



EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE SECADO EN UN DESHIDRATADOR FAMILIAR TIPO INVERNADERO BAJO DISTINTAS CONDICIONES DE OPERACIÓN, EN UN AMBIENTE COSTERO.

Anthony J. Hernández Bautista, Sarah R. Messina Fernández, Blanca E. Gómez Espinoza.
Universidad Autónoma de Nayarit, Ciudad de la Cultura Amado Nervo, Tepic, Nayarit, 63170, México, (311) 211 88 00.

José Campos Álvarez
Instituto de Energías Renovables – UNAM, Priv. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México.

*anthony.hernandez@uan.edu.mx

RESUMEN

En este trabajo, se determinó el comportamiento térmico al interior de un deshidratador familiar tipo invernadero bajo distintas pruebas de secado. La caracterización y obtención de datos experimentales se realizó mediante un sistema de adquisición de datos que proporciona información de temperatura, humedad relativa, irradiancia y pérdida de masa.

El proceso de deshidratado se llevó a cabo en la comunidad El Llano, San Blas, Nayarit; mediante el proyecto PRONACES 319456 se implementó un deshidratador familiar con dimensiones 2.44 m x 1.22 m x 2.44 m, con el objetivo de incentivar la economía circular de comunidades rurales y disminuir el desperdicio de alimentos. La FAO estima que la pérdida y el desperdicio de alimentos entre los sitios de cultivo y el consumidor final es aproximadamente un tercio de la producción en general en todo el mundo, lo que aumenta la huella hídrica y la huella de carbono, además de disminuir la ganancia de los productores del campo.

Los procesos de secado se realizaron en días típicos del mes de febrero de 2023, en cada uno se evaluó el comportamiento al interior del secador mediante la medición de los parámetros mencionados. Las condiciones de operación evaluada fueron: a) Sin carga y sin convección; b) a plena carga y convección natural y c) A plena carga con convección forzada por ventiladores.

Los resultados permiten conocer el comportamiento al interior del secador bajo distintas condiciones de operación, y de tal forma, poder ajustar, adecuar y realizar modificaciones al prototipo de secador solar con el objetivo de mejorar su desempeño y demostrar en campo la viabilidad de implementación de secadores solares tipo invernadero de escala familiar.

Palabras clave: Secado solar, energía solar, temperatura, humedad relativa.

ABSTRACT

In this work, the thermal behavior inside a family greenhouse-type dehydrator was determined under different drying tests. The characterization and collection of experimental data were carried out using a data acquisition system that provides information on temperature, relative humidity, irradiance, and mass loss.

The dehydration process took place in the El Llano community, San Blas, Nayarit, through the PRONACES 319456 project, where a family dehydrator with dimensions of 2.44 m x 1.22 m x 2.44 m was implemented to promote the circular economy in rural communities and reduce food waste. The FAO estimates that food loss and waste between cultivation and the final consumer account for approximately one-third of overall global production, increasing water and carbon footprints, and decreasing farmers' profits.

The drying processes were conducted on typical days in February 2023, and the behavior inside the dehydrator was evaluated by measuring the mentioned parameters. The evaluated operating conditions were: a) Empty and without convection; b) Fully loaded with natural convection, and c) Fully loaded with forced convection using fans.

The results allow understanding the behavior inside the dehydrator under different operating conditions, and thus, making adjustments and modifications to the solar dehydrator prototype to improve its performance and demonstrate the field feasibility of implementing greenhouse-type solar dehydrators at a family scale.

Keywords: Solar dry, solar energy, temperature, relative humidity.

INTRODUCCIÓN

El estado de Nayarit corresponde a sólo 1.4% del territorio nacional, en él se distribuye al menos ocho tipos de vegetación y distintos tipos de hábitats, por lo cual es catalogado por la CONABIO un estado un estado megadiverso [1]. La región costa norte de Nayarit se caracteriza por su riqueza en la producción de granos y diversidad de frutas tropicales. En esta región, existe una creciente incorporación de empresas dedicadas a la deshidratación de frutas como mango, plátano, yaca y piña, mediante procesos semi-industrializados, con capacidad para secar hasta 20 toneladas de productos al día en hornos con capacidad de 1 a 4 toneladas.



En Nayarit cerca de 100,745 personas se dedican a la agricultura [2]. Los productores agrícolas de esta región venden su producto a empresas empacadoras para la venta al mercado local, nacional e internacional. Las frutas que no pasan la calidad en los empaques son trasladadas a las empresas deshidratadoras que ofrecen una segunda oportunidad a estos productos. Sin embargo, estas empresas deshidratadoras emplean gas LP y energía eléctrica convencional para llevar a cabo los procesos de deshidratado, lo cual, incrementa la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Actualmente la agricultura es el principal sustento de la alimentación humana a nivel mundial; no obstante, es la cuarta actividad que genera mayor cantidad de emisiones de GEI. En México las actividades agropecuarias son la tercera causa de generación de emisiones de GEI con el 12% a las emisiones nacionales [3].

El deshidratado solar se considera una actividad factible en México, ya que es uno de los países con mayor cantidad de recurso solar, el Servicio Solarimétrico Mexicano, estima una irradiación diaria promedio de 5.5 kWh/m²/día en todo el país [4], [5]. La energía solar es un recurso esencial en el proceso de deshidratado solar, ya que para deshidratar 1 kg de frutas se requiere aproximadamente 3.57 kWh [6]. El proceso de deshidratado solar, permite disminuir la cantidad de agua y prolongar la vida en anaquel de productos, este proceso garantiza la disponibilidad de frutas en todas las temporadas del año; además, es posible almacenarlas a temperatura ambiente, son fáciles de transportar, contribuye a la disminución de residuos debido a malos manejos y contribuye con beneficios económicos a los productores agrícolas [7].

Así, este trabajo plantea disminuir la cantidad de pérdida de productos agrícolas e impulsar la generación de nuevas fuentes de empleo rurales a través de tecnología solar. El prototipo desarrollado permite deshidratar hasta 75 kg de pulpa de fruta al día. El deshidratador fue diseñado de tal manera que sea fácil de construir y replicar, debido a que utiliza materiales como policarbonato, perfiles de aluminio y ventiladores, para su construcción. La idea de promover e incentivar el uso de deshidratadores solares es con el objetivo de reducir el desperdicio de alimentos frescos y disminuir la generación de gases de efecto invernadero; los nuevos productos desarrollados permiten incrementar la disponibilidad de productos nutritivos para el autoconsumo o para la venta, además de impulsar la economía y la sustentabilidad rural.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

La localidad de El Llano, en el municipio de San Blas, se localiza en la región costa norte de Nayarit; tiene una población de 1259 habitantes, su ubicación geográfica está en las coordenadas 105°10'40.83" W, 1 21°25'07.9" N, a 42 msnm [8]. La **figura 1** muestra la ubicación geográfica de El Llano en Nayarit.

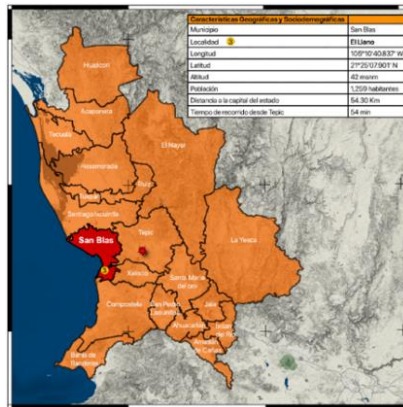


Figura 1. Localización geográfica del sitio de estudio, El Llano, San Blas, Nayarit México [9]

La producción agrícola en El Llano destaca por el cultivo de yaca. Nayarit ocupa el primer lugar en la producción de yaca a nivel nacional con el 92.91% [10]. En el Llano además se cultiva plátano, piña, guanábana y mango. Sin embargo, una fracción de hasta el 50% de la producción no pasa los controles de calidad en las empacadoras y termina pudriéndose por mal manejo y falta de procesamiento. Derivado de esto, ha incrementado la aparición de empresas deshidratadoras foráneas de escala semi-industrial que compran la producción rechazada a muy bajo precio y emplean a los productores rurales y a sus familias. No obstante, son trabajos informales y mal pagados. Por esta razón, la importancia de implementar sistemas energéticos sustentables que empleen el recurso solar y sea la misma sociedad local la que procese dichos productos con la finalidad de dar valor agregado a las mermas y de tal manera propiciar bienestar mediante trabajos más justos en los sitios rurales.

Adquisición de la información

La evaluación del desempeño energético del secador solar se realizó mediante un sistema autónomo de monitoreo y medición de variables. El sistema registra y almacena datos de las variables temperatura, irradiancia, humedad relativa y masa. Cuenta con un microcontrolador Arduino Mega 2560, el cual controla 10 sensores "DS18B20" para la medición de temperatura, 4 sensores "DHT22" para la medición de humedad relativa y temperatura, 1 celda solar de 2.3 x 4.3 cm para la medición de irradiancia y un módulo HX711 junto a una celda de carga de 5 Kg para la medición de masa.



La adquisición de las características climáticas de temperatura, humedad relativa e irradiación solar fueron obtenidas de año meteorológico típico (TMY) haciendo uso de la base de datos PVGIS-ERA5 mediante la página Web “PVGIS” [11].

Procesamiento de la información

El procesamiento estadístico de los datos se realizó mediante OriginLab. La representación gráfica de los datos obtenidos mediante PVGIS se procesaron mediante el Software “Jupyter notebook” empleando la librería “Calplot”.

RESULTADOS

Estimación del Recurso Solar

Empleando la base de datos PVGIS-ERA5 se obtuvo el promedio de irradiación solar de El Llano. Los resultados obtenidos indican que durante los meses de marzo a junio la irradiación promedio diaria, supera el promedio nacional de 5.5 kWh/m², lo cual corresponde con el periodo de cosecha, por lo tanto, es posible llevar a cabo exitosamente procesos de secado solar. En el mes de mayo se obtiene el valor de irradiación solar máxima con hasta 7.36 kWh/m² y los mínimos en diciembre con 4.35 kWh/m². La **figura 2** muestra los valores promedio mensuales de irradiación diaria en El Llano.

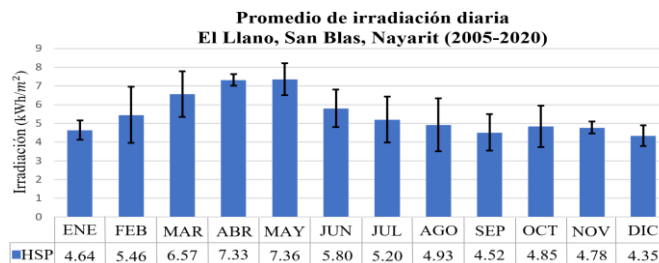


Figura 2. Valor Promedio Diario Mensual de Irradiación solar en la comunidad de El Llano.

La **figura 3** muestra el comportamiento de la Temperatura, Humedad relativa e Irradiación solar de El Llano. La información se obtuvo del Año Meteorológico Típico “TMY” de la base de datos PVGIS-ERA5.

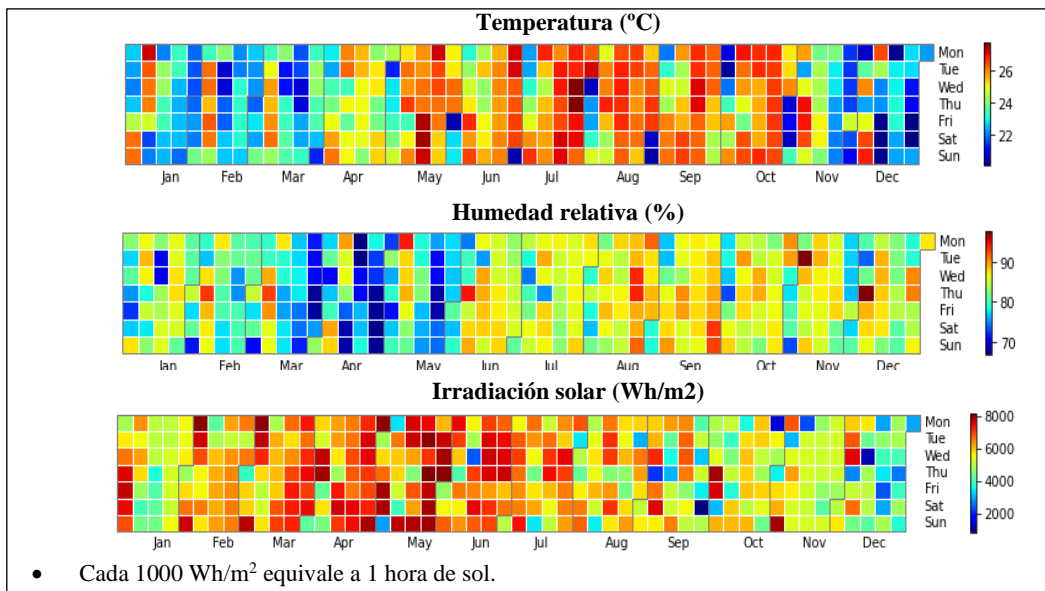


Figura 3. Temperatura, Humedad relativa e Irradiación solar promedio diaria en El Llano.

De acuerdo con los resultados, durante algunos días de los meses de enero a octubre se supera los 5.5 kWh/m² de irradiación solar, siendo noviembre y diciembre los meses de menor recepción de irradiación solar. No obstante, se considera posible llevar a cabo procesos de secado durante todo el año. Respecto a la humedad relativa, durante los meses de enero a mayo existe un rango aproximado de humedad diaria de 70% a 80%, posteriormente, de junio a diciembre la humedad incrementa en un rango de 85% a 95% derivado del temporal de lluvias. Además, El Llano se encuentra a aproximadamente 3 km del mar del océano pacífico, por lo cual, la humedad es mayor en la zona.

Las gráficas generadas mediante *Jupyter Notebook* y *Calplot* permiten estimar los días y meses en donde es más factible llevar a cabo procesos de deshidratado.



Diseño del prototipo de secado

En el diseño de los secadores se consideraron modelos de fácil construcción, con materiales asequibles y disponibles en el mercado local. El secador tiene dimensiones generales de 2.44 m x 1.22 m x 2.44 m, está construido en perfil de aluminio cuadrado de 1-1/4" x 1-1/4", escuadras de 1-1/2" x 3/16", cubierta perimetral y techumbre de policarbonato celular transparente de 6mm, con protección UV, la base en color humo. Cuenta con un área de secado de ~ 15 m² distribuida en 36 charolas en 6 niveles, en las que se pueden colocar hasta 70 kg de pulpa de fruta. La carga y descarga de fruta se realiza a través de 2 puertas laterales abatibles. El secador tiene 4 ventiladores de 6" en la parte superior y 4 en la parte inferior, para la inyección y extracción de aire. Las imágenes de la **figura 4**, muestran el prototipo de secador solar implementado en El Llano.



Figura 4. Imágenes del secador solar familiar uni-modular. Diseño y proceso a plena carga.

Se realizaron pruebas en días típicos del mes de febrero de 2023, para evaluar el desempeño del deshidratador bajo las siguientes condiciones de operación: a) sin carga y sin convección forzada; b) a plena carga y sin convección forzada, c) a plena carga con convección forzada.

Pruebas del prototipo en condiciones de operación sin carga y sin convección forzada

Se realizó la medición de temperatura y humedad relativa dentro del deshidratador solar sin carga durante un día completo, para identificar el comportamiento del equipo. La **figura 5** muestra la variación de humedad relativa y la temperatura dentro del secador. La prueba se llevó a cabo el día jueves 2 de febrero de 2023 y la temperatura ambiente máxima durante ese día fue 33.5°C.

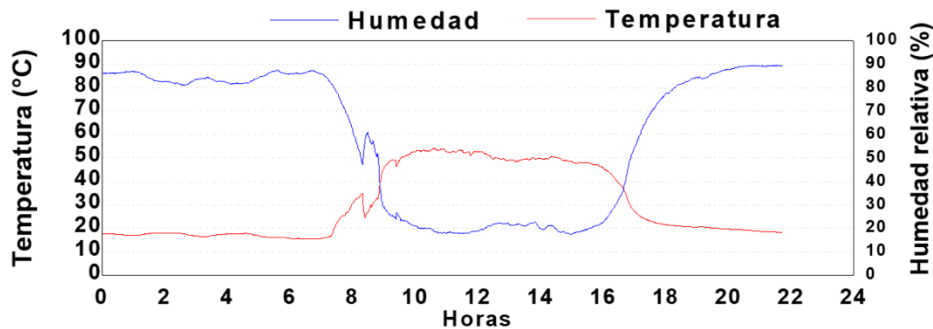


Figura 5. Operación del secador sin carga y sin convección forzada.

La información obtenida indica valores máximos de temperatura de 53.4°C a las 11:00 a.m. y mínimos de 16°C durante la madrugada. El comportamiento de la humedad relativa es contrario al de temperatura, si la temperatura aumenta, la humedad disminuye y viceversa.

Proceso a plena carga y sin convección forzada

En este proceso, el deshidratador fue cargado con 75 kg de plátano maduro. Se midieron parámetros de temperatura, humedad e Irradiancia solar al interior del deshidratador solar. La **figura 6** muestra la variación de: a) la temperatura, b) humedad relativa medida en las charolas de nivel inferior y superior, c) irradiancia global interior y exterior. El proceso se llevó a cabo del 17 a 20 de febrero de 2023.

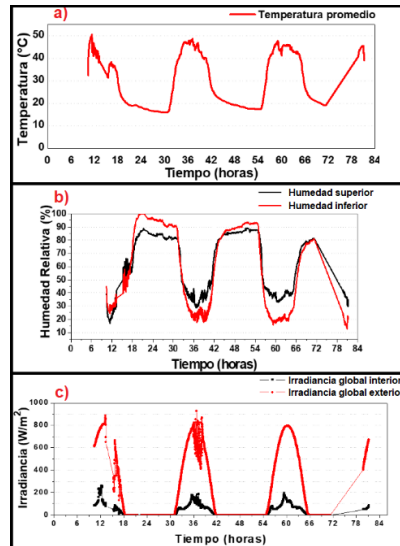


Figura 6. Proceso de secado a plena carga y sin convección forzada.

La temperatura máxima fue de 51.48°C el día 17 a las 12:00 pm. Dentro del deshidratador, la humedad en la parte inferior tuvo mayor fluctuación, durante las noches se encuentra por encima del 90 % y durante el día varía entre 40% y 18%, mientras que, la humedad en la parte superior durante las noches varía entre 90% y 80% y durante el día varía entre 45% y 30%. La irradiancia al exterior del deshidratador fue superior a 800 W/m^2 durante los días de proceso, la irradiancia global interior fue de 261 W/m^2 y se midió dentro del deshidratador en la parte superior. Al final las 72 horas del proceso se obtuvo la cantidad de 33 kg de fruta seca.

Proceso a plena carga con convección forzada

En este proceso se habilitaron 4 extractores en la parte inferior de la cara del secador orientada al sur, los cuales se encuentran alimentados con energía convencional, con la finalidad de propiciar la convección forzada de aire hacia la parte inferior, evitando así la entrada de polvo al secador. El proceso se realizó con una carga de 75 kg de plátano maduro. Se midieron parámetros de a) temperatura promedio interior y b) humedad relativa. La figura 7 muestra los resultados de la prueba realizada bajo estas condiciones durante los días 25 a 27 de febrero de 2023.

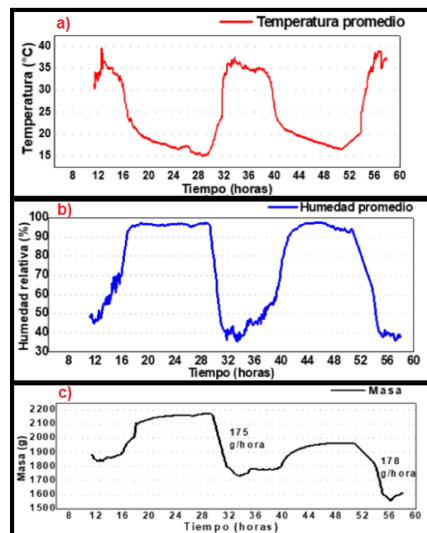


Figura 7. Proceso a plena carga con convección forzada.

Bajo la condición de operación a plena carga y con convección forzada, la temperatura máxima interior es cercana a los 40°C. La humedad promedio interior durante las noches se encuentra por encima del 95 %, mientras que durante el día disminuye a valores cercanos al 40%. Adicionalmente durante esta prueba de secado, se midió durante todo el proceso la c) pérdida de masa de una muestra de una charola cargada con 2.2 kg de fruta, se observa que durante el día la fruta pierde masa a una tasa de 175 g/hora, sin embargo, durante las noches debido a la humedad del ambiente, y a que el secador se mantuvo abierto con los ventiladores operando, las frutas adquieren humedad y vuelven a ganar masa.



CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de la evaluación del secador bajo distintas condiciones de operación permiten identificar el comportamiento de las variables de temperatura, humedad y pérdida de masa, con lo cual, es posible estimar el tiempo requerido para llevar a cabo un proceso de deshidratado, así como la toma de mejores decisiones para seleccionar las condiciones de secado diversos productos.

- La máxima temperatura en las condiciones sin carga y sin convección forzada fue de 53.4°C, en el proceso a plena carga y sin convección forzada fue de 51.48°C y en el proceso a plena carga y con convección forzada fue de 39.67°C. En las tres condiciones las temperaturas máximas se obtuvieron de las 11:00 a 13:00 horas.
- La humedad relativa máxima para la condición de operación sin carga y sin convección forzada fue de 90%, en el proceso a plena carga y sin convección forzada fue de 90.5% y en el proceso a plena carga y con convección forzada fue de 95.5%, esto ocurre durante las horas en las que no hay radiación solar.
- El rendimiento del proceso a plena carga y sin convección forzada fue de 44 %, ya que de 75 kg de producto fresco se obtuvieron 33 kg de producto seco en un tiempo de 72 h. A plena carga y con convección forzada el rendimiento fue de 33 ya que de 75 kg de producto fresco se obtuvieron 25 kg de producto seco en un tiempo de 48 h de procesamiento.
- Se observó que durante el proceso de deshidratado cuando hay radiación solar las frutas pierden masa a una tasa de 175 g/hora, durante el transcurso de la noche debido al incremento de humedad, ganan masa en hasta aproximadamente un 10% del peso inicial de la fruta.
- Los resultados de las mediciones indican que es necesario incorporar un respaldo de energía térmica, como resistencias eléctricas para alcanzar temperaturas óptimas de secado, así como para llevar a cabo de manera continua el proceso durante el periodo nocturno.
- Es necesario realizar mediciones en distintas zonas y determinar en qué sitio es más factible llevar a cabo procesos de deshidratado solar.
- El costo total del prototipo deshidratador familiar tipo invernadero y su instalación ronda los 60,000 pesos mexicanos.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT a través del proyecto 319456 del fondo PRONACES convocatoria FOP04 2022.

REFERENCIAS

- [1] CONABIO, “La biodiversidad en Nayarit. Estudio de Estado.” México, 2021.
- [2] SIAP, Infografía agroalimentaria 2019. Ciudad de México, 2019.
- [3] V. Saynes Santillán et al., “Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México,” *Terra Latinoamericana*, vol. 34, no. 1, pp. 83–96, 2016, Accessed: Jan. 31, 2023. [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000100083&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [4] I. Renewable Energy Agency, “REmap 2030, Renewable Energy Prospects: Mexico,” 2015. [Online]. Available: www.irena.org/remap
- [5] D. Riveros-Rosas, C. A. Arancibia-Bulnes, R. Bonifaz, M. A. Medina, R. Peón, and M. Valdes, “Analysis of a solarimetric database for Mexico and comparison with the CSR model,” *Renew Energy*, vol. 75, pp. 21–29, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.09.013.
- [6] S. Messina et al., “Solar powered dryers in agricultural produce processing for sustainable rural development worldwide: A case study from Nayarit-Mexico,” *Cleaner and Circular Bioeconomy*, vol. 3, no. April, p. 100027, 2022, doi: 10.1016/j.clcb.2022.100027.
- [7] M. L. Acosta Miranda and L. Ángeles Hernández, “Disminuir la pérdida de alimentos en la producción agrícola mediante la deshidratación,” *Revista Tecnológica - ESPOL*, vol. 33, no. 3, pp. 139–151, Dec. 2021, doi: 10.37815/rte.v33n3.874.
- [8] INEGI, “México en cifras.” 2023. Accessed: Jun. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/#collapse-Tabulados>
- [9] QGIS, “Bienvenido al proyecto QGIS” Sistema de Información Geográfica libre y de Código Abierto,” 2023. <https://www.qgis.org/es/site/>.
- [10] J. M. Elías Soto, “Generalidades y particularidades del cultivo de la yaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam.): El árbol de la fruta de los sabores combinados,” 2020. Accessed: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/47192>
- [11] PVGIS, “Photovoltaic Geographical Information System,” 2023. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/