



# Modelo de Evaporación para el Explorador Solar

---

Marzo 2024

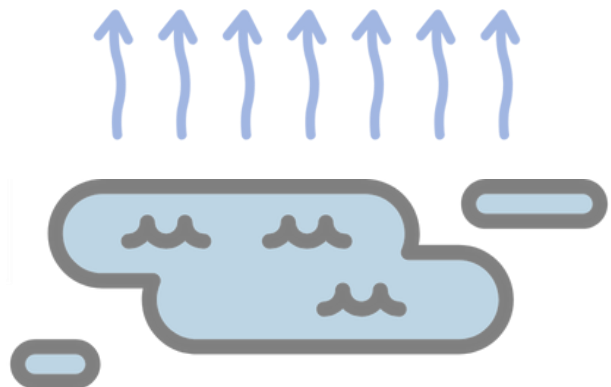
Hernán Alcayaga Saldías

Rodrigo Cáceres González

Andrés Díaz Alarcón

Alonso Pizarro Valdebenito

Cristóbal Sarmiento-Laurel



Resumen ejecutivo 3

1.	Introducción .....	3
2.	Módulo de preprocesamiento.....	5
2.1.	Panel Tipo A .....	6
2.2.	Panel Tipo B .....	7
2.3.	Panel Tipo C .....	7
2.4.	Panel Tipo D.....	8
3.	Módulo de Cálculo de Radiación neta.....	9
3.1.	Panel Tipo A .....	10
3.2.	Panel Tipo B .....	10
3.3.	Panel Tipo C .....	10
3.4.	Panel Tipo D.....	11
4.	Módulo de Cálculo de Evaporación.....	11
5.	Parámetros de Entrada.....	12
	Referencias.....	13

## Resumen ejecutivo

El presente documento compila el desarrollo y aplicación de modelos de evaporación para infraestructuras hidroeléctricas con paneles solares flotantes. Se presentan metodologías, resultados experimentales y análisis comparativos para validar los modelos propuestos.

### 1. Introducción

La creciente necesidad de fuentes de energía renovable ha llevado al desarrollo de tecnologías como los paneles solares flotantes. Este documento presenta un estudio integral sobre los efectos de estos paneles en la evaporación de cuerpos de agua. Se enfoca en un modelo de evaporación diseñado específicamente para infraestructuras de cuerpos de agua usados en agricultura o para generación hidroeléctrica con paneles solares flotantes, con el objetivo de proporcionar estimaciones precisas sobre la evaporación de agua bajo superficies fotovoltaicas flotantes (FPS, por su sigla en inglés).

El nuevo módulo del Explorador Solar permite, de manera fácil y rápida, estimar la tasa de evaporación y el desempeño de paneles solares flotantes en cuerpos de agua, utilizando datos meteorológicos detallados disponibles desde 2004 hasta 2016. Los usuarios pueden ingresar información técnica específica de los paneles solares flotantes y su configuración.

Los modelos que calculan la evaporación y el desempeño de una instalación con paneles solares flotantes a partir de variables meteorológicas, como la radiación solar, la velocidad del viento, la temperatura ambiente, entre otras, pueden ser divididos en un conjunto de módulos cuya función es calcular variables operacionales del sistema. Cada uno de estos módulos se encuentra interrelacionado a través de un conjunto de variables.

Este módulo permitirá a los usuarios estimar de manera precisa la reducción en la tasa de evaporación debido a la instalación de paneles solares flotantes y evaluar el impacto de estos sistemas en la generación de energía y la gestión del recurso hídrico. Este enfoque integrará datos meteorológicos con modelos de evaporación y radiación, proporcionando una herramienta poderosa para la planificación y optimización de infraestructuras hidroeléctricas con tecnología solar flotante.

A continuación, se detallan los distintos módulos empleados en el Explorador Solar. Para cada uno de ellos se explican los parámetros de entrada, así como también la variable de salida de dicho módulo. Estas variables de salida forman parte, a su vez, del conjunto de variables de entrada de otros módulos, de modo que es posible crear un diagrama de flujo que en última instancia permite calcular la tasa de evaporación del sistema de paneles flotantes.

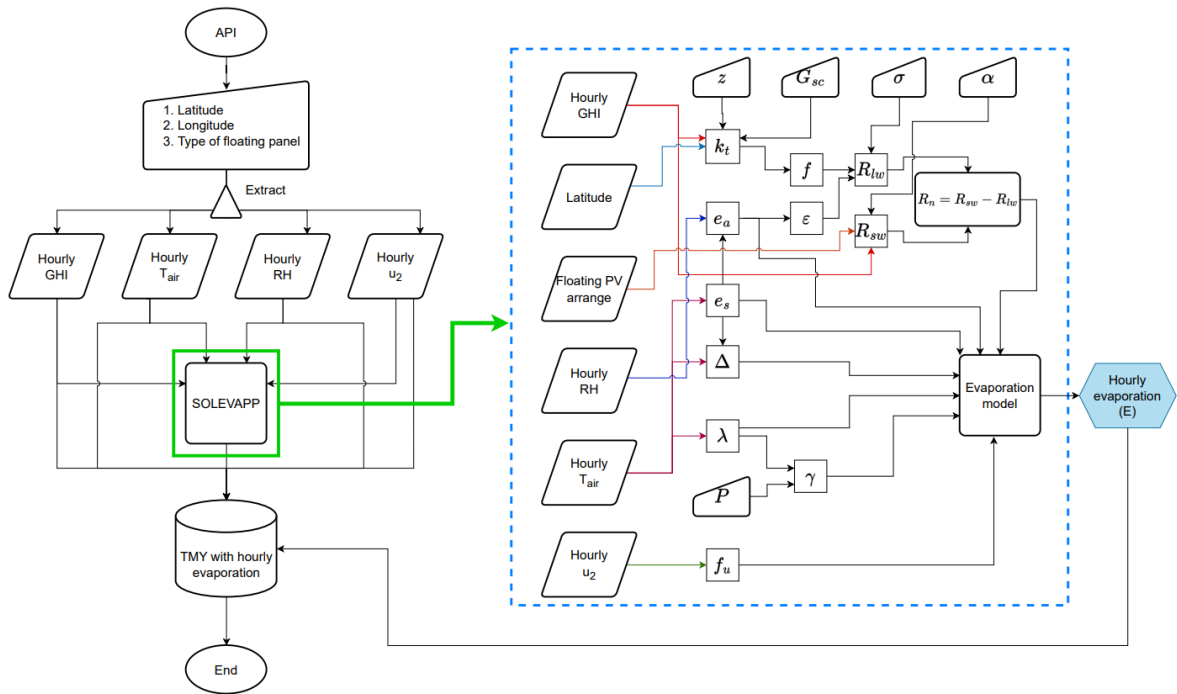


Figura 1: Esquema de flujo de información de herramienta desarrollada. A la derecha se describen los módulos internos de la herramienta desarrollada para calcular propiedades termofísicas.

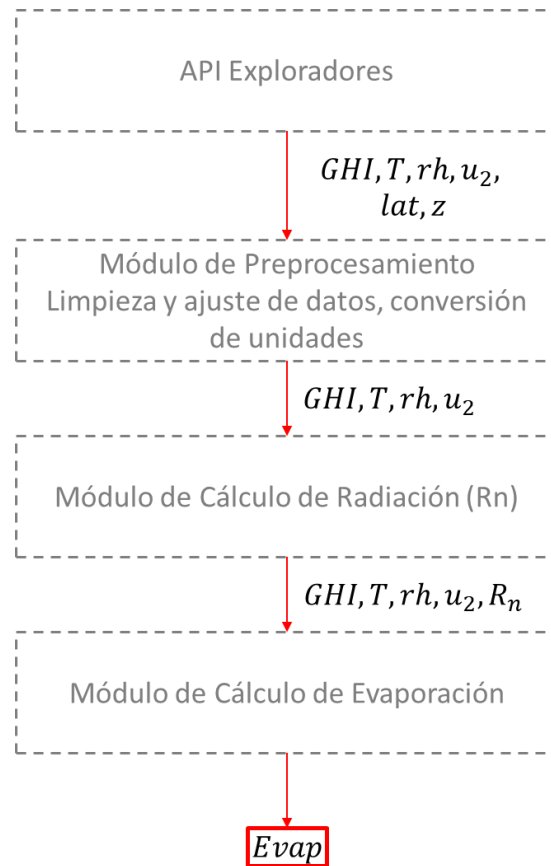


Figura 2: Esquema de interacción de los distintos módulos de cálculo para estimar la evaporación de un sistema fotovoltaico flotante.

## 2. Módulo de preprocesamiento

Este módulo se encarga de ajustar los datos proporcionados por la API del Ministerio de Energía. La herramienta desarrollada incorpora funciones que permiten ajustar automáticamente los valores entregados por la API al formato y unidades requeridos por SOLEVAPP<sup>1</sup> a través de la función ***json\_to\_df***

Los datos obtenidos de la API de los Exploradores<sup>2</sup> es radiación global horizontal en  $W/m^2$  ( $GHI$ ), temperatura ambiente en  $^{\circ}C$  ( $T$ ), humedad relativa en porcentaje de 0 a 100 % ( $rh$ ), velocidad del viento a 5.5 metros de altura ( $u_2$ ), latitud ( $lat$ ) y altura respecto al nivel del mar ( $z$ ). Además, el usuario define valores de albedo de la superficie ( $\alpha$ ) para el que se recomienda seleccionar un valor entre 0.08 y 0.23 y el tipo de panel flotante entre 4 modelos ( $FPStype$ ).

<sup>1</sup> SOLEVAPP es una herramienta desarrollada en Python por el equipo de la Universidad Diego Portales que permite estimar la evaporación de una superficie de agua cuando está cubierta con arreglos de paneles flotantes. Esta herramienta está incorporada al sistema del Explorador Solar.

<sup>2</sup> <https://exploradores.minenergia.cl/>

En el módulo de preprocesamiento, estas propiedades se convierten a los requerimientos de la ecuación de Penman-Monteith. GHI se convierte a MJh, rh pasa a valores entre 0 y 1, mientras que la velocidad del viento es convertida a su equivalente a una altura de 2 metros.

$$GHI_{PM} = GHI \cdot \frac{3.6}{1000}$$

$$rh_{PM} = \frac{rh}{100}$$

$$u_2 = \frac{u_{5.5} \cdot 4.87}{\log(67.8 * 5.5 - 5.42)}$$

$u_2$  representa a la velocidad del viento medida a 2 metros de altura. Debido a que el Explorador tiene datos a 5.5 m, ésta es convertida con la ecuación descrita precedentemente.

Tras ajustar los valores, se obtiene un *DataFrame* conteniendo la información de todos los puntos consultados por la API que son utilizados en los siguientes módulos.

Fecha	ghi_S1	evap_S1	tempc_S1	rh_S1	vel_S1	Mes
2015-01-01 00:00:00	0	0.064	17.764	0.39244	6.45247	1
2015-01-01 01:00:00	0	0.056	16.932	0.41358	6.53327	1
2015-01-01 02:00:00	0	0.056	15.762	0.63498	6.46731	1
2015-01-01 03:00:00	0	0.048	14.876	0.64644	5.91161	1

Figura 3: Ejemplo de visualización de datos corregidos.

Para evaluar los efectos de los sistemas fotovoltaicos flotantes en los niveles de evaporación en cuerpos de agua, el modelo propuesto considera cinco configuraciones representativas de los posibles escenarios a enfrentar de acuerdo con el estudio de Bontempo Scavo et al., 2021 [1]. La primera configuración se refiere a una superficie de agua sin obstáculos, la cual se utiliza como punto de referencia para comparaciones posteriores, mientras que las cuatro configuraciones restantes corresponden a diferentes sistemas PV flotantes:

### 2.1. Panel Tipo A

Esta configuración consiste en un arreglo donde el sistema flotante cubre por completo la superficie debajo del módulo PV. En estos casos, se considera que el módulo y sistema de flotación cubren completamente la superficie de agua, evitando el paso de radiación.

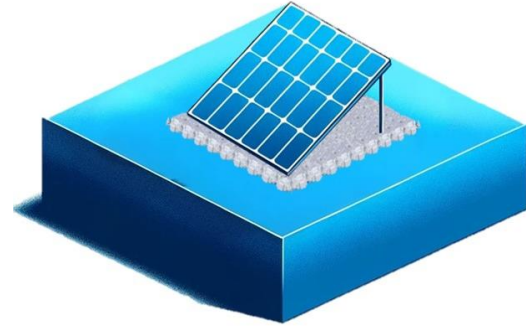


Figura 4: Configuración de panel tipo A.

## 2.2. Panel Tipo B

Esta configuración consiste en un arreglo donde el sistema flotante no cubre por completo la superficie debajo del módulo fotovoltaico (PV). En estos casos, se considera que el módulo PV cubre la superficie, pero el módulo de flotación no impide el paso de radiación.

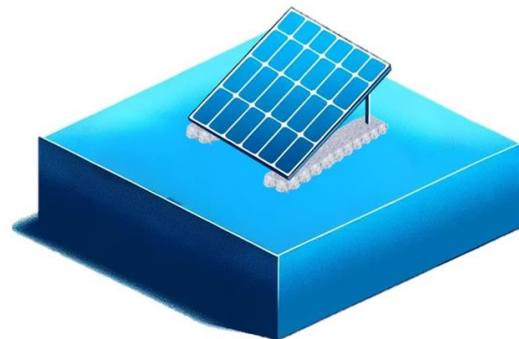


Figura 5: Configuración de panel tipo B.

## 2.3. Panel Tipo C

Esta configuración consiste en un arreglo donde el sistema flotante no cubre por completo la superficie debajo del módulo PV. Es similar al tipo B, pero también puede ser aplicada sobre canales o ríos donde es necesaria la reducción de evaporación o uso de suelo. En estos casos, se considera que el módulo PV cubre la superficie, pero el módulo de flotación no impide el paso de radiación.

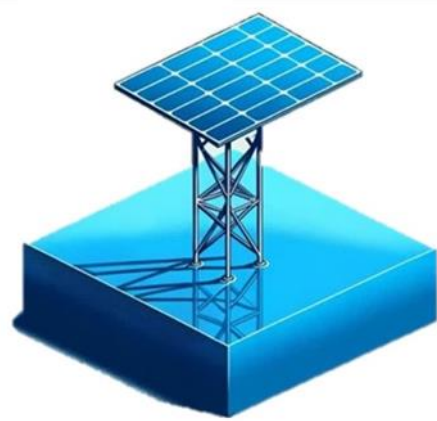
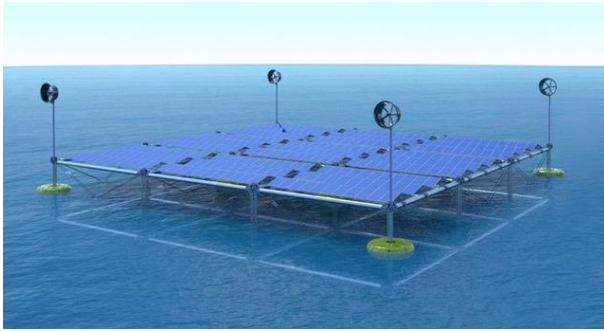


Figura 6: Configuración de panel tipo C.

## 2.4. Panel Tipo D

Esta configuración consiste en un arreglo donde el sistema flotante está completamente integrado con el flujo del cuerpo de agua, permitiéndolo seguir el movimiento de olas (en caso de existir) o adaptarse a las bajas o altas de cantidad de agua. En estos casos, se considera que el módulo PV cubre la superficie, pero el módulo de flotación no impide el paso de radiación completamente. Acá, la componente difusa de radiación es la que pasa a través del módulo PV.

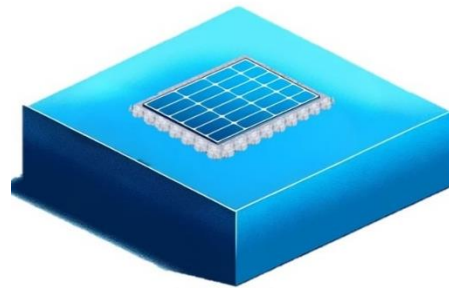


Figura 7: Configuración de panel tipo D.



### 3. Módulo de Cálculo de Radiación neta

En los modelos de Penman y Penman-Monteith, la radiación neta en la superficie del agua libre viene dada por [2, 3]:

$$R_n = (1 - \alpha) \cdot R_s - f \cdot \dot{\rho}_{eff} \cdot \sigma \cdot (T + 273.15)^4 \quad (1)$$

donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $4.903 \times 10^{-9}$  MJ/m<sup>2</sup>-día) y donde

$$\dot{\rho}_{eff} = 0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \quad (1)$$

y

$$f = 1.35k_t - 0.35 \quad (2)$$

donde el índice de claridad ( $k_t$ ) corresponde a una relación entre la radiación neta en la superficie de la Tierra, la radiación extraterrestre y la altitud ( $z$ ) en metros. Esto es:

$$k_t = \left( \frac{R_s}{R_a [0.75 + (2 \times 10^{-5})z]} \right) \quad (3)$$

Aquí, la radiación extraterrestre puede ser obtenida como [4]:

$$R_a = \frac{1}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot (\omega_s \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s)) \quad (4)$$

donde  $G_{sc}$  es la constante solar ( $4.92$  MJ/m<sup>2</sup>-h),  $\phi$  es la latitud,  $\omega_s$  es el valor del ángulo solar del atardecer,  $\delta$  es el ángulo de declinación solar y  $d_r$  es la distancia relativa entre el Sol y la Tierra. Estos tres últimos parámetros vienen dados, respectivamente, por:

$$\omega_s = \arctan(-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta)) \quad (5)$$

$$\delta = 0.409 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot J}{365} - 1.39\right) \quad (6)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot J}{365}\right) \quad (7)$$

con

$$J = \text{trunc}(30.4 \cdot M - 15) \quad (8)$$

donde  $M$  es el mes.

La presencia de paneles PV en la superficie del agua induce cambios en el balance energético entre esta superficie y la energía térmica proveniente del sol. En este contexto, la radiación neta  $R_n$  emerge como un factor crítico a considerar, ya que engloba tanto la radiación solar de onda corta entrante  $R_{sw}$  como la radiación de onda larga saliente  $R_{lw}$ .  $R_{lw}$  depende exclusivamente de la temperatura ambiente y la cantidad de nubosidad presente, lo que puede ser estimado de la siguiente forma:

$$R_{lw} = \sigma \cdot T^4 \cdot f \cdot \delta_{eff} \quad (10)$$

Por otro lado, la  $R_{sw}$  depende de factores como la disposición de los paneles, la presencia de sombra y el albedo del agua. Así, la radiación neta puede ser estimada con los modelos matemáticos indicados a continuación.

### 3.1. Panel Tipo A

Al no permitir el pase de la radiación, la radiación de onda corta es despreciable en esta configuración.

$$R_{n,PV-A} = -f \cdot \delta_{eff} \cdot \sigma \cdot (T + 273.15)^4$$

### 3.2. Panel Tipo B

Al no permitir el paso completo de la radiación, la radiación de onda corta es dependiente solo de la componente difusa.

$$R_{n,PV-B} = (1 - \alpha) \cdot R_d - f \cdot \delta_{eff} \cdot \sigma \cdot (T + 273.15)^4$$

### 3.3. Panel Tipo C

Al ser un símil de la configuración B, pero para otro tipo de aplicaciones, la radiación de onda corta también es solo función de la radiación difusa incidente.

$$R_{n,PV-C} = (1 - \alpha) \cdot R_d - f \cdot \delta_{eff} \cdot \sigma \cdot (T + 273.15)^4$$

Dicha radiación difusa viene dada por:

$$(9) \quad \frac{R_d}{R_s} = \begin{cases} 1 - 0.2727k_t + 2.4495k_t^2 - 11.9514k_t^3 + 9.3879k_t^4 & \omega_s < 81.4^\circ \quad k_T < 0.715 \\ 0.143 & \omega_s < 81.4^\circ \quad k_T \geq 0.715 \\ 1 + 0.2832k_t - 2.5557k_t^2 + 0.8448k_t^3 & \omega_s \geq 81.4^\circ \quad k_T < 0.722 \\ 0.175 & \omega_s \geq 81.4^\circ \quad k_T \geq 0.722 \end{cases}$$

### 3.4. Panel Tipo D

Al estar en contacto directo con el cuerpo de agua, esta configuración permite el paso de la radiación total, sin embargo, la cantidad de energía térmica recibida por el agua depende de la eficiencia del panel PV ( $\eta_{pv}$ ) y de una variable de ajuste que define la radiación incidente que se transfiere a través del sistema PV a la superficie del agua ( $f_{pv}$ ).

$$R_{n,PV-D} = (1 - \alpha) \cdot R_s \cdot (1 - \eta_{PV}) \cdot f_{PV} - f \cdot \dot{\alpha}_{eff} \cdot \sigma \cdot (T + 273.15)^4$$

Configuración PV	Radiación neta, $R_n = R_{sw} - R_{lw}$
Superficie libre	$R_{n,free} = (1 - \alpha) \cdot R_s - f \cdot \dot{\alpha}_{eff} \cdot \sigma \cdot (T + 273.15)^4$
Tipo-A	$R_{n,PV-A} = -f \cdot \dot{\alpha}_{eff} \cdot \sigma \cdot (T + 273.15)^4$
Tipo-B	$R_{n,PV-B} = (1 - \alpha) \cdot R_d - f \cdot \dot{\alpha}_{eff} \cdot \sigma \cdot (T + 273.15)^4$
Tipo-C	$R_{n,PV-C} = (1 - \alpha) \cdot R_d - f \cdot \dot{\alpha}_{eff} \cdot \sigma \cdot (T + 273.15)^4$
Tipo-D	$R_{n,PV-D} = (1 - \alpha) \cdot R_s \cdot (1 - \eta_{PV}) \cdot f_{PV} - f \cdot \dot{\alpha}_{eff} \cdot \sigma \cdot (T + 273.15)^4$

## 4. Módulo de Cálculo de Evaporación

Ya calculada la radiación neta ( $R_n$ ), la herramienta calcula la evaporación a través del método de Penman-Monteith:

$$E_{PM} = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot 900 \cdot u_2 \left( \frac{e_s - e_a}{T + 273.15} \right)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)}$$

Donde  $G$  es el calor absorbido por la superficie de agua (asumida como 0 para el caso de paneles flotantes [5]),  $T$  es la temperatura media del agua,  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor saturado (kPa/°C) estimada como:

$$\Delta = 4098 \cdot \frac{e_s}{(T + 237.3)^2}$$

$e_s$  es la presión de vapor de saturación media para el agua (s), aire a temperatura media de aire seco (a) calculada como:

$$e_s = 0.6108 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3}\right)$$

$$e_a = e_s \cdot rh$$

Donde  $rh$  es la humedad relativa del aire.  $\gamma$  es la constante psicrométrica del agua (kPa,°C) dependiente de la temperatura media y presión media ( $P$ ):

$$\gamma = \left( \frac{0.00163 \cdot P}{2.501 - T \cdot 2.361 \times 10^{-3}} \right)$$

## 5. Parámetros de Entrada

A continuación, se describen los parámetros de entrada para el modelo desarrollado:

**Tipo de arreglo:** Los paneles fotovoltaicos flotantes pueden ser instalados en cualquiera de las 4 configuraciones mencionadas en la sección 2.

**Albedo:** Con valores que van desde 0.08 a 0.23, el albedo de la superficie de agua indica la cantidad de radiación que se refleja respecto a la energía radiativa que ingresa al cuerpo de agua.

Las características de la instalación y pérdidas se mantienen igual que el modelo Monofacial Básico del Explorador, también modificables por el usuario.

## Referencias

1. Bontempo Scavo, F., et al., *An assessment study of evaporation rate models on a water basin with floating photovoltaic plants*. International journal of energy research, 2021. **45**(1): p. 167-188.
2. Allen, R., et al., *An update for the definition of reference evapotranspiration*. ICID bulletin, 1994. **43**(2): p. 1-34.
3. Valiantzas, J.D., *Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data*. Journal of Hydrology, 2006. **331**(3-4): p. 690-702.
4. Duffie, J.A., W.A. Beckman, and N. Blair, *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*. 2020: John Wiley & Sons.
5. Santos, F.R.d., et al., *Effects of a floating photovoltaic system on the water evaporation rate in the passaúna reservoir, Brazil*. Energies, 2022. **15**(17): p. 6274.