



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Campus Loma Bonita

LICENCIATURA EN ZOOTECNIA

**RELACIÓN ENTRE LA DECLINACIÓN SOLAR, LAS
CONSTANTES CLIMATOLÓGICAS Y LA EVOLUCIÓN DE
LAS ESPECIES**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

LICENCIADO EN ZOOTECNIA

PRESENTA

ANGEL EUSEBIO ALONSO SEVILLA

DIRECTOR

DR. JOSE ANGEL RUEDA BARRIENTOS

LOMA BONITA, OAXACA, MÉXICO; 2023



Universidad del Papaloapan

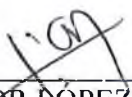
FECHA:	30 de Junio del 2023
ÁREA:	Vice-Rectoría Académica
OFICIO NÚMERO:	UNPA/VRA/176/2023
ASUNTO:	Autorización de Impresión de Tesis.

**C. ANGEL EUSEBIO ALONSO SEVILLA
P R E S E N T E:**

En base al artículo 120 del reglamento de alumnos, por medio de la presente se aprueba la impresión de la tesis titulada **“Relación entre la declinación solar, las constantes climatológicas y la evolución de las especies”** así como la programación del examen profesional bajo la dirección del Dr. Jose Angel Rueda Barrientos.

Sin más por el momento aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente.
terra ubérrima, mens aperta
Bou Lo-tama, chi jí jú


MC. HÉCTOR LÓPEZ ARJONA
Vice-Rector Académico.



C.c.p. Dra. Tania Zúñiga Marroquín. Jefa de Carrera de la Lic. En Zootecnia
C.c.p. L.P. Yesenia Barrientos Arenal. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
C.c.p. Dr. Jose Angel Rueda Barrientos. Director de Tesis.
C.c.p. Archivo.



Universidad del Papaloapan

Terra Ubellima. Mens Aperta

Licenciatura en Zootecnia

Oficio número JCLZ/70/2023

Asunto: Asignación de jurado de examen profesional

Loma Bonita, Oaxaca a 30 de junio del 2023

M.E. Yesenia Barrientos Arenal

Jefa del Departamento de Servicios Escolares

PRESENTE

Mediante la presente, le informo que esta jefatura, con el visto bueno de la Vice-rectoría Académica, ha designado a los siguientes profesores como sinodales del examen profesional del egresado **C. Angel Eusebio Alonso Sevilla**, quien defenderá su trabajo de tesis titulado **"Relación entre la declinación solar, las constantes climatológicas y la evolución de las especies"**, para obtener el título de **Licenciado en Zootecnia**.

Titulares:

Presidente: Dr. Miguel Angel Sánchez Hernández

Secretario: M.C. Raúl Moreno de la Torre

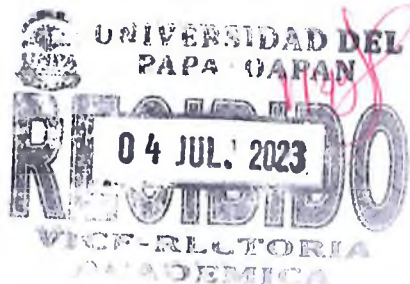
Vocal: Dr. Jose Angel Rueda Barrientos

Suplentes:

Dr. Cecilio Ubaldo Aguilar Martínez

Dr. J. Orbelín Gutiérrez Hernández

Sin más por el momento, le envió un cordial saludo.



Atentamente

Dra. Tania Zúñiga Marroquín
Jefa de Carrera de Lic. en Zootecnia

Vo. Bo.

M.C. Héctor López Arjona
Vice-rector Académico

C.c.p.: M.C. Hector López Arjona. Vicerector académico. Para su conocimiento
C.C.p: Archivo



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Campus Loma Bonita

LICENCIATURA EN ZOOTECNIA

LA PRESENTE TESIS TITULADA “**RELACIÓN ENTRE LA DECLINACIÓN SOLAR, LAS CONSTANTES CLIMATOLÓGICAS Y LA EVOLUCIÓN DE LAS ESPECIES**”, PRESENTADA POR EL PASANTE **ANGEL EUSEBIO ALONSO SEVILLA**, BAJO LA DIRECCIÓN DEL **DR. JOSE ANGEL RUEDA BARRIENTOS**, HA SIDO REVISADA Y ACEPTADA POR LA COMISIÓN REVISORA, PARA SER DEFENDIDA EN EL EXAMEN PROFESIONAL Y OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN ZOOTECNIA.

COMISIÓN REVISORA

DR. MIGUEL ANGEL SÁNCHEZ HERNÁNDEZ

M.C. RAUL MORENO DE LA TORRE

LOMA BONITA, OAXACA, MÉXICO, 2023

DEDICATORIA

A **Dios**, por darme la fuerza y la motivación para seguir adelante.

A mis padres, **Eusebio y Mariana**, por el gran esfuerzo que han hecho para que pueda culminar mi formación profesional.

Los amo

A **mí**, porque no sobra una auto dedicatoria, cuando en muchas ocasiones eran más las razones para rendirse, y aun así encontré fortaleza en mi fe, en mi gente.

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad del Papaloapan** por darme la oportunidad de llevar a cabo mi formación profesional.

Al Dr. **Jose A. Rueda**, por su oportuna guía en la dirección de este trabajo.

A mis revisores, ya que, a raíz de sus valiosas aportaciones, se enriqueció la calidad de este documento: **Dr. Miguel Angel Sánchez Hernández y M.C. Raúl Moreno de la Torre**.

A los profesores de la Licenciatura en Zootecnia, por sus enseñanzas.

A **Marco Eduardo, Jose Mauricio y Nancy Yamileth**; gracias por su amistad.

A mis compañeros de clases, gracias por todo, y por nada.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. HIPÓTESIS	4
4. REVISIÓN DE LITERATURA	5
4.1. Factores determinantes del clima y elementos del estado del tiempo	5
4.2. Perpendicularidad de los rayos solares	6
4.3. Ciclos dinámicos terrestres y la radiación	7
4.4. La radiación solar y los organismos vivos, en el corto plazo.....	8
4.5. El proceso de adaptación evolutiva de las especies	9
4.6. El clima y la evolución de las especies biológicas	10
4.7. Implicaciones en poblaciones domésticas	11
5. MATERIALES Y MÉTODOS	13
5.1. Localización de los sitios seleccionados para el estudio.....	13
5.2. Consulta y generación de datos.....	13
5.3. Análisis estadístico.....	14
5.4. Temáticas a desarrollar.....	15
5.5. Alcance	15
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
6.1. La declinación solar y su relación con los elementos del clima	16
6.1.1. La perpendicularidad de los rayos solares	16
6.1.2. Los recursos solares y la declinación del sol.....	19

6.1.3.	El ciclo anual de declinación y las estaciones del año	20
6.1.4.	El analema	21
6.2.	Elección de sitios y bandas latitudinales	22
6.2.1.	Selección estratégica de los sitios	22
6.2.2.	Definición de las bandas latitudinales arbitrarias.....	23
6.3.	Relación entre la declinación solar y los elementos del clima en seis sitios del planeta.	24
6.3.1.	Sitios localizados en el trópico de Cáncer	25
6.3.2.	Sitios localizados en el trópico de Capricornio	26
6.3.3.	Sitios de los trópicos de Cáncer y Capricornio	27
6.3.4.	Sitios localizados en la franja ecuatorial	29
6.4.	Correlación entre la declinación solar y los elementos del clima	31
6.4.1.	Coeficientes de correlación intra-estación	32
6.4.2.	Coeficientes de correlación globales	33
6.4.3.	Relación entre los elementos del estado del tiempo	35
7.	CONCLUSIONES.....	36
8.	LITERATURA CITADA	54

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Temperatura, humedad relativa, y precipitación en relación con la declinación solar para Fresnillo, Zacatecas, México.	43
Cuadro 2. Temperatura, humedad relativa y precipitación en relación con la declinación solar para Shantou, China.	44
Cuadro 3. Temperatura, humedad relativa y precipitación en relación a la declinación solar para San Pablo, Brasil.	45
Cuadro 4. Temperatura, humedad relativa y precipitación en relación con la declinación solar para Polokwane, Sudáfrica.	46
Cuadro 5. Temperatura, humedad relativa y precipitación en relación con la declinación solar para Quito, Ecuador.	47
Cuadro 6. Temperatura, humedad relativa y precipitación en relación con la declinación solar para Mbandaka, Congo.	48
Cuadro 7. Correlación entre la declinación solar, temperatura, humedad relativa y precipitación para dos sitios del trópico de Cáncer.	49
Cuadro 8. Correlación entre la declinación solar, temperatura, humedad relativa y precipitación, para dos sitios del trópico de Capricornio.	50
Cuadro 9. Correlación entre la declinación solar, temperatura, humedad relativa y precipitación para dos sitios del Ecuador.	51
Cuadro 10. Correlación entre la declinación solar, temperatura, humedad relativa y precipitación para seis sitios del planeta Tierra.	52
Cuadro 11. Coordenadas, altitud, distancia al océano y elementos del clima, en los seis sitios elegidos para el estudio de la asociación entre la declinación solar y las constantes climatológicas.	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de los seis sitios elegidos para analizar la correlación entre la declinación solar y los elementos del estado del tiempo.	38
Figura 2. Relación entre la ecuación del tiempo y la declinación solar (analema).39	
Figura 3. Relación entre la declinación solar y la temperatura superficial a lo largo del año 2021.	40
Figura 4. Relación entre la declinación solar y la humedad a lo largo del año 2021.	41
Figura 5. Relación entre la declinación solar y la precipitación a lo largo del año 2021.	42

RESUMEN

La implementación de sistemas de producción pecuarios sustentables se fundamenta en la calidad genética de los animales. Los rasgos asociados a la sanidad, la reproducción y la producción, pueden ser permanentemente optimizados si se cuenta con poblaciones evolutivamente adaptadas al ambiente físico que habitan. El presente trabajo estudia la ciclicidad anual del estado del tiempo, como descriptor del medio ambiente físico; mediante la correlación entre la declinación solar y la temperatura, la humedad relativa y la precipitación.

Los datos de declinación se obtuvieron a partir del modelo geométrico, mientras que los datos del estado del tiempo se descargaron del portal de la NASA. Los sitios fueron seleccionados con base en su latitud, con la condición de que dos de ellos estuvieran localizados en el trópico de Cáncer, dos en el trópico de Capricornio y dos en el Ecuador. Por lo tanto, la declinación del sol está directamente relacionada con la temperatura ($r=0.71$ a 0.83 ; $P<0.01$), la humedad relativa ($r=0.15$ a 0.55 ; $P<0.01$) y la precipitación ($r=0.28$ a 0.38 ; $P<0.01$). Los cuatro lugares ubicados en los trópicos de Cáncer y Capricornio muestran un patrón comparable de variación en cuanto a sus condiciones climáticas, aunque la temporalidad se invierte entre hemisferios. Para los sitios ubicados en la franja ecuatorial, una alta y constante humedad relativa coincide con una precipitación frecuente durante todo el año. Al comparar las medias anuales de temperatura, precipitación y humedad relativa entre los seis sitios estudiados, se evidencia que los tres elementos varían en proporción inversa a la latitud, altitud o distancia al océano.

Palabras clave: Sistema sol-tierra, normales climatológicas, ambiente físico.

ABSTRACT

The implementation of a sustainable livestock production system is based on the genetic quality of the animals. Traits associated with health, reproduction, and production can be permanently optimized if the populations are evolutionarily adapted to their physical environment. This study focuses on the annual cyclicity of weather conditions as descriptors of the physical environment. Particularly, it explores the relationship between solar declination and the temperature, relative humidity, and precipitation. Declination data estimated from the geometric model of sun declination, whereas weather data was downloaded from the NASA portal. Six places were selected based on their latitude: two of them located on the Tropic of Cancer, two on the Tropic of Capricorn, and two on the Equator.

As the angle at which the sunrays land approaches perpendicularity, the three elements describing weather increase proportionally; so that the sun declination is directly correlated with the temperature ($r=0.71$ to 0.83 ; $P<0.01$), relative humidity ($r=0.15$ to 0.55 ; $P<0.01$), and precipitation ($r=0.28$ to 0.38 ; $P<0.01$). The four sites lying in the tropics of Cancer and Capricorn show a comparable pattern of variation regarding their climatic conditions; nonetheless the timing is reversed between hemispheres. For the sites located in the equatorial belt, a high and constant relative humidity coincides with frequent precipitation, throughout the year. When comparing the annual means for temperature, precipitation, and humidity, among the six sites under study, it becomes evident that the three of them vary in inverse proportion to latitude, altitude, or distance to the ocean.

Keywords: Earth-sun system, climate normals, physical environment.

1. INTRODUCCIÓN

La tierra presenta varios ciclos dinámicos, referidos como ciclos de Milankovitch. En orden de importancia desde el punto de vista climático y biológico, estos son rotación, traslación, precesión y nutación (Bennett, 1990). La traslación y la rotación impactan directamente sobre la distribución de la radiación normal en la superficie terrestre. La excentricidad de la órbita de traslación (Ahluwalia, 2019), en combinación con el ángulo de inclinación del eje de rotación del planeta (Wigley, 1981), modulan la distribución de la energía solar y el control termodinámico de la atmósfera; así como las cuatro estaciones del año. El aumento en la temperatura es causado por la variación en la incidencia de la radiación solar directa en cada latitud, y constituye un factor determinante del clima, así como un elemento descriptor del estado del tiempo atmosférico.

La importancia de considerar el medio físico como un factor esencial para la evolución de los organismos vivos, radica en que este representa la primer condicionante de la selección natural (Josephs, 2018). Una población podrá enfrentarse con mayores probabilidades de éxito a un medio biológico hostil, siempre que presente resiliencia al medio físico. En decisiones de migración de animales domésticos, la especie expresará una mayor resiliencia si las condiciones climáticas de los sitios origen y destino son equivalentes; en virtud de que el clima es el descriptor y rector del ambiente físico.

El presente trabajo se enfocará en mostrar la variación en la disponibilidad de los recursos proporcionados por el sol (la luz y el calor); así como la manera en que dicha variación afecta al ambiente físico, comenzando por modular el estado del

tiempo y del clima. Posteriormente, se discutirán brevemente las consecuencias que la asociación entre los recursos solares y los elementos del clima pueden significar para la evolución de los organismos vivos; todo lo anterior, conjugando conocimientos elementales de astronomía, ecología, genética y evolución. El eje de este análisis de información será la distribución de las fuentes primarias de energía sobre la superficie de la tierra, el calor y la luz. El primero, responsable del ciclo del agua y de modular la precipitación pluvial. La segunda, responsable de la fotosíntesis, así como de los ritmos circadianos y circanuales propios de los organismos vivos. El medio físico determina la adaptación evolutiva de todas las poblaciones biológicas que habitan el planeta. En el presente trabajo se analiza la influencia de la declinación solar sobre los elementos del estado del tiempo, y se comenta brevemente la relevancia de este conocimiento para el caso de poblaciones domésticas, ya sean animales o vegetales.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Estudiar la relación entre la incidencia perpendicular de los rayos solares y las constantes climatológicas: temperatura, humedad relativa y precipitación pluvial.

2.2. Objetivos específicos

- a)** Explicar la correlación entre la declinación solar y la distribución de la temperatura, humedad relativa y la precipitación pluvial, a lo largo del año, para seis sitios del planeta: Fresnillo (México). Shantou (China), San Pablo (Brasil), Polokwane (Sudáfrica), Quito (Ecuador) y Mbandaka (El Congo).
- b)** Definir zonas climáticas afines con base en la distribución perpendicular de la radiación solar en el planeta.
- c)** Explicar de manera concreta, la viabilidad de las decisiones de migración de plantas y animales domésticos; en función a las zonas climáticas afines.

3. HIPÓTESIS

- a)** A pesar de la variación aparente en las condiciones climáticas de cada hábitat biológico, en el largo plazo el clima de un sitio es un elemento constante del medio físico que está gobernado por los patrones de declinación solar.
- b)** La perpendicularidad de incidencia de los rayos solares sobre océanos y continentes es un factor clave en la determinación del clima en cualquier sitio de la tierra, ya que la temperatura y la precipitación pluvial de un sitio están correlacionadas con la declinación del sol, en virtud de la cantidad de calor solar que recibe un sitio a lo largo del año.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Factores determinantes del clima y elementos del estado del tiempo

El clima de un nicho ecológico del planeta se asume determinado por factores como latitud, altitud y relieve (Bennett, 1990). Por otra parte, entre los elementos del estado del tiempo se enlistan comúnmente la temperatura, la humedad relativa y la precipitación pluvial (Andrade y Basch, 2012). De acuerdo con lo expuesto, en la literatura la temperatura se identifica tradicionalmente como un elemento del estado del tiempo atmosférico, y no como un factor determinante del clima. Es decir, regularmente se asume que la temperatura es una consecuencia en lugar de reconocerse como la causa más importante en la determinación climática (Coddington *et al.*, 2016). De hecho, el resto de los factores que manejan regularmente como determinantes del clima, cobran importancia solo cuando se analizan como modificadores de la distribución de la perpendicularidad de los rayos solares.

La radiación solar modula la variación en la temperatura de todos y cada uno de los sitios del globo terráqueo (Soon *et al.*, 1996), y es por tanto el factor más importante en la determinación del clima de cualquier sitio del planeta.

Para iniciar con esta propuesta, es necesario explicar las causas de la distribución de la “radiación solar”. La latitud, la altitud y el relieve modifican el estado del tiempo y en consecuencia el clima; no obstante, eso sucede solamente por la relación que estas variables guardan con la distribución de la radiación solar. La distribución de la radiación solar, está en función directa con los movimientos de rotación y

traslación terrestres. La razón fundamental de la gran riqueza de climas, así como de la diferenciación climática entre las estaciones del año, es el ángulo de inclinación del eje de rotación terrestre (23.5°) con respecto a la eclíptica. Esta última es un plano imaginario sobre el que ocurre la traslación del planeta alrededor del sol, por lo que también se puede decir que la órbita terrestre sigue el plano de la eclíptica. (Bernard *et al.*, 2005).

4.2. Perpendicularidad de los rayos solares

Cuando los rayos solares inciden perpendicularmente sobre un lugar dado; incidirían también perpendicularmente sobre todos los sitios cuya latitud coincida con la del primero, esto en el transcurso de 24 h. Se dice que los rayos solares son perpendiculares a un sitio cuando la latitud de dicho sitio converge con la declinación solar. La perpendicularidad dista mucho de ser una constante. El ángulo en el que los rayos solares inciden sobre la superficie terrestre en un lugar determinado, es un factor para el que la única constante es la variación.

El ángulo de incidencia de los rayos solares sobre un sitio del planeta presenta una variación cíclica definida; cuya causa es la posición instantánea que mantiene cada sitio terrestre con respecto al sol. Los arcos que el sol dibuja en el cielo visible (bóveda celeste) son diferentes en cada latitud; no obstante, son equivalentes para latitudes idénticas dentro de un mismo hemisferio.

La perpendicularidad de los rayos solares es un privilegio que ocurre solamente en la región comprendida entre los trópicos de Cáncer y Capricornio; pero dicho evento persiste tan solo 4 minutos y acontece exclusivamente dos veces al año para un

sitio determinado, localizado en la región intertropical. En el instante en el que ocurre la perpendicularidad absoluta la posición del sol será cenital; es decir, se localizará en el meridiano local y en el centro entre los horizontes norte y sur. (Hamilton y Sakazaki, 2017).

El sol libera una inmensa cantidad de energía desde su superficie (Vardavas y Taylor, 2007). Los planetas del sistema solar interceptan una mínima fracción de esta energía, en función de su tamaño y su distancia con respecto al sol. Un área de 1 m^2 en la parte más alta de la atmósfera terrestre, que reciba los rayos solares de manera perpendicular (a 90°), intercepta 1365 watts de energía (Coddington *et al.*, 2016). Aunque 30 % de esta energía es disipada por la atmósfera antes de incidir sobre la superficie terrestre, cada vez que el ángulo de incidencia de los rayos solares es perpendicular, se maximiza la cantidad de energía disponible para promover la fotosíntesis y modificar el estado del tiempo; por lo que se maximiza también la densidad de calor y luz que incide sobre la superficie terrestre.

4.3. Ciclos dinámicos terrestres y la radiación

La rotación y la traslación del planeta son las causas principales de la distribución de la radiación solar; y por lo tanto, son determinantes indirectos del clima (NASA, 2020). Por ejemplo, en un ciclo de 24 h todo sitio localizado a una misma latitud recibirá la misma radiación solar; mientras que dos sitios localizados en latitudes idénticas, pero en hemisferios diferentes, recibirán la misma cantidad de radiación a lo largo de un año (ciclos de 365 d).

Los patrones cíclicos de radiación, que son causados por la rotación y traslación, también sufren modificaciones a lo largo de los siglos, en virtud de la precesión (25776 años) y nutación (18 años). La precesión es un cambio cíclico de la posición del eje de rotación de planeta que significa apenas 50.29 segundos de grado durante cada año terrestre; mientras que la nutación es una variación ondular en la órbita de precesión, inducida por las fuerzas de atracción gravitacional entre la tierra y la luna (Yndestad, 1999). Tanto la precesión como la nutación carecen de efecto si se consideran periodos menores a 18 años. No obstante, la rotación y la traslación regulan el estado del tiempo, el clima y la conformación del medio ambiente físico de cada sitio del globo terrestre.

4.4. La radiación solar y los organismos vivos, en el corto plazo

Los recursos solares promueven la transformación del ambiente físico cuando el calor solar inicia el “ciclo del agua” (evaporación en océanos, flujo de humedad, inversión térmica del aire, viento, y precipitación pluvial). Por otra parte, la luz solar origina el ambiente biológico, dado que la radiación fotosintéticamente activa es utilizada por las plantas como fuente de energía para construir los enlaces covalentes que dan origen a proteínas y carbohidratos. Luego estas macromoléculas sirven como alimento al siguiente eslabón de la cadena alimenticia.

Los movimientos de la tierra con respecto al sol codifican un sinnúmero de actividades biológicas. Por ejemplo, mientras los ritmos circadianos de actividad, descanso, y consumo de alimento son consecuencia de las variaciones de luz en ciclos de 24 h (rotación terrestre), los ritmos circanuales modulan el comportamiento

reproductivo de muchas especies de animales y plantas, de acuerdo con variaciones del fotoperiodo en ciclos anuales, de 365 días de traslación (Geoffrey e Izabella, 2012).

4.5. El proceso de adaptación evolutiva de las especies

La adaptación evolutiva es un proceso continuo al que está sujeta una población, dicho proceso comprende una transformación genotípica y fenotípica que optimiza la capacidad de la población para sobrevivir y reproducirse bajo las condiciones ambientales de un sitio en particular. Para que la evolución logre cierta armonía entre la población biológica y el medio ambiente que significa su hogar dicha población tiene que permanecer en el mismo ambiente por múltiples generaciones.

La evolución de una población biológica puede resumirse en dos etapas. (1) La inducción de una gran variabilidad genética a partir de fenómenos como la segregación aleatoria y la distribución independiente de los cromosomas (1ª y 2ª Leyes de Mendel), así como la mutación, y la recombinación genética. (2) La selección de los progenitores de la siguiente generación, que en poblaciones silvestres se conoce como selección natural. La selección genética es mediada por factores ajenos al individuo, todos ellos componentes del “medio ambiente”; el cual comprende tanto al ambiente físico como al biológico.

Dado que la selección es enteramente dependiente del ambiente, toda variante genética que muestre fragilidad ante el ambiente físico, entrará en estrés y romperá su estado de homeostasis. Cuando un individuo es atacado por el ambiente físico, su sistema inmunológico se deprime, y es presa del ambiente biológico

(enfermedades bacterianas y virales, hongos, parásitos, competidores y depredadores).

4.6. El clima y la evolución de las especies biológicas

El ambiente físico de un sitio, y particularmente los elementos del estado del tiempo interactúan constantemente con las poblaciones de organismos vivos que en el habitan. En particular el estado del tiempo induce variaciones genéticas en todo ser vivo, incluyendo los tres dominios y cinco reinos.

Para que una población biológica se adapte a un lugar, su genoma debe adaptarse primero a la constancia y luego a la variación en el medio ambiente que le alberga. Para el genetista contemporáneo, un cromosoma codifica tanto los rasgos que definen a la población, como las características que el ambiente ha impreso en ella. El ADN contiene el algoritmo que explica por qué el ambiente y la población biológica se pertenecen mutuamente, conformando un sistema de equilibrio ecológico sustentable (Josephs, 2018). La separación de una población del medio ambiente que la sostiene, implica un desequilibrio tanto en la población como en el medio ambiente que la pierde.

El equilibrio evolutivo “población - ambiente - población” se alcanza solo cuando la población convive de forma continua con un ambiente físico particular, por decenas de generaciones. Una vez que el equilibrio se alcanza, este ambiente significará su nicho ecológico, y el lugar que posee tal ambiente constituirá su hábitat y su hogar (Lamarck, 1809). Un análisis más completo - que el que aquí se indica - de las relaciones entre el sol, el clima y la evolución de las poblaciones biológicas, debería

enmarcar: (1) las variaciones que en el largo plazo experimenten el clima del lugar, (2) la adaptación evolutiva de las poblaciones, mediada por la variación en el estado del tiempo y el clima de dicho lugar, (3) la coevolución entre la población y el ambiente físico que le alberga y, (4) la viabilidad práctica de las decisiones [pasadas, actuales y futuras] de migración de organismos vivos, ya sean silvestres o domésticos.

Las decisiones de migración de animales domésticos solo son justificadas cuando el ambiente físico de origen, caracterizado esencialmente por el clima, es similar al ambiente físico destino (Gaughan *et al.*, 2009). Si bien los medios físicos de origen y destino no pueden ser totalmente equivalentes, deben al menos ser similares en cuanto a los patrones de radiación solar recibida. El resultado de la coevolución entre una población y su ambiente es lo que se conoce como formación de razas naturales, y los genes que estas portan son el código que explica la pertenencia mutua entre la población biológica y el ambiente físico que significa su hogar.

4.7. Implicaciones en poblaciones domésticas

Las decisiones de migración de plantas y animales domésticos, así como la adquisición y movilización de germoplasma; entre ellos semillas, material vegetativo, embriones y gametos, se han llevado a cabo con una profunda ignorancia en temas de adaptación evolutiva. La falsa promesa de elevar la producción por medio de la adopción de genotipos exóticos ha sido la causa de la pérdida masiva de los recursos genéticos de los países en desarrollo.

La falta de conocimiento en la toma de decisiones de migración ha sido una característica definitoria de la ganadería durante todo el siglo XX (FAO, 2013), lo que ha llevado a la pérdida de recursos genéticos a nivel global. Este fenómeno ha sido particularmente importante en los países en desarrollo, lo que aplica a toda América Latina. La erosión de los recursos genéticos se dio al sustituir las razas naturales por razas exóticas al ambiente físico destino. La sustitución de una raza natural que ya está adaptada al ambiente físico particular de un sitio por otra raza que es exótica al ambiente específico, provoca el reinicio del proceso evolutivo para la raza introducida. Esta abrupta sustitución erosiona la base genética de la raza natural que si se encuentra en su ambiente del sitio que ha significado su hogar.

El ambiente constituye “todo aquello que no esté codificado en los genes de un organismo”, lo que incluye tanto descriptores físicos (clima, altitud, relieve) como componentes biológicos (enfermedades, parásitos, predadores). La relación entre el ambiente físico y las poblaciones biológicas, obliga a un análisis de los factores que determinan el clima de un nicho ecológico. Las poblaciones evolucionan para adaptarse primero a la constancia y después a la variación en el ambiente físico que significa su hogar (Gaughan *et al.*, 2009).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Localización de los sitios seleccionados para el estudio

Los sitios elegidos para el análisis son parte de la zona intertropical. En particular se eligieron seis sitios: Fresnillo, Zacatecas; Shantou, China; San Pablo, Brasil; Polokwane, Sudáfrica; Quito, Ecuador y Mbandaka, El Congo (Figura 1). Sin embargo, dado que la declinación solar modifica el patrón de distribución de energía solar en la tierra, el alcance de este análisis es relevante para la climatología de cualquier sitio del planeta; mientras que la constancia o la variación en el presupuesto de energía de cada sitio afecta también la evolución de todo ser vivo.

Los sitios fueron seleccionados con base a su latitud, con la condición de que dos de ellos estuvieran localizados en el trópico de Cáncer, dos en el trópico de Capricornio y dos en el Ecuador. La razón por la que se escogieron estos seis sitios radica en que están localizados en latitudes que enmarcan el límite superior, el centro y límite inferior del ciclo anual de declinación solar. La latitud a la que se encuentran los sitios coincide, con la declinación solar durante los solsticios y equinoccios.

5.2. Consulta y generación de datos

En sustitución a la búsqueda de datos de declinación, se decidió generar los datos a partir del modelo geométrico de declinación (Spencer, 1971). Se generó una base de datos que contempla la declinación solar durante los 365 días del año. El modelo geométrico de declinación es:

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos(x) + 0.070257 \sin(x) - 0.006758 \cos(2x) + 0.000907 \sin(2x) - 0.002697 \cos(3x) + 0.00148 \sin(3x)$$

donde $x = (2\pi/365-1) d$ & d es el día del año (1 a 365)

Los sitios para los cuales se hizo el ejercicio de correlacionar la declinación solar con los elementos del estado del tiempo, se eligieron tomando como referencia su cercanía al Trópico de Cáncer, al Ecuador o al Trópico de Capricornio. Los datos de normales climatológicas fueron obtenidos de la página Power Data Access Viewer. (NASA, 2022).

Dada la complejidad y el origen multifactorial del clima terrestre, este trabajo se concentra en correlacionar la declinación solar con las variaciones anuales en la temperatura, la humedad relativa y la precipitación, en seis sitios de la franja intertropical. Con base en la declinación solar, la perpendicularidad de los rayos solares, y la distribución de la radiación normal, se discutirá la posible afinidad climática entre aquellos sitios cuyo presupuesto de energía sea comparable.

5.3. Análisis estadístico

Los datos de declinación solar serán comparados con la temperatura, la humedad relativa y la precipitación, de seis sitios de la zona intertropical del planeta.

Se obtuvieron los coeficientes de correlación de Pearson entre la declinación solar y las variables climatológicas. Las correlaciones se obtuvieron mediante el paquete estadístico R, usando la interfaz de R Studio (Rstudio, 2022).

5.4. Temáticas a desarrollar

Se abordan a diferente profundidad, tres temas: (1) la distribución de la radiación normal en función de la declinación solar, (2) la relación entre la declinación del sol y los elementos del estado del tiempo que conforman el ambiente físico de un sitio, y (3) las implicaciones de dicha relación sobre la evolución de las especies. La primera etapa consiste en explicar la forma en que el sol recorre el planeta. La segunda etapa explica la distribución latitudinal de zonas climáticas equivalentes en el globo, en función de la disponibilidad de recursos solares (calor y luz). En la tercera etapa se mencionará brevemente el impacto que tiene la distribución de los recursos solares, sobre la evolución de las especies.

5.5. Alcance

El sol es la fuente primaria de energía, y esta energía es a su vez uno de los elementos esenciales que promueve la vida. Por lo anterior, ningún organismo vivo puede subsistir sin los recursos solares, y en consecuencia la distribución de los recursos solares en el planeta es relevante para todo organismo vivo. La primera consecuencia de la distribución de los recursos solares en el planeta, es que del presupuesto de energía dependerá tanto la distribución de climas como la distribución de biomas que pueden potencialmente producirse en cada sitio. Las conclusiones del análisis son relevantes para toda especie y población, incluidas las poblaciones domésticas que constituyen la base alimenticia de la humanidad. El alcance que este trabajo pueda tener en especies domésticas será también aclarado.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. La declinación solar y su relación con los elementos del clima

6.1.1. La perpendicularidad de los rayos solares

A pesar de que el diámetro del sol es 109 veces mayor al de la tierra (1.4×10^6 y 12 756 km respectivamente) (Chiron y Cachorro, 2003), la gran distancia que los separa (150×10^6 km) crea la ilusión de un sol pequeño, con un diámetro aparente de 0.53° en la bóveda celeste (Uma et al., 2021). Un cono de luz, de sección transversal circular y diámetro decreciente, se proyecta de forma normal desde el disco solar hasta la superficie del planeta. La proyección normal sucede sobre un lugar dado del planeta cuando el sol aparente ocupa el cenit en la bóveda celeste. Al referido cono de luz puede también llamársele cono de perpendicularidad, en alusión a su proyección normal sobre la superficie. Los conos de luz no están descritos en Astrofísica, pero sí los conos de sombra asociados a los eclipses; estos últimos son descritos a detalle en (Westfall y Sheehan, 2015).

El área del “círculo de incidencia de la radiación normal” dibujado por la intercepción entre el cono de perpendicularidad y la superficie del planeta, es función de la dimensión aparente del sol en la bóveda celeste. A pesar de que el radio de la sección transversal del cono coincide con el radio del sol en su origen, este se reduce a 29.5 km al coincidir con la superficie del planeta, por lo que el diámetro de incidencia del cono es de 59 km. Esta aproximación es propuesta aquí considerando la fracción del perímetro de la tierra ($x / 40,075$ km) en que teóricamente el disco solar incidirá de forma perpendicular $0.53 / 360^\circ$, durante una rotación completa de 360° en 24 h (Pal y Das, 2015). Esta última reflexión debe reevaluarse si se

considera que la luna y el sol comparten diámetro angular cuando se observan desde la superficie terrestre (Uma *et al.*, 2021), entonces el diámetro del círculo de luz que dibuja el cono de perpendicularidad podría variar en un intervalo equiparable a aquel de la umbra de un eclipse total de sol, cuya magnitud podría alcanzar 150 km (Montenbruck y Pflieger, 2000). La estimación anterior supone una aproximación, pues la equivalencia entre el cono de perpendicularidad y la umbra lunar, es solo válida para el caso de un eclipse solar cenital en latitud ecuatorial (en el que la luna interrumpiría la luz solar al medio día de un equinoccio).

A medida que la declinación solar aumenta, el círculo de incidencia del cono de perpendicularidad se desplazará a una menor velocidad horizontal (menor dimensión de los paralelos de mayor latitud) y vertical (máxima velocidad de declinación se alcanza en el ecuador). A pesar de que el tamaño del sol aparente no presenta una variación importante desde el punto subsolar; el menor perímetro de la tierra en la latitud de los trópicos de Cáncer y Capricornio, en comparación con el Ecuador, produce una menor velocidad del anillo solar en su sendero diario por la bóveda celeste.

A la proporción de la radiación solar que es recibida por la superficie terrestre a un ángulo de 90° , se le denomina radiación normal, o perpendicular. Cuando un sitio recibe radiación normal, la distancia entre el sol y el sitio donde incide el cono de perpendicularidad se minimiza, en comparación con el resto del año (Pareja, 2010). El presupuesto de energía solar disponible por unidad de área también se maximiza para la superficie del planeta sobre la cual incide el cono de perpendicularidad, esto en comparación con cualquier otra superficie del globo, o con la misma superficie

en cualquier otro momento del año. La luz y el calor transmitidos a la tierra y a los océanos por la proyección normal de los rayos solares, cruzan la atmósfera de manera también perpendicular, por lo que las pérdidas por refracción, obstrucción y dispersión, son mínimas en comparación con las pérdidas a las que están sujetos los recursos solares entregados a la tierra mediante rayos solares oblicuos (Mayers, 2016; Prieto y Oliveira, 2018).

En virtud de que el sol envía luz omnidireccional, todo sitio del planeta donde el sol es visible recibe un presupuesto instantáneo de energía oblicua, llamada también radiación difusa. No obstante, la energía que incide de manera oblicua aumenta su interacción con los elementos de la atmósfera a medida que el ángulo de incidencia se aleja de la perpendicularidad; es decir, la cantidad de energía solar instantánea que un sitio obtiene del sol a lo largo del año, se reduce conforme aumenta el ángulo de incidencia de los rayos solares (Pareja, 2010). Lo anterior se debe tanto a la interacción de los rayos solares con la atmósfera, como al hecho de que una mayor oblicuidad implica que una misma cantidad de energía se distribuye en una mayor superficie. Por lo anterior, el aporte de energía transferido desde el sol a un sitio, es más alto cuando la incidencia de los rayos solares tiende a la perpendicularidad, lo cual sucede en las semanas previas y posteriores al día de la perpendicularidad. Dada la rotación terrestre, aun en el día de la perpendicularidad los rayos solares entregarán radiación normal y de baja oblicuidad (menor o igual a 15°) solo durante las 2 horas en que el sol aparente atraviesa el cenit.

6.1.2. Los recursos solares y la declinación del sol

La luz y el calor son los dos recursos solares de mayor importancia, dado que son las formas de energía que alimentan los ciclos vitales del planeta. Estos recursos son las formas originales de energía, ambas proporcionadas por el sol mediante un eficiente sistema de transmisión y distribución, logrado por la interacción gravitacional entre la tierra y el sol.

La declinación del sol define el ángulo entre la posición del sol y el ecuador terrestre (Méndez y Gómez, 2015); mientras que la perpendicularidad de los rayos solares ocurre cuando la declinación solar converge con la latitud de un sitio (Blanc *et al.* 2015). La perpendicularidad ocurre sobre todo sitio localizado en la misma banda latitudinal, en el transcurso de 24 horas, no obstante, es un evento efímero cuya duración es de aproximadamente 2 minutos; relación que deriva de que el sol aparente, de magnitud igual a 0.53 grados, recorre 360 grados en 24 h (Pal y Das, 2015). Una vez que el cono de perpendicularidad cubre una banda latitudinal de anchura igual al diámetro de las superficies de incidencia del mismo 0.53 grados $\approx$ 150 km este se desplaza verticalmente para incidir sobre una latitud vecina al día siguiente, continuando con el ciclo de declinación.

El estudio de la distribución de la radiación normal sobre la superficie del planeta, puede ayudar a la valoración del suministro de recursos solares en el globo terráqueo. El patrón de distribución del calor solar tiene una influencia importante en la ciclicidad anual de los elementos del estado del tiempo, mientras que la distribución de la luz modula la producción primaria, al promover la fotosíntesis. Por lo expuesto, la declinación solar tiene una estrecha relación con el clima (Mayers,

2016), así como con el diseño de la totalidad del ambiente físico y con las poblaciones biológicas.

6.1.3. El ciclo anual de declinación y las estaciones del año

La inclinación del planeta, en conjunto con su rotación y traslación, modifican el ángulo de incidencia de los rayos solares sobre la superficie terrestre. La rotación es responsable de que el cono de perpendicularidad dibuje diariamente una circunferencia característica sobre una banda latitudinal dada alrededor del planeta; mientras que la traslación permite que esa banda se desplace a otra latitud, diariamente (Lynch, 2012). El desplazamiento del cono de perpendicularidad es cuantificable, debido a que la declinación solar indica la posición del sol aparente.

Aunque solo las latitudes localizadas entre los trópicos de Cáncer y Capricornio reciben los recursos solares de manera perpendicular, el patrón anual de declinación modula el estado del tiempo, lo que a su vez determina las estaciones del año, en cada sitio del planeta (Vardavas y Taylor, 2007). El verano ocurre a consecuencia de la acumulación de calor, mientras que el invierno ocurre por la pérdida recurrente de calor del otoño; ambos ciclos térmicos debidos a los ángulos de incidencia de los rayos solares. Cuando el cono de perpendicularidad viaja a través del hemisferio norte, suceden la primavera y verano boreales; en contraparte, cuando el cono se desplaza por el hemisferio sur ocurren la primavera y verano australes.

6.1.4. El analema

La manera más adecuada de representar el patrón de declinación del sol sobre la esfera terrestre es un analema. La figura así denominada ha sido construida desde la antigüedad, primero colocando una estaca de longitud fija sobre la superficie del sitio y midiendo la posición y el ángulo de su sombra a lo largo del año. Más recientemente, el analema se logra tomando una foto diaria del sol aparente, siempre desde una posición fija en el mismo sitio, y combinando después las 365 fotos del año. Dos condiciones deben cumplirse para que la figura sea representada de manera correcta, (1) que cada día la posición del sol sea registrada a la misma hora del día, en tiempo medio, y (2) que las 365 fotografías del año sean concentradas en una sola imagen.

Un analema es un gráfico bidimensional que contiene en el eje de las abscisas “la diferencia entre el tiempo medio y el tiempo solar”, relación conocida como ecuación del tiempo, y en el eje de las ordenadas “el patrón anual de declinación solar” (Lynch, 2012). El analema más adecuado para representar la relación entre el patrón de declinación solar y las estaciones del año será aquel que indique la posición del sol a las 12:00 pm, dado que la rotación y traslación terrestres provocan que toda representación no meridional produzca un gráfico diagonal. La representación que aportaría mayor información sería un analema meridional y ecuatorial. La Figura 2 muestra un analema meridional basado en el modelo geométrico (Spencer, 1971), en el que se indica la sección que corresponde a cada estación del año.

La importancia del analema radica en que el patrón de declinación del sol regula la distribución tanto de la radiación normal como de la radiación oblicua; explicando así la distribución de los recursos solares. La posición y dirección del patrón de declinación son característicos de cada estación del año. En invierno y primavera, los cambios de declinación son positivos, dado que el sol aparente viaja del trópico de Capricornio hacia el trópico de Cáncer; en tanto que en verano y otoño los cambios de declinación son negativos, pues el sol aparente viaja del trópico de Cáncer al trópico de Capricornio. Los solsticios y equinoccios, que son las posiciones clave del ciclo de declinación, enmarcan tanto el fin de una estación del año como el principio de la siguiente (Lynch, 2012). Durante cada estación del año, las relaciones entre las variables climáticas difieren. Por esta razón, la exploración de las asociaciones entre la declinación solar y las constantes climatológicas puede realizarse para cada estación del año. A la par, debe analizarse la relación entre las mismas variables con base en la información completa de todo un año, para entender el patrón de asociación en el ciclo anual de declinación.

6.2. Elección de sitios y bandas latitudinales

6.2.1. Selección estratégica de los sitios

Para el estudio de la asociación entre la declinación del sol y los elementos del clima, se eligieron seis lugares del globo terráqueo, dos de ellos localizados en la vecindad del trópico de Cáncer, dos en el trópico de Capricornio, y dos en el Ecuador. Los sitios elegidos fueron: (1) Fresnillo, municipio de Zacatecas, México; (2) Shantou, Provincia de Guangdong, China; (3) San Pablo, capital de la provincia de San Pablo, Brasil; (4) Polokwane, capital de Limpopo, Sudáfrica; (5) Quito, capital

de Ecuador; y (6) Mbandaka, en la Provincia de Ecuador, República del Congo, África (Figura 1).

Debido a que el ciclo de declinación solar define la distribución de la radiación normal y oblicua que recibe un sitio, los sitios se eligieron en función de su latitud. Bajo la hipótesis del presente trabajo, los sitios localizados en la misma latitud y hemisferio tienen potencial para desarrollar climas equivalentes (sitios 1 vs 2, o 3 vs 4); alternatively, los sitios localizados a la misma latitud pero en diferente hemisferio tienen potencial para desarrollar climas similares (sitios 1 vs 3 o 4, y 2 vs 3 o 4). No obstante, la altitud (Blumthaler *et al.*, 1997) y la distancia entre el sitio y el océano (Emanuel, 2020) influyen también en las discrepancias en los elementos del estado del tiempo entre sitios de latitud equivalente (1 vs 2, 3 vs 4, 5 vs 6, o bien 1 vs 3 o 4, y 2 vs 3 o 4).

6.2.2. Definición de las bandas latitudinales arbitrarias

Para evaluar la variación en los elementos del clima de cada sitio en función a la declinación solar, los datos se promediaron de acuerdo con 5 bandas latitudinales arbitrarias, dentro de cada hemisferio. Las bandas se definieron desde el Ecuador hacia los cada uno de los trópicos, y fueron nombradas E, A, B, C y T. La banda T comprende 3.5° de latitud en la vecindad del trópico de Cáncer o Capricornio, mientras que cada uno de los cinturones restantes comprende 5° de latitud. Las dos bandas E comprenden 10° , y cada una recorre 5 grados desde el Ecuador hacia uno de los trópicos. Se utilizaron los mismos nombres para las bandas de ambos hemisferios.

De acuerdo con el ciclo de declinación, la perpendicularidad de los rayos solares viaja en primavera desde el Ecuador hacia el trópico de Cáncer, y en verano desde el trópico hacia el Ecuador; recorriendo las cinco bandas en dirección norte y luego en dirección sur. Por lo tanto, las bandas son transitadas por el sol aparente en dos ocasiones durante seis meses (periodo entre dos equinoccios). El ciclo de declinación de verano es idéntico al de primavera, pero sucede en orden inverso; mientras que la misma relación existe entre las estaciones de otoño e invierno.

6.3. Relación entre la declinación solar y los elementos del clima en seis sitios del planeta.

En los Cuadros 1 a 6 se presentan las medias de temperatura, humedad relativa y precipitación para los seis sitios, de acuerdo con cinco bandas arbitrarias de latitud. En las Figuras 3, 4, y 5 se grafica la relación entre la declinación solar y cada variable, utilizando la información completa de los 365 días del año.

La asociación de la temperatura con la humedad del aire y la precipitación, ha sido tema recurrente en investigación (Njau, 1995). No obstante, no se dispone de información suficiente sobre la relación numérica directa entre el ángulo de declinación solar y los elementos del clima, a nivel global. A continuación, se discute la influencia de la declinación solar sobre tres descriptores primordiales del estado del tiempo, en función a la información de seis sitios del planeta.

6.3.1. Sitios localizados en el trópico de Cáncer

La temperatura promedio de las bandas latitudinales para los sitios 1 y 2 (Fresnillo y Shantou) oscila en un rango de 13.2° y 13.5°, respectivamente (Cuadros 1 y 2). En estos sitios, una menor temperatura ocurre cuando el ciclo de declinación toca el trópico de Capricornio; en tanto que la temperatura incrementa a medida que la declinación solar se acerca al trópico de Cáncer (invierno y primavera); es decir, la temperatura de las bandas latitudinales arbitrarias depende directamente de la posición de la perpendicularidad de los rayos solares (Figura 3). En Fresnillo, la humedad relativa oscila entre 25 y 77 %, supera el 60 % al final de la primavera, y se mantiene sobre ese valor durante todo el verano y la mitad del otoño (Cuadro 1). En Shantou la humedad relativa varía entre 71 a 89 %, y al igual que en Fresnillo, un mayor y más estable registro sucede durante el verano (82 a 88 %, Cuadro 2, Figura 4).

En los sitios del trópico de Cáncer, se registran lluvias a finales de primavera, durante el transcurso del verano y en la primera mitad del otoño (Cuadros 1 y 2; Figura 5). En Shantou la mayor parte de la precipitación se registra también durante este periodo, pero pueden ocurrir lluvias en cualquier estación del año, con excepción del periodo de declinación de la banda C en el invierno. Los registros de precipitación coinciden con períodos de alta humedad relativa; aunque la definición de “una alta humedad” difiere entre sitios. Por ejemplo en Fresnillo, valores de humedad relativa superiores al 70 % caracterizan a la estación lluviosa, mientras que en Shantou la mayor precipitación ocurre cuando la humedad supera el 80 %. Los mayores registros de temperatura, humedad y precipitación registrados en

Shantou, en comparación con aquellos de Fresnillo, pueden deberse a que Shantou se encuentra más cerca del océano y su altitud es de tan sólo 50 msnm (Cuadro 11).

6.3.2. Sitios localizados en el trópico de Capricornio

Las medias de temperatura, humedad relativa, y precipitación de San Pablo y Polokwane se muestran en los cuadros 3 y 4, respectivamente, de acuerdo con las cinco bandas de declinación. La temperatura de San Pablo, oscila en un rango de 6.9 °C (17.4 a 24.3 °C), mientras que la de Polokwane oscila en un rango de 12.8 °C (12.2 a 25 °C). Para ambos sitios, la temperatura mínima se registra cuando la declinación solar se encuentra en bandas adyacentes o en vecindad al trópico de Cáncer, mientras que la máxima ocurre cuando la declinación converge con el trópico de Capricornio.

Para los sitios ubicados en el trópico de Capricornio, la declinación varía en relación directamente proporcional con la temperatura en el invierno y la primavera australes, mientras que la relación es inversamente proporcional en las estaciones de verano y otoño. Los adjetivos boreal y austral se usan para hacer referencia al hemisferio norte o al hemisferio sur, respectivamente.

En San Pablo, la humedad relativa varía entre 57.6 °C y 83.5 °C (Cuadro 3, Figura 4), una variación menor a la registrada en Polokwane y Fresnillo, sitios con los que comparte latitud pero que están localizados a mayor altitud y distancia al océano (y que están en el hemisferio contrario). La humedad relativa de las bandas latitudinales arbitrarias es siempre mayor en San Pablo, en comparación con los

dos sitios referidos, mientras que es esta variable es similar entre la primavera y el verano (Figura 4), en los que supera 70 %. La época de máxima precipitación de San Pablo abarca toda la primavera y el verano australes; no obstante, se presentan lluvias importantes también en otoño e invierno.

En Polokwane, la humedad relativa oscila entre 46.9 % y 81.8 % durante el año (Cuadro 4), alcanza sus valores máximos en el verano, y es estable en esta estación, manteniéndose por encima de 70 %. La época de mayor precipitación comienza cuando la declinación solar se aproxima a la latitud del sitio, a mitad de la primavera, y continúa durante el verano austral. En contraparte, durante las estaciones de otoño e invierno, la precipitación es escasa e infrecuente. Los mayores registros de precipitación coinciden, en las estaciones de primavera y verano australes, con los mayores registros de humedad relativa.

6.3.3. Sitios de los trópicos de Cáncer y Capricornio

En los Cuadros 1 a 4 se presentan las medias de temperatura, humedad relativa y precipitación de cada una de las 20 bandas arbitrarias, para los sitios localizados en los trópicos. Las temperaturas medias máximas registradas en los sitios 1 y 2 del hemisferio norte convergen en el tiempo con las temperaturas mínimas de los sitios 3 y 4 en el hemisferio sur, y viceversa.

En los sitios 1 a 4, las máximas temperaturas corresponden con la incidencia perpendicular de los rayos solares, en tanto que las temperaturas mínimas coinciden con la máxima oblicuidad de los mismos. Los elementos del estado del tiempo de Fresno y Shantou (sitios 1 y 2) varían de manera similar a aquellos de

San Pablo y Polokwane (sitios 3 y 4), en respuesta al ciclo anual de declinación solar.

A pesar, de que los sitios 1 y 2 comparten latitud con los sitios 3 y 4, al no compartir hemisferio, se producen dos diferencias importantes. Primero, las estaciones de primavera y verano del hemisferio sur (sitios 3 y 4) convergen en el tiempo con las estaciones de otoño e invierno del hemisferio norte. Segundo, en virtud de que los hemisferios norte y sur presentan una cobertura de océanos 60 % y 80 %, respectivamente (Webb, 2001), existe una importante variación en los elementos del estado del tiempo entre los sitios que se localizan en diferente hemisferio. La razón por la que la última diferencia es importante radica en que todas las variables climáticas están conectadas mediante “el ciclo del agua” (Schmitt y Wijffels 1993).

Para sitios localizados en la vecindad de los trópicos de Cáncer y Capricornio, la temperatura se eleva en la medida que el ángulo de incidencia de los rayos solares se acerca a la normalidad (invierno y primavera correspondientes). A partir de cierto umbral de temperatura, se eleva a la par la humedad relativa (primavera); después la elevación de la humedad relativa promueve una temperatura estable, probablemente debido a que la nubosidad y la humedad relativa interceptan la radiación solar y previenen el calentamiento de la superficie (verano). Los relativamente altos registros de temperatura y humedad relativa, así como la constancia en dichos registros durante la última mitad de la primavera y todo el verano, coinciden con la ocurrencia de la precipitación.

6.3.4. Sitios localizados en la franja ecuatorial

Los sitios elegidos para caracterizar la banda ecuatorial presentan diferencias importantes con respecto a su altitud y distancia al océano (Cuadro 11), razones por las que se espera una marcada variación en los elementos del estado, al comparar estos sitios. La discrepancia mayor entre estos fue la diferencia en su temperatura, la cual puede deberse a que Quito se encuentra a 2500 m más de altitud que Mbandaka. No obstante, los rangos de oscilación de temperatura y humedad relativa revelan una fuerte estabilidad en los elementos del estado del tiempo dentro de cada uno de los sitios ecuatoriales (Cuadros 5 y 6; Figuras 3 a 5).

La mínima variación registrada en los elementos del estado del tiempo en Quito y en Mbandaka, refleja un clima estable y aparentemente desligado de la declinación solar. Dicha aparente independencia refleja en realidad una dependencia casi absoluta entre la estabilidad de los elementos del estado del tiempo y la distribución armónica del calor solar en los sitios de la franja ecuatorial, en función al patrón anual de declinación. La perpendicularidad de los rayos solares ocurre dos veces al año en estos sitios, mientras que los dos intervalos entre eventos de perpendicularidad, son equivalentes tanto en longitud como en el patrón de distribución del calor solar. Un trabajo previo confirma una marcada similitud entre el patrón de variación de varios elementos del clima, en la franja ecuatorial; en particular, el estudio muestra la relación de la evaporación del agua con la radiación global, la temperatura y la humedad relativa (Tan *et al.*, 2007).

Los sitios localizados en la franja ecuatorial presentan una temperatura y humedad relativa constantes a lo largo del año (Figuras 3 y 4; Cuadros 4 y 5). La estabilidad

térmica, en estrecha relación con la alta y casi constante humedad de estos sitios, se asocia con la ocurrencia frecuente de precipitación durante todo el año. Una humedad ligeramente mayor, así como una alta precipitación, fueron registradas en los sitios ecuatoriales durante la primavera y verano australes, en comparación con aquellas registradas durante las estaciones de otoño e invierno. Este hecho produce una similitud entre los sitios ecuatoriales y los del trópico de Capricornio, simulando en Quito y Mbandaka patrones climáticos típicos del hemisferio sur.

La estabilidad térmica e hídrica del aire registrada en sitios ecuatoriales es consecuencia de que la velocidad del ciclo de declinación solar es máxima en el ecuador (equinoccios) y mínima en los trópicos (solsticios), lo que mantiene la radiación por cortos periodos en perpendicularidad y por largos periodos en oblicuidad moderada. Por ejemplo, a diferencia de los trópicos de Cáncer y Capricornio, el ciclo de declinación solar pasa por el ecuador dos veces al año, y promueve cortos periodos de alta exposición (perpendicularidad) y largos periodos de baja oblicuidad de los rayos solares. En resumen, la franja ecuatorial recibe la mínima dosis de perpendicularidad y el máximo presupuesto de energía oblicua, dado que la oblicuidad máxima de 66.5° ($66.5 = 90 - 23.5^\circ$), ocurre al momento de los solsticios.

El paso del ciclo de declinación por el Ecuador, promueve una mayor humedad y menor temperatura en los sitios ecuatoriales cuando el sol procede del hemisferio sur (equinoccio de primavera), en comparación con los datos registrados cuando el sol viaja desde el hemisferio norte (equinoccio de verano). La situación anterior es compatible con la entrada del verano en los sitios 1 a 4, en los que la temperatura

deja de elevarse, bajo el control de la alta humedad del ambiente; condiciones que convergen con una mayor precipitación. La reducción en la temperatura registrada durante el verano es explicada en términos de la intercepción de la radiación solar, lograda por la alta humedad relativa y la abundante nubosidad, típicas de la estación lluviosa.

El Ecuador terrestre es la zona climática más estable del planeta. Los sitios cercanos al ecuador terrestre presentan una humedad y temperatura relativamente constantes, lo que puede estar relacionado con la ocurrencia de precipitación pluvial durante todo el año. Para los sitios localizados en la franja ecuatorial no se diferencian las cuatro estaciones del año. No obstante, una mayor cantidad de precipitación ocurre en los dos sitios estudiados en esta franja cuando la declinación es negativa y la perpendicularidad de los rayos solares se encuentra en vecindad del trópico de Capricornio; lo cual puede deberse a la mayor proporción de océanos característica del hemisferio sur. Este hecho provoca que la distribución de la precipitación de los dos sitios ecuatoriales bajo estudio, siga un patrón que se asemeja a los sitios del trópico de Capricornio; por ejemplo 60 % de la precipitación sucede en la primavera y verano australes, mientras que el verano boreal es el periodo de menor precipitación.

6.4. Correlación entre la declinación solar y los elementos del clima

En los Cuadros 7 a 9 se presenta la correlación de la declinación solar con la temperatura, la humedad relativa y la precipitación. Cada cuadro contiene la información de solo un sitio, organizada por estación del año, comenzando por los

lugares localizados en los trópicos de Cáncer (Fresnillo y Shantou) y Capricornio (San Pablo y Polokwane), y terminando con los lugares de la franja ecuatorial (Quito y Mbandaka). En el Cuadro 10 se presentan los coeficientes de correlación globales entre los elementos del clima y la declinación solar, con base en la información de todo el año, para cada uno de los seis sitios bajo estudio.

6.4.1. Coeficientes de correlación intra-estación

Las correlaciones obtenidas parcializando la información de cada sitio, por estación del año (Cuadros 7 a 9), no permitieron detectar la asociación lineal entre la declinación solar y los elementos del clima. La interacción a que están sujetas en el corto plazo las variables climáticas no permiten establecer una asociación unidireccional entre la declinación y cada uno de los elementos para el análisis intra-estación. Por ejemplo, la temperatura puede elevar la humedad relativa a razón de la evaporación del agua de los océanos (Emanuel, 2020); mientras que la humedad del aire merma la radiación solar y puede afectar la temperatura superficial. Otro ejemplo de la interacción entre los elementos del estado del tiempo, es la relación entre la humedad relativa y la precipitación. La humedad relativa puede alcanzar el punto de saturación (100 %), lo que a su vez promueve la precipitación (Oyewole *et al.*, 2014); por otra parte, la precipitación implica transferencia de humedad del aire al suelo y al océano. La presencia de agua líquida continental, así como la evapotranspiración vegetal promovida por la humedad del suelo, ayudan a elevar nuevamente la humedad relativa del aire cerca de la superficie.

A partir de la correlación intraestacional se detectó la fuerte asociación entre la humedad relativa y la precipitación. En los sitios 1 a 4, localizados en los trópicos,

los coeficientes de correlación fueron siempre altos y tuvieron una significancia contundente (Cuadros 1 a 4; $0.48 < r < 0.79$; $P < 0.001$), esto para cada una de las cuatro estaciones. Sin embargo, en el caso de los sitios ecuatoriales, la relación intra-estación solo fue importante para el otoño e invierno (boreales) en Quito, pero no en Mbandaka.

6.4.2. Coeficientes de correlación globales

De acuerdo con los coeficientes de correlación globales obtenidos para los sitios localizados en los trópicos de Cáncer y Capricornio, los tres elementos del estado del tiempo (los considerados aquí) aumentan en magnitud conforme la incidencia del cono de perpendicularidad de los rayos solares es más cercana a cada sitio en cuestión. La reducción en la oblicuidad solar (lo que implica invertir el signo de la declinación si el sitio está ubicado en el hemisferio sur) se correlaciona de manera directamente proporcional con la temperatura (0.71 a 0.83 ; $P < 0.01$), la humedad relativa (0.15 a 0.55 ; $P < 0.01$), y la precipitación (0.28 a 0.38 ; $P < 0.01$).

Los coeficientes de correlación global entre la precipitación y la humedad relativa fueron siempre superiores a 0.41 ($P < 0.01$) para los seis sitios estudiados. Mientras que la correlación entre precipitación y la humedad relativa fue moderada (0.12 a 0.24), siendo positiva, para los sitios del trópico y negativa para los sitios ecuatoriales. Con el análisis de la información de un solo año se estableció una relación directa entre la declinación y los tres descriptores principales del estado del tiempo.

Las correlaciones obtenidas a partir de la información completa de cada sitio, fueron más útiles para demostrar la importante influencia de la declinación solar sobre el clima de un sitio. La razón de la estrecha relación entre la declinación y la temperatura es debida a la variación en el presupuesto de radiación solar que ocurre en un sitio en función al ángulo de incidencia de los rayos solares. El control de los elementos del estado del tiempo es iniciado y mediado por la declinación solar, en función de su influencia sobre la distribución del presupuesto de radiación, logrado por la incidencia del cono de perpendicularidad de los rayos solares sobre la superficie de la tierra (Prieto y Oliveira, 2018). La perpendicularidad de los rayos solares es la causa primordial de la variación en los elementos del estado del tiempo.

Los coeficientes de correlación globales entre la declinación solar y cada uno de los tres elementos del clima, fueron altos en Quito (Cuadro 10) para la información de todo el año, cuyo patrón de variación climática se asemeja a los sitios del trópico de Capricornio, dado que las tres variables se incrementan a medida que la declinación se aproxima al trópico de Capricornio. Además, los coeficientes de correlación global entre la declinación y los elementos del clima se comportan de manera similar en Quito y en los sitios del hemisferio sur (sitios 3 y 4). A pesar de la estabilidad climática y de la aparente independencia entre la declinación y la temperatura y humedad en los sitios 5 y 6 (de acuerdo con los coeficientes de correlación intra-estacional) los patrones de declinación solar son la causa principal de la constancia en la temperatura y humedad relativa de estos sitios.

6.4.3. Relación entre los elementos del estado del tiempo

En un análisis simplificado, cuando la declinación solar converge con la latitud de un sitio, los rayos solares cruzan la atmósfera de manera perpendicular, elevando la temperatura del lugar (Ramanathan, 1987). Este hecho ocurre para toda una franja latitudinal, alrededor del globo terráqueo, en el transcurso de 24 h. La porción de dicha franja, que está representada por océanos, muestra una alta tasa de evaporación hídrica en comparación con cualquier otra banda latitudinal o con la misma banda en diferente día (Bigg *et al.*, 2003). La humedad relativa aumenta a la par con la temperatura (Tan *et al.*, 2007), en función de la incidencia de rayos solares perpendiculares o de baja oblicuidad. La acumulación progresiva de humedad en la atmósfera, promueve las condiciones ideales para que se establezca el periodo de lluvias (Oyewole *et al.*, 2014). El eslabón más elusivo de demostrar en el ciclo del agua simplificado “declinación solar - temperatura - humedad - precipitación” fue la relación entre la temperatura y la humedad relativa; no obstante, la declinación y la precipitación mostraron una asociación positiva con la temperatura y la humedad relativa.

Un análisis más completo deberá incluir una mayor cantidad de sitios, así como un mayor intervalo de tiempo. Los sitios elegidos deberán presentar una variación en altitud (Blumthaler *et al.*, 1997) y en distancia al mar (Emanuel, 2020), dado que estos factores influyen de manera decisiva en la temperatura, humedad relativa, y precipitación pluvial de cada lugar. Algunos factores adicionales que interfieren con los elementos del clima son fenómenos como la corriente a chorro, el efecto Coriolis (Njau, 1995), y la zona de convergencia intertropical.

7. CONCLUSIONES

El presupuesto estacional de radiación normal que recibe cada latitud del planeta está estrechamente relacionado con la incidencia perpendicular de los rayos solares, la que a su vez puede ser estudiada mediante la declinación solar. El patrón de declinación solar muestra una asociación directamente proporcional con la temperatura, la humedad relativa y la precipitación. La cercanía al Ecuador, o al océano, así como baja altitud, promueven mayores registros de temperatura, humedad y precipitación. Semejanzas en la variación estacional de los elementos del estado del tiempo entre Fresnillo y Shantou, entre San Pablo y Polokwane, así como entre Quito y Mbandaka, revelan que el patrón de declinación solar tiene potencial para promover zonas de equivalencia climática en sitios localizados en la misma latitud y en el mismo hemisferio. Esta propuesta resulta una consecuencia obvia de que la perpendicularidad de los rayos solares recorra una misma banda latitudinal a lo largo de cada día solar.

Semejanzas en la variación estacional de los elementos del estado del tiempo entre los sitios Fresnillo y Polokwane, o entre Shantou y San Pablo, indican que la ocurrencia de un patrón análogo de declinación solar, promueven zonas de similitud climática en sitios localizados en la misma latitud, pero en diferente hemisferio. Los elementos del estado del tiempo serán comparables en tiempos diferentes, ya que las estaciones del año se invierten entre hemisferios.

La coevolución entre los organismos vivos y el ambiente que habitan está mediada por la distribución y presupuesto de recursos solares. El calor y la luz del sol inician el ciclo del agua y la fotosíntesis, respectivamente. Dada la estrecha relación entre

el sol y los elementos del clima, se asume que el ciclo anual de declinación solar es clave en la generación y mantenimiento de los componentes físicos y biológicos de los biomas del planeta. Una población tiene garantizada su supervivencia en un lugar, solo si esta se encuentra evolutivamente adaptada a los elementos del estado del tiempo predominantes en el sitio.



Figura 1. Localización de los seis sitios elegidos para analizar la correlación entre la declinación solar y los elementos del estado del tiempo.

Fuente: Wordpress.com (2023)

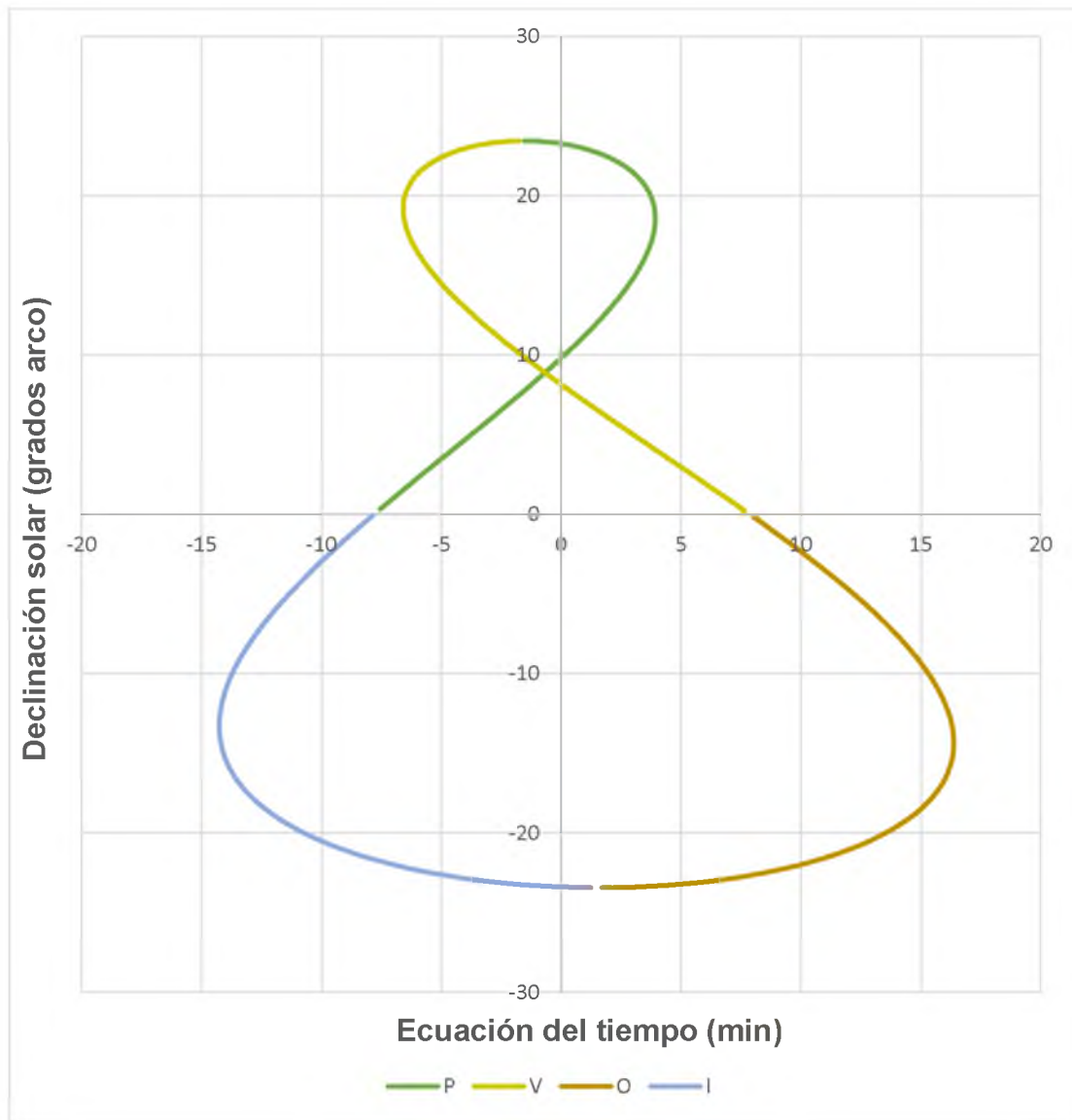


Figura 2. Relación entre la ecuación del tiempo y la declinación solar (analema).

P: Primavera; V: Verano; O: Otoño; I: Invierno.

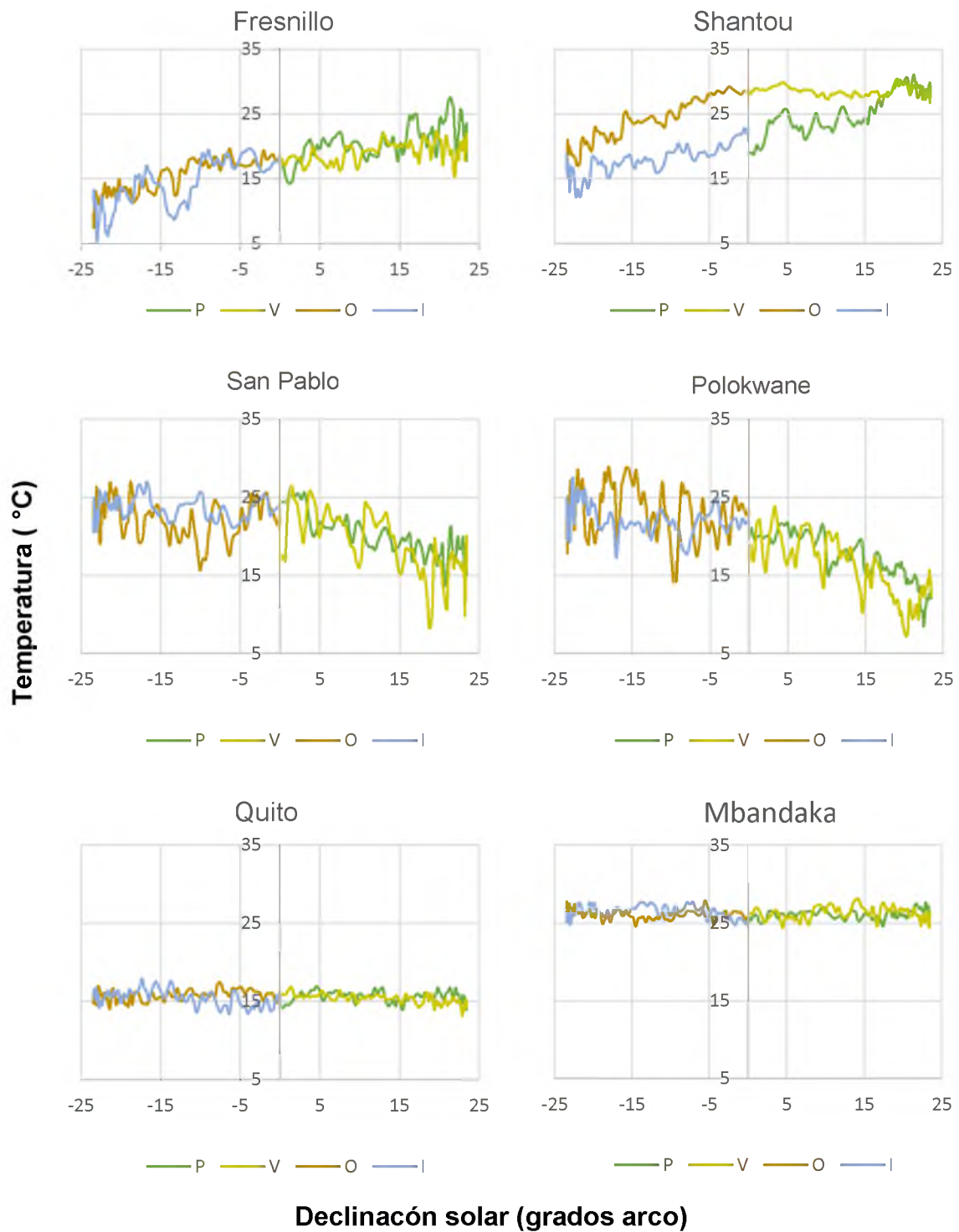
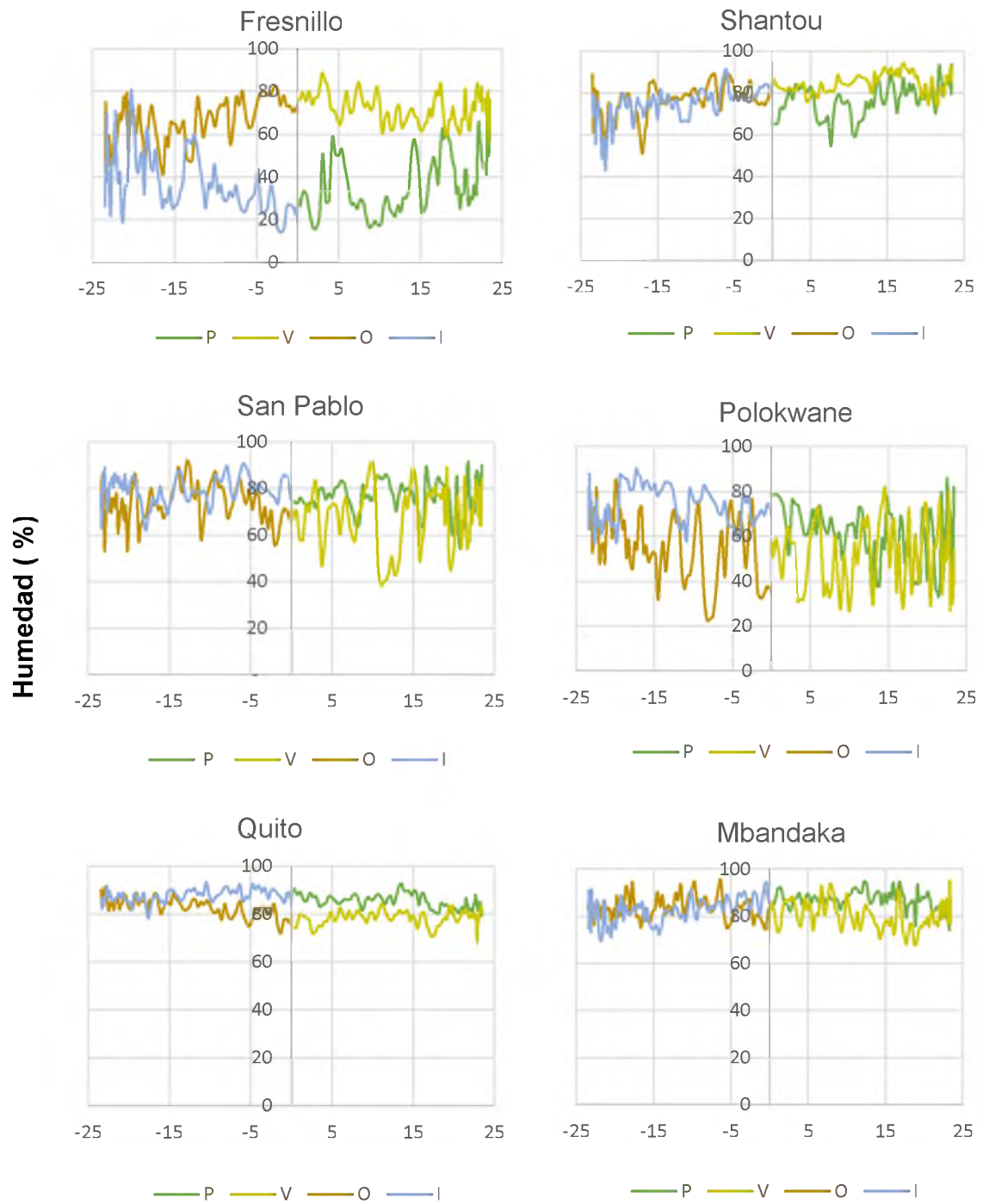


Figura 3. Relación entre la declinación solar y la temperatura superficial a lo largo del año 2021.

P: Primavera; V: Verano; O: Otoño; I: Invierno.



Declinación solar (grados arco)

Figura 4. Relación entre la declinación solar y la humedad a lo largo del año 2021.

P: Primavera; V: Verano; O: Otoño; I: Invierno.

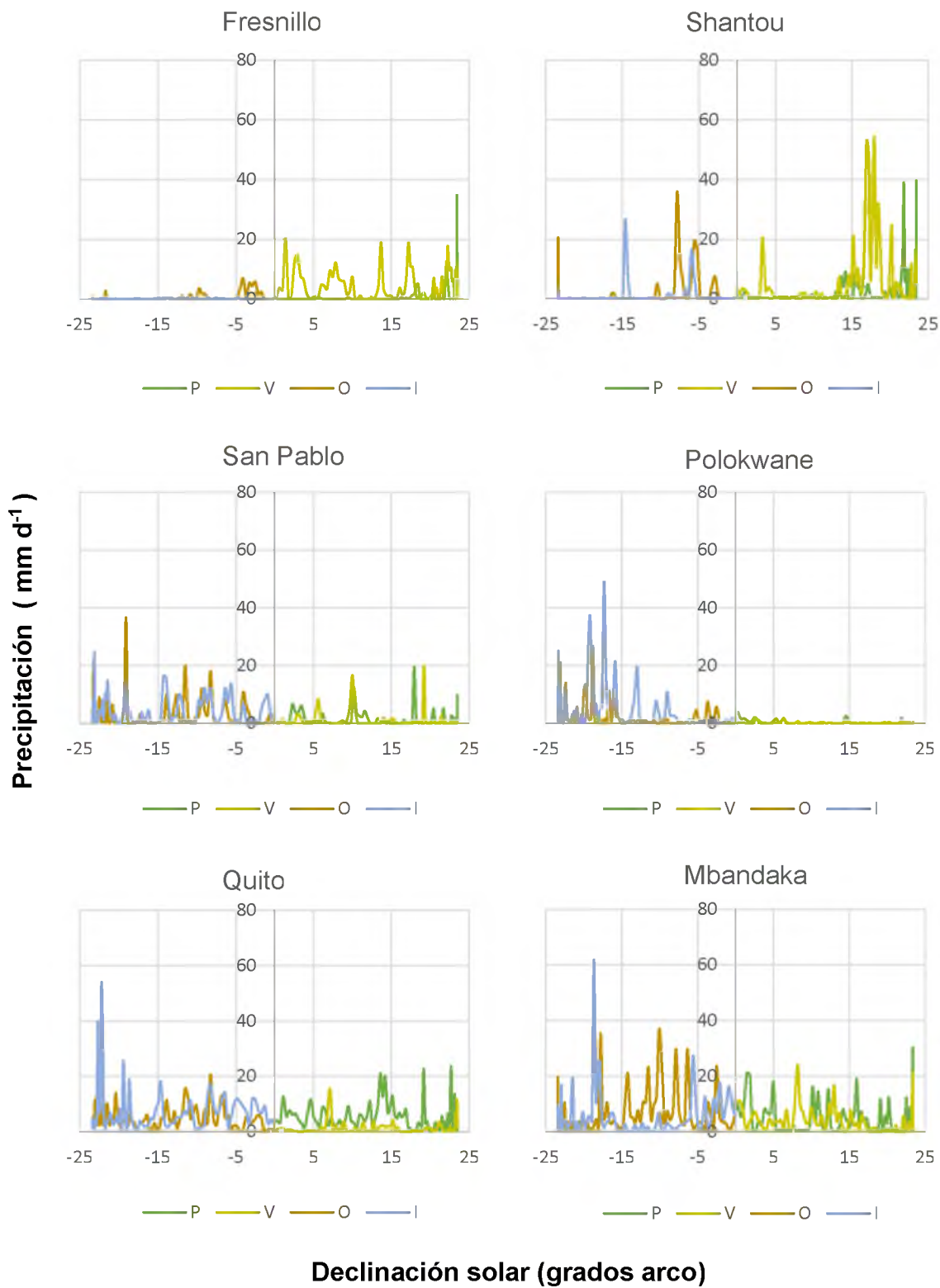


Figura 5. Relación entre la declinación solar y la precipitación a lo largo del año 2021.

P: Primavera; V: Verano; O: Otoño; I: Invierno.

Cuadro 1. Temperatura, humedad relativa, y precipitación en relación con la declinación solar para Fresnillo, Zacatecas, México.

E	Cinturón	Latitud (grados)	Inicio	TE (d)	D	T (°C)	HR (%)	P (mm d ⁻¹)
P	Ecuador	[0,5)	3/22	12	2.5	17.8	32.1	0.0
	A	[5, 10)	4/3	14	7.5	20.6	29.5	0.1
	B	[10, 15)	4/17	15	12.6	19.5	32.9	0.0
	C	[15, 20)	5/2	19	17.6	21.7	43.1	0.7
	Cáncer	[20,23.5]	5/21	33	22.3	23.1	48.8	2.8
V	Cáncer	(23.5,20]	6/23	32	22.2	19.5	72.3	5.3
	C	(20, 15]	7/25	19	17.6	20.1	68.5	3.5
	B	(15, 10]	8/13	15	12.7	20.0	66.9	2.2
	A	(10, 05]	8/28	14	7.6	17.9	75.0	5.1
	Ecuador	(5, 0)	9/11	13	2.6	18.0	77.3	5.6
O	Ecuador	[0, -5)	9/24	13	-2.5	17.7	76.8	2.4
	A	[-5, -10)	10/7	13	-7.5	17.7	70.1	0.6
	B	[-10, -15)	10/20	15	-12.5	16.3	62.2	0.3
	C	(-15, -20]	11/4	19	-17.7	13.2	60.5	0.1
	Capricornio	[-20, -23.5]	11/23	30	-22.3	12.1	59.3	0.1
I	Capricornio	(-23.5, -20]	12/23	30	-22.3	9.9	44.2	0.0
	C	(-20, -15]	1/22	18	-17.7	14.1	42.4	0.0
	B	(-15, -10]	2/9	15	-12.6	11.7	42.2	0.0
	A	(-10, -5]	2/24	13	-7.5	17.9	30.4	0.0
	Ecuador	(-5, 0)	3/9	13	-2.4	17.9	25.1	0.0

E: Estación, P: Primavera; V: Verano, O: Otoño & I: Invierno. TE (d): Tiempo de exposición en días, D: Declinación, T: Temperatura, HR: Humedad, & P: Precipitación.

Cuadro 2. Temperatura, humedad relativa y precipitación en relación con la declinación solar para Shantou, China.

E	Cinturón	Latitud (grados)	Inicio	TE (d)	D	T (°C)	HR (%)	P (mm d ⁻¹)
P	Ecuador	[0,5)	3/22	12	2.5	22.2	76.9	0.4
	A	[5, 10)	4/3	14	7.5	23.2	71.6	0.4
	B	[10, 15)	4/17	15	12.6	23.9	72.6	1.7
	C	[15, 20)	5/2	19	17.6	27.4	80.0	1.8
	Cáncer	[20,23.5]	5/21	33	22.3	28.8	83.0	5.7
V	Cáncer	(23.5,20]	6/23	32	22.2	28.6	84.0	5.2
	C	(20, 15]	7/25	19	17.6	28.6	88.3	16.8
	B	(15, 10]	8/13	15	12.7	28.0	86.9	2.0
	A	(10, 05]	8/28	14	7.6	28.4	82.4	0.8
	Ecuador	(5, 0)	9/11	13	2.6	29.0	81.9	3.2
O	Ecuador	[0, -5)	9/24	13	-2.5	28.4	78.3	1.2
	A	[-5, -10)	10/7	13	-7.5	26.4	81.9	8.0
	B	[-10, -15)	10/20	15	-12.5	24.0	78.0	0.5
	C	(-15, -20]	11/4	19	-17.7	22.2	73.1	0.3
	Capricornio	[-20, -23.5]	11/23	30	-22.3	19.0	71.6	1.0
I	Capricornio	(-23.5, -20]	12/23	30	-22.3	15.3	66.8	0.2
	C	(-20, -15]	1/22	18	-17.7	17.3	73.9	0.0
	B	(-15, -10]	2/9	15	-12.6	17.5	73.0	2.4
	A	(-10, -5]	2/24	13	-7.5	19.1	79.4	2.5
	Ecuador	(-5, 0)	3/9	13	-2.4	20.5	79.4	0.1

E: Estación, P: Primavera; V: Verano, O: Otoño & I: Invierno. TE (d): Tiempo de exposición en días, D: Declinación, T: Temperatura, HR: Humedad, & P: Precipitación.

Cuadro 3. Temperatura, humedad relativa y precipitación en relación a la declinación solar para San Pablo, Brasil.

E	Cinturón	Latitud (grados)	Inicio	TE (d)	D	T (°C)	HR (%)	P (mm d ⁻¹)
O	Ecuador	[0,5)	3/22	12	2.5	23.8	75.3	2.0
	A	[5, 10)	4/3	14	7.5	21.4	75.6	0.5
	B	[10, 15)	4/17	15	12.6	19.5	80.4	2.0
	C	[15, 20)	5/2	19	17.6	18.3	76.0	1.2
	Cáncer	[20,23.5]	5/21	33	22.3	17.4	76.2	1.2
I	Cáncer	(23.5,20]	6/23	32	22.2	15.8	70.8	0.2
	C	(20, 15]	7/25	19	17.6	15.5	69.7	1.3
	B	(15, 10]	8/13	15	12.7	21.1	57.6	0.6
	A	(10, 05]	8/28	14	7.6	20.7	72.4	2.5
	Ecuador	(5, 0)	9/11	13	2.6	22.5	67.1	0.6
P	Ecuador	[0, -5)	9/24	13	-2.5	23.4	67.7	2.1
	A	[-5, -10)	10/7	13	-7.5	20.6	78.3	4.4
	B	[-10, -15)	10/20	15	-12.5	20.3	79.3	3.8
	C	(-15, -20]	11/4	19	-17.7	22.3	72.1	2.6
	Capricornio	[-20, -23.5]	11/23	30	-22.3	23.7	72.7	4.2
V	Capricornio	(-23.5, -20]	12/23	30	-22.3	23.6	79.7	5.4
	C	(-20, -15]	1/22	18	-17.7	24.3	74.8	2.4
	B	(-15, -10]	2/9	15	-12.6	23.5	78.4	4.5
	A	(-10, -5]	2/24	13	-7.5	22.5	83.5	6.9
	Ecuador	(-5, 0)	3/9	13	-2.4	23.7	79.5	2.7

E: Estación, P: Primavera; V: Verano, O: Otoño & I: Invierno. TE (d): Tiempo de exposición en días, D: Declinación, T: Temperatura, HR: Humedad, & P: Precipitación.

Cuadro 4. Temperatura, humedad relativa y precipitación en relación con la declinación solar para Polokwane, Sudáfrica.

E	Cinturón	Latitud (grados)	Inicio	TE (d)	D	T (°C)	HR (%)	P (mm d ⁻¹)
O	Ecuador	[0,5)	3/22	12	2.5	20.3	69.9	0.9
	A	[5, 10)	4/3	14	7.5	20.3	63.3	0.4
	B	[10, 15)	4/17	15	12.6	17.5	57.4	0.3
	C	[15, 20)	5/2	19	17.6	16.0	54.3	0.0
	Cáncer	[20,23.5]	5/21	33	22.3	12.6	58.9	0.2
I	Cáncer	(23.5,20]	6/23	32	22.2	12.2	49.4	0.1
	C	(20, 15]	7/25	19	17.6	13.5	52.4	0.1
	B	(15, 10]	8/13	15	12.7	16.8	58.4	0.1
	A	(10, 05]	8/28	14	7.6	18.6	46.9	0.2
	Ecuador	(5, 0)	9/11	13	2.6	19.5	48.1	0.3
P	Ecuador	[0, -5)	9/24	13	-2.5	22.2	52.1	1.4
	A	[-5, -10)	10/7	13	-7.5	21.3	48.6	0.7
	B	[-10, -15)	10/20	15	-12.5	23.5	51.8	0.5
	C	(-15, -20]	11/4	19	-17.7	25.0	61.0	4.7
	Capricornio	[-20, -23.5]	11/23	30	-22.3	23.3	65.1	2.9
V	Capricornio	(-23.5, -20]	12/23	30	-22.3	24.0	69.6	4.6
	C	(-20, -15]	1/22	18	-17.7	21.5	81.8	11.7
	B	(-15, -10]	2/9	15	-12.6	21.6	76.0	3.3
	A	(-10, -5]	2/24	13	-7.5	20.8	74.2	1.7
	Ecuador	(-5, 0)	3/9	13	-2.4	22.2	69.2	0.6

E: Estación, P: Primavera; V: Verano, O: Otoño & I: Invierno. TE (d): Tiempo de exposición en días, D: Declinación, T: Temperatura, HR: Humedad, & P: Precipitación.

Cuadro 5. Temperatura, humedad relativa y precipitación en relación con la declinación solar para Quito, Ecuador.

E	Cinturón	Latitud (grados)	Inicio	TE (d)	D	T (°C)	HR (%)	P (mm d ⁻¹)
P	Ecuador	[0,5)	3/22	12	2.5	15.5	86.7	6.0
	A	[5, 10)	4/3	14	7.5	15.8	85.6	4.4
	B	[10, 15)	4/17	15	12.6	15.6	87.8	8.0
	C	[15, 20)	5/2	19	17.6	15.5	83.8	4.8
	Cáncer	[20,23.5]	5/21	33	22.3	15.4	82.6	4.4
V	Cáncer	(23.5,20]	6/23	32	22.2	14.6	79.2	1.7
	C	(20, 15]	7/25	19	17.6	15.1	76.8	0.5
	B	(15, 10]	8/13	15	12.7	15.5	79.9	1.4
	A	(10, 05]	8/28	14	7.6	15.5	79.3	2.3
	Ecuador	(5, 0)	9/11	13	2.6	15.8	76.3	0.5
O	Ecuador	[0, -5)	9/24	13	-2.5	16.0	79.3	2.4
	A	[-5, -10)	10/7	13	-7.5	16.3	80.0	6.1
	B	[-10, -15)	10/20	15	-12.5	15.8	84.4	6.5
	C	(-15, -20]	11/4	19	-17.7	15.3	84.5	2.9
	Capricornio	[-20, -23.5]	11/23	30	-22.3	15.4	86.1	5.8
I	Capricornio	(-23.5, -20]	12/23	30	-22.3	15.7	86.2	8.5
	C	(-20, -15]	1/22	18	-17.7	16.3	85.4	5.4
	B	(-15, -10]	2/9	15	-12.6	15.6	88.8	6.0
	A	(-10, -5]	2/24	13	-7.5	15.1	88.3	7.8
	Ecuador	(-5, 0)	3/9	13	-2.4	14.5	88.6	7.3

E: Estación, P: Primavera; V: Verano, O: Otoño & I: Invierno. TE (d): Tiempo de exposición en días, D: Declinación, T: Temperatura, HR: Humedad, & P: Precipitación.

Cuadro 6. Temperatura, humedad relativa y precipitación en relación con la declinación solar para Mbandaka, Congo.

E	Cinturón	Latitud (grados)	Inicio	TE (d)	D	T (°C)	HR (%)	P (mm d ⁻¹)
P	Ecuador	[0,5)	3/22	12	2.5	25.8	86.9	7.9
	A	[5, 10)	4/3	14	7.5	26.3	86.8	2.0
	B	[10, 15)	4/17	15	12.6	25.9	89.7	5.3
	C	[15, 20)	5/2	19	17.6	25.8	87.4	4.1
	Cáncer	[20,23.5]	5/21	33	22.3	26.6	82.9	4.0
V	Cáncer	(23.5,20]	6/23	32	22.2	25.8	81.5	2.5
	C	(20, 15]	7/25	19	17.6	26.5	75.7	1.9
	B	(15, 10]	8/13	15	12.7	26.9	78.2	4.7
	A	(10, 05]	8/28	14	7.6	26.0	83.5	6.2
	Ecuador	(5, 0)	9/11	13	2.6	26.0	82.4	4.7
O	Ecuador	[0, -5)	9/24	13	-2.5	26.0	81.5	5.2
	A	[-5, -10)	10/7	13	-7.5	26.3	85.1	10.0
	B	[-10, -15)	10/20	15	-12.5	25.5	86.1	11.2
	C	(-15, -20]	11/4	19	-17.7	26.0	83.1	4.9
	Capricornio	[-20, -23.5]	11/23	30	-22.3	26.7	81.6	3.4
I	Capricornio	(-23.5, -20]	12/23	30	-22.3	26.3	79.9	4.7
	C	(-20, -15]	1/22	18	-17.7	26.4	81.7	9.1
	B	(-15, -10]	2/9	15	-12.6	27.0	80.4	1.6
	A	(-10, -5]	2/24	13	-7.5	26.7	84.4	4.8
	Ecuador	(-5, 0)	3/9	13	-2.4	25.7	86.9	7.9

E: Estación, P: Primavera; V: Verano, O: Otoño & I: Invierno. TE (d): Tiempo de exposición en días, D: Declinación, T: Temperatura, HR: Humedad, & P: Precipitación.

Cuadro 7. Correlación entre la declinación solar, temperatura, humedad relativa y precipitación para dos sitios del trópico de Cáncer.

Fresnillo	Temperatura	Humedad relativa	Precipitación
Declinación	-0.24 (0.01)	-0.38 (<0.001)	-0.40 (<0.001)
	-0.09 (0.36)	-0.17 (0.09)	0.09 (0.35)
	-0.15 (0.14)	-0.11 (0.28)	-0.16 (0.11)
	0.19 (0.06)	0.08 (0.44)	0.12 (0.25)
Temperatura		-0.09 (0.37)	0.48 (<0.001)
		0.11 (0.25)	0.07 (0.46)
		-0.48 (<0.001)	-0.17 (0.09)
		0.005 (0.96)	0.12 (0.22)
Humedad relativa			0.52 (<0.001)
			0.71 (<0.001)
			0.63 (<0.001)
			0.71 (<0.001)
Shantou			
Declinación	-0.02 (0.78)	-0.25 (0.01)	-0.01 (0.89)
	-0.36 (<0.001)	0.36 (<0.001)	0.36 (<0.001)
	-0.12 (0.25)	-0.08 (0.42)	-0.10 (0.30)
	-0.21 (0.03)	-0.20 (0.05)	-0.30 (0.003)
Temperatura		-0.12 (0.22)	-0.16 (0.12)
		-0.49 (<0.001)	-0.34 (<0.001)
		-0.12 (0.24)	-0.18 (0.08)
		-0.15 (0.15)	-0.12 (0.23)
Humedad relativa			0.53 (<0.001)
			0.48 (<0.001)
			0.69 (<0.001)
			0.79 (<0.001)

En cada celda se muestran los coeficientes de correlación intra estacional primavera, verano, otoño e invierno. Cada coeficiente es seguido por su probabilidad del error tipo 1.

Cuadro 8. Correlación entre la declinación solar, temperatura, humedad relativa y precipitación, para dos sitios del trópico de Capricornio.

San Pablo	Temperatura	Humedad relativa	Precipitación
Declinación	-0.25 (0.01)	-0.10 (0.3)	-0.05 (0.5)
	0.27 (0.006)	-0.41 (<0.001)	-0.11 (0.2)
	-0.14 (0.1)	0.07 (0.4)	0.04 (0.6)
	0.24 (0.001)	-0.17 (0.09)	-0.15 (0.1)
Temperatura		-0.11 (0.2)	-0.19 (0.06)
		-0.24 (0.01)	-0.24 (0.01)
		-0.37 (<0.001)	-0.35 (<0.001)
		0.009 (0.9)	0.007 (0.9)
Humedad relativa			0.64 (<0.001)
			0.56 (<0.001)
			0.50 (<0.001)
			0.63 (<0.001)
Mbandaka			
Declinación	0.14 (0.1)	0.12 (0.8)	-0.12 (0.2)
	0.11 (0.2)	-0.33 (0.001)	-0.25 (0.01)
	0.24 (0.02)	0.25 (0.01)	0.10 (0.3)
	0.26 (0.01)	-0.35 (<0.001)	-0.34 (<0.001)
Temperatura		-0.28 (0.006)	-0.27 (0.008)
		-0.37 (0.0002)	-0.07 (0.4)
		-0.30 (0.004)	-0.53 (<0.0001)
		-0.40 (<.0001)	-0.28 (0.007)
Humedad relativa			0.56 (<0.0001)
			0.58 (<0.0001)
			0.51 (<0.0001)
			0.76 (<0.0001)

En cada celda se muestran los coeficientes de correlación intra estacional primavera, verano, otoño e invierno. Cada coeficiente es seguido por su probabilidad del error tipo 1.

Cuadro 9. Correlación entre la declinación solar, temperatura, humedad relativa y precipitación para dos sitios del Ecuador.

Quito	Temperatura	Humedad relativa	Precipitación
Declinación	0.21 (0.03)	0.23 (0.02)	0.04 (0.66)
	0.26 (0.008)	0.10 (0.33)	-0.01 (0.9)
	0.33 (0.001)	-0.11 (0.2)	0.18 (0.08)
	0.30 (0.003)	0.22 (0.03)	0.09 (0.3)
Temperatura		0.18 (0.07)	0.15 (0.14)
		0.22 (0.03)	0.07 (0.4)
		0.17 (0.09)	0.06 (0.5)
		0.23 (0.02)	0.11 (0.2)
Humedad relativa			0.17 (0.08)
			0.07 (0.5)
			0.31 (0.002)
			0.41 (<0.001)
Mbandaka			
Declinación	0.01 (0.8)	0.02 (0.7)	0.39 (0.0001)
	0.03 (0.7)	0.21 (0.03)	0.12 (0.2)
	-0.03 (0.7)	0.08 (0.4)	0.16 (0.1)
	-0.07 (0.4)	-0.05 (0.5)	0.26 (0.01)
Temperatura		0.11 (0.2)	0.04 (0.6)
		0.10 (0.3)	-0.15 (0.1)
		-0.02 (0.8)	-0.07 (0.5)
		0.22 (0.03)	-0.04 (0.6)
Humedad relativa			-0.01 (0.8)
			0.19 (0.06)
			0.12 (0.2)
			0.15 (0.1)

En cada celda se muestran los coeficientes de correlación intra estacional primavera, verano, otoño e invierno. Cada coeficiente es seguido por su probabilidad del error tipo 1.

Cuadro 10. Correlación entre la declinación solar, temperatura, humedad relativa y precipitación para seis sitios del planeta Tierra.

		Temperatura	Humedad relativa	Precipitación
Declinación	Fresnillo	0.82 (0.00)	0.13 (0.02)	0.36 (0.00)
	Shantou	0.82 (0.00)	0.55 (0.00)	0.28 (0.00)
	San Pablo	-0.71 (0.00)	-0.15 (0.01)	-0.32(0.00)
	Polokwane	-0.83(0.00)	-0.38(0.00)	-0.38(0.00)
	Quito	-0.24(0.00)	-0.45(0.00)	-0.23(0.00)
	Mbandaka	-0.09(0.17)	0.05(0.37)	-0.12(0.05)
Temperatura	Fresnillo		0.02(0.69)	0.16(0.01)
	Shantou		0.64(0.00)	0.24(0.00)
	San Pablo		-0.13(0.03)	0.12(0.03)
	Polokwane		0.08(0.14)	0.19(0.00)
	Quito		-0.12(0.02)	-0.14(0.02)
	Mbandaka		-0.58(0.00)	-0.32(0.00)
Humedad Relativa	Fresnillo			0.46(0.00)
	Shantou			0.42(0.00)
	San Pablo			0.41(0.00)
	Polokwane			0.41(0.00)
	Quito			0.47(0.00)
	Mbandaka			0.41(0.00)

Cuadro 11. Coordenadas, altitud, distancia al océano y elementos del clima, en los seis sitios elegidos para el estudio de la asociación entre la declinación solar y las constantes climatológicas.

Número	Sitio	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Distancia al océano (km)	T (°C)	HR (%)	P (mm)
1	Fresnillo	23.18	-102.88	2210	300	17.2	53.7	572
4	Polokwane	-23.91	29.45	1310	390	19.2	60.4	679
3	San Pablo	-23.73	-46.65	760	57	20.8	74.3	919
2	Shantou	23.36	116.69	51	0	23.8	77.9	1064
5	Quito	-0.20	-78.51	2850	170	15.4	83.4	1692
6	Mbandaka	0.04	18.27	370	900	26.2	82.8	1802

T. Temperatura media del año, HR: Humedad relativa media, y P: Precipitación anual. Las coordenadas y altitud de los sitios se tomaron del mapa de la NASA, mientras que la distancia al mar se aproximó mediante la herramienta de medición del mismo

8. LITERATURA CITADA

- Ahluwalia, H.S. 2019. Changes of space weather and space climate at Earth orbit: an update. *Advances in Space Research*. 64 (5): 1093–1099. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.05.046>.
- Andrade, J., Basch G. 2012. Clima e estado do tempo. Factores e elementos do clima. Classificação do clima. En: *Hidrología Agrícola*. 23–78.
- Bennett, K. D., 1990. Milankovitch cycles and their effects on species in ecological and evolutionary time. *Paleobiology* 16 (1): 11–21. <https://doi.org/10.1017/S0094837300009684>.
- Bernard, R., Goldstein., Hon, G. 2005. Kepler's move from orbs to orbits: documenting a revolutionary scientific concept. *Perspectives on Science* 13 (1): 74–111. <https://doi.org/10.1162/1063614053714126>.
- Bigg, G.R., Jickells, T.D., Liss, P.S., Osborn, T.J. 2003. The role of the oceans in climate. *International Journal of Climatology* 23 (10): 1127–59. <https://doi.org/10.1002/joc.926>.
- Blanc, P., Espinar, B., Geuder, N., Gueymard, C., Meyer, R. 2015. Direct normal irradiance related definitions and applications: The circumsolar issue. *Solar Energy*, 561–577. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.001>.
- Blumthaler, M.B., Ambach, W., Ellinger, R. 1997. Increase in solar UV radiation with altitude. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 39: 130–134. [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(96\)00018-8](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(96)00018-8).
- Chiron, C.A., Cachorro, R.V. 2003. Radiación solar y la atmosfera. En: *La radiación solar en el sistema tierra-atmósfera*, 1a ed., 71–143. Universidad de Valladolid.
- Coddington, O., Lean, J.L., Pilewskie, P., Snow, M., Lindholm, D. 2016. A solar irradiance climate data record. *Bulletin of the American Meteorological Society* 97 (7): 1265–1282. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00265.1>.
- Emanuel, K. 2020. The Relevance of Theory for Contemporary Research in Atmospheres, Oceans, and Climate. *Advancing Earth and Space Science* 1 (4). <https://doi.org/10.1029/2019av000129>.
- FAO 2013. Livestock and Genetic Resources: FAO's Animal Production and Health Division. 2013. <https://www.fao.org/ag/againfo/themes/en/AnGR.html>.

- Geoffrey, E.D., Izabella, M.T. 2012. Effects of photoperiod on domestic animals. En: Collier, R.J. Collier, J.L. (eds), *Environmental Physiology of Livestock* 229–242.
- Gaughan, J., Lacetera, N., Valtorta, S.E., Khalifa, H.H., Hahn, L., Mader, T. (2009). Response of domestic animals to climate challenges. En: Ebi, K.L., Burton, I., McGregor, G.R. (eds) *Biometeorology for Adaptation to Climate Variability and Change*. Biometeorology, Vol 1. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8921-3_7
- Hamilton, K., Sakazaki, T. 2017. A note on apparent solar time and the seasonal cycle of atmospheric solar tides. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 143 (706): 2310-2314. <https://doi.org/10.1002/qj.3076>.
- Josephs, E.B. 2018. Determining the evolutionary forces shaping $G \times E$. *New Phytologist* 219 (1): 31–36. <https://doi.org/10.1111/nph.15103>.
- Lamarck, J.B. 1809. Influencia de las circunstancias sobre las acciones y hábitos de los animales. En: *Filosofía Zoológica*. 165–194.
- Lynch, P. 2012. The equation of time and the analemma. *Irish Mathematical Society Bulletin* 69: 47–56. <https://doi.org/https://doi.org/10.33232/bims.0069.47.56>.
- Mayers, D.R. 2016. Direct normal radiation. En: *Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology*, 1–53.
- Méndez, P.I., Gómez A.G. 2015. Conceptos generales. En: *Prontuario Solar de México*, 11–27.
- Montenbruck, O., Pfleger T. 2000. Solar eclipse. En: *Astronomy on the Personal Computer*, 173–196. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03436-7>.
- NASA., 2020. Milankovitch (Orbital) Cycles and Their Role in Earth's Climate – Climate Change: Vital Signs of the Planet. <https://climate.nasa.gov/news/2948/milankovitch-orbital-cycles-and-their-role-in-earths-climate/>.
- NASA., 2022. Power Data Access Viewer. 2022. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

- Njau, E.C. 1995. Expressions for wind speed, relative humidity, rainfall, absolute humidity, vapor pressure and dew point as functions of temperature. *Renewable Energy* 6 (1): 23–28. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)00053-9](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)00053-9).
- Oyewole, J.A., Thompson, A.M., Akinpelu, J.A., Jegede, O.O. 2014. Variation of rainfall and humidity in Nigeria. *Journal of Environment and Earth Science* 4(2): 29–37. www.iiste.org.
- Pal, A.M., Das, S. 2015. Analytical Model for Determining the Sun's Position at All Time Zones. *International Journal of Energy Engineering* (3): 58–65. <https://doi.org/10.5923/j.ijee.20150503.03>.
- Pareja, M. 2010. *Radiación solar y su aprovechamiento energético*.
- Prieto, R.B., Oliveira F.H. 2018. Estudio de la radiación solar en los equinoccios y solsticios en la ciudad de Habana, Cuba. *Ciência e Natura* 40 (mayo): 1–10. <https://doi.org/10.5902/2179460x30674>.
- Ramanathan, V. 1987. The Role of Earth Radiation Budget Studies in Climate and General Circulation Research. *Journal of Geophysical Research* 92 (D4): 4075–95. <https://doi.org/10.1029/id092id04p04075>.
- Rstudio Team. 2023. RStudio: Integrated Development Environment for R [Software]. Retrieved from <https://www.rstudio.com/>
- Schmitt, R. W., Wijffels, S. E. 1993. *The oceans in the global water cycle. Geophysical Monograph Series* (15): 77-84. <https://doi.org/10.1029/GM075P0077>.
- Soon, W.H., Posmentier, E.S., Baliunas, S.L. 1996. Inference of solar irradiance variability from terrestrial temperature changes, 1880-1993: an astrophysical application of the sun-climate connection. *The Astrophysical Journal* 472 (2): 891–902. <https://doi.org/10.1086/178119>.
- Spencer, I. 1971. Fourier series representation of the position of the sun. *Search* 2 (5): 162–72.
- Tan, S.B.K., Shuy, E.B., Chua, L.H.C. 2007. Modelling hourly and daily open-water evaporation rates in areas with an equatorial climate. *Hydrological Processes* 21(4): 486–499. <https://doi.org/10.1002/hyp.6251>.

- Uma, S.K., Venugopal, P., Rupa, K., Rao, S.B. 2021. Diameters (bimbas) of the sun, moon and earth's shadow-cone in indian astronomical texts, with special reference to the makarandasāriṇī and the gaṇakānanda. *Journal of Astronomical History and Heritage* 24(1):159–169. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1440-2807.2021.01.11>.
- Vardavas, I.M., Taylor F.W. 2007. *Radiation and climate*. Editado por J. Birman, S. F. Edwards, R. Friend, M. Rees, D. Sherrington, y G. Veneziano. Oxford University Press. 511 pp.
- Webb, P., 2021. Introduction to the oceans. En: *Introduction to Oceanography*, Roger Williams University. pp 14-24.
- Westfall, J., Sheehan W. 2015. Celestial Shadows. En: *Celestial Shadows*, Board, 1–8. <http://www.springer.com/series/5664>.
- Wigley, T.M.L. 1981. Climate and paleoclimate what we can learn about solar luminosity variations. *Solar Physics* 74 (2): 435–471. https://doi.org/10.1007/978-94-010-9633-1_40.
- Wordpress.com. 2023. Blog de geografía e historia. <https://vcastello.wordpress.com/1o-eso/1175-2/>
- Yndestad, H. 1999. Earth nutation influence on the temperature regime of the Barents Sea. *ICES Journal of Marine Science* 56: 381–387. <https://doi.org/10.1006/jmsc.1999.0469>.