



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Análisis de la radiación solar, México 2014

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA

por

Carlos Alfredo López Téllez

Asesorado por

Dr. Cristian Heber Zepeda Fernández

Puebla Pue.
Febrero de 2023



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Análisis de la radiación solar, México 2014

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA

por

Carlos Alfredo López Téllez

Asesorado por

Dr. Cristian Heber Zepeda Fernández

Puebla Pue.
Febrero de 2023

Título: Análisis de la radiación solar, México 2014
Estudiante: CARLOS ALFREDO LÓPEZ TÉLLEZ

COMITÉ

Dr. Javier Miguel Hernández López
Presidente

Dr. Eduardo Moreno Barbosa
Secretario

Dr. Benito de Celis Alonso
Vocal

Dr. Lucio Fidel Rebolledo Herrera
Vocal

Dr. Cristian Heber Zepeda Fernández
Asesor

Agradecimientos

A la asesora metodológica de la presente investigación: mi madre, que siempre ha estado a mi lado en las buenas y en las malas, en la salud y en la enfermedad, mi protectora, mi confidente, mi amiga, mi modelo a seguir y mi lugar seguro donde sé que todo está bien. Quien me ha impulsado a ser mejor en la vida conmigo y a pesar de mi. A ella le debo el éxito que he tenido en la vida pues todo lo bueno que sé es debido casi por completo a ella.

A mi padre, que gracias a él he podido realizarme como persona y me dió la oportunidad de poder crecer intelectualmente. Quien estuvo presente e hizo todo lo humanamente posible cuando lo necesité. Sé que puedo contar con él para todo.

A mi hermano, quien me ha entendido y ha sido un compañero de vida como ningún otro, quien siempre ha considerado lo mejor para todos.

La culminación de una etapa extraordinaria de mi vida no habría sido posible sin el apoyo incondicional de mi familia, por ello quiero agradecer a mi padre Juan Carlos López Ramírez y a mi madre Claudia Téllez Alcántara por confiar en mí cuando decidí estudiar física y perseguir mis sueños.

A Max y Jenny de quienes sólo he recibido la mejor de las amistades, a Mich que sin su apoyo y constante motivación estas líneas no existirían. A David y su amistad incondicional.

A Ale y Vero por el tiempo y espacio compartido, a Miguel por ser un ejemplo a seguir y a mis grandes amigos Juan, Kevin, Adrián, Arturo, Nayeli, Ricardo, Fernando, Ekai e Isaac con quienes pasé tiempo interminable de alegría. A todos mis amigos y compañeros que hicieron de la escuela un lugar agradable y a quienes tendré siempre en mi memoria.

A mi jurado por su valiosa retroalimentación, Dr. Cristian Heber Zepeda Fernández, Dr. Miguel Javier Hernández López.

Finalmente le agradezco al Dr. Zepeda por su paciencia, apoyo y dirección en el desarrollo de este trabajo y de sus enseñanzas en el aula, sin las cuales no tendría claro cuál es el camino profesional que deseo seguir.

A todos ustedes, muchas gracias.

Índice general

Resumen	XIII
Introducción	XV
1. Planteamiento del problema	1
1.1. Descripción de la realidad problemática	1
1.1.1. En el mundo	1
1.1.2. En México	1
1.1.3. Organización donde se va hacer la investigación	3
1.2. Formulación del problema.	3
1.2.1. Preguntas específicas	3
1.2.2. Objetivo general	3
1.3. Justificación.	4
1.4. Perspectiva teórica metodológica	4
1.5. Alcances y limitaciones	5
2. Marco Teórico	7
2.1. Antecedentes de cáncer en la piel	7
2.1.1. Aportes de Grecia antigua	7
2.1.2. Siglo XIX	7
2.2. Cáncer	8
2.2.1. Tipos de cáncer de piel	9
2.3. Radiación solar	10
2.3.1. Radiación ultravioleta	11
2.3.2. Duración del día y porcentajes de radiación	12
2.3.3. La constante solar	13
2.4. Daño producido	14
2.4.1. Efecto indirecto	14
2.4.2. Efecto directo	15
2.5. Física moderna	19
2.5.1. Teoría cuántica de la luz	19
2.5.2. Radiación térmica	20
2.6. Óptica	21
2.6.1. Flujo radiante	21
2.6.2. Irradiancia	21
2.7. Definición de términos básicos	21

3. Metodología	25
3.1. Enfoque de la investigación	25
3.2. Alcance de la investigación	25
3.2.1. Tipo de variable	25
3.2.2. Tipo de investigación	25
3.3. Diseño de la investigación	25
3.3.1. Diseño de investigación cuantitativa	26
3.4. Población de estudio	26
3.5. Muestra	26
3.5.1. Muestra probabilística	26
3.6. Unidad de análisis	26
3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	26
3.7.1. Investigación cuantitativa	27
3.8. Procedimientos de la investigación	27
3.9. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	27
4. Resultados	29
4.1. Descripción del trabajo de campo	29
4.2. Lista de verificación	29
4.3. Número de fotones	29
4.4. Obtención de la energía más probable de un fotón a partir de la irradiancia diaria promedio mensual	30
4.5. Resultados	32
4.6. Pregunta de investigación	36
4.7. Discusión de resultados	37
5. Propuesta de intervención	39
5.1. Presentación de la propuesta	39
5.2. Justificación	39
5.3. Objetivos	40
5.3.1. Objetivo principal	40
5.3.2. Objetivos secundarios	40
5.3.3. Metas	40
5.4. Actividades	40
Conclusiones	42
Recomendaciones	43
A. Metodología de la investigación	47
B. Mapas de irradiancia diaria promedio mensual	49
Bibliografía	57

Índice de figuras

1.1. Defunciones a nivel mundial (autoría propia).	2
2.1. Esquema del cáncer de piel (Policlínico San Miguel, 2021).	10
2.2. ABCDE del melanoma (HC Hospitales, 2023).	11
2.3. Capa de ozono (autoría propia).	12
2.4. La constante solar (Universidad de Jaén, 2023).	13
2.5. Purinas y pirimidinas (Khan Academy, 2023).	16
2.6. Formación de dímeros de Timina por absorción de fotón UV (imagen modificada de autoría propia con base en: Aprender Fácil, 2023; Khan Academy, 2023; Freepik, 2023; Simonet, 2021; Online Web Fonts, 2022)	23
3.1. Esquema de la investigación (autoría propia).	26
4.1. Irradiancia diaria promedio (autoría propia).	31
4.2. Energía por fotón, recibido entre las 10 y 14hrs, vs Irradiancia (autoría propia). . .	34
4.3. Energía por fotón, recibido en el resto del día, vs Irradiancia (autoría propia). . . .	34
4.4. Energía por fotón vs Irradiancia (autoría propia)	35
4.5. Longitud de onda, γ entre las 10 y 14hrs, vs Irradiancia (autoría propia).	35
4.6. Longitud de onda, γ en el resto del día, vs Irradiancia (autoría propia).	36
4.7. Ángulo subtendido (autoría propia).	37
B.1. Irradiancia Enero (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).	49
B.2. Irradiancia Febrero (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).	50
B.3. Irradiancia Marzo (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).	50
B.4. Irradiancia Abril (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).	51
B.5. Irradiancia Mayo (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).	51
B.6. Irradiancia Junio (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).	52
B.7. Irradiancia Julio (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).	52
B.8. Irradiancia Agosto (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).	53
B.9. Irradiancia Septiembre (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).	53
B.10. Irradiancia Octubre (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).	54
B.11. Irradiancia Noviembre (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).	54
B.12. Irradiancia Diciembre (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).	55

Índice de tablas

2.1. <i>Salida y puesta de Sol CDMX 2022 (DatosMundial, 2023).</i>	13
4.1. <i>Procedimiento.</i>	29
5.1. <i>Planificación de actividades.</i>	40
5.2. <i>Tabla de viabilidad.</i>	41
A.1. <i>Matriz de consistencia metodológica.</i>	47
A.2. <i>Matriz de operacionalidad de variables.</i>	48

Resumen

Se denomina mutación del ADN «o del genoma» a cualquier cambio en la secuencia del ADN de una célula (Panda, 2013). La exposición prolongada a la luz solar es un factor de riesgo que puede detonar el origen de un cáncer de piel; si bien es beneficiosa una exposición breve, los efectos a la salud son perjudiciales cuando se exceden los límites recomendados según estudios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos mejor conocida como EPA (2001). La componente ultravioleta de la radiación solar es especialmente peligrosa para seres vivos debido a su capacidad de disociar y excitar moléculas presentes en el organismo, sumado esto al hecho de que los ácidos nucleicos «macromoléculas que contienen la información genética de un organismo» presentan los máximos coeficientes de absorción para longitudes de onda ultravioleta en el mundo vivo, obtenemos que cuando se irradia con luz ultravioleta a un organismo muy probablemente se afecte la información genética del mismo, pudiendo provocar así mutaciones en su genoma (Garnacho, et al., 2020; Garcés, 2015).

Mediciones de la temperatura del Sol indican que su superficie se encuentra a 5778 K, la ley de Wien permite calcular que el máximo de intensidad del espectro del Sol ocurre con fotones con longitudes de onda alrededor de $\lambda = 500nm$ (University of Calgary, 2021). Suponiendo que una energía instantánea solar de $1367,7W/m^2$ «constante solar» es debida a N fotones con energía correspondiente a la longitud de onda más probable «500nm», se estima que el número de fotones procedentes del espectro de emisión del Sol que alcanzan la superficie terrestre es de $3,442580646 \times 10^{21}$ fotones por metro cuadrado en un segundo.

Esta cantidad de fotones por segundo y metro cuadrado permite calcular la energía más probable de un fotón incidente en la superficie; si se conoce la irradiancia Y promedio recibida en X horas, la energía más probable de un fotón procedente del espectro de emisión del Sol es de

$$\varepsilon_{\gamma}(eV) = \frac{KY}{X} \quad (1)$$

teniendo K el valor constante de

$$K = 1,813077836 \quad (2)$$

Como el proceso de transferencia de energía de radiaciones ultravioleta a ácidos nucleicos sucede por un único mecanismo que implica la absorción del fotón, el comportamiento del material genético es entonces idéntico al de un cuerpo negro «absorbe toda la radiación incidente» (Garcés, 2015; Zettili, 2009).

Un fotón de energía ε tiene una longitud de onda $\lambda = hc/\varepsilon$ y una frecuencia ν correspondiente de $\nu = c/\lambda$. Así, la energía transferida al ADN, recibida instantáneamente en $9 \cdot 10^{-23}m^2$ «sección eficaz» es de

$$\int_{\nu}^{\nu+\delta\nu} u(\nu, T) \cdot d\nu \quad (3)$$

con $u(\nu, T)$

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/KT} - 1} \quad (4)$$

como la densidad de energía por unidad de frecuencia para la frecuencia ν . En esta última ecuación K es la constante de Boltzmann.

Palabras clave: Longitud de onda, fotón, ácidos nucleicos, ultravioleta, cuerpo negro, radiación, espectro, coeficiente de absorción.

Introducción

El cáncer de piel es un problema que tiene cada vez mayor relevancia, en general se considera al cáncer como la segunda causa de muerte a nivel mundial, con mayor incidencia en países de ingreso medio y bajo, como México. Si bien, cada vez se conoce más acerca de su tratamiento la mejor cura es la prevención del mismo. La principal causa del cáncer de piel es la exposición a la luz solar y su componente ultravioleta, la cual tiene la capacidad de disociar y excitar moléculas desde su estado fundamental, debido a su elevada energía, dando lugar a compuestos modificados no aptos para la vida (Garnacho, et al., 2020).

Cuando una partícula de luz impacta en el material biológico del organismo, este absorbe cierta cantidad de energía, posteriormente esta absorción puede desencadenar reacciones que llegan a dañar directa o indirectamente el material genético, este daño puede dar lugar a aberraciones cromosómicas o mutaciones en el ADN, las cuales al evolucionar se traducen en células dañadas y el comienzo de un cáncer de piel (Sainz, 2002).

El conocimiento médico al que se ha llegado acerca de este proceso permite abordarlo por medio de conocimientos físico-teóricos, concediendo resultados que pueden llegar a ser claves tanto en el tratamiento como en la prevención de las mutaciones en el ADN. La reciente rama de la medicina, la fotobiología, aborda este tema desde un punto de vista cuantitativo macroscópico, considerando la exposición del organismo completo a la luz ultravioleta. Entre los pocos escritos que se tienen en la fotobiología, se encuentra el libro *Photobiology: The Science of Light and Life* del autor Lars Olof Björn, un texto que aborda la interacción entre radiaciones no ionizantes y organismos vivos. Dicho modelo se ha practicado por decenas de años sin cambio, pues estima con bastante precisión el daño al organismo completo; mediante técnicas de radioresistencia, fotosensibilidad, etc., arroja un resultado que indica la vulnerabilidad de cierto organismo a radiaciones no ionizantes.

Sin embargo, a día de hoy, no se ha desarrollado un modelo cuantitativo microscópico en el que se estudie el proceso individual, debido a la radiación solar, por el cual se desencadenan reacciones químico-biológicas no aptas para la vida. Si bien se conoce el efecto de estos procesos individuales sobre el organismo completo, sería fructífero determinar con precisión las cantidades involucradas en los procesos individuales, antes, durante y después de la absorción de energía contenida en las partículas de luz.

En el marco teórico se encuentran los principales resultados físico-médicos que permiten elaborar el procedimiento descubierto en el presente escrito. La investigación propone un nuevo modelo que permite estimar tanto el riesgo de exposición al Sol para distintas regiones, horarios y temporadas, como la energía neta transferida al ADN durante la absorción de un fotón procedente del espectro de emisión del Sol.

Los resultados obtenidos aún no son aplicables directamente al ramo de la medicina, pues se han considerado aproximaciones físicas lejos de la realidad que deben corregirse por un análisis estadístico exhaustivo de datos meteorológicos, estratosféricos, ecológicos, etc.; únicamente se han sentado las bases para desarrollar un método simplificado, que junto con el índice UV, permita estimar el riesgo de exposición al Sol. Algo único que permite calcular el método presente es la energía neta transferida al ADN cuando este absorbe un fotón procedente de la radiación solar.

Capítulo 1

Planteamiento del problema

1.1. Descripción de la realidad problemática

1.1.1. En el mundo

El cáncer es una de las enfermedades más letales de toda la historia, es considerada como la segunda causa de muerte a nivel mundial; en 2012 se diagnosticaron más de 14 millones de casos nuevos y en 2020 ocasionó 10 millones de defunciones alrededor del mundo. Cerca del 16 % de defunciones en el mundo se deben a esta enfermedad, de las cuales, casi el 70 % corresponden a países de ingresos medio y bajo (Yovera y Teran, 2016).

La Organización Mundial de la Salud *OMS* apunta que desde 1970 se ha pronunciado un incremento en la incidencia de cáncer de piel en poblaciones de piel clara, a este fenómeno se le relaciona con las costumbres personales de exposición al sol y a su componente ultravioleta *UV*, así como a la percepción social de que el bronceado es saludable y estético (Organización Mundial de la Salud, 2022).

El cáncer de piel es el tumor más frecuente en el cuerpo humano con una mortalidad de ocho a diez casos por cada 100,000 habitantes. En América del Sur se ha presentado un aumento en altas proporciones, como ejemplo de ello, Argentina actualmente ocupa el primer lugar en cáncer de piel, según lo concertado en las diferentes ponencias presentadas en el XXI Congreso Mundial de Dermatología.

Desde el punto de vista de la salud pública, es preciso trabajar en este tema ya que se es cada vez más vulnerables al impacto de la radiación solar, debido al debilitamiento de la capa de ozono. Día a día el filtro para los rayos ultravioleta es más débil, asimismo una alimentación escasa en frutas y verduras produce una deficiencia de vitaminas necesarias para los mecanismos de defensa del organismo contra las radiaciones, también, se ha observado que la población en general no suele usar protector solar (Yovera y Teran, 2016).

1.1.2. En México

La tercera causa de muerte en nuestro país es el cáncer, debido a ella fallecen 14 de cada 100 habitantes y la esperanza de vida de quienes la padecen ronda 63 años. Su mortalidad ha crecido de manera acelerada, pues en 1990 el número de muertes fue de 41 mil personas y en 2019 se duplicó a 89 mil (Flamand, et al., 2021).

Esta afección genera costos de entre 23 y 30 mil millones de pesos anuales, lo cual representa la quinta parte del presupuesto total del Instituto de Salud para el Bienestar «Insabi» en 2020. La prevención y la detección tempranas son clave, como en otras enfermedades:

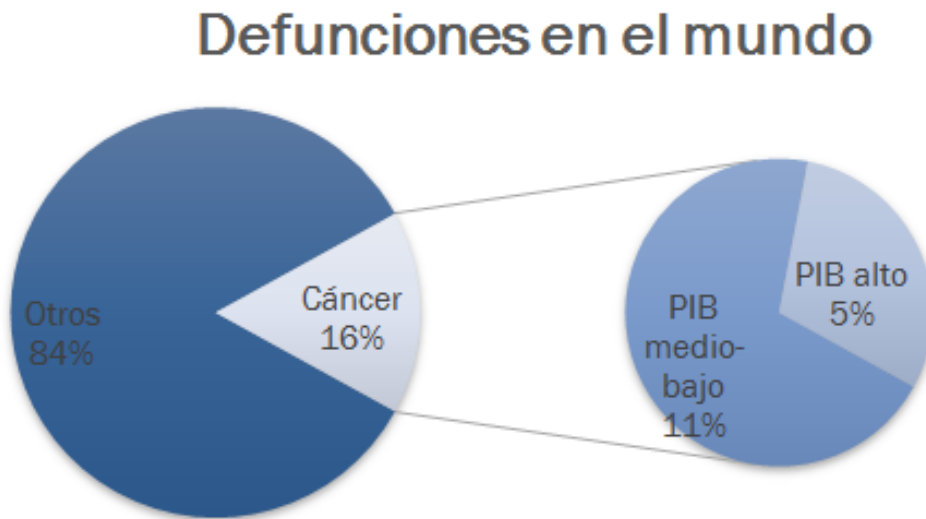


Figura 1.1: Defunciones a nivel mundial (autoría propia).

- Se pueden prevenir la mayor parte de tipos de cáncer en grado escolar primaria y secundaria por medio de los programas de vacunación y tamizaje.
- El 33 % de los casos de cáncer pueden curarse si se detectan a tiempo y se tratan adecuadamente.
- El 40 % de casos de cáncer podrían prevenirse si se evitan factores de riesgo cruciales como el tabaco, consumo abusivo de alcohol, dieta insana, inactividad física y exposición a la componente ultravioleta del Sol (Flamand, et al., 2021).

Anualmente en México ocurren alrededor de mil casos de cáncer de piel, este órgano es susceptible de padecer enfermedades ocasionadas por la radiación solar al estar expuesto directamente a ella (S.S.A., 2015).

Existen tres tipos de cáncer que son provocados por la radiación solar y las cámaras de bronceado: el carcinoma de células basales, el carcinoma de células escamosas y el melanoma.

En el Hospital General de México “Eduardo Liceaga” se atienden unas doce mil consultas por año debido a este padecimiento, de las cuales mil doscientas corresponden a tumor maligno de diferentes grados.

Actualmente en México es curable el cáncer menos maligno, como el carcinoma de células basales, en donde las tasas de curación de cirugía van alrededor del 90 % y el carcinoma de células escamosas con el 73 %. El melanoma tiene menores probabilidades de curación, sobre todo si se diagnostica en etapa avanzada (S.S.A., 2015).

No se conoce con certeza cuánto dinero se gasta en el tratamiento de cáncer de piel en México. Datos de dominio público indican que en 1999 se gastaron 451 millones de pesos en atención al derechohabiente con cáncer en el Hospital de Oncología del Centro Médico Nacional Siglo XXI del Instituto Mexicano del Seguro Social «IMSS», esto es, 43 millones de pesos más que el presupuesto

anual destinado para su combate en 1999 y que el presupuesto de 2001 del Hospital Civil de Guadalajara, institución enfocada al tratamiento integral de niños con cáncer.

La terapia en pacientes oncológicos pediátricos varía de acuerdo a su patología, y su costo va de 1,500 hasta 50,000 pesos mensuales; mientras que en un adulto la cifra puede incrementarse hasta los 70,000 pesos, cifras que tampoco representan el costo de la atención específica del dolor en este tipo de pacientes. (Reyes, et al., 2011, párr. 14)

1.1.3. Organización donde se va hacer la investigación

La población de estudio es la extensión territorial de los Estados Unidos Mexicanos, puesto que se analiza la irradiancia promedio mensual diaria en suelo mexicano, la cual se midió en 2014 por el Instituto de Geofísica de la UNAM.

1.2. Formulación del problema.

La pregunta de investigación es el eje donde gira toda la investigación misma, debe tener elementos que den pauta al investigador que seguir; como son la pregunta, variable, temporalidad, ubicación.

Para la siguiente investigación donde la principal causa del cáncer de piel es la exposición a la componente ultravioleta de la radiación solar, la pregunta de investigación es:

- ¿Qué cantidad de energía se transmite al ADN cuando este absorbe un fotón de una longitud de onda específica, proveniente de la radiación solar, 2022?

1.2.1. Preguntas específicas

- ¿Qué es ADN?
- ¿Qué es un fotón?
- ¿Qué es radiación solar?
- ¿Cómo se calcula la energía que llega al ADN proveniente de la radiación solar?

1.2.2. Objetivo general

El objetivo general de esta investigación es calcular la energía que el ADN absorbe cuando un fotón proveniente de la radiación solar impacta en él, este fotón en principio puede tener longitudes de onda desde el infrarrojo hasta el ultravioleta.

- Determinar la cantidad de energía que recibe el ADN al absorber un fotón, de una longitud de onda específica, proveniente de la radiación solar 2022.

1.2.2.1 Objetivos específicos

- Determinar ADN.
- Explicar fotón.
- Explicar radiación solar.
- Explicar cómo se calcula la energía transferida al ADN.

1.3. Justificación.

- Conveniencia

Esta tesis sirve de fundamento para futuras investigaciones que analicen con mayor profundidad el impacto de la radiación solar en el ADN, es decir, que al estudiar el proceso que da lugar a mutaciones del ADN por recibir energía de fotones de la radiación solar, puedan tomar como referente los valores de energía aquí obtenidos.

También es un referente histórico para analizar el impacto que tuvo la radiación solar en la población mexicana 2014, en caso de replicar esta metodología, se podría llegar a crear con el tiempo un gráfico por el método de regresión lineal, el cual prediga a futuro el impacto de la radiación solar en la población.

- Relevancia social

En caso de utilizar este escrito con fines de divulgación científica se podría crear un apartado que informara a la población las regiones del territorio mexicano que presentan mayor exposición a la componente ultravioleta de la radiación solar, y por tanto mayor riesgo de desarrollar cáncer de piel, a su vez se informaría que tanto es el riesgo para cada mes del año, y cuanto tiempo pueden exponerse al sol en la región donde habitan según la temporada.

- Implicaciones prácticas

Concientización de los efectos biológicos de las radiaciones no ionizantes, con ello la población toma medidas de precaución adecuadas. Al ser un texto decodificable por cualquier lector el impacto a nivel república sería la disminución de incidencia de cáncer de piel.

- Valor teórico

De momento no se tiene un modelo establecido para el mecanismo mediante el cual el ADN recibe la energía de los fotones pertenecientes a la radiación solar, aquí se propone que el material genético actúe como un cuerpo negro, el cual absorbe toda la radiación sin emitir energía de regreso. Esto coincide con los resultados observados y descritos en la literatura, por lo cual podría ser el eslabón que enlace el procedimiento de absorción del fotón con los efectos que se tiene a nivel macromolécula.

- Unidad metodológica

Esta investigación propone tratar al material biológico como un cuerpo negro según la formulación cuántica de Max Planck, se encuentra que esto es sostenible puesto que coinciden los resultados con las medidas experimentales disponibles en la actualidad, por lo que podría ser un nuevo método de medición en cuanto a transmisión de energía electromagnética se trata.

1.4. Perspectiva teórica metodológica

En lo consecuente, se revisará la información conocida hasta la actualidad acerca del cáncer de piel, su definición, tipos, causas y consecuencias; se abordará la principal causa del cáncer de piel: la exposición a la componente ultravioleta de la radiación solar. Se analizará con detalle este tipo de radiación y su proceso cuando ingresa al organismo, se encontrará que esta «y cualquier tipo» de radiación es una manifestación de la acción de las partículas unitarias de luz, los fotones.

A continuación se contempla la formulación cuántica de la luz para calcular propiedades de los fotones, como lo son la longitud de onda y la energía. Por último se considerará que el material genético actúa como un cuerpo negro «absorbe toda la radiación incidente», y se aplicarán las leyes correspondientes a este.

La siguiente investigación será de índole cuantitativo con diseño transversal y alcance correlacional, se propone extraer una relación entre dos o más variables en un momento único de tiempo. La muestra a emplear será de índole probabilístico.

1.5. Alcances y limitaciones

La aplicación y trascendencia de esta investigación en la actualidad y a futuro está limitada por los datos disponibles, la irradiancia promedio mensual que se utiliza para esta investigación data del año 2014, que corresponde a la última actualización de datos abiertos «de esta índole» del Instituto de Geofísica de la UNAM.

El rango de irradiancia para distintas zonas del territorio mexicano también está delimitado por los datos disponibles, por lo que nos restringimos a calcular la energía y estimar el riesgo para 11 intervalos de irradiancia diaria promedio mensual.

La estimación de riesgo de mutaciones al ADN debidas a la componente ultravioleta de la radiación solar está delimitada por la información disponible en la literatura, es decir, a partir de un valor encontrado para cierta longitud de onda del fotón, categorizamos la situación como de riesgo o no según los estándares a nivel mundial.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Antecedentes de cáncer en la piel

El carcinoma es el tumor cutáneo de mayor tasa de muerte relativa, ha presentado un incremento alarmante en su incidencia desde inicios de la historia. Data desde el siglo V a.C. con escritos de Hipócrates, sin embargo, no fue sino hasta el siglo XIX cuando se le reconoció como enfermedad específica y empezaron a publicarse textos especializados en la bibliografía médica.

A partir de entonces comenzaron a comprenderse aspectos de su tratamiento e identificación por análisis de tejido, a finales de ese siglo se propusieron tratamientos quirúrgicos que sirvieron de guía para el tratamiento del melanoma por casi otro siglo (Alonso y Salerni, 2016).

2.1.1. Aportes de Grecia antigua

Hipócrates (460-377 a.C.) separó la mitología de la medicina, en cuanto al cáncer aportó al reconocimiento de cáncer de mamá, recto, estómago, cérvix y piel. Posteriormente Rufus de Éfeso (60-120 d.C.), describió distintos tipos de cáncer de piel. Estos dos personajes se referían a la enfermedad como un tumor negro fatal, desde entonces no se encontraron referencias del padecimiento hasta el periodo de 1651 a 1757 (Alonso y Salerni, 2016).

2.1.2. Siglo XIX

Durante este siglo se empezaron a reconocer las principales características y causas de la enfermedad, principalmente en Francia, Escocia e Inglaterra.

2.1.2.1 Siglo XIX Francia

- René Laënnec declaró que las lesiones de melanoma no se relacionaban con los depósitos negros de carbón encontrados en los pulmones durante las autopsias.
- Jean Cruveilhier publicó “Anatomie Pathologique du Corps Humain” en el que se encuentran las primeras referencias de melanomas de mano, pie y vulva y fue pionero en describir metástasis de melanoma en corazón y en intestino delgado (Alonso y Salerni, 2016).

2.1.2.2 Siglo XIX Inglaterra

- William Norris siguió el caso de un hombre con melanoma y documentó la progresión de la enfermedad a lo largo de tres años y posterior autopsia. Primero en señalar la relación entre el melanoma con nevos «lunares» y factores ambientales.

- Thomas Fawdington publicó “A case of melanosis”, el caso de un paciente que desarrolló un melanoma en el ojo luego de un traumatismo ocular.
- Samuel Cooper describe en “First lines of theory and practice of surgery” que el melanoma, en etapas avanzadas es intratable y debe ser extirpado inmediatamente, este concepto se conserva en la actualidad (Alonso y Salerni, 2016).
- Oliver Pemberton publicó en 1860 una serie detallada de 60 casos de melanoma recopilados desde 1820 hasta 1857 con un exhaustivo análisis estadístico.
- William Sampson Handley fue el principal influyente en el desarrollo de la cirugía del cáncer, puesto que identificó las vías linfáticas de diseminación. Recomendó amputar melanoma localizado en dedos, si el melanoma aparece en otros sitios indica que se debe hacer incisión circular profunda alrededor de la piel del tumor a 2.5cm (Alonso y Salerni, 2016).

2.2. Cáncer

El cáncer se caracteriza por células anormales del cuerpo que se multiplican y propagan sin control a otras regiones del organismo; en principio el cáncer puede comenzar en cualquier parte del cuerpo, puesto que éste se encuentra conformado por billones de células (Rigel, et al., 2011).

La célula es la unidad biológica y funcional de todos los seres vivos, en particular, el ser humano está conformado por células eucariotas «células con un núcleo aislado y membrana celular que lo recubre».

Las células le dan estructura al cuerpo, absorben los nutrientes de los alimentos, transforman estos nutrientes en energía y realizan funciones específicas. Las células también contienen el material genético del organismo y pueden replicarse.

En circunstancias normales el cuerpo humano forma y multiplica células sanas «mediante la división celular», a medida que las necesita. Cuando las células se dañan o envejecen, mueren y son reemplazadas por nuevas células sanas (Rigel, et al., 2011).

En ocasiones este proceso es irrumpido y células anormales «o células dañadas» se forman y reproducen cuando no deberían, estas células pueden llegar a formar tumores, que son bultos de tejido.

Los tumores cancerosos o malignos se diseminan a tejidos cercanos, aunque también pueden viajar a regiones lejanas del cuerpo y formar otros tumores «metástasis». Estos son difíciles de eliminar ya que tienen la posibilidad de volver cuando se les extirpa del cuerpo. Asimismo, existen tumores benignos o no cancerosos, los cuales no se diseminan a tejidos cercanos ni suelen volver cuando se les extirpa (Rigel, et al., 2011).

En particular, el cáncer es una enfermedad difícil de tratar por los mecanismos biológicos que realizan las células cancerosas:

- Las células cancerosas se originan sin recibir señales de que se deben formar ni hacen caso a las señales que indican a las células que dejen de multiplicarse o que deben destruirse «muerte celular programada o apoptosis», las células normales solo se forman cuando reciben estas señales.
- Las células cancerosas se esconden del sistema inmunitario «el cual suele destruir las células dañadas o anormales», engañan a este sistema para seguir vivas y multiplicarse. Algunas de estas incluso logran que las células inmunitarias protejan el tumor en lugar de atacarlo.
- Las células cancerosas incorporan numerosos cambios en los cromosomas, como partes del cromosoma que se repiten o faltan, algunas incluso tienen el doble de cromosomas normales. También producen cambios en los vasos sanguíneos haciendo que crezcan en dirección a los tumores, llevando oxígeno y nutrientes a los tumores y quitando sus productos de desecho.

- Las células cancerosas dependen de nutrientes que son distintos a los que necesitan las células normales. Además, algunas crean energía de los nutrientes de formas diferentes «y completamente desafiantes» a las que usan la mayoría de las células normales, esto permite que se multipliquen mucho más rápido.

El cáncer es una enfermedad genética, las alteraciones en el genoma que controlan el funcionamiento de las células, en especial cómo se forman y multiplican, causan el cáncer (Rigel, et al., 2011).

Los cambios genéticos que causan cáncer se producen por los siguientes motivos:

- Errores que ocurren cuando las células se multiplican o errores cuando el ADN se repara.
- Daños en el ácido desoxirribonucleico *ADN* por sustancias perjudiciales en el medio ambiente, como las sustancias químicas en el humo del tabaco en cigarrillos y los rayos ultravioleta del sol.
- Se hereda una predisposición al cáncer de familiares cercanos, también se puede pasar de padres a hijos.

El cáncer puede comenzar en cualquier parte del cuerpo y extenderse por todo el organismo, existen más de 100 tipos de cáncer y en general cada uno recibe el nombre del órgano o tejido donde se origina (Rigel, et al., 2011).

Para el propósito de la presente investigación, se aborda el cáncer de piel, denominado así porque inicia en la epidermis «capa externa de la piel» compuesta de células escamosas, células basales y melanocitos. En esta afección células cutáneas dañadas crecen sin control y se diseminan desde la piel a otros tejidos u órganos.

El cáncer de piel es una enfermedad de origen multifactorial, sin embargo, el mayor factor de riesgo es la exposición a la componente ultravioleta de la radiación solar y los antecedentes de quemaduras solares.

Las complicaciones que puede producir el cáncer de piel es según su localización en el organismo y el tipo de cáncer que se identifique, van desde infecciones hasta desfiguración y metástasis a cualquier parte del cuerpo (Rigel, et al., 2011).

Esta investigación aborda la principal circunstancia que da lugar al cáncer de piel, el daño al ADN causado por la componente ultravioleta de la radiación solar, a continuación, se describen los tipos de cáncer de piel conocidos.

2.2.1. Tipos de cáncer de piel

2.2.1.1 Carcinoma

Los carcinomas son el tipo más común de cáncer, se dan en células epiteliales, que son las células que recubren las partes internas y externas del cuerpo; hay muchos tipos de células epiteliales, cuando estas se observan al microscopio parecen pequeñas columnas. Los carcinomas tienen nombres distintos según el tipo de célula epitelial donde se inician, en particular el cáncer de piel tipo carcinoma se divide en dos:

- Carcinoma de células basales: Cáncer que se forma en la capa inferior de la epidermis, que es la capa de piel externa de una persona.
- Carcinoma de células escamosas o epidermoide: Un cáncer que se forma en las células escamosas, que son células epiteliales que están justo debajo de la superficie externa de la piel, estas se ven planas al observarlas en el microscopio «como las escamas de un pez». Las células escamosas también recubren muchos otros órganos, como los intestinos, el estómago, la vejiga, el pulmón, y los riñones (Rigel, et al., 2011).

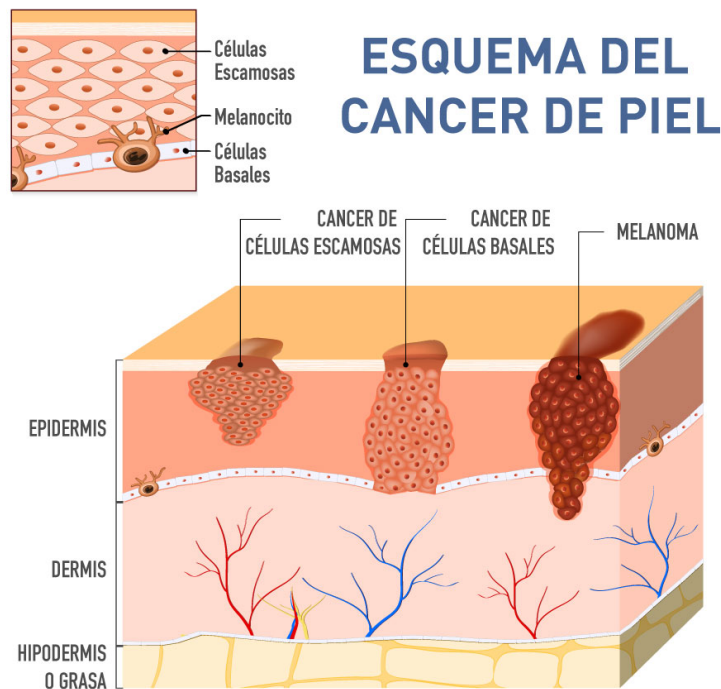


Figura 2.1: Esquema del cáncer de piel (Policlínico San Miguel, 2021).

2.2.1.2 Melanoma

El melanoma es un cáncer que se inicia en los melanocitos, que son células especializadas que producen melanina «el pigmento que da a la piel, y ojos, su color» y se encuentran en la parte más profunda de la epidermis, así como en el iris. La mayoría de los melanomas se forman en la piel, pero a veces aparecen en los tejidos pigmentosos, como los del ojo.

El melanoma puede aparecer en la piel normal «sana» o en un lunar que luego cambia de apariencia, algunos lunares que están presentes al nacer pueden convertirse en melanomas malignos. Este tipo de cáncer de piel es menos frecuente que los carcinomas, pero es el más agresivo, una forma simple de identificarlo es mediante el método ABDCE (Rigel, et al., 2011).

2.3. Radiación solar

La primera causa del cáncer de piel es la exposición a la alta radiación solar, en especial a su componente ultravioleta *UV*, que llega a la superficie terrestre. Los efectos derivados de la exposición a la luz solar pueden ser beneficiosos y también dañinos cuando se exceden los límites recomendados según estudios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos mejor conocida como EPA (2001).

La radiación solar afecta a la salud en el sentido en que longitudes de onda específicas pueden dañar directa o indirectamente el ADN. La radiación solar puede producir la excitación de átomos y moléculas, así como su ionización y disociación (Balart, 2001).

La radiobiología es la rama encargada de estudiar los fenómenos que se producen en un ser vivo como consecuencia de la absorción de la energía procedente de las radiaciones ionizantes. El estudio presente aborda radiación electromagnética y su efecto en los seres vivos, sin embargo, al tratarse

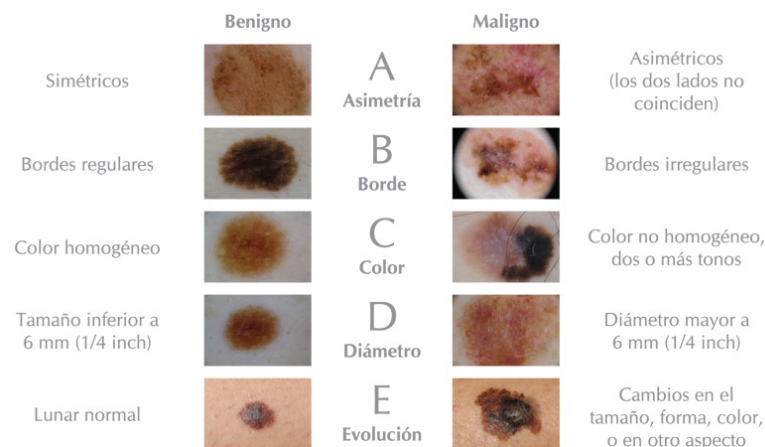


Figura 2.2: ABCDE del melanoma (HC Hospitales, 2023).

en este caso de energía no ionizante para seres vivos, no pertenece al dominio de la radiobiología (Sainz, 2002).

En caso de que el lector quiera indagar más en el tema, el estudio de este fenómeno se aborda en la fotobiología.

En general, la luz solar es beneficiosa para la vida en la Tierra «tanto en desarrollo como prevalencia», la mayor parte de ella se compone de fotones con longitudes de onda en el infrarrojo $\lambda \in (700nm, 1mm)$; su elevada longitud de onda indica que tiene un bajo poder energético y un poder de penetración escaso a través de la piel, por ello no produce daños biológicos, ni siquiera quemaduras (Bohórquez y Pérez, 2007).

Los efectos de la radiación infrarroja sobre la piel se traducen en una sensación de calor que estimula la circulación sanguínea, esto interviene en los fenómenos de termorregulación y sudoración, mediante el cual el organismo secreta el ácido urocánico que actúa como un protector natural contra la radiación solar (González, 2003).

La luz solar se compone en menor medida de fotones con longitudes de onda en el visible $\lambda \in (400nm, 700nm)$ y tan solo el 7.2 % de ella la conforman fotones con longitudes de onda en el rango ultravioleta $\lambda \in (100nm, 400nm)$ (Bohórquez y Pérez, 2007).

2.3.1. Radiación ultravioleta

La radiación ultravioleta es el componente dañino de la luz solar para el ser humano, no es más que radiación electromagnética con una menor longitud de onda, sin embargo, su capacidad de disociar y excitar moléculas debido a su alta energía la hace peligrosa (Garnacho, et al., 2020).

Esta se divide en tres categorías:

- Radiación ultravioleta A **UVA**: Definida por su longitud de onda $\lambda \in (315nm, 400nm)$, constituye el 5.1 % del total de radiación solar. Este tipo de radiación es débilmente filtrada por la capa de ozono y por tanto llega casi en su totalidad a la superficie terrestre y a la piel.

La radiación UVA se clasifica en UVA I $\lambda \in (340nm, 400nm)$ la cual puede penetrar hasta la hipodermis y UVA II $\lambda \in (315nm, 340nm)$ la cual puede penetrar solo hasta la dermis superficial.

- Radiación ultravioleta B **UVB**: Definida por su longitud de onda $\lambda \in (280nm, 315nm)$, constituye el 1.3 % del total de radiación solar. Este tipo de radiación es mayormente filtrada

en la capa de ozono y por tanto llega en menor medida a la superficie terrestre y a nuestra piel. Su poder de penetración en la piel es escaso, solo puede penetrar hasta la epidermis.

- Radiación ultravioleta C **UVC**: Definida por su longitud de onda $\lambda \in (100nm, 280nm)$, es filtrada casi en su totalidad en la capa de ozono. Constituye el 0.8 % del total de radiación solar recibida y está mayormente relacionada a locaciones donde la capa de ozono se ha reducido; o locaciones con mayor altitud debido a que la radiación UV aumenta 20 % por cada 1000m de altitud (EPA, 2001; Bohórquez y Pérez, 2007).

2.3.1.1 Eliminación de UVC

La parte más dañina de la radiación ultravioleta, la radiación UVC, casi no alcanza la superficie ya que es absorbida al 99.99 % por la atmósfera, especialmente en la capa de ozono. Esto porque el oxígeno presente en la estratósfera, segunda capa de la atmósfera, absorbe radiación ultravioleta, radiaciones con longitudes de onda menores a 240 nm rompen el enlace de la molécula de oxígeno, produciéndose así la disociación de una molécula de oxígeno en dos átomos de oxígeno (Caldwell y Sisson, 1976; IDEAM, 2023).

Los átomos de oxígeno se combinan con otras moléculas de oxígeno para formar moléculas de ozono O_3 . Las moléculas de ozono también se descomponen al absorber la radiación ultravioleta. De esta forma la radiación UV ayuda a mantener el equilibrio de ozono en la estratosfera, mientras que el ozono, por su parte, absorbe la radiación dañina ultravioleta y protege la vida en la Tierra (IDEAM, 2023).

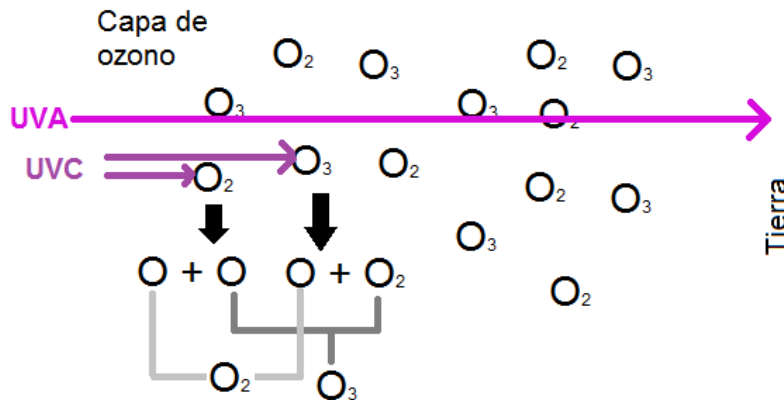


Figura 2.3: Capa de ozono (autoría propia).

El ozono también se presenta en otras capas de la atmósfera en menor medida (Caldwell y Flint, 1994; IDEAM, 2023).

2.3.2. Duración del día y porcentajes de radiación

Particularmente, cada estado de la República Mexicana tiene un horario específico de salida y puesta de Sol en función del mes, que determina la duración del día. Esta duración no suele diferir por más de una hora si se toma como referente a la Ciudad de México, por lo que, por propósitos de simplificación de cálculo, se toman los valores de salida y puesta de Sol en la Ciudad de México como generales para la República Mexicana:

Tabla 2.1: *Salida y puesta de Sol CDMX 2022 (DatosMundial, 2023).*

Amanecer y atardecer por mes (Ciudad de México)			
Mes	Amanecer	Puesta de Sol	Duración del día
Enero	07:12 am	06:19 pm	11:08 h
Febrero	07:03 am	06:37 pm	11:34 h
Marzo	06:43 am	06:47 pm	12:04 h
Abril	06:17 am	06:55 pm	12:38 h
Mayo	06:00 am	07:05 pm	13:06 h
Junio	05:56 am	07:17 pm	13:20 h
Julio	06:05 am	07:19 pm	13:14 h
Agosto	06:16 am	07:05 pm	12:50 h
Septiembre	06:22 am	06:40 pm	12:18 h
Octubre	06:29 am	06:14 pm	11:45 h
Noviembre	06:43 am	05:58 pm	11:16 h
Diciembre	07:01 am	06:01 pm	11:00 h

Como dato, la puesta de Sol en México dura 26 minutos en promedio (Eglitis, 2023). Del total de radiación diaria promedio que llega a la superficie terrestre, el 60 % se recibe en tan solo 4 horas, correspondientes en el horario de 10 a.m. a 2 p.m.

Por simplificación, se tomará que el resto de radiación se recibe en las horas del día restantes (Bohórquez y Pérez, 2007).

Toda forma de radiación electromagnética proveniente del Sol que alcanza la superficie terrestre está determinada por la constante solar.

2.3.3. La constante solar

“La constante solar se define como la cantidad instantánea de energía solar (W/m^2s) que incide perpendicularmente en la cima de la atmósfera (extraterrestre) a la distancia media Tierra-Sol. Su valor medio es de $1367.7 W/m^2$ ” afirma Instituto Cooperativo de Investigaciones en la Atmósfera mejor conocido como CIRA (2023, párr.1).

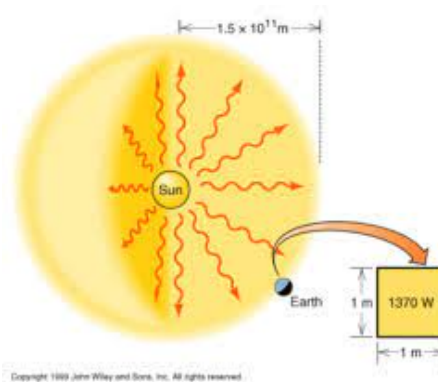


Figura 2.4: La constante solar (Universidad de Jaén, 2023).

Esta fluctúa $\pm 3\%$ debido a la variación periódica de la distancia entre la Tierra y el Sol, tiene una desviación estándar de $1.6 W/m^2$ y una desviación máxima de $1.7 W/m^2$ (IDEAM, 2023).

Esta cantidad da una idea del total de energía que llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética, pues, se debe considerar que esta es filtrada en la atmósfera por la presencia de las nubes, vapor de agua, ozono y otras especies químicas presentes.

En general, se estandariza que la radiación que alcanza la superficie terrestre posee el valor del 70 % de la constante solar, como indicativo de la filtración y reflexión llevada a cabo en la atmósfera. Abordando particularmente el caso de México, estudios recientes han indicado que en la zona desértica del país el 85 % de la energía instantánea solar alcanza la superficie en un día soleado, mientras que en un día lluvioso llega tan solo un 20 % (Rivero y Orozco, 2017).

Por simplicidad y por tratarse de una nueva forma de abordar este tema, se tomará el valor de la constante solar como referente, pues la cantidad instantánea de energía solar que llega a la superficie depende de muchísimos factores, como la atmósfera, las nubes, la vegetación, el día, la hora, altitud, etcétera.

2.4. Daño producido

El daño que los diferentes tipos de radiación producen en el ADN se clasifica en directo e indirecto, producido por efecto directo e indirecto (Sainz, 2002).

Para radiaciones UV, en general, “la absorción de energía sucede por un único mecanismo que implica la absorción del fotón y que conduce en materiales biológicos, a estados de excitación molecular” (Garcés, 2015, p. 11).

2.4.1. Efecto indirecto

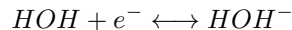
Se asocia mayormente a la formación de radicales libres «especies altamente reactivas», principalmente resultantes de la ionización del agua. En células no irradiadas, la producción de radicales libres que provienen del oxígeno se debe en mayor medida al proceso de respiración celular llevado a cabo en las mitocondrias.

“De los radicales derivados del oxígeno, el más reactivo es el grupo hidroxilo, siendo el principal agente atacante del ADN” (Sainz, 2002, p. 16). En el medio acuoso, los radicales libres se forman por radiación mediante el siguiente proceso:

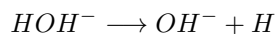
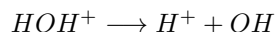
Una molécula de agua absorbe energía procedente de la radiación, esto provoca la eyección de un electrón y la formación de un ion positivo, como se indica en la reacción



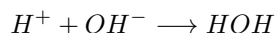
El electrón eyectado es capturado por otra molécula de agua, con lo que se forma otro ion, que en este caso tendrá carga negativa



Ambos iones HOH^+ y HOH^- son muy inestables y se descomponen fácilmente siempre que en el medio estén presentes moléculas de agua no ionizadas «o con carga neutra». Esto produce la formación de otros iones y radicales libres



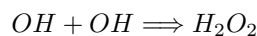
Los iones H^+ y OH^- se pueden combinar, produciendo una nueva molécula de agua



Aunque también pueden reaccionar químicamente y afectar a las macromoléculas presentes «ADN, ARN, enzimas, proteínas, etc.»; es significativamente más probable que se combinen a que

reaccionen y produzca un daño celular. “No obstante, su alta reactividad y movilidad en el medio hace que su acción se propague a través de este, pudiendo provocar lesiones en lugares distintos de su origen” (Sainz, 2002, p. 17).

También la unión de radicales entre sí puede formar otro tipo de molécula tóxica para la célula, como el agua oxigenada «o peróxido de hidrógeno» en la reacción.



Asimismo, estas especies químicas podrían reaccionar con otras moléculas cercanas, dando lugar a compuestos modificados. Las modificaciones moleculares inducidas mediante ondas electromagnéticas pueden provocarse lejos del lugar de interacción con la radiación, ya que los radicales libres se desplazan en el medio como mínimo distancias de 40 ángstroms, debido a que su vida media es del orden de 10^{-5} s.

El daño producido por la generación excesiva de especies reactivas del oxígeno depende también de la disponibilidad y localización de iones catalizadores metálicos de la formación del radical OH (Sainz, 2002). Estos iones metálicos como los de Hierro o Cobre, por ejemplo, pueden favorecer el daño de determinadas estructuras «ADN, lípidos, etc.». (Sainz, 2002, p. 17)

El cuerpo humano posee diversos mecanismos de defensa y reparación contra el daño producido por el efecto indirecto, por ejemplo, existen compuestos naturales que capturan los radicales libres en circulación, como la vitamina C y E (Sainz, 2002). Al unirse a los radicales forman moléculas estables que cortan la cascada de reacciones, en este proceso los radicales aportan sus electrones libres perdiendo así su elevada reactividad.

“Además existen enzimas antioxidantes encargadas de favorecer reacciones de estabilización o neutralizar directamente la capacidad de reacción de los radicales, protegiendo así a las células contra el daño oxidativo” (p. 18). A su vez, las catalasas son las principales moléculas responsables de neutralizar el agua oxigenada H_2O_2 (Sainz, 2002).

Lo anterior define el daño indirecto, en el que la energía no recae en el ADN sino en otras moléculas del medio intracelular, fundamentalmente en agua «puesto que compone el 80 % de la célula», la cual al disociarse produce radicales libres altamente reactivos que pueden llegar a reaccionar con el ADN (Rueda, 2017).

El daño indirecto que genera la radiación solar se produce principalmente por absorción de la radiación UVA con $\lambda \in (315, 400)$ nm (Garcés, 2015).

También se le asocia el daño indirecto a la radiación UVA porque esta no suele afectar al ADN directamente, sino a los cromóforos, sustancias en el cuerpo incluido el tejido epitelial.

Los cromóforos son sustancias que se excitan al absorber un fotón UV y generan, en última instancia, especies que pueden reaccionar con el oxígeno. Son estas especies reactivas del oxígeno las que dañan activa o directamente el ADN, al oxidarlo.

También para esto existe un mecanismo protector, los melanocitos, los cuales absorben radiación UVA y UVB en lugar de los cromóforos (Garcés, 2015).

De hecho, “se estima que diariamente cada célula de nuestro organismo sufre alrededor de 10^5 lesiones en el ADN, lo cual sería letal si no fuera por la activación de mecanismos reparadores y reguladores que mantienen la homeostasis celular” (Rueda, 2017, p. 13).

2.4.2. Efecto directo

Se dice que el efecto de la radiación electromagnética sobre el genoma es directo cuando el daño es producido directamente sobre macromoléculas como el ADN, ARN, enzimas, proteínas, etcétera (Sainz, 2002).

En este proceso las macromoléculas absorben íntegramente la energía transmitida por la radiación, a esto se le conoce también como “teoría del impacto” o “efecto bola” y se debe tanto a radiaciones ionizantes como no ionizantes (Rueda, 2017).

“Una macromolécula ionizada modificará su actividad química, perdiendo o alterando su funcionalidad específica. Cuando sea excitada podrá volver a su estado original rompiendo enlaces covalentes, lo cual puede suponer un daño biológico” (Sainz, 2002, p. 19).

La ionización puede producir cambios en los lípidos de la membrana celular, alterando su capacidad de filtrar fluido, puede desregular la rapidez de las enzimas de catalizar reacciones y desnaturalizar proteínas por cambio en su estructura.

“Dosis altas de radiación llegan a causar la muerte celular inmediata por fallo mitocondrial al desorganizarse las crestas mitocondriales y la cadena de fosforilación oxidativa” (pp.19-20) «cadena de proteínas incrustadas en el interior de la mitocondria» (Sainz, 2002).

2.4.2.1 Lesiones al ADN

Las principales lesiones al ADN causadas por efecto directo o indirecto son:

1. Pérdida o cambio de bases: Se produce principalmente por reacción de la timina con el grupo hidroxilo (OH) formando dímeros de esta base nitrogenada. Al alterarse la secuencia de las bases «organización de purinas y pirimidinas dentro de la cadena del ADN» se modifica la información genética pudiendo dar lugar a una mutación.
2. Rotura simple: Sucede cuando se rompe una cadena de la doble hélice del ADN.
3. Rotura doble: Sucede al romperse ambas cadenas del ADN. Para radiaciones de baja energía las lesiones predominantes son el cambio y pérdida de bases, así como las roturas simples; mientras que para radiaciones más energéticas las lesiones más frecuentes son las roturas dobles.

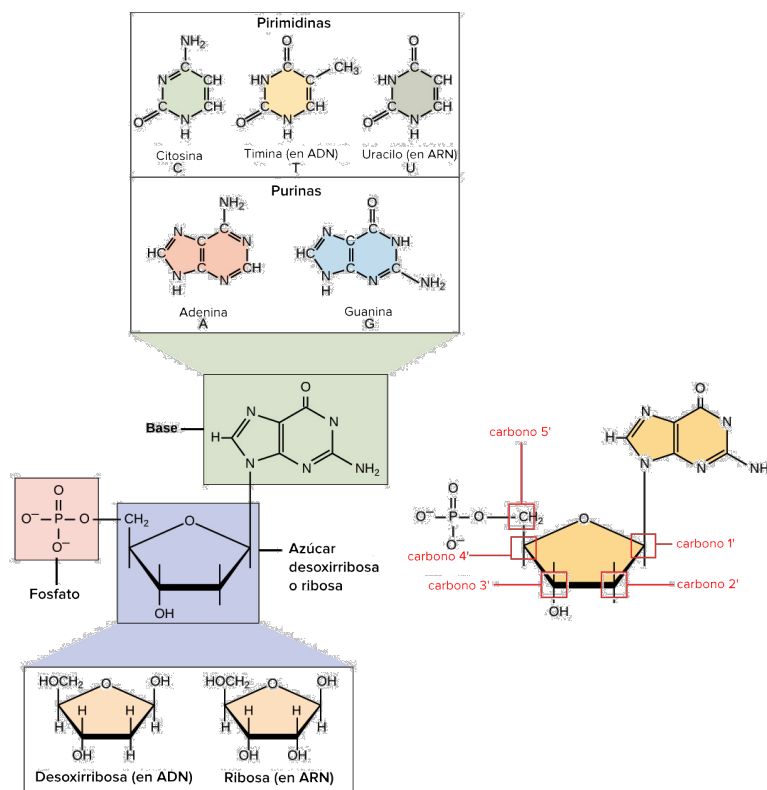


Figura 2.5: Purinas y pirimidinas (Khan Academy, 2023).

Existen mecanismos de detección y reparación de daños que corrigen la mayoría de modificaciones del ADN, por ejemplo, las roturas simples y modificaciones de bases pueden repararse sencillamente utilizando otra cadena intacta como molde para restaurar la información original. Sin embargo, a veces estos mecanismos no funcionan o se saturan y los daños al ADN pueden convertirse en aberraciones cromosómicas, células cancerosas, iniciar una apoptosis o una necrosis (Sainz, 2002). El ADN dañado en general obstaculiza la replicación y síntesis de proteínas.

2.4.2.2 Aberraciones cromosómicas

Las aberraciones cromosómicas son modificaciones en el genoma que surgen como consecuencia de lesiones incorrectamente reparadas o incluso sin reparar, entre ellas se encuentran:

1. Ruptura de un brazo de un cromosoma: Puede dar lugar a la formación de fragmentos dicéntricos «con dos centrómeros» o fragmentos acéntricos «sin centrómero».
2. Ruptura simple de un brazo en dos cromosomas: Además de poder formar fragmentos dicéntricos o acéntricos, también puede dar lugar a la aparición de traslocaciones, es decir, uniones de fragmentos correspondientes a distintos cromosomas.
3. Ruptura doble de un brazo en un cromosoma: Puede producir que un fragmento de un cromosoma se pierda. También puede provocar un cambio de posiciones de regiones del cromosoma o inversión.
4. “Ruptura doble de dos brazos de un cromosoma: Puede ocasionar inversiones, fragmentos acéntricos y anillos, que son estructuras en las que los dos brazos del cromosoma se fusionan dando una conformación cerrada.” (p. 26). En el caso de radiaciones ionizantes, la ionización producida afecta principalmente a proteínas (Sainz, 2002).

2.4.2.3 Especificación del daño directo estudiado en la presente investigación

La molécula de ADN resulta ionizada o excitada en este proceso, para nuestro caso la energía de un fotón de luz ultravioleta no es suficiente para ionizar las macromoléculas, por lo que en adelante al hablar de daño directo nos referimos únicamente a la excitación electrónica. También, nos referiremos únicamente a la excitación electrónica para dímeros y monómeros de bases del ADN, puesto que nuestro estudio aborda los efectos sobre el ADN solamente (Rueda, 2017).

“Cada molécula, de acuerdo con los orbitales moleculares de que disponga, presenta una probabilidad diferente a cada valor de la energía para pasar a un estado excitado por absorción de un cuanto de energía de dicha frecuencia” (Garcés, 2015, p. 12).

Las moléculas excitadas por absorción de energía en forma de radiación electromagnética son susceptibles de sufrir transformaciones no permitidas desde el estado fundamental y que en general se denominan reacciones fotoquímicas. En ellas se emplea la energía de excitación electrónica resultando en un compuesto distinto del estado fundamental (Garcés, 2015). Las radiaciones UV son absorbidas preferentemente por ácidos nucleicos; los carbohidratos aunque representan el 41 % del peso de los ácidos nucleicos, son transparentes a las radiaciones UV por encima de 230nm.

El ADN es una diana biológica para la radiación UV en el sentido en que los ácidos nucleicos en general presentan mayores coeficientes de absorción en la zona UV que otros componentes biológicos. En segundo puesto están las proteínas, sin embargo, estas presentan coeficientes de absorción del orden de 10 veces menos. Los ácidos nucleicos poseen los máximos coeficientes de absorción en el mundo vivo (Garcés, 2015).

El daño directo se produce principalmente por absorción de la radiación UVB con $\lambda \in (280, 315)$ nm, generando estructuras conocidas como dímeros de bases y que mayormente corresponden a dímeros de timina.

Aunque también se puede producir al absorber radiación de menor energía (UVA), como es el caso de los aminoácidos aromáticos que presentan en sus espectros de excitación electrónica grandes

probabilidades de absorción en zonas UV energéticamente bajas, resultado de sus características electrónicas (Garcés, 2015).

En el caso de la radiación UVB, su absorción produce lesiones de pérdida o cambio de bases, generando dímeros de bases. Dos bases adyacentes en nuestra secuencia genética «normalmente dos nucleótidos de Timina» establecen una unión covalente e irrompible entre ellas. Si la cadena de ADN correspondiente se repara incorrectamente «o no lo hace» puede dar lugar a aberraciones cromosómicas y si la célula correspondiente, dañada o cancerosa, escapa de la acción del sistema inmunitario se puede generar un tumor.

“El efecto primario más relevante de la irradiación de ADN con luz UVB ha sido la producción de dímeros de pirimidina de tipo ciclobutano entre pirimidinas contiguas de la misma cadena” (Garcés, 2015, p. 219).

Sección eficaz: Las secciones eficaces de monómeros y dímeros para este proceso «área en la que absorben el fotón UV» son del orden de $9 \cdot 10^{-23} m^2$ (Garcés, 2015).

La radiación ultravioleta entre 240 y 300 nm «UVB y parte UVC», no produce roturas simples intracadena en el ADN, detectables por análisis de sedimentación en ultracentrifugado analítico; en todo caso el número de roturas simples es siempre inferior a 0.1 a 0.9 por cada 10^5 nucleótidos y por cada $10^6 ergios/mm^2$.

“La presencia de los dímeros de pirimidina en el DNA produce una desestabilización de la estructura doble helicoidal frente a la temperatura” (p. 220). “La presencia de un dímero cada 100 nucleótidos supondría la pérdida de 4 a 6 enlaces de hidrógeno” (Garcés, 2015, p. 179).

El ADN generalmente se repara utilizando otra cadena como molde pero a veces es incapaz de realizar la reparación. A partir de una concentración de 0.2 % de dímeros de pirimidina respecto de timina se produce la pérdida de más del 90 % de la capacidad transformante. Niveles por encima del 0.5 % a 1 % de dímeros carecen ya de sentido biológico.

Un aspecto relevante puesto de manifiesto en el estudio de la acción de la radiación UV sobre enzimas endonucleasas “es que la probabilidad de rotura doble del DNA aumenta, para una misma cantidad de roturas simples, con la cantidad de dímeros” (Garcés, 2015, p. 222).

En general, los cromóforos protegen también contra la absorción de radiación UVB, el conocimiento al que se ha llegado acerca de los estados excitados de los grupos cromóforos de los ácidos nucleicos y de los mecanismos de transferencia de la energía de excitación electrónica orientan a una serie de simplificaciones en la fotoquímica de los ácidos nucleicos:

- Las transiciones electrónicas en los grupos cromóforos de los ácidos nucleicos «ADN y ARN» en la zona UV corresponden a transiciones $\pi \rightarrow \pi^*$ y $n \rightarrow \pi^*$ de las bases de purinas y pirimidinas «compuestos aromáticos».
- La absorción de un fotón de frecuencia próxima a la del grupo cromóforo se da en $10^{-15} - 10^{-12} s$ «esto puede resultar en otra línea de investigación en conjunción con los postulados del capítulo 4».
- La emisión de fosforescencia solo se produce desde la timina, solo se puede observar fosforescencia desde las purinas si se les hidroliza previamente el ADN (Garcés, 2015).

La desexcitación puede ocurrir fundamentalmente por los siguientes procesos:

- Reemisión de un fotón de menor energía que la inicialmente absorbida «no hay una reflexión previa del fotón».
- Transferencia de la energía de excitación electrónica a otra molécula del entorno que actúa de extintor, puede ser a otra molécula de ADN también, provocando la propagación de daño.
- Formación de una nueva entidad química o fotoproducto con otra molécula no excitada del entorno, como en el caso del efecto indirecto.

La migración de excitación electrónica llega hasta de 5 a 10 bases consecutivas, esto es, una molécula de ADN puede llegar a transferir su energía a otras 10 moléculas del medio al desexcitarse (Garcés, 2015).

Tras dosis altas de radiación UV a 280nm se inicia aproximadamente el 50 % de la inactivación de la capacidad transformante del ADN.

“In vitro” la capacidad del ADN desnaturalizado para actuar como molde para la síntesis de nuevas cadenas desciende drásticamente cuando se le irradia con luz UV a 280nm.

La síntesis de los ácidos nucleicos se interrumpe a nivel del dímero constituyendo así una lesión letal, estos dímeros no se transcriben si la célula se encuentra metabolizando pero si lo hacen si se está dividiendo.

La composición en base del mRNA «ARN mensajero» se modifica incrementando la relación purinas/pirimidinas (Garcés, 2015).

Para el desarrollo del trabajo, es necesario conocer y comprender la energía de un fotón, se encontrará que así también se puede hallar su longitud de onda y con estos datos se podrá hacer tanto un análisis de riesgo de daño al ADN como proponer un modelo por el cual se calcule la energía que absorbe el material genético cuando este resulta excitado en un efecto directo.

Como el proceso de absorción de energía para las radiaciones UV implica la absorción completa de los fotones, sin reflejar nada del espectro, se va a tratar el material biológico como un cuerpo negro, el cual absorbe por definición toda la radiación incidente.

2.5. Física moderna

Antes de hablar del comportamiento de un material como si fuera un cuerpo negro, el cual absorbe fotones incidentes, debemos definir al fotón y su energía.

2.5.1. Teoría cuántica de la luz

En 1900 Max Planck propuso que la energía de la radiación electromagnética no está distribuida de forma continua en un frente de onda, sino que se concentra discretamente en cuantos de energía los cuales pasarían a llamarse fotones (Krane, 2012).

La energía de un fotón perteneciente a una onda electromagnética de frecuencia ν es

$$E = h\nu \tag{2.1}$$

En donde h es la constante de Planck, sustituyendo la frecuencia ν por c/λ se tiene

$$E = \frac{hc}{\lambda} \tag{2.2}$$

Con esta relación se obtendrá la longitud de onda de los fotones a partir de su energía. Debido a la relación

$$E(eV) = \frac{hc[eV \cdot \mu m]}{\lambda[\mu m]} \tag{2.3}$$

Sabemos que las radiaciones UV más dañinas son aquellas con menor longitud de onda, debido a que la energía es inversamente proporcional (Krane, 2012).

Se sabe de hecho que longitudes de onda cercanas a los 250nm incrementan la absorción de la radiación UV por parte del ADN y otras moléculas intranucleares «localizadas en el interior del núcleo de la célula», la radiación de 250nm es usada como germicida (Garcés, 2015).

2.5.2. Radiación térmica

2.5.2.1 Ley de Stefan-Boltzmann y ley de Wien

Cuando la radiación llega a un cuerpo, normalmente parte de esta es transmitida y parte es reflejada. Si un cuerpo se calienta este emite radiación electromagnética como resultado de la agitación térmica de los electrones en su superficie, la temperatura a la cual se caliente determinará la intensidad de esta radiación, la luz que emite varía en todo el espectro electromagnético (Zettili, 2009).

A través de cuidadosas mediciones, se encontró que la intensidad total incrementa proporcionalmente con la cuarta potencia de la temperatura. Si un cuerpo se encuentra a una temperatura T fija, la intensidad de radiación que emita estará determinada por la ley de Stefan-Boltzmann

$$I = \sigma T^4 \tag{2.4}$$

En donde sigma es la constante de Stefan-Boltzmann, con un valor de

$$\sigma = 5,67037 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4 \tag{2.5}$$

En 1893 Wilhelm Wien halló una relación que indica la longitud de onda en la cual se produce el máximo de intensidad

$$\lambda_{maxT} = 2,8978 \cdot 10^{-3} m \cdot K \tag{2.6}$$

conocida como la ley de Wien (Krane, 2012).

Un cuerpo en equilibrio térmico con sus alrededores absorbe tanta energía como la que emite, en general la capacidad de emitir o absorber energía no depende de la forma del cuerpo sino más bien de su temperatura (Zettili, 2009).

2.5.2.2 Radiación del cuerpo negro

Un cuerpo negro absorbe toda la radiación que incide en él, sin reflejar ningún porcentaje de esta. El cuerpo negro también es una fuente de radiación casi perfecta cuando es calentada, hay una relación directa entre la energía y la temperatura del cuerpo negro, la frecuencia de la radiación de máxima intensidad emitida es proporcional a la temperatura absoluta del cuerpo negro (Chaichian, et al., 2012).

Si graficamos la densidad de energía emitida por un cuerpo negro, en función de la temperatura, encontraremos que la energía máxima incrementa con la temperatura; similarmente este máximo se da al incrementar la frecuencia. En otras palabras, la frecuencia es proporcional a la temperatura absoluta $\nu_{max}/T = const$, de acuerdo a la ley de Wien (Chaichian, et al., 2012).

Desde el punto de vista astronómico, el Sol es una estrella catalogada como enana amarilla, con una edad aproximada de 4500 millones de años, su diámetro se estima que mide 1.39 millones de km y se puede considerar compuesto por diferentes capas concéntricas con temperaturas decrecientes hacia el exterior (Mompin, 1986).

La más externa de las capas opacas se denomina fotosfera, compuesta por gases fuertemente ionizados a una temperatura de 5778 K (University of Calgary, 2021). La energía que continuamente irradia el Sol está compuesta por ondas electromagnéticas desde el infrarrojo hasta el ultravioleta.

La radiación solar total incidente tiene una componente directa, que es la que llega en línea recta del Sol, y una componente difusa, la cual procede del hemisferio zenital y es difundida por toda la atmósfera (Mompin, 1986).

La mejor manera de describir el espectro de emisión del Sol es como un cuerpo negro a 5778 K (Durand, 2020).

Un cuerpo negro se puede considerar conformado por un número de osciladores electromagnéticos (Zettili, 2009). Planck postuló que la energía de radiación de frecuencia ν emitida por las cargas oscilantes de un cuerpo negro, debería estar restringida a múltiplos de $h\nu$.

$$E = nhv \quad (2.7)$$

Al asumir que la energía de un oscilador está cuantizada, Planck mostró la relación termodinámica correcta para el promedio de la energía de los osciladores. Haciendo una suma discreta sobre la energía de todos los estados posibles y dividiendo entre el número de estados se tiene

$$\langle E \rangle = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} nhve^{-nhv/KT}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-nhv/KT}} = \frac{hv}{e^{hv/KT} - 1} \quad (2.8)$$

Donde K es la constante de Boltzmann cuyo valor es $K = 1,3805 \cdot 10^{-23} J/K$. Al multiplicar la energía promedio del oscilador por el número de modos de la radiación en un intervalo de frecuencia de v a dv

$$N(v) = \frac{8\pi v^2}{c^3} \quad (2.9)$$

se obtiene

$$u(v, T) = \frac{8\pi v^2}{c^3} \frac{hv}{e^{hv/KT} - 1} \quad (2.10)$$

Esta es la distribución de la densidad de energía que un cuerpo negro absorbe o emite, con ello se postulará la cantidad de energía que absorbe el material genético para cierta longitud de onda de un fotón absorbido (Zettili, 2009).

2.6. Óptica

2.6.1. Flujo radiante

Mide la potencia «energía por unidad de tiempo» de una o más fuentes de radiación electromagnética. Es la energía que una o más ondas electromagnéticas transportan por unidad de tiempo y se expresa, por lo general, en Watts: $1W = 1J/s$ (Hecht, 2017).

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (2.11)$$

2.6.2. Irradiancia

Es la potencia electromagnética que incide en una superficie, o bien, la cantidad promedio de energía electromagnética que llega por unidad de área y por unidad de tiempo. Se expresa en unidades de potencia sobre unidades de superficie (Hecht, 2017).

$$I = \frac{\Phi}{A} \quad (2.12)$$

2.7. Definición de términos básicos

ADN: El ácido desoxirribonucleico, es aquel que contiene la información genética de los organismos, y es uno de los dos tipos de ácidos nucleicos de los seres vivos.

Apoptosis: Muerte celular programada por el organismo, se realiza por una serie de pasos.

ARN: El ácido ribonucleico, es uno de los dos tipos de ácidos nucleicos de los seres vivos, su principal función es almacenar la información copiada del ADN.

Base nitrogenada: Estructura química que contiene nitrógeno. Las bases nitrogenadas de los nucleótidos se componen principalmente de carbono en estructuras anulares que contienen nitrógeno.

Catalizador: Sustancia que retarda o agiliza la velocidad de una reacción química.

Centrómero: Lugar donde los cromosomas se mantienen unidos en la división celular.

Cresta mitocondrial: Pliegue de la membrana interna de la mitocondria.

Daño oxidativo: Se produce por la presencia de compuestos que no son útiles para la vida «radicales libres, agua oxigenada, etc».

Dímero: Estructura química formada por dos monómeros de la misma especie.

Disociación: En química es un proceso general en el cual moléculas complejas se separan en moléculas simples, iones o radicales libres, usualmente de manera reversible.

Enlace covalente: Es un enlace químico entre dos átomos no metálicos, por el cual comparten uno o más electrones de su orbital externo.

Enlace de hidrógeno: Fuerza de atracción entre un átomo de hidrógeno «unido covalentemente a un átomo o grupo donante más electronegativo» y otro átomo electronegativo que lleva un par solitario de electrones.

Enzima: Molécula orgánica que actúa como catalizador de reacciones químicas de los organismos. Las enzimas endonucleasas son las principales responsables de cortar las cadenas de ácidos nucleicos.

Excitación electrónica: Fenómeno por el cual un electrón se eleva a un nivel energético superior, sin que este salga del átomo al que pertenece.

Fosforilación oxidativa: Proceso metabólico por el cual se produce adenosina trifosfato al utilizar la energía liberada por oxidación de nutrientes.

Grupo hidroxilo: Es un conjunto de moléculas que contienen un átomo de oxígeno con dos pares de electrones no compartidos, enlazado a un átomo de hidrógeno por un enlace covalente sencillo.

Homeostasis: Capacidad de los organismos de mantener una condición interna estable.

Ionización: Fenómeno por el cual un electrón, o más de uno, es eyectado fuera del átomo o molécula al que pertenece. De aquí se deriva el término ion positivo, el cual es una sustancia con un electrón faltante, e ion negativo, el cual es una sustancia con un electrón extra (Panda, 2013).

Lípido: Denominado comúnmente como grasa, su principal función es la de almacenar energía de reserva para el organismo.

Longitud de onda: Distancia que recorre una perturbación con periodo completo al propagarse por un medio, para un ciclo «para una sola repetición de la perturbación».

Membrana celular: Estructura que envuelve a la célula y separa su contenido del entorno.

Mitocondria: Parte de la celular eucariota encargada de suministrar energía fundamental para la actividad celular a través de la respiración celular.

Monómero: Molécula orgánica formada fundamentalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno. Los monómeros del ADN se conocen como nucleótidos.

Necrosis celular: Conjunto de eventos que llevan a la ruptura de la membrana citoplasmática y la consecuente salida de material intracelular lo que desencadena una reacción inflamatoria «explosión celular».

Nucleótido: Molécula formada por una base nitrogenada, un azúcar de cinco carbonos y un grupo fosfato. La molécula de azúcar tiene una posición central en el nucleótido.

Organismo: Ser vivo. Conjunto de componentes biológicos que constituyen un ser vivo.

Oxidación: Proceso por el cual una especie química entra en contacto con oxígeno o compuestos del oxígeno. Proceso por el cual un átomo o molécula pierde electrones.

Pirimidina: Base nitrogenada que tiene solo un anillo de carbono y nitrógeno.

Proteína: Macromolécula formada por una cadena lineal de aminoácidos, esenciales para la vida.

Purina: Base nitrogenada que contiene dos anillos fusionados de carbono y nitrógeno.

Radiación: Forma de energía que se propaga en el vacío sin necesidad de un medio material que la soporte.

Radical libre: Molécula orgánica o inorgánica que es altamente reactiva y extremadamente inestable. Tiene un único electrón no apareado en su orbital externo, es decir, tiene un número impar de electrones en sus orbitales periféricos. Su tiempo de vida es de unos pocos milisegundos (Panda, 2013).

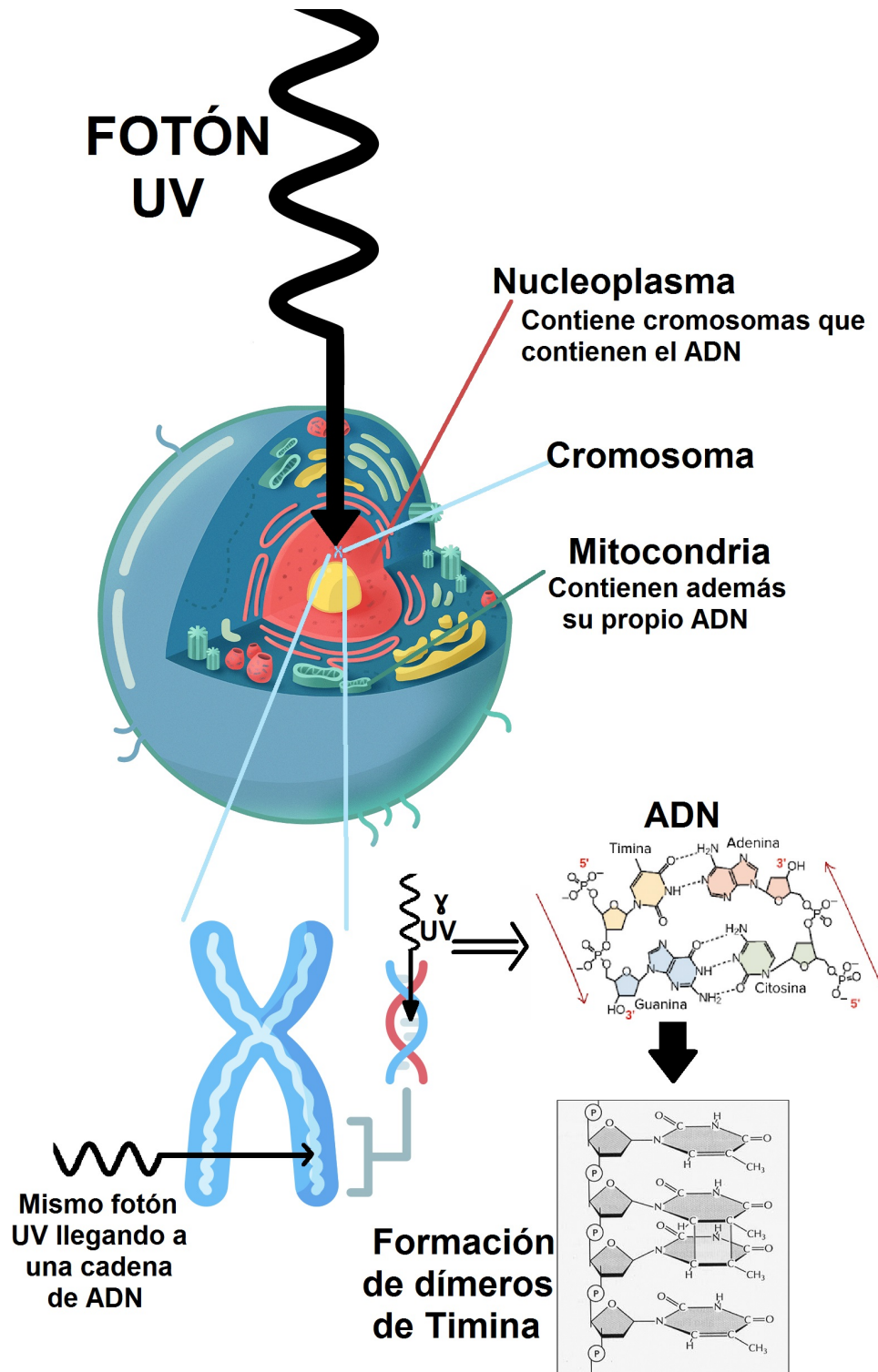


Figura 2.6: Formación de dímeros de Timina por absorción de fotón UV (imagen modificada de autoría propia con base en: Aprender Fácil, 2023; Khan Academy, 2023; Freepik, 2023; Simonet, 2021; Online Web Fonts, 2022)

Capítulo 3

Metodología

3.1. Enfoque de la investigación

- Investigación cuantitativa:

El enfoque cuantitativo mejor conocido como positivismo lógico proporciona datos duros cotejables estadísticos, medibles; es de índole objetivo por lo que su estudio se hace de lo general a lo particular, prueba hipótesis y su investigación es de carácter lineal (Téllez, 2021).

3.2. Alcance de la investigación

- Correlacional:

En el alcance correlacional se tiene una o varias variables de índole independiente así como variables de índole dependiente por lo que el investigador en algunas ocasiones manipula la variable X para ver y observar si la variable Y sufre algún cambio y llenar un vacío de conocimiento (Téllez, 2021).

3.2.1. Tipo de variable

- Continua: La variable se fracciona.

3.2.2. Tipo de investigación

El tipo de investigación será transaccional o transversal es decir la recolección y análisis de datos se realizará en un momento único de tiempo.

3.3. Diseño de la investigación

El diseño de la variable independiente como:

- X=Irradiancia diaria promedio mensual
- Y la variable dependiente se expresa como:
- Y=Longitud de onda de un fotón proveniente de la radiación solar

Muestra como:

- M= Datos de irradiancia diaria promedio mensual 2014 del Instituto de Geofísica de la UNAM

El esquema

- M=Muestra
- O= Observación relevantes que se recogen de la muestra. Medición de la variable
- R= Es relación

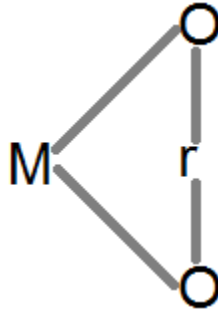


Figura 3.1: Esquema de la investigación (autoría propia).

3.3.1. Diseño de investigación cuantitativa

Datos de irradiancia diaria promedio mensual \rightarrow Energía de un fotón proveniente de la radiación solar \rightarrow Longitud de onda del fotón y determinación de riesgo para el ADN \rightarrow Energía transmitida al ADN «cuerpo negro».

3.4. Población de estudio

La población de estudio es la extensión territorial de los Estados Unidos Mexicanos, puesto que se analiza la irradiancia promedio mensual diaria en suelo mexicano, la cual se midió en 2014 por el Instituto de Geofísica de la UNAM.

3.5. Muestra

Muestra: Es un subconjunto representativo de la población completa. Una muestra que no sea representativa de toda la población independientemente de su tamaño, es inadecuada para los propósitos de análisis (Hernández, et al., 2014).

3.5.1. Muestra probabilística

Se obtiene según principios matemáticos, que establecen que se conoce la posibilidad de selección de cada unidad, es decir todos los elementos pueden ser sujetos de estudio.

3.6. Unidad de análisis

Se estudia la irradiancia diaria promedio «energía en forma de radiación que llega a una determinada área», para cada mes del año 2014 en particular.

3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Los datos proporcionados por el instituto de geofísica de la UNAM están disponibles en línea para el público en general y se encuentran en su página online.

3.7.1. Investigación cuantitativa

Se eligió la muestra probabilística porque proporciona datos arbitrarios representativos de la población, los cuales son fundamentales al describir un problema general.

3.8. Procedimientos de la investigación

- Los datos de irradiancia diaria promedio mensual son datos abiertos proporcionados por el Instituto de Geofísica de la UNAM, disponibles para el público en general.
- La técnica de procesamiento de datos de irradiancia solar se desarrolla y aplica por autoría propia en el año 2023 en Puebla, México.
- Se procesan los datos mediante un procedimiento original de determinación de energía para fotones, se analiza su impacto mediante estándares que indican que tipo de radiación daña activamente el ADN y se prueba la hipótesis mediante los resultados obtenidos en el cálculo desarrollado.

3.9. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

- Fórmulas de la física moderna.
- Fórmula para obtención de energía más probable de un fotón procedente del espectro de emisión del Sol a partir de la Irradiancia diaria promedio mensual, desarrollada por autoría propia dentro del marco de la Física Moderna.
- Gráficos.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Descripción del trabajo de campo

La muestra de estudio es la irradiancia diaria promedio mensual, la cual se puede obtener a partir del acceso al portal de datos abiertos del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Las principales herramientas empleadas en el procesamiento de datos fueron los software de uso libre Jupyter-Python y Mathematica. La aplicación de los instrumentos duró un estimado de dos a tres días.

A partir de los resultados descritos a continuación se puede visualizar que el modelo teórico presente es lineal, por lo que a partir de datos crudos de irradiancia diaria promedio mensual se puede estimar con trivialidad la energía más probable de un fotón.

4.2. Lista de verificación

Tabla 4.1: *Procedimiento.*

Indicadores	Ítems	
	Procedimiento	No lo contiene
Energía	X	
Longitud de onda	X	
Espectro electromagnético	X	
ADN	X	
Radiación de cuerpo negro	X	

4.3. Número de fotones

La energía de un fotón se puede obtener de su longitud de onda, por la ecuación

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (4.1)$$

Introduciendo los valores de la velocidad de la luz $c = 299792458 \text{ m/s}$ y la constante de Planck en unidades convenientes $h = 4,135667696 \times 10^{-15} \text{ eV s}$, se obtiene

4.4 Obtención de la energía más probable de un fotón a partir de la irradiancia diaria promedio mensual

$$E(eV) = \frac{1239,841984}{\lambda(nm)} \quad (4.2)$$

La mejor manera de describir el espectro de emisión del Sol es como un cuerpo negro a 5778 K, según la ecuación (2.6) o Ley de Wien, el espectro de emisión del Sol tiene su máximo de intensidad a una longitud de onda de

$$\lambda_{max} = \frac{2,8978 \times 10^6 nm \cdot K}{5778K} = 501,52301nm \approx 500nm \quad (4.3)$$

Lo cual corresponde a un fotón con espectro en la zona visible, en particular, al color verde. Según la ecuación (4.1), dicho fotón tiene una energía de

$$\varepsilon = \frac{1239,841984eVnm}{500nm} = 2,4796eV = 3,972891 \times 10^{-19} J \quad (4.4)$$

El valor obtenido corresponde a la energía más probable de un fotón proveniente del Sol, el promedio de radiación solar instantánea ideal recibida en la superficie terrestre lo aproximamos al valor de la constante solar: $1367,7W/m^2$.

Si se considera que esta energía promedio es producida instantáneamente por N fotones con energía igual a la energía más probable de un fotón procedente del espectro solar «2,47eV», entonces se puede estimar el número de fotones que llegan a la superficie terrestre instantáneamente «en un segundo» por metro cuadrado.

$$E_{total} = N\varepsilon_{probable} \Rightarrow$$

$$N = \frac{E_{total}}{\varepsilon_{prob}} = \frac{1367,7W/m^2}{3,972891 \times 10^{-19} J} = \frac{1367,7 \times 10^{19} J}{3,972891 J \cdot m^2 s} = 3,4425 \times 10^{21} \frac{fotones}{m^2 s} \quad (4.5)$$

Entonces, en promedio, de la radiación solar neta que llega a la superficie terrestre, hay

$$3,442580646 \times 10^{21} fotones \quad (4.6)$$

por metro cuadrado en un segundo.

4.4. Obtención de la energía más probable de un fotón a partir de la irradiancia diaria promedio mensual

Los datos disponibles para evaluar la radiación solar recibida corresponden a la irradiancia diaria promedio mensual, la irradiancia diaria es la integración de la irradiancia instantánea durante un día, sus unidades son

$$kWh/m^2$$

En nuestro caso los valores para la irradiancia diaria promedio van desde 0 hasta $12.39 kWh/m^2$, dependiendo el mes y la región.

La irradiancia instantánea es la energía que llega instantáneamente por unidad de área, para el caso del espectro de emisión del Sol esta energía es producida en principio por millones de fotones cada uno con una longitud de onda que puede ir desde 100nm hasta 1mm y energías correspondientes dadas por la ecuación (4.1):

$$I_{instantanea} = \frac{N_1\varepsilon_1 + N_2\varepsilon_2 + \dots + N_n\varepsilon_n}{m^2} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i\varepsilon_i}{m^2}$$

4.4 Obtención de la energía más probable de un fotón a partir de la irradiancia diaria promedio mensual

Sería imposible estimar el número de fotones que llegan a la superficie para cada valor de energía, por ello, para obtener una primera aproximación a la energía de un fotón procedente del espectro de emisión del Sol, vamos a considerar que la irradiancia instantánea se deba a un solo tipo de fotón, que será aquel con energía más probable, el conjunto de estos fotones actúan así de manera instantánea acumulativa a lo largo del día y su efecto final es la irradiancia diaria promedio «integración de irradiancia instantánea durante un día».

Ahora bien, el 60 % de la radiación se recibe en un horario, y el 40 % en otro, entonces los fotones van a clasificarse dentro de un valor de energía para un horario y otro para el otro horario, pues el valor de la irradiancia Y acumulada es distinto para cada uno.

Un valor Y de irradiancia diaria promedio mensual es entonces el resultado de la acción de N fotones cada uno con energía ε llegando continuamente a lo largo del día «de forma instantánea» durante el tiempo X en el que se recibe tal radiación.

La integración de la irradiancia instantánea pasa a ser así la integración de un valor constante en lugar de la integración de una suma de valores «suma de número de fotones de una cierta energía multiplicados por dicha energía».

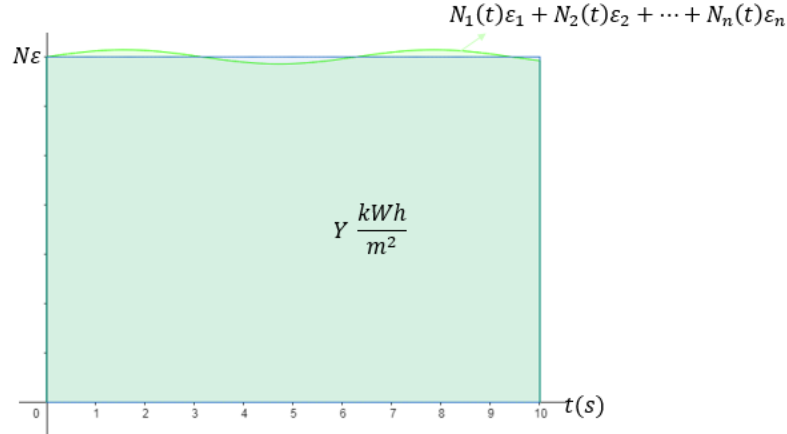


Figura 4.1: Irradiancia diaria promedio (autoría propia).

Para un tiempo X de horas esto tiene la forma

$$Y \frac{kWh}{m^2} = N \frac{fotones}{m^2 s} \cdot \varepsilon_\gamma (eV) \frac{kWh}{2,247 \times 10^{25} eV} \cdot X (hrs) \frac{3600s}{hr} \quad (4.7)$$

Entonces en el tiempo X en el que se reciba la irradiancia Y la energía ε más probable de cada fotón será de

$$\begin{aligned} \varepsilon_\gamma &= \frac{Y}{X} \frac{kWh}{(hr) m^2} \cdot \frac{hr}{3600s} \cdot \frac{2,247 \times 10^{25} eV}{kWh} \cdot \frac{m^2 s}{3,4425 \times 10^{21} fotones} \\ &= \frac{Y}{X} \cdot \frac{2,247 \times 10^{25}}{3600 \cdot 3,4425 \times 10^{21}} \cdot \frac{eV}{\gamma} = \frac{KY}{X} \frac{eV}{\gamma} \end{aligned}$$

teniendo K el valor constante de

$$K = 1,813077836 \quad (4.8)$$

De esta forma, la energía más probable de un fotón procedente del espectro de emisión solar que llega en X horas con irradiancia Y promedio, está determinada por la fórmula

$$\varepsilon_{\gamma}(eV) = \frac{KY}{X} \quad (4.9)$$

Ahora, con el conocimiento de que el 60 % de la radiación solar es recibida entre las 10 y las 14 horas, y suponiendo que en el resto del día se recibe el 40 % de forma equitativa; se puede determinar la energía más probable de un fotón que llega a la superficie del territorio mexicano dependiendo la región, la hora del día y el mes en particular.

4.5. Resultados

A partir del cálculo anterior y utilizando la información disponible «gráficas de irradiancia diaria promedio mensual», se puede estimar el riesgo de exponerse al Sol en un mes es particular, dependiendo la hora y ubicación.

Por ejemplo el estado de Yucatán en Enero tiene una irradiancia diaria promedio entre 4.86 y 5.80 kWh/m^2 . Así, entre las 10 a.m. y las 2 p.m., un fotón procedente del espectro de radiación solar tendría una energía que va desde

$$\varepsilon_{\gamma,min} = 0,6 \cdot \frac{4,86K}{4} eV = 1,321eV$$

hasta

$$\varepsilon_{\gamma,max} = 0,6 \cdot \frac{5,80K}{4} eV = 1,577eV$$

Por lo que, el rango de longitud de onda estaría entre

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{\varepsilon_{\gamma,max}} = \frac{1239,841984}{1,577} nm = 786,01nm$$

y

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{\varepsilon_{\gamma,min}} = \frac{1239,841984}{1,321} nm = 938,04nm$$

Esto indica que los fotones que inciden en la superficie terrestre en el horario donde el Sol está en su punto máximo se clasifican dentro del espectro infrarrojo, por lo que no son dañinos para el ser humano. Con esto se deduce automáticamente que durante el resto del día es también segura la exposición al Sol.

Por otro lado el estado de Tlaxcala en Julio tiene, en su mayoría de extensión, una irradiancia diaria promedio entre 11.46 y 12.39 kWh/m^2 . Así, entre las 10 a.m. y las 2 p.m., un fotón procedente del espectro de radiación solar tendría una energía que va desde

$$\varepsilon_{\gamma,min} = 0,6 \cdot \frac{11,46K}{4} eV = 3,116eV$$

hasta

$$\varepsilon_{\gamma,max} = 0,6 \cdot \frac{12,39K}{4} eV = 3,369eV$$

Por lo que, el rango de longitud de onda estaría entre

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{\varepsilon_{\gamma,max}} = \frac{1239,841984}{3,369} nm = 367,9nm$$

y

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{\varepsilon_{\gamma,min}} = \frac{1239,841984}{3,116} nm = 397,8nm$$

Esto indica que los fotones que inciden en la superficie terrestre en el horario donde el Sol está en su punto máximo se clasifican dentro del espectro ultravioleta A, por lo que son dañinos para el ser humano.

En Julio un día promedio tiene 13 horas con 14 minutos en la Ciudad de México, o bien 13.23hrs. Por lo que en el resto del día «9.23hrs», un fotón tendría una energía que va desde

$$\varepsilon_{\gamma,min} = 0,4 \cdot \frac{11,46K}{9,23} eV = 0,900eV$$

hasta

$$\varepsilon_{\gamma,max} = 0,4 \cdot \frac{12,39K}{9,23} eV = 0,973eV$$

Por lo que, el rango de longitud de onda estaría entre

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{\varepsilon_{\gamma,max}} = \frac{1239,841984}{0,973} nm = 1274,02nm$$

y

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{\varepsilon_{\gamma,min}} = \frac{1239,841984}{0,9} nm = 1377,41nm$$

Que corresponde a la longitud de onda del espectro infrarrojo, por lo que aún en la región mas expuesta a la radiación, en el mes de mayor irradiancia; es seguro exponerse al Sol 30 minutos «tiempo estandarizado» después de las 3 de la tarde.

Para obtención de los siguientes resultados, se recurre a la tabla 2.1, se generaliza que el día estándar de cualquier mes tiene una duración igual al promedio de los valores en la columna *Duración del día*. El promedio de la duración de un día en la Ciudad de México según estos valores es de 12 horas con 11 minutos y 5 segundos, o bien 12.18472222 horas.

También se trabaja bajo la suposición de que la duración del día es similar para las demás regiones del territorio mexicano, puesto que solo se dispone de los datos de duración del día por mes para la Ciudad de México.

El 60 % de la radiación se recibe entre las 10 y las 14 hrs: $X = 4$. Por lo que al suponer que el otro 40 % se recibe en el resto del día, se implica que $X = 12,1847222 - 4 = 8,1847222$. Para relacionar más sencillamente la irradiancia Y diaria promedio con la energía más probable de un fotón, el procedimiento desarrollado se simplifica a

$$\varepsilon_{\gamma}(eV) = \begin{cases} 0,6KY/4 & 10a.m. - 2p.m. \\ 0,4KY/8,1847222 & \text{resto del día} \end{cases} \quad (4.10)$$

También, para estimar el riesgo de exposición a la radiación solar con mayor facilidad, se han creado los siguientes gráficos, los cuales relacionan directamente la irradiancia diaria promedio con la energía más probable de un fotón y su longitud de onda

La figura 4.2 es la representación gráfica de la ecuación (4.9) con $X = 4$ hrs mientras que la figura 4.3 es la representación gráfica de la ecuación (4.9) con $X = 8,18$ hrs.

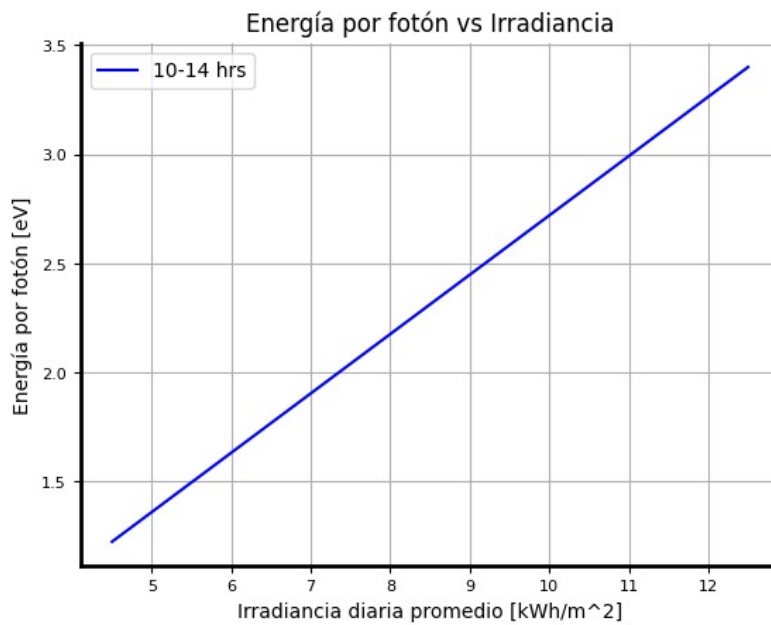


Figura 4.2: Energía por fotón, recibido entre las 10 y 14hrs, vs Irradiancia (autoría propia).

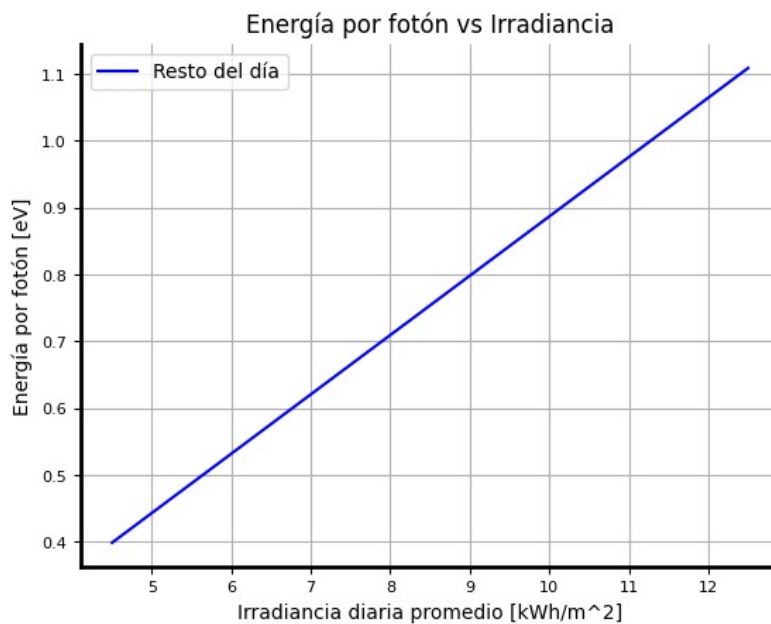


Figura 4.3: Energía por fotón, recibido en el resto del día, vs Irradiancia (autoría propia).

Mientras que las figuras 4.2 y 4.3 muestran de manera individual la energía por fotón en función de la irradiancia diaria promedio, para el horario de 10 a.m. a 2 p.m. y durante el resto del día, respectivamente; la figura 4.4 incluye los resultados conjuntos permitiendo visualizar la diferencia

de energía. Por su parte, las figuras 4.5 y 4.6 resultan de aplicar la ecuación (4.1) a los resultados mostrados en las figuras 4.2 y 4.3, respectivamente.

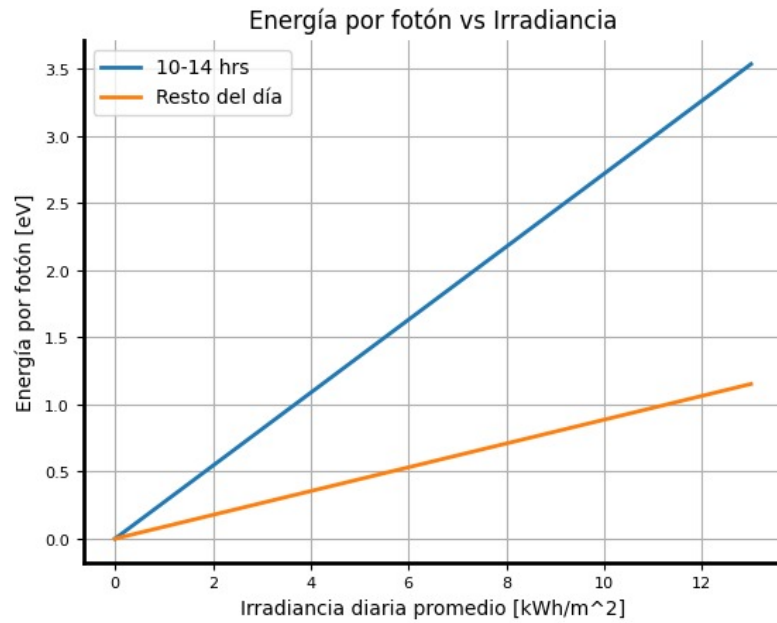


Figura 4.4: Energía por fotón vs Irradiancia (autoría propia).

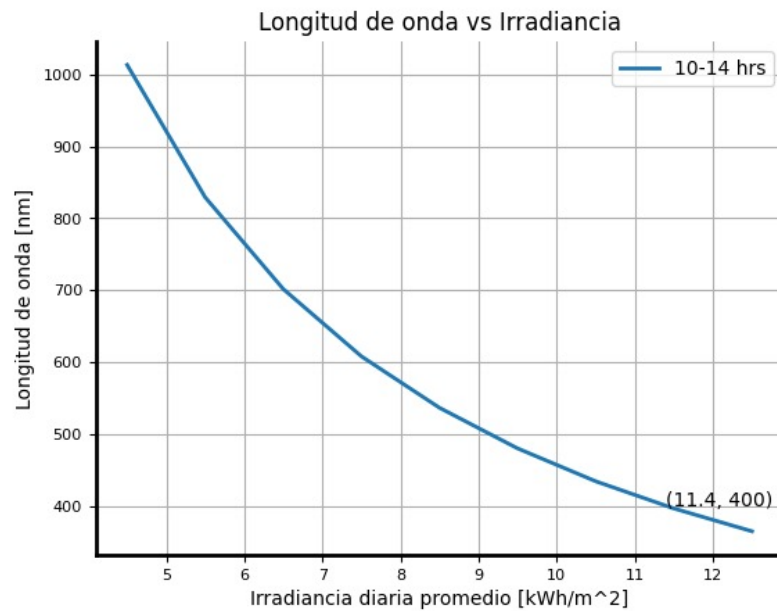


Figura 4.5: Longitud de onda, γ entre las 10 y 14hrs, vs Irradiancia (autoría propia).

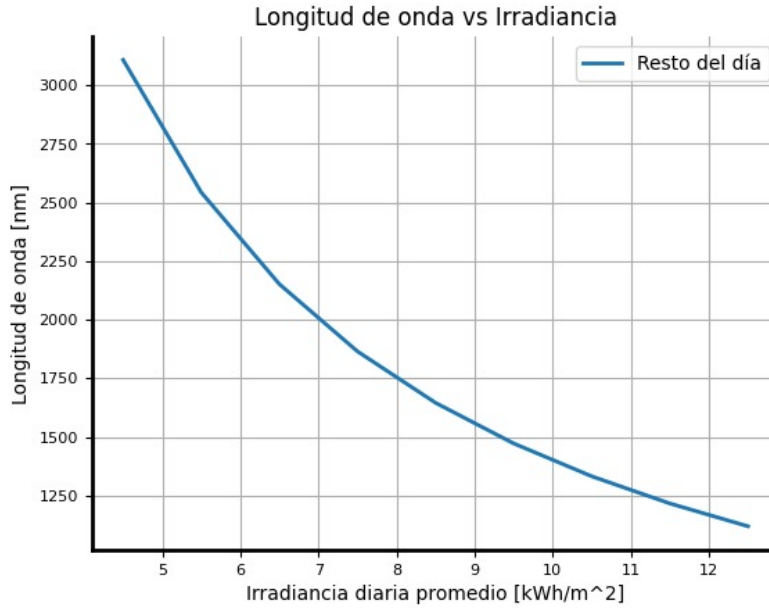


Figura 4.6: Longitud de onda, γ en el resto del día, vs Irradiancia (autoría propia).

4.6. Pregunta de investigación

La pregunta de investigación:

¿Qué cantidad de energía se transmite al ADN cuando este absorbe un fotón de una longitud de onda específica, proveniente de la radiación solar, 2022?

Se responde a través de las declaraciones de Gárces en la sección 2.4, en conjunción con los resultados aquí obtenidos para la energía del fotón proveniente de la radiación solar y su longitud de onda. La absorción de energía de radiaciones UV en materiales biológicos sucede por un único mecanismo que implica la absorción del fotón, por lo cual podemos modelar el material genético como un cuerpo negro que, por definición, absorbe toda la energía recibida.

Si se conoce la longitud de onda de un fotón en particular, se determina fácilmente la frecuencia de su onda electromagnética mediante la fórmula $v = c/\lambda$.

Las radiaciones UVB afectan principalmente a los ácidos nucleicos por tener los mayores coeficientes de absorción en el mundo vivo. Así, la densidad de energía por unidad de frecuencia para la frecuencia v de la radiación contenida en un ácido nucleico a la temperatura absoluta $T=310.15\text{K}$ o 37°C está determinada por

$$u(v, T) = \frac{8\pi v^2}{c^3} \frac{hv}{e^{hv/KT} - 1} \quad (4.11)$$

Donde K es la constante de Boltzmann cuyo valor es $K = 1,3805 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$. En la ecuación (4.11) hv representa la energía cuántica del fotón la cual puede obtenerse de la ecuación (4.9).

Con esto, la cantidad de energía que se transmite al ADN cuando este absorbe un fotón de una longitud de onda específica, proveniente de la radiación solar es el área bajo la curva de esta distribución, para un intervalo diferencial de la frecuencia v

$$\int_v^{v+\delta v} u(v, T) \cdot dv \quad (4.12)$$

4.7. Discusión de resultados

Los resultados aquí obtenidos son un modelo ideal en el que se considera que la energía solar instantánea que llega a la superficie es la misma que se mide en el exterior de la atmósfera.

Esto es un aproximado lejos de la realidad puesto que gran parte de la radiación es filtrada en la capa de ozono, además de que el área que subtiende una fuente de luz a la distancia Tierra-Sol con un metro cuadrado en la atmósfera se traduce a más de un metro cuadrado en la superficie de la Tierra. Esto se debe considerar en conjunto con factores ambientales, climatológicos, geográficos, etc., implicaría un análisis estadístico exhaustivo, por lo que en este escrito se limita a evaluar y modelar el problema según lo acordado.

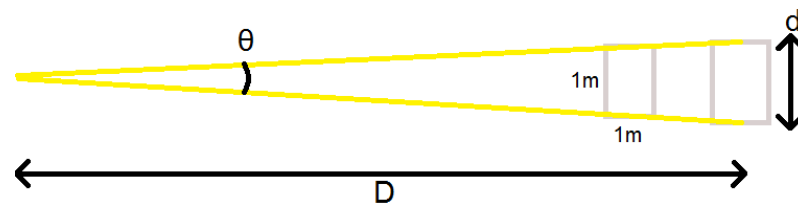


Figura 4.7: Ángulo subtendido (autoría propia).

Otro aspecto importante a considerar es que el portal de datos abiertos de radiación solar del Instituto de Geofísica de la UNAM únicamente contiene los mapas de irradiancia referentes al año 2014, con los que se hizo el análisis presente. Una forma de solucionar este detalle sería recopilar datos anteriores de irradiancia y crear un gráfico por el método de regresión lineal que permita conocer los valores actuales.

O bien, también se podría investigar acerca de modelos ya establecidos que predigan la evolución de la irradiancia en función del tiempo, y aplicar dicho modelo al caso de México. Lo cual podría funcionar o no debido a que no todos los modelos creados para una región en particular se adaptan igualmente para otras regiones.

Capítulo 5

Propuesta de intervención

5.1. Presentación de la propuesta

Debido a que se deben considerar diversos factores para determinar la energía instantánea recibida en la superficie de la Tierra, los resultados aquí obtenidos aún no se pueden tomar como un referente junto con el índice UV para determinar el riesgo de exposición a la luz solar.

La propuesta de intervención en todo caso sería continuar con el análisis estadístico y detallar el modelo aquí presente a partir de datos meteorológicos, geográficos, ambientales, estratosféricos, ecológicos y demás que pudieran influir. Los datos están abiertos a obtenerse tanto por investigación como por trabajo de campo.

Terminado el análisis se podría proceder a complementar el modelo presente y crear un nuevo sistema que junto con el índice UV contribuya a la prevención de eritemas y mutaciones en el ADN debidas a la radiación solar.

5.2. Justificación

Esta propuesta es cada vez más necesaria debido al efecto de los clorofluorocarbonos en la atmósfera; tan solo en Estados Unidos, uno de los países más industrializados, ya se han registrado temperaturas de hasta 53°C en la superficie del territorio de California. Siendo este hecho un claro indicativo del aumento de irradiancia debida a la contaminación.

Cada día el ser humano es más vulnerable al impacto de la radiación solar a causa del debilitamiento de la capa de ozono. Por ello es necesario conocer a detalle el riesgo de exposición para prevenir problemas de salud, así como aprovechar las temporadas y regiones en las que es segura una exposición más prolongada.

La importancia de la propuesta es la de prevenir la consecuencia más perjudicial a la salud que causa la radiación solar, el cáncer de piel.

Es recomendable que la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas en colaboración con otros cuerpos académicos de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla continúen con la propuesta, ya que podría ser esta no solo una nueva medida de prevención de exposición a la luz solar sino también un nuevo modelo que determina con precisión la energía transferida al material genético cuando este absorbe un fotón de determinada longitud de onda, resultado que se expone en la ecuación (4.12).

5.3. Objetivos

5.3.1. Objetivo principal

Dar a conocer el método desarrollado con la finalidad de que sea revisado y evaluado por un comité formal que determine si la implementación del mismo es posible además de ser teóricamente viable y concuerde con los resultados experimentales.

5.3.2. Objetivos secundarios

- Continuar con la investigación implementando un análisis estadístico exhaustivo que contemple todos aquellos factores que aún no permiten implementar este modelo en el mundo real.
- Modificar el modelo de ser necesario para que se adapte a la intervención de estos factores externos.
- Contemplar la evolución de la irradiancia en función del tiempo.
- De ser necesario, hacer mediciones de campo para determinar los factores que pudieran intervenir en el proceso.
- Crear un método que permita hacer esto de una manera automática sencilla, por ejemplo con un software de uso libre como Python, en un programa que cargue los datos meteorológicos, estratosféricos, ecológicos, etc., con la finalidad de que se pueda tener un modelo establecido.

5.3.3. Metas

- Publicar este escrito en una revista que pueda propulsar la investigación para continuar.
- Exponer el método y los resultados obtenidos en congresos nacionales e internacionales.

5.4. Actividades

Tabla 5.1: *Planificación de actividades.*

Actividades	Fechas				
	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Exposición de la tesis en congresos	X				
Evaluación del método por un comité	X				
Continuar con la investigación	X				
Realizar el análisis estadístico	X	X	X		
Modificar el modelo			X	X	
Automatizar el método en Python				X	X
Publicación del método y resultados					X

Tabla 5.2: *Tabla de viabilidad.*

Descripción	Costo	Existente	Por conseguir	Solicitado
Equipo de supercomputo	100000 MXN	X		
Transporte para medir irradiancia	5000 MXN		X	
Aparatos de medición de irradiancia	1700 MXN		X	
Python	0 MXN	X		
Wolfram Mathematica	91 MXN		X	
Formato de laboratorio	0 MXN		X	
Bitácora	200 MXN		X	
Transporte congreso XI Convención Científica Internacional CIUM 2023	10000 MXN	X		
Formato de laboratorio supercomputo	0 MXN		X	
Cuota inscripción congreso XI Convención Científica Internacional CIUM 2023	100 USD			X
Hospedaje congreso XI Convención Científica Internacional CIUM 2023	0 CUP	X		
Total			6991 MXN	100 USD

Conclusiones

Si bien, es precipitado tomar como referente a la ecuación (4.9) como futura referencia a la energía más probable que tendría un fotón procedente del espectro de emisión del Sol, debido a la intervención de factores externos «estratosféricos, meteorológicos, geográficos, ecológicos, etcétera»; se tiene ya una primera aproximación al desarrollo de un nuevo método que permite estimar el riesgo de exposición a la radiación solar y su componente ultravioleta. El desarrollo más profundo de la presente línea de investigación implicaría entonces un método complementario al índice UV por el cual se diseñen medidas de precaución ante la exposición al Sol para la población mexicana, intervendría entonces en la disminución de incidencia de cáncer de piel, eritemas y quemaduras solares.

Las ecuaciones (4.11) y (4.12) por su parte, están completamente determinadas y pueden proceder a una revisión experimental aislando los resultados obtenidos por la ecuación (4.9). Investigaciones especializadas han concretado en efecto que el material genético absorbe completamente un fotón ultravioleta cuando este impacta en él, por lo que la diana biológica de las radiaciones «los ácidos nucleicos» se comporta muy similarmente a un cuerpo negro ideal en el que toda la radiación incidente es absorbida.

Si se conoce la frecuencia ν de una fuente de luz UV monocromática, la cantidad de energía transferida al ADN irradiado con esta fuente será de

$$\int_{\nu}^{\nu+\delta\nu} \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/KT} - 1} \cdot d\nu \quad (5.1)$$

Donde K es la constante de Boltzmann cuyo valor es $K = 1,3805 \cdot 10^{-23} J/K$.

Los resultados aquí presentados llegan a la conclusión de que entre las 10 y las 14 horas un fotón que llega a la superficie de la Tierra, procedente del espectro de emisión del Sol, se cataloga como ultravioleta si la irradiancia diaria promedio mensual correspondiente es superior a $11,39 kWh/m^2$, pues la longitud de onda del fotón sería inferior a $400nm$ y su energía sería superior a $3eV$.

A partir de una irradiancia diaria promedio mensual de $14,48 kWh/m^2$, la longitud de onda más probable de un fotón procedente del espectro de emisión del Sol es inferior a $315nm$ dentro de las 10 y las 14 horas, con una energía superior a $3,93eV$, esto cataloga al fotón dentro del espectro UVB. Este punto de referencia es más relevante que el anterior pues las radiaciones UVB con $\lambda \in (280, 315)nm$ dañan directamente al ADN, mientras que las UVA con $\lambda \in (315, 400)nm$ lo pueden dañar directamente, pero presentan mayor probabilidad de hacerlo indirectamente.

Aunque la irradiancia diaria promedio mensual no alcance $11,4 kWh/m^2$ es importante tomar precauciones frente a la exposición solar a partir de $11 kWh/m^2$, pues se hablaría de una longitud de onda de $414nm$. Estos tres últimos enunciados están sujetos a revisión y corrección, pues consideran que la energía instantánea que llega a la superficie terrestre posee el valor de la constante solar, lo cual no está completamente determinado, siendo esto función de muchos factores externos.

La mejor forma a día de hoy de informarse acerca del riesgo de exposición al Sol y a la componente ultravioleta de la radiación solar sigue siendo el índice UV, pues contempla la mayoría de estos factores externos mencionados en una ponderación y considera todas las posibles longitudes de onda UV en una integral desde $\lambda = 200nm$ hasta $\lambda = 400nm$.

Recomendaciones

El desarrollo aquí planteado tiene aplicaciones tanto en el sector médico como físico-médico y el ramo de la fotobiología; este análisis es una forma completamente nueva de entender como se transfiere energía al ADN cuando en este impactan fotones UV procedentes del espectro de emisión del Sol. El aspecto más relevante que puede derivar del presente escrito es una nueva forma de analizar el riesgo de exposición a la componente ultravioleta del Sol.

La ecuación (4.9), los gráficos derivados de ella y la descripción realizada en el marco teórico, simplifican enormemente la interpretación de datos de dominio público y permite a la población relacionar mejor un concepto con otro concediendo así la pauta para que comiencen a tomar decisiones prudentes acerca de sus hábitos de exposición al Sol. En efecto, usar protector solar siempre es lo mejor y más recomendable, por simplificación del texto no se menciona su funcionamiento pero se conoce suficiente acerca del tema como para validar su efectividad.

En principio, otra línea de investigación que se pudiera seguir para este proceso es extraer de los mapas de irradiancia diaria promedio mensual un gráfico dependiente de dos variables $Z(X,Y)$, para el cual exista Z irradiancia diaria promedio mensual para cada X paralelo y Y meridiano. Esto aunado a un procedimiento similar para datos meteorológicos, geográficos, ecológicos, etc., podría resolver el detalle que se tiene acerca de la energía solar instantánea que se recibe en la superficie del territorio.

Una vez esclarecida la línea de investigación mencionada anteriormente, acerca de determinar con precisión la energía solar instantánea recibida en la superficie, se podría aprovechar esta información en la construcción de celdas de energía solar fotovoltaica, esto permitiría aprovechar mejor la energía de una fuente natural inagotable como lo es el Sol, maximizando el rendimiento de los componentes electrónicos empleados.

Asímismo, la determinación precisa de la energía solar instantánea recibida en conjunción con lecturas aisladas de valores del medio ambiente, podría ayudar a crear un modelo que estime la disminución de ozono estratosférico en función del tiempo.

También, se puede dar continuidad al postulado de obtener la energía transferida al ADN mediante la ecuación (4.12), evaluando su veracidad mediante pruebas experimentales, y de ser positiva la respuesta, implementarlo como una ley que permita entender más el proceso que da origen a una mutación.

Son muchas las posibilidades que se pueden obtener del presente escrito, como en cualquier ciencia, la aplicación del conocimiento depende de quien lo posee y queda en cada uno una convicción moral por hacer lo correcto. Que la continuidad de esta investigación sea fructífera para la sociedad y pueda aportar algo bueno al mundo.

Apéndice A

Metodología de la investigación

Tabla A.1: *Matriz de consistencia metodológica.*

Pregunta de investigación	Objetivo general	Hipótesis general
¿Qué cantidad de energía se transmite al ADN cuando este absorbe un fotón de una longitud de onda específica, proveniente de la radiación solar, 2023?	Determinar la cantidad de energía que recibe el ADN al absorber un fotón, de una longitud de onda específica, proveniente de la radiación solar 2023.	A mayor energía mayor es el riesgo de mutación en el ADN.
Preguntas específicas	Objetivos específicos	Hipótesis específica
¿Qué es ADN?	Determinar ADN.	Durante el verano se presenta mayor riesgo de mutación en el ADN que durante el invierno, al exponerse a la luz solar.
¿Qué es un fotón?	Explicar fotón.	
¿Qué es radiación solar?	Explicar radiación solar.	
¿Cuál es el cálculo de la energía en el ADN?	Explicar cómo se calcula la energía del ADN.	

Tabla A.2: Matriz de operacionalidad de variables.

Estudio	Variable dependiente	Nivel uno	Nivel de dos dimensiones	Los indicadores	Tipo de investigación	El instrumento de medición	Ítems	
							Ya está	Contiene Excel
Datos de irradiancia diaria promedio mensual	Longitud de onda de un fotón proveniente de la radiación solar	Datos de irradiancia diaria promedio mensual ↓	Obtener la energía	La ϵ en eV	Invest. cuantitativa	Lista de verificación	X	
		Energía de un fotón proveniente de la radiación solar ↓	Obtener la longitud de onda	La λ en nm	Invest. cuantitativa	Lista de verificación	X	
		Longitud de onda del fotón y determinación de riesgo para el ADN ↓	Clasificar el espectro electromagnético	La λ en nm	Invest. cuantitativa	Lista de verificación	X	
		Energía transmitida al ADN «cuerpo negro»	Determinar si es dañino o no para el ADN	ADN definición	Invest. cuantitativa	Lista de verificación	X	
			Radiación del cuerpo negro	La densidad de ϵ por unidad de v	Invest. cuantitativa	Lista de verificación	X	

Apéndice B

Mapas de irradiancia diaria promedio mensual



Figura B.1: Irradiancia Enero (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).

Mapas de irradiación diaria promedio mensual

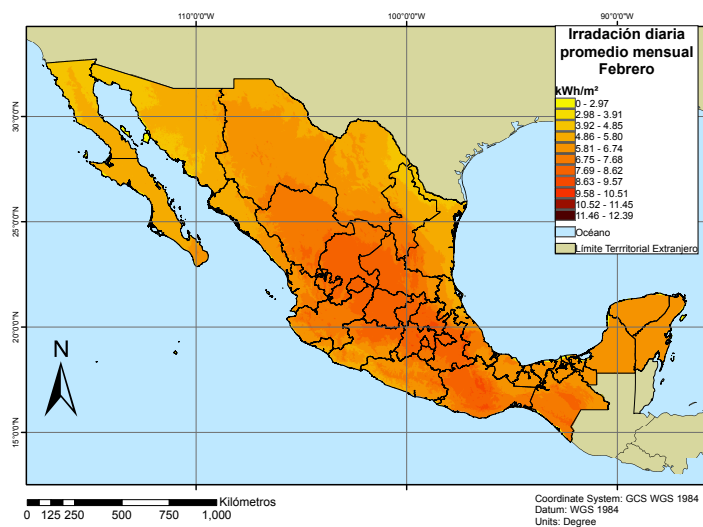


Figura B.2: Irradiancia Febrero (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).

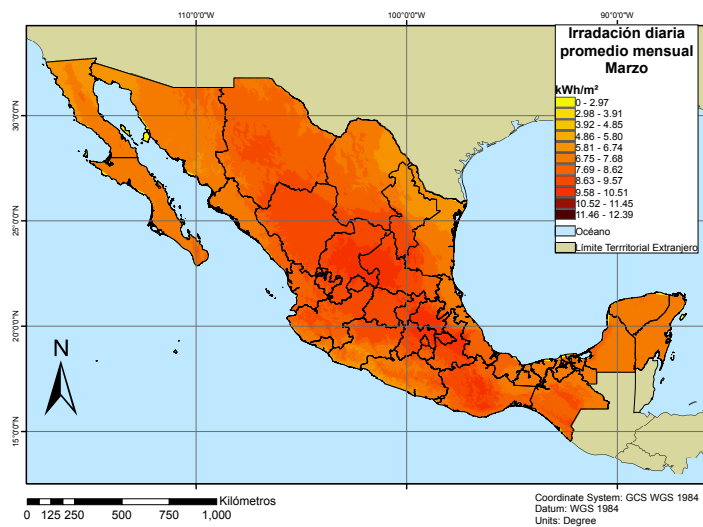


Figura B.3: Irradiancia Marzo (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).

Mapas de irradiación diaria promedio mensual

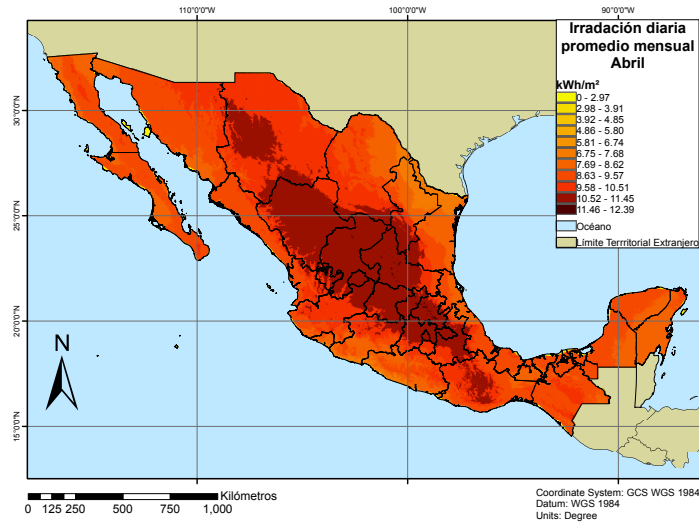


Figura B.4: Irradiancia Abril (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).

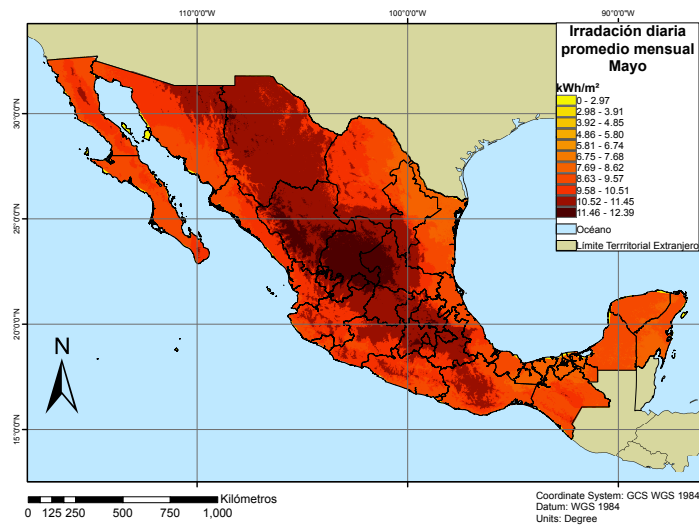


Figura B.5: Irradiancia Mayo (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).

Mapas de irradiación diaria promedio mensual

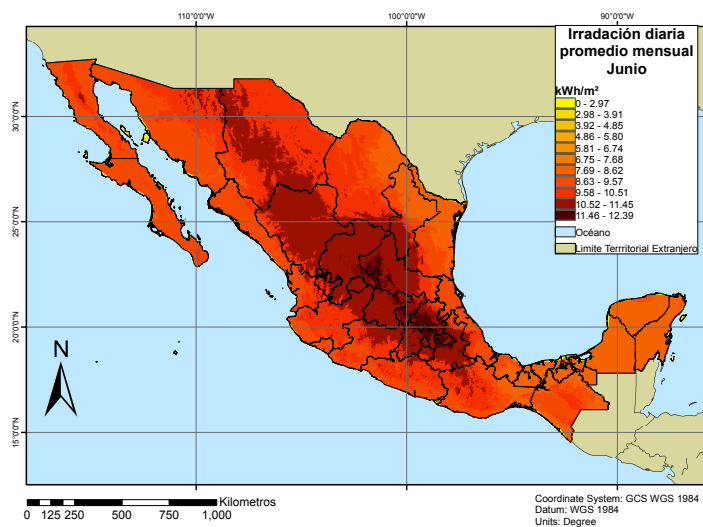


Figura B.6: Irradiancia Junio (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).

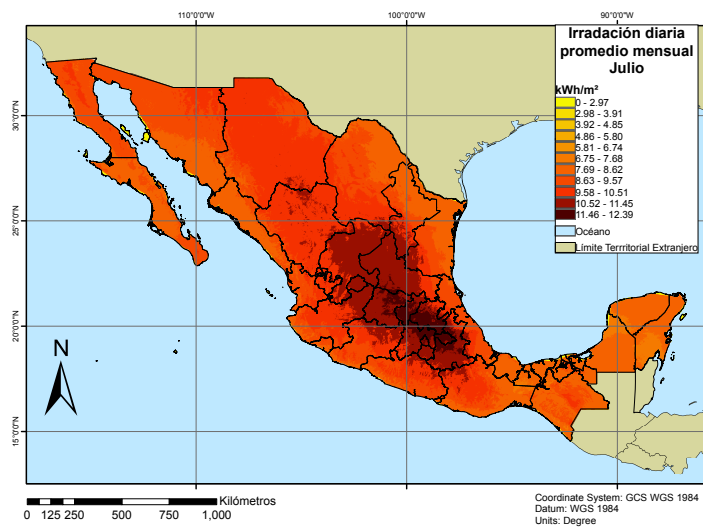


Figura B.7: Irradiancia Julio (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).

Mapas de irradiancia diaria promedio mensual

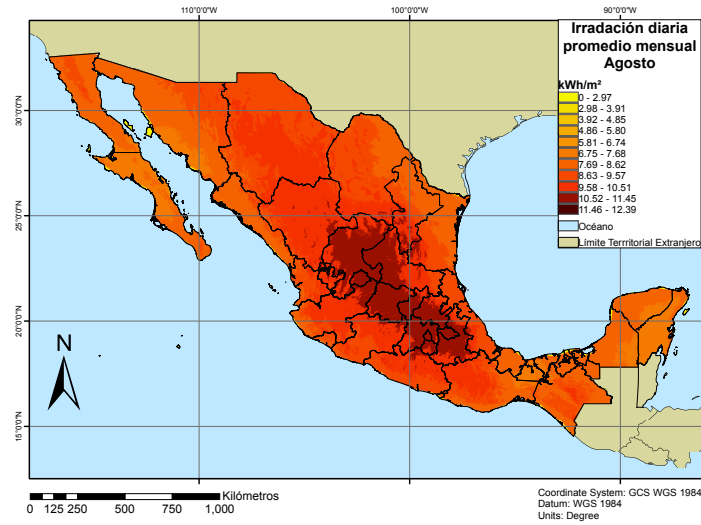


Figura B.8: Irradiancia Agosto (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).

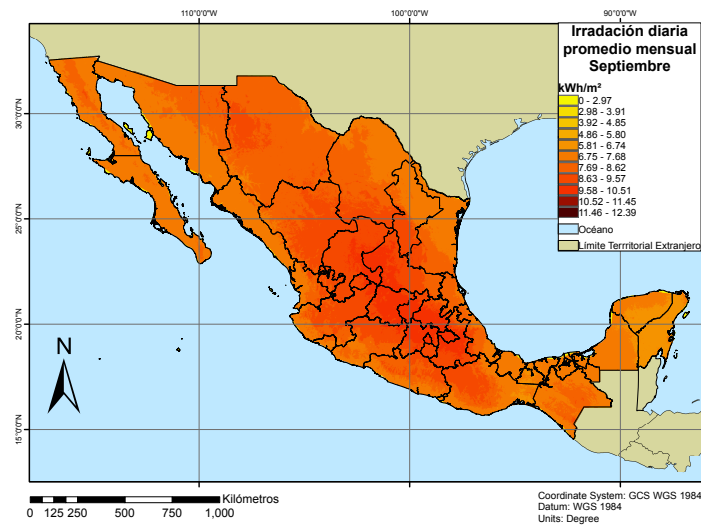


Figura B.9: Irradiancia Septiembre (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).

Mapas de irradiación diaria promedio mensual

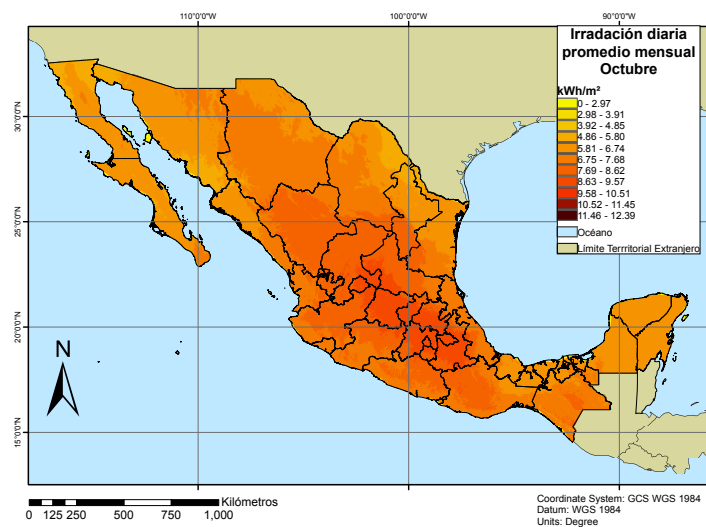


Figura B.10: Irradiancia Octubre (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).

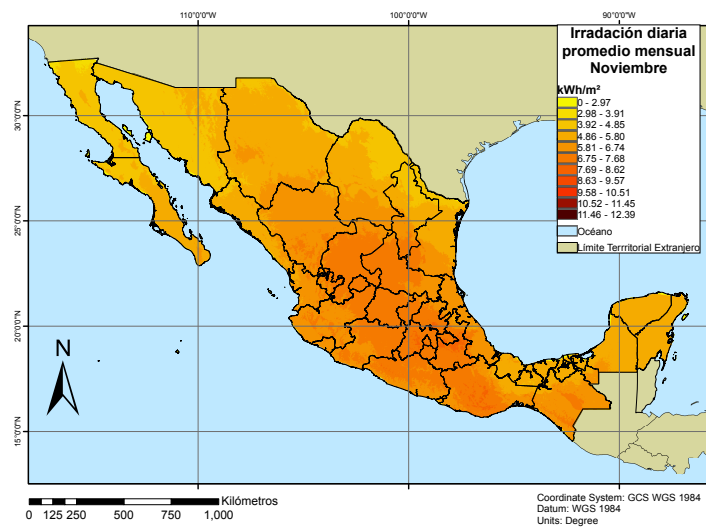


Figura B.11: Irradiancia Noviembre (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).

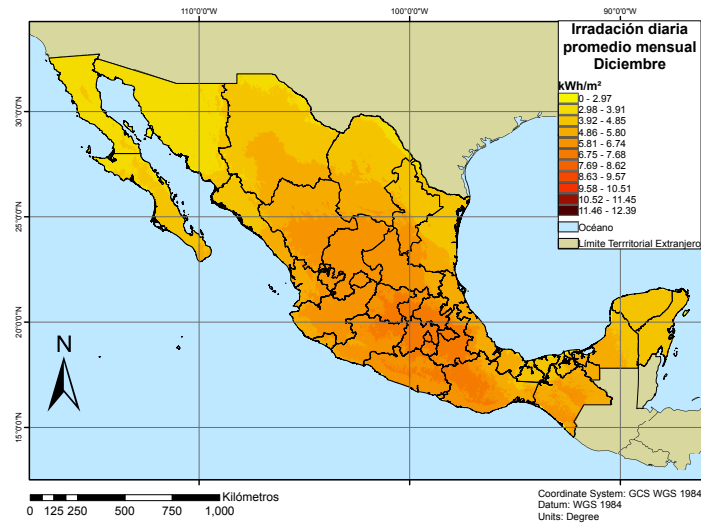


Figura B.12: Irradiancia Diciembre (Instituto de Geofísica de la UNAM, 2014).

Bibliografía

- Alonso, C., y Salerni, G. (30 de Julio de 2016). Breve historia del melanoma. De Hipócrates a Handley . Obtenido de Medigraphic: <https://www.medigraphic.com/pdfs/cutanea/mc-2016/mc1611.pdf>
- Aprender Fácil. (2023). Célula. Obtenido de Aprender Fácil: <https://aprenderfacil.com.ar/biologia/anatomia-y-fisiologia/celula/>
- Balart, J. (20 de Junio de 2001). Análisis de la radiosensibilidad de las células tumorales pancreáticas humanas y su modulación por 5-fluorouracilo. Obtenido de Tesis Doctorals en Xarxa: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/4379/jbs3de6.pdf?sequence=3>
- Bohórquez, J., y Pérez, J. (5 de Octubre de 2007). Radiación ultravioleta. Obtenido de Dialnet: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5599224>
- Caldwell, M., y Flint, S. (28 de Diciembre de 1994). Stratospheric ozone reduction, solar UV-B radiation and terrestrial ecosystems. Obtenido de Springer: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01104080>
- Caldwell, M., y Sisson, W. (16 de Noviembre de 1976). Atmospheric Ozone Depletion: Reduction of Photosynthesis and Growth of a Sensitive Higher Plant Exposed to Enhanced u.v.-B Radiation. Obtenido de Jstor: <https://www.jstor.org/stable/23689599>
- Chaichian, M., Rojas, O., y Tureanu, A. (2012). From the cosmos to quarks: Basic Concepts in Physics. Primera edición: Springer.
- CIRA. (2023). La constante solar. Obtenido de Regional and Mesoscale Meteorology Branch. Cooperative Institute for Research in the Atmosphere: <https://rammb.cira.colostate.edu/wmovl/vrl/tutorials/euromet/courses/spanish/satmet/s2710/s2710004.htm>
- DatosMundial. (21 de Febrero de 2023). Hora de amanecer y atardecer en México. Obtenido de DatosMundial: <https://www.datosmundial.com/america/mexico/puesta-del-sol.php>
- Durand, J. (17 de Junio de 2020). Efectos Biológicos de la Radiación Ionizante. Obtenido de International Atomic Energy Agency: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/032/31032960.pdf
- Eglitis, L. (22 de 01 de 2023). Hora de amanecer y atardecer en México. Obtenido de DatosMundial: <https://www.datosmundial.com/america/mexico/puesta-del-sol.php>
- EPA. (01 de Septiembre de 2001). El Sol, la radiación ultravioleta y usted. Obtenido de Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos: https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/sunuvu_spanish.pdf
- Flamand, L., Moreno, C., y Arriaga, R. (07 de Enero de 2021). Cáncer y desigualdades sociales en Mexico 2022. Obtenido de Red de Estudios sobre Desigualdades de El Colegio de México: <https://desigualdades.colmex.mx/cancer/informe-cancer-desigualdades-2020.pdf>
- Freepik. (2023). Cromosoma icono gratis. Obtenido de flaticon: <https://cdn-icons-png.flaticon.com/512/4192/4192071.png>
- Garcés, F. (9 de Septiembre de 2015). Alteraciones del DNA irradiado con luz ultravioleta. Obtenido de Universidad Complutense de Madrid: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/53375/1/5310031324.pdf>
- Garnacho, G., Salido, R., y Moreno, J. (11 de Abril de 2020). Efectos de la radiación solar y actualización en fotoprotección. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1695403320301661>

González, L. (5 de Mayo de 2003). Los efectos nocivos de la radiación solar y la forma de combatirlos. Obtenido de Elsevier: <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-pdf-13047747>

HC Hospitales. (2023). ABCDE del Melanoma. Obtenido de HC Marbella: <https://www.hcmarbella.com/es/abcde-del-melanoma/>

Hecht, E. (2017). Optics. 5ed: Pearson.

IDEAM. (2023). Características de la Radiación Solar. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, Colombia: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/caracteristicas-de-la-radiacion-solar#CONSTANTE%20SOLAR>

IDEAM. (2023). Formación y destrucción del ozono estratosférico. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/formacion-y-destruccion-del-ozono-estratosferico>

Instituto de Geofísica de la UNAM . (2014). Irradiancia solar diaria promedio mensual . Obtenido de UNAM: <https://rayenari.geofisica.unam.mx/mauro/mapas.php>

Khan Academy. (2023). Ácidos nucleicos. Obtenido de Khan Academy: <https://es.khanacademy.org/science/ap-biology/gene-expression-and-regulation/dna-and-rna-structure/a/nucleic-acids>

Krane, K. (2012). Modern Physics. 3ed: John Wiley & Sons, Inc.

Mompin, J. (1986). Energía solar fotovoltaica. Primera edición: Marcombo.

Online Web Fonts. (2022). Radiation Photon Free Icon. Obtenido de Online Web Fonts: <https://www.onlinewebfonts.com/icon/468808>

Organización Mundial de la Salud. (2 de Febrero de 2022). Cáncer. Obtenido de Organización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cancer>

Policlínico San Miguel. (2021). Cáncer de piel. Obtenido de Policlínico San Miguel: <https://policlinicosanmiguel.com/especialidades-medicas/dermatologia/cancer-de-piel/>

Panda, U. (1 de Diciembre de 2013). Diccionario Medico: Conciso y de Bolsillo. Obtenido de Amazon: <https://www.amazon.com.mx/Diccionario-Medico-Conciso-y-Bolsillo/dp/9962678269>

Reyes, D., González, J., Mohar, A., y Meneses, A. (20 de Abril de 2011). Epidemiología del dolor por cáncer. Obtenido de SciELO-España: https://scielo.isciii.es/scielo.php?pid=S1134-80462011000200006&script=sci_arttext&tlng=pt

Rigel, D., Robinson, J., Ross, M., Friedman, R., Cockerell, C., Lim, H., . . . Kirkwood, J. (2011). Cancer of the Skin: Expert Consult 2nd Edition. 2° ed.: Saunders.

Rivero, M., y Orozco, S. (03 de Diciembre de 2017). ¿Cuánta energía nos llega del Sol? Obtenido de HYPATIA: <https://www.revistahypatia.org/858>

Rueda, L. (31 de Octubre de 2017). Correlación de los parámetros del Ensayo Cometa y dosis de radiación ionizante en células mononucleares sanguíneas humanas expuestas in vitro en la evaluación del daño al ADN, Lima 2016. Obtenido de CORE: <https://core.ac.uk/download/pdf/323349621.pdf>

S.S.A. (22 de enero de 2015). Cáncer de piel duplica su incidencia cada 10 años. Obtenido de Secretaría de Salud y asistencia Gobierno de México: <https://www.gob.mx/salud/prensa/cancer-de-piel-duplica-su-incidencia-cada-10-anos>

Sainz, C. (1 de Septiembre de 2002). Análisis de la influencia in vitro de bajas dosis de radiación producidas por ²²²Rn sobre proliferación celular, apoptosis y respuesta a agentes citotóxicos. Obtenido de Tesis Doctorals en Xarxa: <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/10609/1de9.CSFcap1.pdf?sequence=2>

Simonet, M. (8 de Noviembre de 2021). Formación de dímeros de timina. Obtenido de Wikimedia Commons: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/aa/Formación_de_dímeros_de_timina.jpg

Téllez, C. (Enero de 2021). Decodificación de textos de investigación, para la estructuración de tesis de maestría en una universidad privada de Puebla 2020. Obtenido de Revista de Divulgación científica Universciencia: <http://revista.soyuo.mx/index.php/uc/article/view/157>

Universidad de Jaén. (2023). Curso de Energía Solar Fotovoltaica. Obtenido de Universidad de Jaén: http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/02_radiacion/01_basico/2_radiacion_01.htm

University of Calgary. (9 de noviembre de 2021). Enciclopedia de Energía. Obtenido de Energy Education: Calgary: https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php?title=Sol&oldid=610

Wimmer, R., y Dominick, J. (2001). Introducción a la investigación de medios masivos de comunicación. México: Thomson Learning.

Yovera, M., y Teran, Y. (15 de Noviembre de 2016). Conocimiento y medidas de prevención del cáncer de piel en estudiantes de enfermería de una universidad privada. Obtenido de ACC CIETNA: <https://revistas.usat.edu.pe/index.php/cietna/article/view/34/514>

Zettili, N. (2009). Quantum Mechanics: Concepts and Applications. 2ed: Wiley.