarquización, podemos decir que el estado de Sonora posee dos localizaciones con mayor factibilidad en la región centro (Hermosillo y Ures), tres en la región sur (Cajeme, Navojoa y Guaymas), tres en la región norte (Santa Ana, Magdalena e Ímuris) y dos en la región noroeste (Puerto Peñasco y Caborca); para la instalación de plantas termosolares tipo torre central.

5.CONCLUSIONES

Para determinar localizaciones de nuevas instalaciones que contemplan aspectos geográficos, es necesario utilizar un tipo de SIG para poder estar en condiciones de ofrecer resultados confiables. Sin duda alguna, un SIG es una herramienta poderosa para poder encontrar áreas con potencial para localizaciones de plantas termosolares tipo torre central.

Al haber concluido esta investigación podemos establecer que no se rechaza la hipótesis planteada para esta tesis, ya que se determinaron las localizaciones con mayor factibilidad en el estado de Sonora para la instalación de plantas termosolares tipo torre central.

Con respecto a los objetivos específicos de esta tesis, podemos decir que se cumplieron totalmente. Ya que el primero de ellos fue el establecimiento de criterios y parámetros de localización, estableciéndose los siguientes: red eléctrica (distancia máxima 10 km), disponibilidad de agua (distancia máxima 10 km), red vial (distancia máxima 10 km), pendiente (menor a 3%), usos de suelo (excluir área protegidas, zonas urbanas y cuerpos de agua) y distancia a poblaciones mayores a 3,000 habitantes (distancia máxima 15 km); por medio de la revisión bibliográfica y la consulta a un experto.

El segundo de ellos fue la aplicación de los criterios y parámetros mencionados anteriormente en el SIG, obteniéndose como resultado las siguientes áreas finales con potencial para la instalación de este tipo de plantas y las cuáles pertenecen a los siguientes municipios, y que para efecto de esta tesis serán llamados localizaciones con potencial: Puerto Peñasco, Oquitoa, Altar, Pitiquito, Caborca, Naco, Cananea, Ímuris, Magdalena, Cumpas, Santa Ana, Benjamín Hill, Opodepe, Carbó, Ures, San Miguel de Horcasitas, Hermosillo, Guaymas, Empalme, Bácum, Cajeme, Navojoa, Huatabampo y Álamos.

El tercero de ellos fue la aplicación de un método de calificación para determinar las localizaciones con mayor factibilidad y el orden para la instalación de las plantas termosolares tipo torre central, en el estado de Sonora. Para cumplir con este objetivo específico, se aplicó el método de calificación de criterios estratégicos a un panel de expertos; considerando las localizaciones con potencial mencionadas anteriormente y tres criterios estratégicos establecidos por los mismos expertos.

El resultado final de la aplicación del método fueron las siguientes localizaciones con mayor factibilidad y el orden para la instalación de las plantas termosolares tipo torre central, en el estado de Sonora: (1) Hermosillo, (2) Cajeme, (3) Navojoa, (4) Guaymas, (5) Santa Ana, (6) Magdalena, (7) Puerto Peñasco, (8) Ures, (9) Caborca e (10) Ímuris.

Al haber cumplido satisfactoriamente con los tres objetivos específicos planteados por esta tesis, por consiguiente se cumplió totalmente con el objetivo general de la misma.

5.1. RECOMENDACIONES

Conforme a la experiencia que se obtuvo con la presente investigación se recomienda lo siguiente:

- Sonora tiene un grandioso potencial para poder aprovechar la radiación solar recibida diariamente y anualmente en su territorio. Si unimos esfuerzos por parte de las instituciones de educación superior y centros de investigación, gobierno federal y estatal, empresarios y sociedad en general; podremos convertir a Sonora en “la capital solar del mundo” al instalar el mayor número posible de plantas termosolares tipo torre central, en las localizaciones con mayor factibilidad determinadas por esta tesis, en un futuro no muy lejano.

- Dar una mayor difusión en los diferentes medios de comunicación del gran avance científico y tecnológico que cuenta el estado de Sonora, por medio de su CPH localizado en el municipio de Hermosillo.

5.2. TRABAJOS FUTUROS

A continuación se presentan algunos trabajos futuros que pueden llevarse a cabo:

- Realizar un análisis de microlocalización a las localizaciones con mayor factibilidad determinadas por esta tesis, de tal manera que se evalúen otros tipos de criterios, como por ejemplo: el tipo de terreno, propiedad del terreno, flora y fauna existente, impacto ambiental, riesgos laborales y de salud, entre otros.
- Realizar un análisis costo-beneficio de la producción masiva de helióstatos, considerando a la industria y proveeduría de la región.
- Determinar la capacidad de potencia eléctrica que deberán tener las futuras plantas termosolares tipo torre central para ser instaladas en Sonora.
- Determinar la cantidad de plantas termosolares tipo torre central que deberán ser instaladas en Sonora para poder lograr tener 1GW_e.

6.BIBLIOGRAFÍA

Arán, J., 2008. *Modelo de análisis espacial para la evaluación de la capacidad de acogida del territorio en la ubicación de centrales fotovoltaicas conectadas a red*. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Civil. Granada, España: Universidad de Granada.

Arancibia, C. y Estrada, C., 2010. El redescubrimiento del Sol. En: *Energías renovables: 25 años de la UNAM en Temixco*. México, D.F.: Centro de Investigación en Energía, p. 9-13.

Ávalos, L., 2010. *Energía solar: una propuesta para la generación de electricidad en el estado de Colima, México*. Tesina de Especialidad. Facultad de Ciencias. Especialidad en Ciencias del Ambiente, Gestión y Sustentabilidad. Colima, México: Universidad de Colima.

Barredo, J., 1996. *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid, España: Editorial RA-MA.

Beiser, A., 1990. Energía. En: *Física Aplicada*. 2ª Ed., México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana de México, S.A. de C.V., p. 89-98.

Bosque, J., 1996. *Técnicas de evaluación multicriterio y Sistemas de información geográfica en la ordenación del territorio en Portugal-España*. Universidad de Extremadura, Servicio de publicaciones, Cáceres, p. 69-76.

Bosque, J. y García, R., 2000. *El uso de los sistemas de información geográfica en la planificación territorial*. Núm. 20, Madrid, España: Anales de Geografía de la Universidad Complutense, p. 49-67.

Bueche, F., 1993. Trabajo y Energía. En: *Fundamentos de Física. Tomo I*. 3ª Ed., México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana de México, S.A. de C.V., p. 131-164.

Cabanillas, R., 2008. *Perspectivas de la tecnología de concentración solar en México (torres centrales)*. México, D.F.: Publicaciones ai, Especialidad: Energética, p. 1-23.

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe), OLADE (Organización Latinoamericana de Energía) y GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit [Sociedad Alemana de Cooperación Técnica]), 2003. *Energía y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe, guía para la formulación de políticas energéticas*. Santiago, Chile.

Chase, R., Jacobs, R. y Aquilano, N., 2009. Temas de la ubicación de instalaciones. En: *Administración de operaciones: producción y cadena de suministros*. 12ª Ed., México, D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V., p. 387-389.

Cohen, G., 1999. *Reporte final del programa de mejoramiento de la operación y mantenimiento de las plantas de concentración de energía solar*. Disponible en: <http://www.p2pays.org/ref/17/16933/1693301.pdf> [Accesado: 17 Febrero 2012].

Collier, D. y Evans, J., 2009. Decisiones de ubicación en cadenas de suministro. En: *Administración de operaciones: bienes, servicios y cadenas de valor*. 2ª Ed., México, D.F.: Cengage Learning, p. 374-379.

Colque, M. y Sánchez, V., 2007. *Los gases de efecto invernadero: ¿Por qué se produce el calentamiento global?* Lima, Perú: Asociación Civil Labor / Amigos de la Tierra.

CONANP, 2012. *Áreas Naturales Protegidas en Sonora*. Disponible en: <http://www.conanp.gob.mx/> [Fecha de consulta: 25 de Abril de 2012].

Cuatecontzi, D. y Gasca, J., 2004. Los gases regulados por la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. En: J. Martínez y A. Fernández, eds. 2004. *Cambio climático: una visión desde México*. México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología y Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, p. 87-98.

Daniels, F., 1977. *Uso directo de la energía solar*. Madrid, España: Editorial Blume.

Delakowitz, B., 2010. Demanda energética global y cambio climático. En: J. Taddei y C. Luna, eds. 2010. *El cambio climático ¿Qué es? ¿Qué podemos hacer?* Hermosillo, Sonora: Universidad de Sonora, p. 41-50.

Díaz, A., 2008. *Un análisis económico político para México del Protocolo de Kyoto*. Revista Académica DELOS, Vol. 1, No. 1. México: Grupo Eumed.net y Red Académica Iberoamericana Local Global.

El Imparcial, 2011. *Consideran Central Agua Prieta II: es proyecto pionero en México*. Disponible en: <http://www.elimparcial.com.mx> [Fecha de consulta: 18 de Abril de 2012].

Entremont, A., 1997. *Geografía económica*. Madrid, España: Editorial Cátedra.

Estrada, C., Cabanillas, R., Strachan, J., Hinojosa, J. y Pérez, J., 2005. Sistemas termosolares de potencia para generación eléctrica. En: *Introducción a la concentración solar*. Hermosillo, Sonora: Editorial UNISON, p. 51-62.

García, C. y Lacal, R., 2008. *Energía solar termoeléctrica*. Disponible en: www.greenpeace.org/raw/content/espana/reports/solar-termoelectrica-2020-pas.pdf [Accesado: 09 Febrero 2012].

García, R., 2008. *El papel de las energías renovables en la política energética nacional*. En: Revista legislativa de ciencias sociales y de opinión pública, Vol. 1, Núm. 2, México, D.F.: El Colegio de México.

García, X., 2001. *La energía solar térmica de alta temperatura como alternativa a las centrales térmicas convencional y nuclear*. Disponible en: <http://www.iit.upcomillas.es/docs/IIT-01-1251.pdf> [Accesado: 04 Febrero 2012].

Garmendia, A., 2008. *Centrales eléctricas termosolares Genera, parte de Abengoa Solar, Energía solar para la sustentabilidad mundial 2008*. Disponible

en:http://www.madrimasd.org/informacionidi/agenda/forosmimasd/documentos/energia/A_Esteban_Abengoa_solar_26_02_08.pdf [Accesado: 12 Febrero 2012].

Gómez, M., 2005. *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid, España: Editorial RA-MA.

Guerra, J., 2003. *Habitar el desierto: transición energética y transformación de proyectos del proyecto habitacional colectivo en la ecología del desierto de Atacama, Chile*. Tesis Doctoral (Doctor en Construcciones Arquitectónicas). Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.

Guillén, O., 2004. Naturaleza del Sol y sus repercusiones en la Tierra como fuente de energía. En: *Energías renovables: una perspectiva ingenieril*. México, D.F.: Editorial Trillas, S.A. de C.V., p. 9-13.

Heizer, J. y Render, B., 2009. Estrategias de localización. En: *Principios de administración de operaciones*. 7ª Ed., Edo. de México, México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., p. 315-344.

Hermosillo, J., 1995. *Notas sobre el curso de energía solar*. Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales. División de Ingeniería. Tlaquepaque, Jalisco: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente.

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P., 2010. Definición del alcance de la investigación a realizar: exploratoria, descriptiva, correlacional o explicativa. En: *Metodología de la investigación*. 5ª Ed., México, D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V., p. 76-89.

IEA, 2011. *Key world energy statistics*. Paris, Francia: SOREGRAPH.

INEGI, 2011. *Estado de Sonora*. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/> [Accesado: 03 Diciembre 2011].

Jara, W., 2006. *Introducción a las energías renovables no convencionales (ERNC)*. Chile: Leaders, S.A. y Fyrma Gráfica.

Krajewski, L., Malhotra, M. y Ritzman, L., 2008. Localización. En: *Administración de operaciones: procesos y cadenas de valor*. 8ª Ed. México, D.F.: Editorial Pearson Educación, p. 418-459.

Labarthe, R., 2010. *Acuerdos de Cancún. COP 16*. México: Contorno, Centro de Prospectiva y Debate, S.A. de C.V.

Letelier, T., 2003. *Análisis de algoritmos de localización óptima y su implementación en sistemas de información geográfica*. Tesis de Ingeniero Civil en Informática. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil en Informática. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.

Llamas, R., 2005. *Un análisis institucional de la implantación de la agenda local 21 por los ayuntamientos españoles*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Departamento de Organización de Empresas. Granada, España: Universidad de Granada.

Moreno, A., 2008. Los sistemas de información geográfica: una breve presentación. En: *Sistemas y análisis de la información geográfica*, 2ª Ed., México, D.F.: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., p.3-19.

Mulás, P., 2005. *Visión a largo plazo sobre la utilización de las energías renovables en México: energía solar*. Centro de Investigación de Energías. Universidad Autónoma de México. Disponible en:http://portal.energia.gob.mx/webSener/res/168/A6_Solar1.pdf [Accesado: 06 Febrero 2012].

Orellana, E., 2009. *Determinación de áreas con potencial para la instalación de plantas de energía termoeléctrica solar. Caso de estudio: III Región de Atacama*.

Tesis de Licenciado en Geografía. Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.

Peral, V. y Valverde, B., 1999. *Receptor solar integrado con caldera de recuperación de gases de turbina*. Disponible en: http://usuarios.lycos.es/arquinstal03/publicaciones/otras/bib584_receptorsolar_integrado_con_caldera.pdf. [Accesado: 11 Noviembre 2011].

Platt, A., 2010. Cambio climático: algo está ocurriendo. En: J. Taddei y C. Luna, eds. 2010. *El cambio climático ¿Qué es? ¿Qué podemos hacer?* Hermosillo, Sonora: Universidad de Sonora, p. 19-28.

Rau, H., 1984. Física solar. En: *Energía solar: aplicaciones prácticas*. 2ª Reimpresión, Barcelona, España: MARCOMBO, S.A., p.8-33.

Richter, C., Teske, S. y Short, R., 2009. *Energía solar térmica de concentración: perspectiva mundial 2009*. Ámsterdam, Holanda: Greenpeace Internacional.

Romero, M., 2007. *Energía solar termoeléctrica*. Disponible en: http://www.uib.es/facultat/ciencias/prof/victor.martinez/recerca/jornades/ManuelRomero/CSP_Termoelectrica.pdf [Accesado: 11 Febrero 2012].

Ruiz, L. y Cruz, X., 2004. Los gases de efecto invernadero y sus emisiones en México. En: J. Martínez y A. Fernández, eds. 2004. *Cambio climático: una visión desde México*. México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología y Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, p. 109-121.

Sabady, P., 1983. *Práctica de la energía solar*. Barcelona, España: Editorial Ediciones Ceac.

Sarmiento, P., 1995. *Energía solar: aplicaciones e ingeniería*. Valparaíso, España: Ediciones Universitarias de Valparaíso.

Taddei, J. y Luna, C., 2010. *El cambio climático ¿Qué es? ¿Qué podemos hacer?* Hermosillo, Sonora: Universidad de Sonora.

Téllez, F., 2008. *Energía solar termoeléctrica: tipologías y primeros pasos del surgimiento comercial*.

Torresol Energy, 2011. *Planta Gemasolar*. Disponible en: <http://www.torresolenergy.com/> [Accesado: 25 Noviembre 2011].

Uriarte, A., 2003. *Historia del clima de la tierra*. Madrid, España: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.

Van Gigch, J., 2003. Reconocimiento de un experto. En: *Teoría general de sistemas*. 9ª Reimpresión, México, D.F.: Editorial Trillas S.A. de C.V., p. 446-447.

Vargas, P., 2009. *El cambio climático y sus efectos en el Perú*. Perú: Banco Central de Reserva del Perú.

7. ANEXOS

En este capítulo se presentan los anexos utilizados como soporte para esta investigación, específicamente en el desarrollo del método de calificación de criterios estratégicos.

7.1. TABLA DE CALIFICACIONES Y PONDERACIONES DE LA ZONA I

| Tabla de Calificaciones | | | | | |
|---|--------------------------|------------------------------|---------|-------|-----------|
| Calificación: 0 al 10 (10:Mejor; 0: Peor) | | ZONA I | | | |
| Criterios Estratégicos | Ponderación del C.E. (%) | Localizaciones con Potencial | | | |
| | | Puerto Peñasco | Oquitoa | Altar | Pitiquito |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

| Tabla de Ponderaciones | | | | | |
|------------------------|------------------------------|---------|-------|-----------|---------|
| ZONA I | | | | | |
| Criterios Estratégicos | Localizaciones con Potencial | | | | |
| | Puerto Peñasco | Oquitoa | Altar | Pitiquito | Caborca |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| TOTALES | | | | | |

7.2. TABLA DE CALIFICACIONES Y PONDERACIONES DE LA ZONA II

| Tabla de Calificaciones | | | | | |
|---|------------------------------|------------------------------|---------|-----------|-----------|
| Calificación: 0 al 10 (10:Mejor; 0: Peor) | | ZONA II | | | |
| Criterios Estratégicos | Ponderación del C.E. (%) | Localizaciones con Potencial | | | |
| | | Naco | Cananea | Ímuris | Magdalena |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| Tabla de Ponderaciones | | | | | |
| ZONA II | | | | | |
| Criterios Estratégicos | Localizaciones con Potencial | | | | |
| | Naco | Cananea | Ímuris | Magdalena | Cumpas |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| TOTALES | | | | | |

7.3. TABLA DE CALIFICACIONES Y PONDERACIONES DE LA ZONA III

| Tabla de Calificaciones | | | | | |
|---|------------------------------|------------------------------|---------------|---------|-------|
| Calificación: 0 al 10 (10:Mejor; 0: Peor) | | ZONA III | | | |
| Criterios Estratégicos | Ponderación del C.E. (%) | Localizaciones con Potencial | | | |
| | | Santa Ana | Benjamín Hill | Opodepe | Carbó |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| Tabla de Ponderaciones | | | | | |
| ZONA III | | | | | |
| Criterios Estratégicos | Localizaciones con Potencial | | | | |
| | Santa Ana | Benjamín Hill | Opodepe | Carbó | Ures |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| TOTALES | | | | | |

