



AVANCES EN INVESTIGACIÓN AMBIENTAL EN LA UABC

CONOCIENDO NUESTRO AMBIENTE 2016

CONCEPCIÓN CARREÓN DIAZCONTI, SILVIA AHUMADA VALDEZ Y MA. ELIZABETH RAMÍREZ BARRETO
COORDINADORAS

Universidad Autónoma de Baja California

6 De vías de ciclistas a sistemas fotovoltaicos: Acciones para la mitigación del cambio climático

José F. Armendáriz-López^{1,2}, Nancy E. Romero-Canett¹, Moisés Galindo-Duarte¹, Ma. de los Ángeles Santos-Gómez¹, Alejandro P. Arena-Granados², Aníbal Luna-León³

¹*Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California*

²*Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional, Mendoza, Argentina*

³*Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma de Baja California*

6.1 Introducción

El cambio climático es uno de los mayores problemas globales que la humanidad haya tenido que enfrentar. Es atribuido a la presencia de gases efecto invernadero (GEI) ya que estos contribuyen a la elevación de la temperatura de la atmósfera, por lo que, al acrecentar su concentración se ha producido un aumento de la temperatura media del planeta. En este sentido, los expertos han determinado que este fenómeno está altamente influido por las actividades humanas, principalmente por el sector energético y, en particular, por la quema de combustibles fósiles que producen emisiones de GEI (IPCC 2001).

La preocupación por el cambio climático se ha plasmado en una serie de compromisos adquiridos por los países con la finalidad de mitigar sus efectos. Por ejemplo, en la Cumbre de Río en 1992 surgieron la Declaración de Río, sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, y la Agenda 21 (Organización de las Naciones Unidas (ONU) 2009). A partir de esta reunión, tomó relevancia la necesidad de considerar la adopción de medidas ante los impactos, lo que derivó en la creación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, instrumento al cual se adhirieron más de 150 países. Posteriormente, en 1997, se adoptó el Protocolo de Kioto (ONU 1998), el que estableció compromisos específicos, aplicables de manera distinta a cada país, cuya entrada en vigor fue en 2005; dicho protocolo ha sido actualizado periódicamente a través de reuniones denominadas Conferencia de las Partes, de la Convención de la Organización de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

En este sentido, el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) ha propuesto un marco de evaluación del cambio climático a través de la relación entre sus elementos, así como acciones tendientes a abatir la problemática; por un lado se encuentran las de adaptación, cuya finalidad es la de reducir los impactos, mientras que las acciones de mitigación tienden a la disminución en la generación de los GEI.

En cuanto a estrategias de mitigación del cambio climático, la investigación científica es un elemento que contribuye al cumplimiento de políticas públicas promulgadas con esta finalidad, tanto a nivel nacional, regional, local y por sector. También es un apoyo en la elaboración de

planes, como el Plan Nacional de Desarrollo, de los cuales se derivan programas y estrategias encaminadas a impulsar acciones en este sentido (SEMARNAT 2006).

En lo que respecta a la generación de emisiones, se considera que está asociada a un alto consumo energético derivado de acciones orientadas hacia el desarrollo económico, lo que propicia la degradación del medio ambiente. La principal degradación ocurre en las zonas urbanas, pues es en ellas en donde se encuentran concentradas las actividades económicas y se toman las decisiones en cuanto al suministro de energía, transporte e inversión en infraestructura, entre otras (Gossop y Webb 1993). Por ejemplo, al sector energético se le atribuyen aproximadamente el 70% de las emisiones de GEI en las áreas urbanas, siendo las energías no renovables las de uso más extendido (Huizenga y Bakker 2010).

Las estrategias principales para la reducción de GEI están encaminadas a promover modos de transporte, eficiencia energética, reducción de movimientos y combustibles (Low y Gleeson 2003). Estas estrategias son:

1. La diversificación del modo de transporte utilizado: peatonal, motocicleta, automóvil, autobús y taxi; esta se debe a la diferenciación en el consumo de energía y en la generación de GEI en cada uno de los medios de transporte.
2. La promoción de la eficiencia energética en los motores de combustión, es decir, mejorar el rendimiento del combustible por unidad de distancia recorrida.
3. El impulso en la reducción de los volúmenes de transporte. Se refiere a la disminución en la cantidad de viajes, en la cantidad de kilómetros recorridos por cada usuario, o en las distancias de traslado, es decir, planear viajes más eficientes.
4. La selección del tipo de combustible o energéticos utilizados, favoreciendo propuestas alternativas a los combustibles fósiles que generen menor cantidad de contaminación, principalmente de bióxido de carbono (CO₂).

En este capítulo se presentan dos casos de estudio relacionados con estrategias de mitigación al cambio climático. El primero de ellos está orientado hacia la problemática que representa el sector transporte, considerando que existe una tendencia hacia el aumento en la cantidad de vehículos y hacia la dependencia del uso del automóvil particular (Gossop y Webb 1993), lo que implica un aumento en las emisiones de GEI y su acumulación en la atmósfera. Para este caso se presenta el diagnóstico del uso de la bicicleta como medio de transporte en la ciudad de Mexicali. En un futuro cercano, este diagnóstico servirá como fundamento para el planteamiento de un modelo de pronóstico de reducción de emisiones de GEI en diferentes horizontes de planeación, los cuales estarán basados en la propuesta de disminuir el número de vehículos automotores en circulación, los que serán sustituidos mediante el uso de la bicicleta.

El segundo caso se relaciona con la búsqueda de alternativas para los energéticos fósiles o no renovables, como una estrategia de mitigación del cambio climático. Debido al alto costo y a la sobreexplotación de las fuentes de energía no renovable, la energía fotovoltaica ha sido una de las fuentes más recurridas en tiempos recientes, sin embargo, existen aspectos que no han sido considerados en los análisis de impacto ambiental. Uno de ellos es el tiempo de recuperación de

la energía en los sistemas fotovoltaicos. Con el propósito de contar con elementos para la selección de la mejor opción energética, en relación con sus impactos y beneficios sobre el medio ambiente, se presentan los resultados de un análisis de tiempo de recuperación de energía (EPBT, por sus siglas en Inglés) aplicado a celdas fotovoltaicas elaboradas con diferentes materiales en varias regiones. Mediante este análisis se calcula el periodo de retorno energético, es decir, el tiempo que un sistema de energía renovable requiere para generar la misma cantidad de energía utilizada para su fabricación.

6.2 Diagnóstico sobre el uso de la bicicleta como medio de transporte en la ciudad de Mexicali

Los indicadores de contaminación ambiental a nivel mundial han impulsado la búsqueda de medidas para la reducción de sus índices, siendo el sector transporte el que se ha situado entre los mayores productores de emisiones dañinas al ambiente. Dichas emisiones, específicamente los GEI, generan un fenómeno conocido como efecto invernadero, por medio del cual determinados gases que componen la atmósfera terrestre retienen parte de la energía de la superficie que ha sido calentada por la radiación solar; esto evita que la energía recibida en forma constante vuelva de inmediato al espacio, lo cual produce, a escala planetaria, un efecto similar al observado en un invernadero. Los GEI son principalmente producto de la combustión del petróleo y el carbón, lo cual provoca que los niveles de CO₂ en la atmósfera aumenten, rebasando la capacidad que tiene el planeta de asimilar dicho contaminante por medio de la fotosíntesis o por su disolución en el océano (Jiménez 2002). Esto evita la regeneración del ambiente de manera natural, por lo que se es recomendable tomar medidas para disminuir los niveles de producción de GEI.

Estos gases contaminantes son generados por diversos sectores productivos. Según el Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California (PEACC-BC), en el estado, el sector energético es el mayor contribuyente con un 76%, del cual se desprende la subcategoría del transporte con un 59%, lo cual significa que, al ponderar su aportación, el sector transporte genera un 45% del global de emisiones de GEI en el estado (Galindo et al. 2013). Sin embargo, en este sector es difícil reducir la producción de GEI ya que el aumento en la carga vehicular de las ciudades en desarrollo va ligado tanto al avance económico como al crecimiento de la población. Luego entonces, cualquier medida considerada debe ser cuidadosamente analizada para no afectar el crecimiento y la estabilidad económica o social de los países (Samaniego et al. 2013). Dadas las circunstancias, en cualquier región, ciudad o país, es importante buscar medios alternativos al vehículo automotor, que sean más amigables con el medio ambiente a la vez que económicos. Por estas razones, se cree que la bicicleta representa un estilo de vida que rompe la visión de las sociedades, la que se ha caracterizado siempre por la dependencia al automóvil (García 2013).

La utilización de la bicicleta, sobre todo en ciudades con mayor tráfico, ayuda a disminuir la congestión vehicular en las calles, a tener una mejor calidad de vida a través del ejercicio y a reducir la contaminación acústica y ambiental dado que no produce GEI, lo que a su vez contribuye a frenar el cambio climático (García 2013). En este esfuerzo de investigación se llevó a cabo el

diagnóstico del uso de la bicicleta como modo de transporte con la finalidad de adquirir información que sirva de base para la propuesta, elaboración, validación y operación de un modelo de pronóstico de reducción de emisiones mediante una adecuación vial para el uso de la bicicleta en la ciudad, además de evaluar los diferentes beneficios de dicha adecuación, tomando a Mexicali como caso de estudio.

Como resultado del planteamiento y operación del modelo mencionado en el párrafo anterior, se espera obtener una visión a corto, mediano y largo plazo de los beneficios que se conseguirían al llevarse a cabo una adecuación vial que favorezca el uso de la bicicleta como medio de transporte. Con ello se espera beneficiar a los habitantes de la ciudad, a través de una modernización del transporte, una reducción de contaminantes en la ciudad y una mejora de la calidad de aire y de la calidad de vida para la población.

6.2.1 Antecedentes y métodos

En primer lugar, el concepto transporte se puede definir como el instrumento que se utiliza para llevar o trasladar de un lugar a otros bienes o personas, puede ser público o privado, intermodal o multimodal. Este último concepto engloba más de un modo de transportación, es decir, se puede conducir un vehículo personal hasta cierto sitio y allí cambiar a autobús; o bien, usar la bicicleta hasta la estación de tren, trasladarse en éste junto con la bicicleta y volver a la bicicleta para llegar al destino final (Sandoval 2012).

Se estima que alrededor de 900 millones de vehículos en todo el mundo, excluyendo vehículos en dos ruedas, son causantes de más del 26% de las emisiones de GEI (Nesamani 2010). En los diferentes continentes se presentan problemas de contaminación, aunque a diferente escala debido a la influencia de factores culturales, clima, infraestructura y crecimiento poblacional, entre otros. En México, del total del parque vehicular, el 62.6% corresponde al auto privado, el 4.4% a la motocicleta y el 2.2% al transporte por taxi (Solís y Sheinbaum 2013). De acuerdo con el reporte de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011), Mexicali ocupa el 3er lugar entre las ciudades con mayor presencia de PM 2.5 y el lugar 34 para PM 10. Esta ciudad cuenta con una población urbana de 839,151 habitantes, para el año 2015 (CONAPO 2016), y con un parque vehicular que ascendía a 514,652 vehículos para el mismo año, dando como resultado un índice de motorización de 0.613 vehículos/habitante; además, se ha determinado una longitud promedio de 6.967 km por viaje unitario (Galindo *et al.* 2013).

Estos índices explican, al menos parcialmente, la afectación que la cantidad de automóviles ejerce sobre la ciudad, la que incluye generación de stress, sobrepeso y falta de actividad física por parte de los ciudadanos (Osorio 2006). Resulta razonable extender estas observaciones hacia otras zonas del planeta ya que más del 50% de la población mundial se encuentra asentada en las zonas urbanizadas, (Banister 2011; Monteiro *et al.* 2013). Por otro lado, el número de vehículos en esta región representa un problema de contaminación ambiental pues, debido a la condición de frontera de la ciudad de Mexicali con los Estados Unidos de América (EUA), se tiene un mayor acceso a los vehículos provenientes de dicho país. Desafortunadamente, en muchos de los casos estas

unidades no son regularizadas legal y mecánicamente, además de que frecuentemente cuentan con más de 10 años de uso.

Por lo tanto, una propuesta ambientalmente amigable es el uso de transporte no motorizado, ya que es una alternativa de movilidad adecuada para viajes cortos que da prioridad a los peatones y ciclistas; es eficiente, accesible, no produce emisiones de contaminantes (Melero et al. 2013), actúa como eficaz complemento al transporte público, favorece las alternativas de movilidad de forma ecológica, contribuye al desarrollo sustentable de las ciudades y procura un nuevo estilo de vida, en el que se promueve una cultura de ética, respeto, ecología y bienestar físico y mental (Gobierno del Distrito Federal 2012).

Con el fin de recabar información sobre el flujo de bicicletas en la ciudad, y así obtener las variaciones y demanda en cuanto a tiempo, ubicación del punto y sección de la ciudad, se realizaron conteos manuales o aforos ciclistas (Figura 1) de quince minutos cada uno, tiempo que se considera suficiente para realizar una extrapolación confiable de los volúmenes diarios de vehículos (Galindo *et al* 2002). Se cubrieron tres diferentes turnos: matutino, con aforos entre las 6 y las 12 hrs.; vespertino, con aforos entre las 12 y 17 hrs.; y nocturno, con aforos entre las 17 y 24 hrs. Para esto se eligieron 17 puntos (Tabla 1) distribuidos en toda la ciudad con el propósito de lograr la suficiente cobertura para representar a los diferentes tipos de flujo vehicular, incluidas las zonas de ciclistas (Figura 2). También se utilizaron criterios de observación para determinar el sentido del flujo, la edad, el género y el uso de aditamentos de seguridad (luces, casco y reflejantes). Dichos conteos se llevaron a cabo durante los días hábiles del 9 al 25 de marzo del 2015.

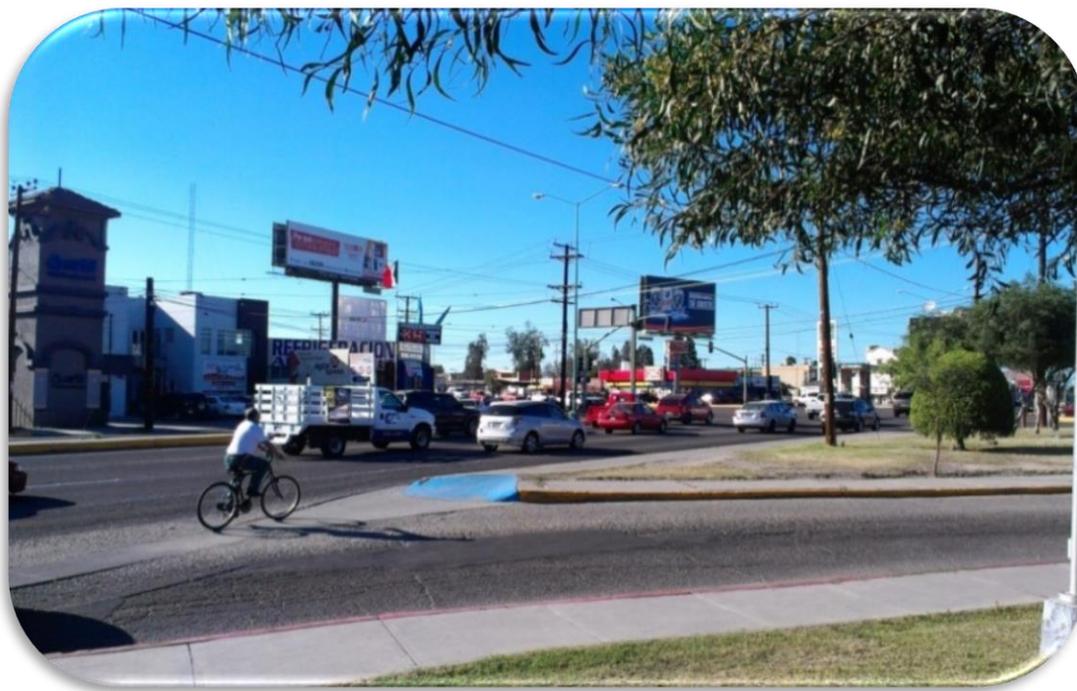
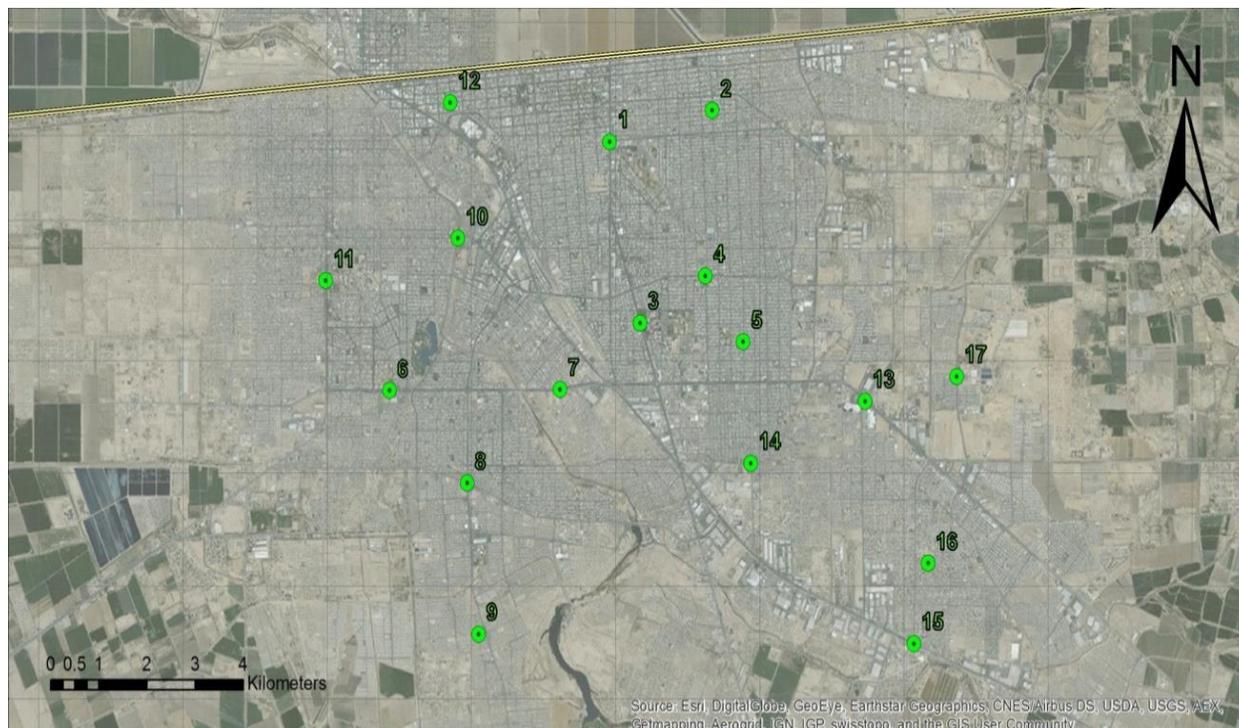


Figura 1. Imagen de aforo ciclista en la ciudad de Mexicali, B. C.

Tabla 1. Puntos de aforo ciclista en la ciudad de Mexicali, B. C.

| Punto | Ubicación |
|-------|---|
| 1 | Blvd. Justo Sierra y Calz. Cuauhtémoc |
| 2 | Calle Río Culiacán y Av. República de Panamá |
| 3 | Blvd. Benito Juárez entre calle López Rayón y Calle de la Normal (frente a Vicerrectoría UABC) |
| 4 | Calzada Independencia y calle Río Mocerito |
| 5 | Calle Río Quelite y calle Víctor Rosales |
| 6 | Blvd. Lázaro Cárdenas y calle Suecia y/o Bordo Wisteria (Frente a supermercado ley) |
| 7 | Blvd. Lázaro Cárdenas casi esquina con calle Niños Héroe (Frente a Escuela Secundaria Estatal 56) |
| 8 | Calz. Anáhuac y Calz. Héctor Terán Terán (Frente a Comandancia de Policía) |
| 9 | Av. Montes de León y Calz. de los Monarcas |
| 10 | Calz. Independencia y Calz. de los Presidentes |
| 11 | Calle H Colegio Militar esquina con calle Ing. Luis Alcerrega (Frente a Ley) |
| 12 | Av. Álvaro Obregón y calle Pedro F. Pérez y Ramírez |
| 13 | Blvd. Lázaro Cárdenas y Blvd. Venustiano Carranza |
| 14 | Calz. Manuel Gómez Morín y calle Río Santacruz |
| 15 | San Luis Río Colorado y calle Cuarta |
| 16 | Calle Río Bravo y calle Octava |
| 17 | Calle Novena (Frente a CESPМ) |

**Figura 2. Localización de los puntos de aforo ciclista a lo largo de la ciudad de Mexicali, B. C. Mapa base tomado de USGS (2015).**

El volumen diario de bicicletas en cada punto de aforo se calculó con base en los tipos o patrones de flujo determinados previamente en una investigación sobre el tránsito de vehículos automotores en la ciudad de Mexicali (Galindo *et al* 2002), asumiendo que el flujo ciclista se comporta de forma similar. En el establecimiento de dichos patrones se consideraron tanto el flujo total como por sentido de la circulación, así como sus variaciones temporales y la ubicación geográfica dentro de la mancha urbana. Son ocho los tipos de flujo determinados, los que se enlistan a continuación:

- Tipo 1: Tránsito en el centro geográfico.
- Tipo 2: Tránsito en el centro comercial (histórico) porción del norte central de la ciudad.
- Tipo 3: Tránsito hacia el norte central de la ciudad, de parte central a centro comercial.
- Tipo 4: Tránsito desde el norte central de la ciudad, de centro comercial a la parte central.
- Tipo 5: Tránsito hacia la periferia.
- Tipo 6: Tránsito desde la periferia.
- Tipo 7: Tránsito transversal a la periferia.
- Tipo 8: Tránsito en dirección a centro comercial, a parte central de la ciudad o viceversa.

Una vez realizados los aforos, se procedió a la captura de la información y al cálculo de la afluencia en cada punto (extrapolación), con lo que se estimó el flujo diario de bicicletas en cada sentido de la circulación (Figura 3).

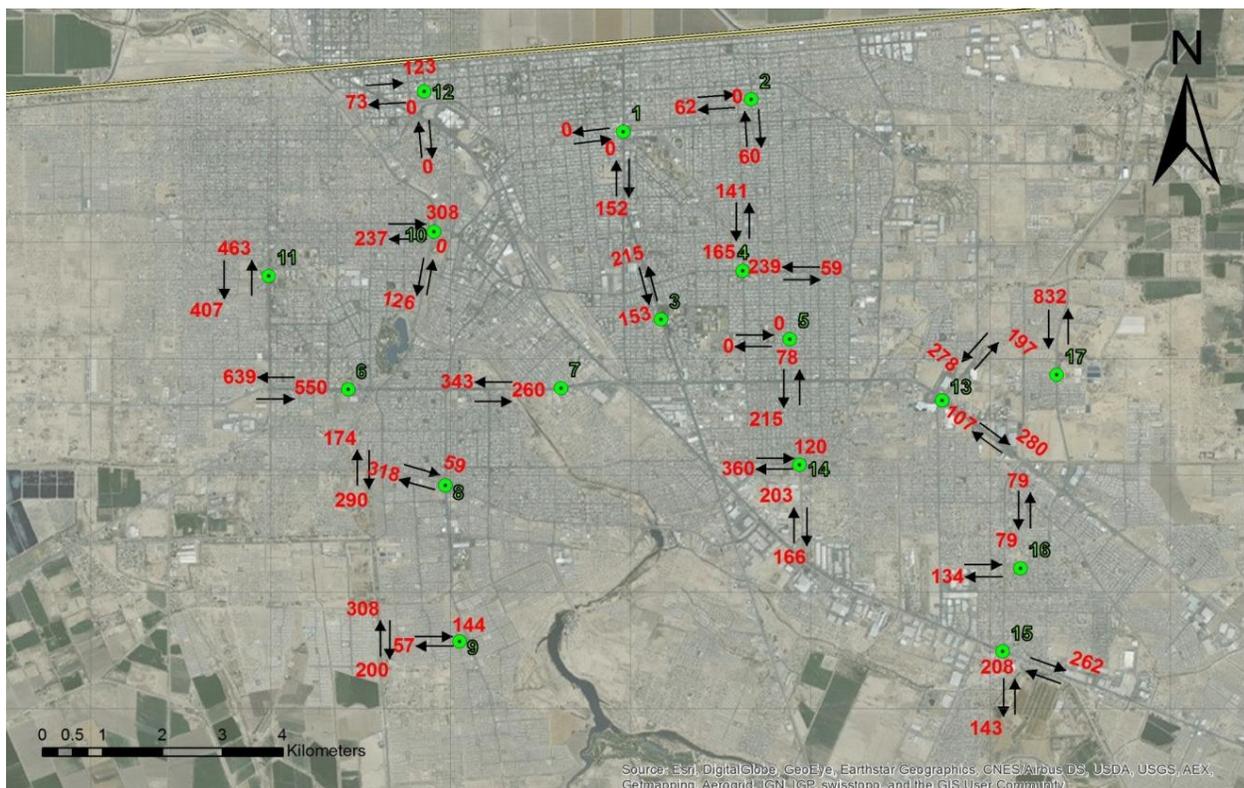


Figura 3. Afluencia ciclista en la Ciudad de Mexicali, B. C., en unidades/día (números en rojo). Las flechas indican la dirección de la afluencia. Mapa base tomado de USGS (2015) .

Se observó que la gran mayoría de los usuarios hacen caso omiso a las recomendaciones sobre la utilización de aditamentos de seguridad para viajar en bicicleta, tales como luces, casco protector y ropa reflectiva, además de no seguir el sentido de circulación convencional. Solo el 4.8% de los ciclistas utilizaban casco, el 1.4% utilizaba luces, el 6.2% de los usuarios utilizaba chaleco reflectivo y el 17.2% transitaba en sentido contrario a la circulación del flujo.

6.2.3 Conclusiones y reflexiones sobre el uso de la bicicleta en Mexicali

Actualmente, en la ciudad de Mexicali el mayor flujo de bicicletas se observa en las periferias, lo cual, podemos inferir, se debe al nivel económico que predomina en esas áreas. Más que utilizar la bicicleta por razones de salud, recreativas o ambientales, ésta se convierte en una necesidad ya que apoya la economía de los usuarios, mediante el ahorro en transporte y en cuotas de estacionamiento, a la vez que representa menores tiempos de traslado. Según los resultados obtenidos, es observable la pertinencia de impulsar acciones a favor del uso de aditamentos de seguridad como luces, casco y ropa reflectiva, además de seguir el sentido de flujo de las calles, lo que finalmente resultaría en una mayor seguridad al transitar en bicicleta.

Existen numerosas razones en contra de la implementación de vías para ciclistas en la ciudad de Mexicali, entre ellas la costumbre y la alta dependencia al automóvil, ya sea por comodidad o por rapidez en los traslados. Un motivo particular es el clima extremo con el que cuenta esta ciudad, el que resulta determinante para la opinión pública. No obstante, existen ciertos puntos que favorecen la circulación de bicicletas como medios de transporte, aunque las vialidades no hayan sido originalmente diseñadas para ello. Por otro lado, el uso de suelo habitacional favorece los altos volúmenes ya que se trata de zonas con mucho flujo de personas.

Para conseguir un mayor interés en el uso de la bicicleta, se hace necesario, primeramente, proveer a los usuarios potenciales con las vías adecuadas para este medio de transporte. Esto aunado a una buena planeación, con programas de implementación y concientización a corto, mediano y largo plazo, motivaría a una parte importante de la población a optar por el uso de la bicicleta sobre los medios de transporte motorizados, lo que finalmente ayudaría a lograr la meta de reducción de los índices de contaminación en la ciudad.

6.3 Tiempo de recuperación de energía en los sistemas fotovoltaicos

Este caso también se relaciona con estrategias de mitigación del cambio climático mediante la búsqueda de alternativas al uso de energéticos fósiles o no renovables. Ante el alto costo y la sobreexplotación de las fuentes de energía no renovable, la energía fotovoltaica ha sido una de las fuentes más recurridas en tiempos recientes. Sin embargo, existen aspectos que no han sido considerados en los análisis de impacto ambiental, tal como los efectos de la producción de los dispositivos utilizados con esta tecnología, específicamente, la energía utilizada durante el proceso. Es decir, es necesario considerar el tipo y cantidad de energía dedicada a la producción de dicha tecnología y estimar el tiempo de recuperación que requieren los equipos una vez que entran en operación.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta de evaluación ambiental que permite identificar la sustentabilidad de los productos y servicios, al investigar y valorar los impactos ambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia: extracción, producción, distribución, uso y fin de vida (reutilización, reciclaje o desecho del producto). En el caso de las tecnologías que generan electricidad a partir de fuentes renovables de energía, permite identificar factores que pueden ayudar a su posicionamiento en el mercado. El propósito de esta sección es el de identificar el impacto ambiental del uso de las tecnologías fotovoltaicas, a partir de su EPBT, y así determinar el tiempo que los diferentes sistemas fotovoltaicos requieren durante su fase de operación para generar la misma cantidad de energía que fue utilizada para su fabricación. En este trabajo, se determina el EPBT de las tecnologías fotovoltaicas de silicio monocristalino, policristalino y amorfo, así como de las de película delgada CdTe y CIGS, fabricados en los Estados Unidos de América, debido a su cercanía con México, y en China, ya que ofrece los menores costos del mercado, para su fase de operación en el centro de México.

6.3.1 Antecedentes

La creciente conciencia de la importancia de la energía en nuestra sociedad, así como la preocupación por las futuras fuentes de la misma, han dado lugar a investigaciones sobre la cantidad de energía que se requiere para la producción de bienes y servicios. El uso de la energía solar como fuente alternativa ha aumentado su popularidad como consecuencia del incremento del costo de los combustibles fósiles, sin embargo, al utilizar energías renovables, a través de diversas tecnologías, no siempre se ha tenido el cuidado de verificar los impactos y beneficios que las diferentes tecnologías ejercen sobre el medio ambiente.

6.3.1.1 Tecnología fotovoltaica

La energía fotovoltaica se genera a partir de materiales semiconductores (celda fotovoltaica) que convierten a los fotones en electricidad. Cuando los fotones, es decir, la luz del sol, inciden sobre los electrones de los materiales semiconductores, estos alcanzan cierta longitud de onda que hace que fluyan para producir electricidad. Las tecnologías fotovoltaicas de silicio son las de mayor posicionamiento en el mercado. Su eficiencia varía en relación a la pureza del lingote de silicio con el que son fabricadas, es decir, a mayor pureza, mayor es la eficiencia de conversión de energía eléctrica. Así mismo, a mayor pureza del silicio también se consume mayor cantidad de energía durante el proceso. La tecnología de mayor eficiencia es la de silicio monocristalino, seguida por la de silicio policristalino y por la de silicio amorfo. Por otro lado, en los últimos años se han desarrollado tecnologías de película delgada, las que han resultado más económicas que las de silicio. Estas tecnologías están fabricadas a partir de Teluro de Cadmio (CdTe) y de Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS o CIS) y requieren de mayores dimensiones para producir la misma unidad de energía eléctrica.

Un panel fotovoltaico está compuesto por diversas capas con el siguiente arreglo:

- Cubiertas de cristal: La cubierta del panel fotovoltaico es de vidrio templado.

- Revestimiento antireflectivo: Es necesario debido a que el silicio puede reflejar hasta el 35% de la radiación.
- Las celdas fotovoltaicas: Están hechas a partir del corte en obleas del lingote de silicio.
- EVA: Se denomina EVA a la capa de etileno acetato de vinilo utilizada para encapsular celdas fotovoltaicas con el propósito de hacerlas resistentes a la humedad y ofrecerles aislamiento eléctrico.
- Contacto de metal posterior: El contacto metálico se hace al reverso de las celdas fotovoltaicas xerografiando una pasta de metal (por lo general de aluminio).
- Tedlar: Esta capa permite que el proceso fotovoltaico sea estable, además de proporcionar aislamiento y protección adicional contra la humedad.

En la actualidad, la más larga garantía de producción de energía que ofrece este tipo de módulos solares es de 25-30 años. Por otro lado, a pesar de que la energía fotovoltaica es considerada una energía limpia, es necesario realizar evaluaciones de su impacto ambiental con la finalidad de identificar procesos susceptibles de alcanzar una mayor eficiencia.

6.3.1.2 Análisis de ciclo de vida

Los ACV hacen referencia a la estimación del impacto ambiental de un producto o servicio a partir de comparaciones entre los materiales, componentes y servicios, en relación a las categorías de salud humana, calidad de los ecosistemas o ecotoxicidad y consumo de recursos. Estos estudios permiten considerar la influencia del sitio de distribución de los productos, especialmente en relación al impacto producido por su transporte. Adicionalmente, contemplan que las materias primas pueden ser extraídas y/o producidas en diferentes países. Para ello, se establecen cuatro fases de estudio:

1. Definición de Objetivos y Alcances.- Establece la finalidad y los alcances del estudio, el producto o servicio a analizar y los datos necesarios para realizar la revisión crítica.
2. Inventario de los Componentes.- Cuantifica todos los flujos entrantes y salientes del sistema durante su vida útil, desde la extracción de la materia prima, la eficiencia energética de sus componentes y las emisiones producidas por cada uno de los procesos. A esta fase también se le conoce como inventario de ciclo de vida (ICV).
3. Evaluación de los Impactos.- Clasifica y evalúa los resultados a partir de una comparación de los efectos observables, de acuerdo con el análisis del inventario, con la finalidad de comprender mejor su significado ambiental. A esta fase también se le denomina análisis de impacto de ciclo de vida (AICV).
4. Interpretación de la Información.- Los resultados de las fases anteriores son evaluados, desde el punto de vista de los objetivos y alcances definidos al inicio del estudio, con la finalidad de sacar conclusiones y recomendaciones para tomar decisiones futuras.

En los ACV se utilizan términos como “de la cuna a la tumba” y “de la cuna a la cuna”; el primero hace referencia a los productos que se desechan en vertederos, mientras que el segundo se refiere a los productos reciclados. Para llegar a ese nivel de análisis, los ACV contemplan 5 etapas de

análisis adicionales a las cuatro fases anteriormente expuestas. Las cinco etapas de análisis de productos son el montaje, el ciclo de vida (o periodo de vida útil), el escenario de eliminación, el desmontaje y la reutilización.

Una vez realizado el ACV, es posible determinar el EPBT de las distintas tecnologías fotovoltaicas, el que está condicionado por el recurso solar y por las características climáticas de la localidad en las que son utilizadas. También se puede determinar el mix eléctrico, o la combinación de fuentes de energía renovables y no renovables con las que se produce la energía eléctrica, del país en que fueron fabricadas. En la Tabla 2 se muestran algunos EPBT, en años, estimados para diversas tecnologías y regiones en los últimos años.

Tabla 1.- Estudios de EPBT, por tecnología y país, realizados en años recientes.

| País/Región | Monocristalina | Policristalina | (años) | | | Película delgada ¹ | Cita |
|---------------|----------------|----------------|--------|---------|---------|-------------------------------|---------------------------|
| | | | Amorfa | CdTe | CIGS | | |
| España | 7.08-9.57 | 3.67-4.94 | - | - | - | 3.43-4.45 | Sumper <i>et al.</i> 2011 |
| Italia | 2.4-2.8 | 2.5-2.9 | - | 1.8-2.1 | 2.4-2.8 | - | Cucchiella y D'Adamo 2012 |
| China | - | 2.2-6.1 | - | - | - | - | Fu <i>et al.</i> 2014 |
| Sur de Europa | 1.96 | 1.24 | 1.39 | 0.68 | 1.02 | - | De Wild-Scholten 2013 |
| Malasia | - | - | - | 0.94 | - | - | Kim <i>et al.</i> 2014 |

¹No se especifica cuál de las tecnologías de película delgada se analizó

Así mismo, Peng et al. hicieron una revisión del estado del arte de los sistemas fotovoltaicos monocristalino, policristalino, amorfo, CdTe y CIGS. Los resultados demostraron que la tecnología de CdTe presenta un mejor desempeño ambiental con un EPBT de 0.75 a 3.5 años. La tecnología monocristalina es la peor desempeño al presentar EPBT de entre 1.7 y 2.7 años. No obstante, la energía fotovoltaica nuestra en general un menor impacto ambiental en relación a la generación de electricidad por medio de combustibles fósiles (Peng *et al.* 2013).

6.3.2 Metodología

El ACV sigue los lineamientos establecidos en las normas ISO 14040 y 14044, a la vez que se apega a las directrices e inventarios elaborados por la Agencia Internacional de Energía (EIA, por sus siglas en Inglés) a través del proyecto Task 12 del Programa de Energía Fotovoltaica (PVPS) (Fthenakis *et al.* 2011a; 2011b). En estas directrices se destaca que los parámetros que pueden afectar los resultados de los ACV de tecnologías fotovoltaicas son:

- El rendimiento eléctrico de los sistemas fotovoltaicos (incluyendo su degradación a lo largo de los años).
- Los componentes de soporte (Balance of System - BOS) como el inversor y el cableado. Generalmente se fija su rendimiento entre 75% y 80%.

- El final de ciclo de vida, tampoco suele incluirse por la falta de datos. Sin embargo, puede ejercer una influencia considerable sobre los resultados.

Los supuestos considerados en este trabajo se detallarán a continuación:

- Esperanza de vida - Se estima una vida útil de 30 años para los módulos, la estructura de soporte (BOS) y del cableado, y de solo 15 años para los inversores.
- Irradiación - Se asume de 1900 kWh/m² para una orientación óptima.
- Relación de rendimiento - Se establece una relación del 80%.
- No se contempla la etapa de desecho o reciclaje de los módulos, es decir, sólo se consideran la etapa de fabricación y periodo de vida útil de los paneles fotovoltaicos.

Para el ACV se utiliza el software SimaPro, que es el programa más utilizado a nivel mundial. Este realiza los ACV mediante el uso de metodologías y bases de datos de inventarios creadas por organizaciones especializadas o por los propios usuarios. En el caso de las tecnologías fotovoltaicas, los inventarios de los componentes de los sistemas fotovoltaicos han sido reunidos a través del programa de computadora CRYSTAL CLEAR (CC, nombre original en inglés) y subsiguientes actualizaciones. El CC es un proyecto de investigación y desarrollo centrado en la tecnología de silicio cristalino que se llevó a cabo dentro del 6º Programa Marco de la Unión Europea.

De acuerdo con la Administración Nacional de Energía de China (2012), el mix eléctrico de China en 2012 estuvo constituido de la siguiente manera: carbón 72.31%, energía hidroeléctrica 21.93%, energía eólica 4.35%, energía nuclear 1.18%, energía fotovoltaica 0.21% y otros 0.02%. El mix eléctrico de EUA en 2013 estaba conformado de la siguiente manera, de acuerdo a la Agencia Internacional de Energía (2013): gas natural 25%, energías renovables 13%, energía nuclear 19%, carbón 42% y petróleo y otros líquidos 1%.

Para obtener el EPBT se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Energy Payback Time} = [E_{\text{mat}} + E_{\text{manuf}} + E_{\text{trans}} + E_{\text{inst}} + E_{\text{EOL}}] / [(E_{\text{agen}}/nG) - E_{\text{O\&M}}]$$

En donde:

E_{mat} : Demanda de energía primaria para producir los materiales que comprenden el sistema fotovoltaico.

E_{manuf} : Demanda de energía primaria para la fabricación del sistema fotovoltaico.

E_{trans} : Demanda de energía primaria de los materiales utilizados durante el ciclo de vida del transporte.

E_{inst} : Demanda de energía primaria para la instalación del sistema.

E_{EOL} : Demanda de energía primaria para la gestión de fin de vida.

E_{agen} : Generación anual de electricidad.

$E_{\text{O\&M}}$: Demanda de energía primaria anual de operación y mantenimiento

nG : Eficiencia de la red, la energía primaria promedio a la eficiencia de conversión de energía eléctrica hacia a la demanda.

6.3.3 Resultados y discusión

En el caso de las tecnologías fotovoltaicas fabricadas en China, el EPBT fue de 2.69, 1.66, 1.58, 0.78 y 1.17 años para las tecnologías de silicio monocristalino, policristalino y amorfo, así como para las de película delgada de CdTe y CIGS respectivamente (Figura 6).

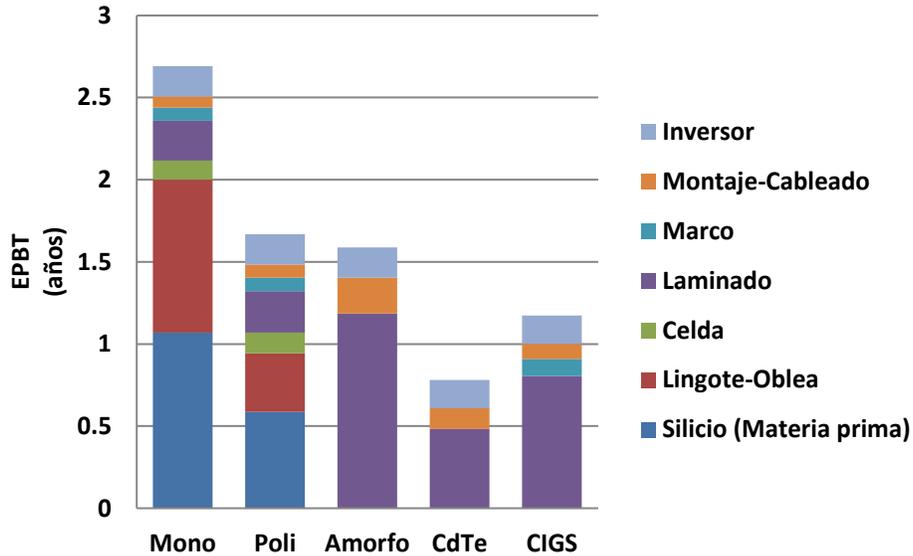


Figura 6. EPBT o tiempo de recuperación de la energía para módulos fotovoltaicos fabricados en China.

Para el caso de los EUA, el EPBT fue de 2.45, 1.52, 1.44, 0.71 y 1.07 años para las tecnologías de silicio monocristalino, policristalino y amorfo y para películas CdTe y CIGS respectivamente (Figura 7).

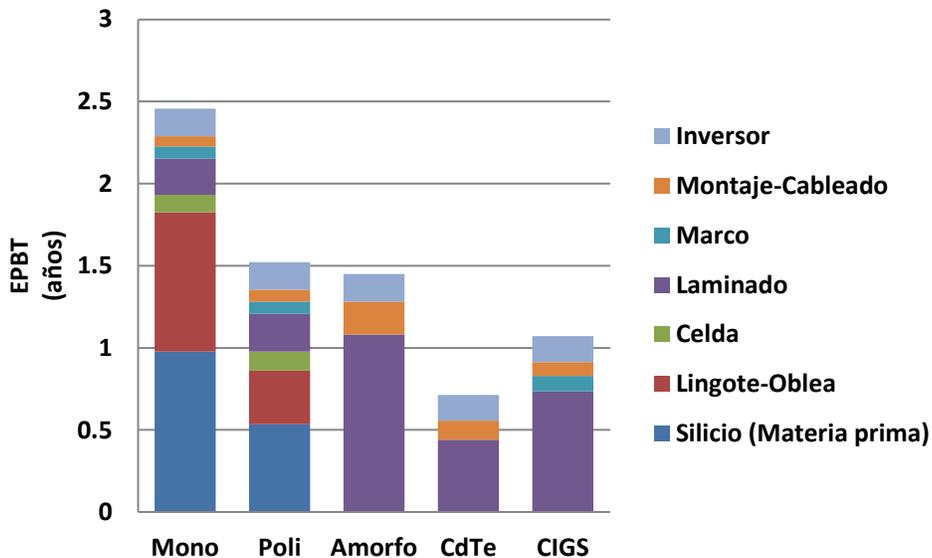


Figura 7. EPBT o tiempo de recuperación de la energía para módulos fotovoltaicos fabricados en los Estados Unidos de América.

En ambos casos, para las tecnologías de silicio monocristalino y policristalino, el mayor impacto ambiental se debe a la extracción y purificación del silicio. Es decir, entre la extracción y purificación del silicio se consume más de la mitad de la energía total utilizada en el proceso de fabricación de ambas tecnologías. Igualmente, en las tecnologías de película delgada, el proceso de laminado de los módulos fotovoltaicos es el que tiene mayor impacto ambiental ya que el consumo de energía alcanza más de la mitad del total (Mulvaney, 2014; Yue et al., 2014).

6.3.4 Conclusiones y reflexiones preliminares

La mayor proporción de energías limpias en el mix eléctrico de EUA (32%) fue una influencia determinante al estimar menores tiempos de amortización de la energía durante la etapa de uso de las diferentes tecnologías fotovoltaicas, en relación a sus pares fabricados en China, en donde se cuenta con una aportación del 28% de energías limpias en el mix eléctrico. De las cinco tecnologías evaluadas, las de silicio monocristalino y policristalino resultaron en un mayor EPBT debido, principalmente, al elevado consumo de energía durante el proceso de extracción y purificación del silicio. Por su parte, la tecnología de película delgada CdTe presenta el menor EPBT en los dos casos analizados.

En el futuro se tendrán que hacer estudios en los que se considere el mix eléctrico regional y, en caso de tener la información disponible, el mix eléctrico específico de cada localidad. Este tipo de análisis contribuirá a realizar una estimación más precisa del potencial ambiental de las tecnologías fotovoltaicas.

6.4 Resumen y recomendaciones finales

Existe una diversidad de casos en los que se puede aplicar la investigación científica en pro de la disminución de emisiones dañinas al ambiente y, por lo tanto, en pro de la mitigación del cambio climático. En este capítulo se mostraron dos casos de estudio, uno de ellos se refiere al análisis del uso de la bicicleta como medio de transporte en la ciudad de Mexicali, Baja California; el otro, al tiempo de recuperación de la energía que un sistema de energía renovable por medio de celdas fotovoltaicas requiere para generar la misma cantidad de energía utilizada para su fabricación. Ambos casos son solo ejemplos de las numerosas y diversificadas acciones para la mitigación del cambio climático que, a nivel mundial, están siendo evaluadas, expuestas y defendidas con la mira de promover su aplicación y ayudar a reducir las emisiones de GEI.

El diagnóstico sobre el uso de bicicleta arroja datos ambiguos. Por un lado, este medio de transporte es utilizado mayormente en la periferia de la ciudad, hecho que parece estar ligado con la complicación y el costo de utilizar el transporte público, y se hace caso omiso de las medidas de seguridad adecuadas para esta actividad. Así mismo, la cantidad de bicicletas resulta insignificante en comparación con el volumen de vehículos automotores. Por otro lado, la necesidad de disminuir las emisiones en una de las ciudades con un serio problema de partículas en el ambiente. Se observa que, aunque la infraestructura vial de la ciudad está desarrollada principalmente para el uso del automóvil, es alto su potencial de adecuación para el uso de bicicletas. Adicionalmente, se deben

implementar programas de concientización y dar a conocer que el uso de bicicleta ayuda a reducir las emisiones dañinas que conllevan la aceleración del cambio climático.

En el caso de los módulos fotovoltaicos, para que estos alcancen mayor grado de industrialización, se requiere reducir sus costos de producción y optimizar sus diseños. Este trabajo reporta el tiempo de retorno de la energía en México de las tecnologías fotovoltaicas de silicio monocristalino, policristalino y amorfo y de película delgada CdTe y CIGS. El estudio se basó en las directrices elaboradas por el Task12 del Programa de Producción Fotovoltaica de la Agencia Internacional de Energía, considerando tanto el recurso solar promedio como el mix eléctrico nacional. El tiempo de recuperación de la energía fue de 1.2, 3.2, 1.4, 2.5 y 3.2 años para las tecnologías de silicio monocristalino, policristalino, amorfo, CdTe y CIGS, respectivamente. Pese a ser la primera vez que se reporta éste tipo de información para América Latina, es necesario realizar estudios más detallados para las diferentes regiones del país.

Los dos casos presentados en este apartado son una muestra de la necesidad de disminuir el uso de energías no renovables que inciden en la producción de GEI y, por ende, en el cambio climático. Así mismo, se muestra que, aunque este fenómeno es un problema global, es recomendable estudiarlo a escalas locales y en todos los sectores, para conocer el contexto particular y la magnitud del daño generado en cada uno de ellos. Con este conocimiento se pueden proponer acciones específicas que tengan la factibilidad de ser implementadas con éxito en el mejoramiento de la calidad de vida de la población, la preservación del medio ambiente y la disminución de la contaminación (INE 2009).

Referencias

- Banister, D. (2011), 'Cities, mobility and climate change', *Journal of Transport Geography*, 19(6), pp. 1538–1546.
- CONAPO (Consejo Nacional de Población) (2016), *Estimaciones y proyecciones de la población por entidad federativa*, [en línea]. Disponible en: http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos (consultado: el 15 de abril del 2015).
- Cucchiella, F. y D'Adamo, I. (2012), 'Estimation of the energetic and environmental impacts of a roof-mounted building-integrated photovoltaic systems', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, pp. 5245–5259.
- De Wild-Scholten, M. (2013), 'Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems', *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 119, pp. 296–305.
- Desideri, U., Proietti, F., Zepparelli, P., Sdringola y Bini, S. (2012), 'Life Cycle Assessment of a ground-mounted 1778 kWp photovoltaic plant and comparison with traditional energy production systems', *Applied Energy*, 97, pp. 930–943.
- Fthenakis, V., Kim, H., Frischknecht, R., Raungei, M., Sinha, P. y Stucki, M. (2011a), *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems*, International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme. Report, IEA-PVPS Task12-02:2011.

- Fthenakis, V., Frischknecht, R., Raugei, M., Kim, H., Alsema, E., Held, M. y de Wild-Scholten, M. (2011b), *Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity*, International Energy Agency. Photovoltaic Power Systems Programme, report IEA-PVPS Task12-03:2011.
- Fu, Y., Liu, X. y Yuan, Z. (2014), 'Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China', *Journal of Cleaner Production*, 86, pp. 180-190.
- Galindo, M., Santos, M. y Benites, J. (2013), 'Proyecto para desarrollar el Programa de Cambio Climático en el Estado de Baja California, Sector Transporte', Mexicali, B. C., en Quintero, M. (ed), *Baja california ante el embate del cambio climático*, pp. 155-180, UABC, México.
- García, L. (2013), *La bici y el Medio Ambiente: La bici en Granada* [en línea]. Disponible en: http://labiciengranada.blogspot.mx/p/blog-page_11.html (consultado: 23 de abril de 2014).
- Gobierno del Distrito Federal (2012), *ECOBICI* [en línea]. Disponible en: <https://www.ecobici.df.gob.mx/es/informacion-del-servicio/que-es-ecobici> (consultado: 4 de julio de 2014).
- Gossop, C. y Webb, A. (1993), *Towards a sustainable energy policy: Planning for a sustainable environment*, Earthscan Publications, London.
- Huizenga, C. y S. Bakker (2010), *Instrumentos climáticos para el sector transporte: Informe de Consultores*, SLoCaT, Italia.
- INE (Instituto Nacional de Ecología) (2012) [en línea]. Disponible en: <http://cambioclimatico.inecc.gob.mx/> (consultado: julio de 2016).
- IPCC, 2001, *Tercer informe de evaluación del cambio climático* [en línea]. Disponible en: http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml (consultado en 2016).
- Jiménez, C., B. E. (2002), *La contaminación ambiental en México: Causas, efectos y tecnología apropiada*, Ed. Limusa, México, D.F., 926 p.
- Kim, H., Cha, K., Fthenakis, V., Sinha P. y Hur, T. (2014), 'Life cycle assessment of cadmium telluride photovoltaic (CdTe PV) systems', *Solar Energy* 103, pp. 78–88.
- Low, N. y Gleeson, B. (2003), *Making Urban Transport Sustainable*, Palgrave Macmillan UK, Australia, 299 p.
- Melero, A., Quintero, M. y Galindo, M. (2013), 'Análisis de las estrategias de mitigación y adaptación del sector transporte en la ciudad de Mexicali', *Estudios Fronterizos*, 14, pp. 79–105.
- Monteiro, P., Nascimento, L. y De Rezende, C. (2013), 'Contaminación causada por automóviles y el derecho ambiental en el impuesto Brasil: la reestructuración fiscal propuesta para el desarrollo sostenible', *Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 8, pp. 183–203.
- Mulvaney, D. (2014). 'Solar's Green Dilemma. Must cheaper photovoltaics come with a higher environmental price tag?'. *IEEE Spectrum*, September, 26–29.
- Nesamani, K. (2010), 'Estimation of automobile emissions and control strategies in India', *The Science of the total environment*, 408(8), pp.1800-1811.

- ONU (Organización de las Naciones Unidas) (1998), *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático* [en línea]. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf> (consultado en julio de 2016).
- ONU (2016) *Ozono* [en línea]. Disponible en: <http://www.cinu.mx/temas/medio-ambiente/ozono/> (consultado en julio de 2016).
- Peng, J., Lu, L. y Yang, H. (2013), 'Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, pp. 255–274.
- Samaniego, J., Jordán, R. y Ruiz, M. (2013), *Estrategias de desarrollo bajo en carbono en megaciudades de América Latina*, Ed., Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) [en línea]. Disponible en: <http://148.231.10.114:3018/ehost/detail/detail?sid=9ff7b029-b358-459b-8e1f-580e071dfbbe@sessionmgr110&vid=0&hid=107&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#db=a9h&AN=57140994> (consultado el 19 de marzo del 2014).
- Sandoval, J. (2012), *La importancia de la bicicleta en la movilidad del Distrito Federal*, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría, Universidad nacional Autónoma de México.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos naturales) (2006), *Hacia una Estrategia Nacional de Acción Climática, Comisión Intersecretarial de Cambio Climático*, México.
- Solís, J. y Sheinbaum, C. (2013), 'Energy consumption and greenhouse gas emission trends in Mexican road transport', *Energy for Sustainable Development*, 17(3), pp. 280–287.
- Sumper, A., Robledo-García, M., Villafáfila-Robles, R., Bergas-Jané, J. y Andrés-Peiró J. (2011), 'Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain)', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, pp. 3888–3896.
- USGS (United States Geological Service) (2015), Mapas temáticos [en línea]. Disponible en: <http://earthexplorer.usgs.gov/> (consultado: 20 de febrero de 2015).
- WHO (World Health Organization) (2005). 'Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005'. *Summary of risk assessment*.
- Yue, D., You, F., y Darling, S. B. (2014). 'Domestic and overseas manufacturing scenarios of silicon-based photovoltaics: Life cycle energy and environmental comparative analysis'. *Solar Energy*, 105, pp. 669-678.