

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

UNIDAD SALTILLO

**Obtención de monolitos de carbón a partir de
PET reciclado y su uso en evaporación solar
interfacial**

T E S I S

Que presenta

ANDREA ALFARO BARAJAS

Para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS

EN

**SUSTENTABILIDAD DE LOS RECURSOS
NATURALES Y ENERGÍA**

Directores de la Tesis:

Dr. Arturo Isaías Martínez Enríquez

Dra. María de Lourdes Virginia Díaz Jiménez

RESUMEN

La evaporación de agua por medio de radiación solar es una tecnología emergente, este proceso tiene aplicaciones prometedoras para la desalinización de agua. Los materiales con base en carbono tienen un gran potencial para la conversión de energía solar. En esta investigación se planteó el reúso de desechos de PET en la síntesis de una estructura monolítica de carbón porosa. El efecto de diferentes parámetros de síntesis fue estudiado a través de métodos estadísticos para optimizar las características del monolito de carbón. Los resultados mostraron que la temperatura de síntesis juega un papel crucial en las propiedades del carbón monolítico. Los resultados de XRD y espectroscopía Raman indicaron la naturaleza amorfa del carbón. Las microestructuras analizadas mostraron la presencia de micro y macroporos interconectados, dependientes del proceso de formación de carbón. También, se estudió el porcentaje de volumen de poros permeables, estos tuvieron una influencia importante en el escape de vapor y la eficiencia de evaporación. Por último, al variar el espesor de monolitos, se encontró una mayor eficiencia de evaporación a mayores espesores, ya que estos últimos pueden evitar la pérdida de calor en el volumen del agua. Se logró una eficiencia de evaporación de 63.57 %, eficiencia de conversión de energía solar a térmica de 76.47 % y una pérdida de calor de 36.43 % evaluados a través de un simulador solar a escala laboratorio con una irradiación de 1000 W/m^2 . Los resultados indicaron que los monolitos de carbón son adecuados para evaporación de agua.

ABSTRACT

Water evaporation by solar means is an emerging technology, this process has promising applications for water desalination. Carbon-based materials have great potential for sustainable energy harvesting. In this research, the reuse of PET waste in the synthesis of a monolithic structure of porous carbon is exposed. The effect of different synthesis parameters was studied through statistical methods to optimize the characteristics of the carbon monoliths. The synthesis temperature plays a crucial role in the properties of monolithic carbon. XRD and Raman spectroscopy results indicated the amorphous nature of carbon. The microstructures studies detected the presence of interconnected micro and macropores, which dependent on the oxidation process. Also, the percentage of volume of permeable pores was studied, which plays an important influence on the steam escape and the evaporation efficiency. Finally, by varying the thickness of monoliths, a greater evaporation efficiency was found at higher thicknesses because can avoid the loss of heat in the volume of the water. An optimization was carried out in the solar evaporation process, reaching the following values: evaporation efficiency of 63.57 %, conversion efficiency of solar to thermal energy of 76.47 % and a heat loss of 36.43 evaluated through a laboratory scale solar simulator with an irradiation of 1000 W/m^2 . The results indicated that the carbon monoliths are suitable for water evaporation.

DEDICATORIA

A mis padres, a mi hermana y a Valentina por su amor y apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante dos años para apoyar mis estudios de maestría.

Agradezco a mi director de tesis, el Dr. Arturo I. Martínez, por su asesoramiento y guía; sin duda, la motivación por innovar y la libertad intelectual que me brindó fueron invaluable a lo largo de mi estancia en CINVESTAV. También agradezco a mi directora de tesis la Dra. Lourdes Díaz por su asesoramiento y apoyo durante la realización de esta tesis.

Por último, me gustaría agradecer al Dr. Gregorio Vargas y al Dr. Iván Escalante por sus valiosas contribuciones y por el tiempo que dedicaron para revisar mi tesis. A Darwin Vega por todas sus enseñanzas, sugerencias, pero principalmente por darme ánimo para continuar con mis metas. A Ricardo Hincapié y a Felipe Mondaca por su amistad y por la retroalimentación que brindaron a este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS.....	x
GLOSARIO DE TÉRMINOS	xi
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 ANTECEDENTES TEÓRICOS	3
2.1 Evaporación de agua.....	3
2.2 Proceso físico de evaporación.....	3
2.3 Factores que influyen en la tasa de evaporación.....	5
2.3.1 Calidad del agua	6
2.3.2 Humedad del aire.....	6
2.3.3 Temperatura.....	6
2.3.4 Radiación solar	6
2.4 Principios de los sistemas de evaporación solar	8
2.4.1 Calentamiento plasmónico localizado	9
2.4.2 Relajación no radiativa	9
2.4.3 Vibración térmica molecular	10
2.4.4 Conducción.....	11
2.4.5 Convección	12
2.4.6 Radiación térmica.....	12
2.5 Sistemas convencionales de evaporación solar.....	13
2.6 Sistemas no convencionales de evaporación solar	13
2.6.1 Absorción solar y conversión de energía.....	13
2.6.2 Reducción de pérdidas innecesarias	15
2.7 Materiales fototérmicos en evaporación solar	16
2.7.1 Metales	17
2.7.2 Semiconductores.....	17
2.7.3 Materiales con base en carbono.....	18
2.8 Polietilentereftalato (PET)	21

2.8.1	Carbonización de PET	21
2.9	Análisis numérico de evaporación solar interfacial	22
2.9.1	Método de transferencia de masa	23
2.9.2	Balance de agua	23
2.9.3	Balance de energía.....	23
2.9.4	Energía de evaporación	24
3	JUSTIFICACIÓN.....	26
4	OBJETIVOS.....	27
4.1	Objetivo general.....	27
4.2	Objetivos específicos	27
5	METODOLOGÍA CIENTÍFICA	28
5.1	Materiales.....	28
5.1.1	Variables experimentales.....	28
5.2	Síntesis de carbón	28
5.2.1	Etapas 1: Diseño experimental.....	29
5.2.2	Técnicas de caracterización de carbón	31
5.3	Etapas 2: Eficiencia del evaporador solar interfacial	31
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
6.1	Optimización de la síntesis de carbón.....	33
6.2	Optimización por el método Taguchi y ANOVA.....	37
6.3	Efecto de la temperatura, relación másica (PET/NaCl) y tiempo.....	39
6.3.1	Temperatura de síntesis de carbón.....	39
6.3.2	Relación másica PET/NaCl.....	42
6.3.2.1	Caracterización estructural del carbón	44
6.3.3	Tiempo de carbonización.....	46
6.3.4	Morfología.....	47
6.3.5	Porosidad	48
6.3.6	Propiedades ópticas	51
6.4	Análisis de eficiencia de evaporación.....	52
6.5	Observaciones finales	56
7	CONCLUSIONES.....	59
8	REFERENCIAS	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evaporación en condiciones saturadas y no saturadas.....	5
Figura 2: La masa de aire aumenta a medida que crece el ángulo del cenit solar.....	8
Figura 3: Tipos de mecanismos de conversión fototérmica. (A) Calentamiento plasmónico localizado, (B) vibración térmica de moléculas y (C) relajación no radiativa de semiconductores	9
Figura 4: Mecanismos de transferencia de calor	11
Figura 5: (A) Sistemas volumétricos, (B) Sistemas interfaciales.....	14
Figura 6: Clasificación de evaporadores solares interfaciales. (A) Contacto directo (B) Contacto indirecto	16
Figura 7: Estructura molecular de polietilentereftalato (PET) [93].....	21
Figura 8: Caracterización del sistema ISSG. La fuente de luz irradia al prototipo y se mide el cambio de masa y temperatura.	32
Figura 9: Dibujo esquemático de las configuraciones de carbón (A) 8M-SP (B) 5M-SP y (C)5M-CP.....	32
Figura 10: Análisis visual de integridad física del carbón monolítico. (A) C-7: 45.5 %, (B) C-3: 72.7 %, (C) P-3: 97.3%	34
Figura 11: Efectos principales de la relación SR para Taguchi preliminar.	34
Figura 12: Contribución de los factores en la integridad del monolito en la etapa 1 preliminar.	36
Figura 13: Relación del Módulo de Young e integridad física del monolito de carbón P1, P3, P4.....	39
Figura 14: Termogramas: TGA, primera derivada de TGA y DSC (A) PET (B) DSC PET, (C) P1 (D) P1 DSC, (E) P3 (F) P3 DSC.....	41
Figura 15: Caracterización estructural de carbones P1, P3, P4 (A) DRX, (B) Espectroscopía Raman.....	45
Figura 16: Espectro de XPS de alta resolución para C1s (P1-P3-P4).	47
Figura 17: Micrográficas de Carbón P1: (A) SEM 25x, (B) TEM.....	48
Figura 18: Isotermas de adsorción de N ₂ . P1 (Negro), P3 (Rojo), P4 (Azul).....	49
Figura 19: Reflectancia solar de 300-1000 nm de los carbones P1, P3 y P4.	51

Figura 20: Múltiples reflexiones de luz dentro de los poros.	52
Figura 21: (A) Temperatura promedio registrada. Cambio de masa de carbones P1, P3 y P4 (B) 8M-SP (C) 5M-SP (D) 5M-CP.	53
Figura 22: Carbones P1, P3 y P4 con configuraciones 8M-SP, 5M-SP y 5M-CP. (A) Tasa de evaporación, (B) Eficiencia de evaporación.	54
Figura 23: Relación entre la integridad física, módulo de Young y superficie específica. .	57
Figura 24: Relación entre la absorción solar y volumen de poros permeables en la eficiencia de evaporación.	58
Figura 25: Eficiencia de evaporación (1000 W/m^2) de ISSG P3 en comparación con otras eficiencias reportadas en la literatura.	58

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Configuración de evaporador solar con materiales a base de carbón/soporte.....	19
Tabla 2: Tamaño de poro, densidad, absorción y evaporación solar con diferentes tipos de materiales porosos sin soporte adicional.	20
Tabla 3: Variables y rangos del diseño experimental para carbón (Taguchi preliminar).....	30
Tabla 4: Arreglo ortogonal aplicado para identificar los parámetros óptimos para la obtención de carbón.....	33
Tabla 5: Valores de integridad monolítica de carbón, media, desviación estándar, y relación S/R con número de repeticiones.	35
Tabla 6: Análisis de varianza (ANOVA) para % de integridad monolítica (SN: mayor es mejor)	36
Tabla 7: Media de medias y predicción de media con la configuración óptima.	37
Tabla 8: Variables y rangos del diseño experimental para la síntesis de carbón (Taguchi 2 optimización).....	37
Tabla 9: Condiciones experimentales para la optimización de integridad monolítica del carbón. Medias y relación S/R.....	38
Tabla 10: Cálculo estequiométrico % C de pérdida de peso de TGA	42
Tabla 11: Entalpía de fusión de muestras PET, P1, P3.	43
Tabla 12: Eficiencia de pérdida de calor de ISSG P1, P3, P4.	56

LISTA DE ABREVIATURAS

VSSG	Volumetric Solar Steam Generation	<i>Generación de vapor solar volumétrica</i>
ISSG	Interfacial Solar Steam Generation	<i>Generación de vapor solar interfacial</i>
PET	Polietilentereftalato	
PVA	Poli(vinil alcohol)	
PTFE	Poli(tetrafluoroetileno)	
GO	Graphene oxide	<i>Óxido de grafeno</i>
PVDF	Polifloruro de vinilideno	
PPy	Polipirrol	
PET	Polietilentereftalato	
SEM	Scanning electron microscopy	<i>Microscopio electrónico de barrido</i>
TGA	Thermal gravimetric analysis	<i>Análisis termogravimétrico</i>
DSC	Differential Scanning Calorimetry	<i>Calorimetría de barrido diferencial</i>
BET	Brunauer-Emmett-Teller	<i>Adsorción de nitrógeno</i>
XRD	X-ray diffraction	<i>Difracción de rayos X</i>
UV-Vis	Espectroscopia ultravioleta-visible	
TEM	Transmission Electron Microscopy	<i>Microscopio electrónico de transmisión</i>
XPS	X-ray photoelectron spectroscopy	<i>Espectroscopía fotoelectrónica de rayos X</i>
RGO	Reduced graphene oxide	<i>Óxido de grafeno reducido</i>
SA	Sodium alginate	<i>Alginato de sodio</i>

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Banda prohibida	Diferencia de energía entre la parte superior de la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción, en materiales aislantes y semiconductores [1].
Alótropos de carbono	Diferentes estructuras bien definidas de materiales de carbono puro, en las que los átomos de carbono están unidos de formas específicas [2].
Hibridación	Combinación de orbitales atómicos de distinta energía para formar orbitales más estables [3].
Materiales plasmónicos	Material que los plasmones para lograr propiedades ópticas que no se ve en la naturaleza, los cuales son producidos a partir de la interacción de la luz con materiales metal-dieléctricos [4].
Fotoexcitación	Proceso de excitar los átomos o moléculas de un material mediante la absorción de energía radiante [5].
Liofilización	Método estándar que comprende las etapas de: enfriar el material para inducir la congelación y secar el material congelado [6].
Cenit	Situación del Sol en el punto más alto de su elevación sobre el horizonte.

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el suministro de agua dulce es un gran desafío. La expresión "estrés hídrico" describe la situación de escasez de agua dulce para satisfacer la demanda humana y ecológica. Solo el 3.3 % del volumen global de agua es apto para uso industrial, agrícola y para consumo humano, el resto es agua salina. El acceso al agua dulce será más limitado en el futuro debido al rápido crecimiento de la población, la contaminación ambiental y al cambio climático. Por esta razón, la desalinización de agua se ha vuelto una necesidad inmediata [7,8].

La desalinización es el proceso por el cual las sales se eliminan del agua para que sea útil, incluso como agua potable. Hoy en día existen diferentes tecnologías de desalinización, sin embargo, su operación se basa en el consumo de combustibles fósiles. Entre las diferentes tecnologías, la destilación y la ósmosis inversa (O.R) son las más utilizadas; aunque la destilación es una técnica efectiva en comparación a la ósmosis inversa, requiere mucha energía (Destilación = 6 - 23.5 kWh / m³ y O.R = 4.0 – 4.5 kWh / m³) y tiene un impacto significativo en el medio ambiente por sus altas emisiones de carbono (Destilación = 0.3-34.7 kg CO₂/ m³ y O.R = 0.224-2.238 kg CO₂/ m³) [9]. Así, por su enfoque sustentable, el uso de la energía solar para impulsar la desalinización de agua se considera una de las soluciones más prometedoras para reducir el estrés hídrico [10].

La utilización de materiales fototérmicos con alta absorción solar ($\alpha_s > 90\%$) en paralelo a los diseños de los dispositivos evaporadores, ofrece posibilidades para lograr una eficiente desalinización solar. Los evaporadores solares se pueden clasificar según la posición del material fototérmico. El primero es un sistema volumétrico (VSSG, por sus siglas en inglés, *Volumetric Solar Steam Generation*) donde los materiales fototérmicos se dispersan en el agua. El segundo es un sistema de generación de vapor solar interfacial (ISSG, por sus siglas en inglés, *Interfacial Solar Steam Generation*), donde los materiales fototérmicos están en la interfaz agua-aire [11,12].

Los sistemas ISSG disminuyen la pérdida de calor en el agua en volumen (~ 90 %), por lo tanto son más eficientes [13]. La configuración más común consiste en un material fototérmico bidimensional 2D (películas, membranas etc.) que convierte la radiación solar en calor y un material poroso que permite el paso del agua y evita la transferencia de calor en el volumen. A

pesar de la capacidad de generación de vapor, los materiales 2D se han visto limitados por el paso de agua. Debido a esta limitación, se han desarrollado estructuras fototérmicas con poros para promover la rápida transmisión de agua y el escape de vapor [14]. Sin embargo, la escalabilidad de la mayoría de los absorbedores solares diseñados se ve obstaculizada por la complejidad de los procesos de síntesis y los altos costos de los materiales utilizados (e.g. materiales plasmónicos) [15].

Los plásticos tienen ventajas para la fabricación de estructuras porosas en comparación con los materiales inorgánicos (e.g. nanomateriales), ya que son económicos debido a su alta disponibilidad de residuos, además, son adecuados para fabricar monolitos con propiedades aislantes [16]. El PET (polietileno tereftalato) ($C_{10}H_8O_4$) se considera el plástico más utilizado, comúnmente en botellas para líquidos. Se estima que actualmente se han acumulado 150 millones de toneladas en los océanos [17]. La degradación natural del PET lleva mucho tiempo y por lo tanto su reciclaje es vital. La carbonización es una forma efectiva de reciclar desechos de PET en materiales con base en carbono [18,19]. Por tal motivo, este proyecto de tesis se centra en el desarrollo de un monolito de carbón como material fototérmico, sintetizado a partir de residuos de botellas de PET como un sistema prometedor para aumentar la eficiencia de evaporación solar interfacial.

2 ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1 Evaporación de agua

La evaporación es un fenómeno físico en el que se da la transición de fase de agua líquida a vapor. Las principales técnicas de evaporación se han visto afectadas por la crisis energética, por su dependencia de las fuentes de energía convencionales. Esta crisis energética podría resolverse mediante el uso eficiente y efectivo de los recursos energéticos renovables. La utilización de la energía solar para la evaporación es una idea ancestral que ha sido retomada por ser una energía limpia y abundante [20].

2.2 Proceso físico de evaporación

Un estudio de la evaporación del agua puede iniciarse en la interfaz agua-vapor. Una interfaz es una región de transición para fenómenos físicos. En la fase líquida, las moléculas adyacentes se atraen entre sí con diferentes interacciones, como las fuerzas de van der Waals o los enlaces de hidrógeno. Estas interacciones son fuertes debido a que las moléculas están muy cercanas unas de otras en el líquido. Sin embargo, cerca de la interfaz, menos moléculas son atraídas y la interacción no es isotrópica. Esto conduce a una tensión en la dirección de la interfaz; que se conoce como tensión superficial y es un fenómeno que depende de la naturaleza del líquido, así como de la temperatura. La tensión superficial (σ) en la mayoría de los casos disminuye con un aumento de la temperatura (T) y puede ser representada según la ecuación (1):

$$\sigma = \sigma_0 - \gamma(T - T_0) \quad (1)$$

donde, σ_0 es la tensión superficial inicial, γ es una constante dependiente de la naturaleza del líquido y T y T_0 son la temperatura final e inicial respectivamente.

El fenómeno de evaporación se verifica mediante una reducción de la tensión superficial del agua. Las moléculas del líquido se evaporan debido a que las fuerzas atractivas que existen en el estado líquido son vencidas; es decir, que, al aumentar la energía, decrece la tensión superficial.

La tasa de evaporación es inversamente proporcional a la tensión superficial, de modo que, si se reduce la última, aumenta la primera.

Al evaporarse, el líquido pierde sus moléculas más energéticas y la temperatura del líquido decrece. Para mantener constante la temperatura del líquido y así su tasa de evaporación, debe agregarse energía en forma de calor, llamado calor latente de vaporización. Una relación comúnmente usada es la descrita en la ecuación (2):

$$h_w = 2.501 - 0.002361T_w \quad (2)$$

donde h_w es el calor latente de vaporización del agua en MJ/kg y T_w es la temperatura del agua en °C. El calor latente de vaporización para evaporar 1 kg de agua a 0 °C es 2260 kJ.

La energía absorbida por las moléculas de agua aumentará la energía y la brecha entre moléculas, causando que las fuerzas moleculares que sostienen las moléculas puedan debilitarse y la energía cinética aumente. Si hay un aumento suficientemente grande de energía cinética, las moléculas podrán escapar a la superficie del agua líquida como vapor. El movimiento de las moléculas de agua desde la capa de vapor de agua líquida sobre la superficie del agua produce una presión conocida como presión de vapor. A medida que las moléculas continúan escapando colisionan en el aire, haciendo que muchas moléculas regresen al agua, este punto se conoce como presión de vapor de saturación como se muestra en la Figura 1.

La evaporación es así, un proceso endotérmico en la interfaz aire-agua. Además, otros mecanismos de calor pueden aparecer, tales como convección o radiación. Una descripción general de estos mecanismos adicionales se discute en la Sección 2.4.

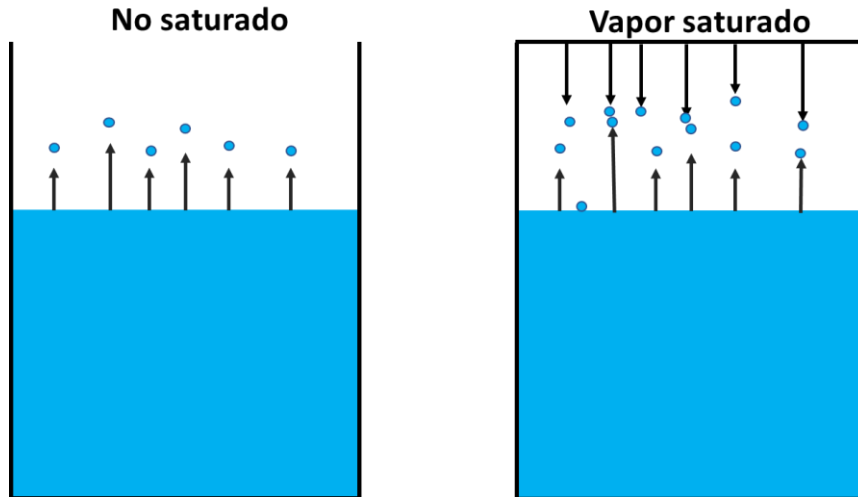


Figura 1: Evaporación en condiciones saturadas y no saturadas.

En 1802 el trabajo de Dalton estableció que la tasa de evaporación en una superficie de agua es proporcional a la diferencia de la presión de vapor en la superficie del agua y en el aire circundante. En la ley de Dalton se considera el primer modelo matemático de evaporación, dado por la ecuación (3):

$$E = \alpha(e_o - e) \quad (3)$$

donde E es la tasa de evaporación del agua en la superficie, expresada como tasa por unidad de tiempo; α es un coeficiente que depende de diferentes factores que afectan a la evaporación como la velocidad media de tiempo, e_o es la presión de saturación de vapor en una interface aire-agua y e es la presión del aire [21,22].

A partir de este modelo, se han desarrollado numerosos métodos para estimar la evaporación de agua, entre los que destacan: 1) balance de energía, 2) balance de agua y 3) método de transferencia de masa. Una descripción general es discutida en la sección 2.9.

2.3 Factores que influyen en la tasa de evaporación

Estimar la tasa de evaporación puede conducir a la determinación del tiempo de evaporación y la cantidad de vapor producido. Este conocimiento es muy valioso para aplicaciones de

desalinización. Como se mencionó anteriormente, la tasa de evaporación depende de diferentes factores, entre ellos pueden citarse los siguientes:

2.3.1 Calidad del agua

La calidad del agua se considera un factor que influye en la tasa de evaporación del agua. Cuando aumenta la salinidad, la tasa de evaporación disminuye, ya que disminuye la energía libre del agua debido a que la actividad molecular del agua se reduce. Esto tiene el efecto de reducir la presión de vapor de saturación sobre una superficie de agua salina. El flujo de calor latente reducido de la evaporación del agua salina aumenta la temperatura del agua superficial, lo que promueve la evaporación; sin embargo, el efecto de la salinidad supera el efecto del aumento de la temperatura y la evaporación finalmente se reduce [23].

2.3.2 Humedad del aire

El término humedad se refiere a la cantidad de vapor de agua presente en el aire. La cantidad de vapor de agua que puede contener el aire depende de su temperatura. La tasa de evaporación es proporcional a la diferencia entre la presión de vapor de saturación a la temperatura del agua y la presión de vapor real en el aire.

2.3.3 Temperatura

La temperatura de la superficie del agua determina la velocidad a la que las moléculas de agua salen de la superficie. De manera similar, a medida que aumenta la temperatura del ambiente, la humedad relativa disminuye. Como la evaporación es una función de la diferencia de dos presiones de vapor, el aumento similar de la temperatura del agua y el aire puede no aumentar la velocidad de evaporación. La temperatura del aire y el agua dependen en gran medida de la radiación solar [24].

2.3.4 Radiación solar

Dado que la evaporación requiere un suministro continuo de energía, la radiación solar es generalmente considerada como el factor más importante en la tasa de evaporación. De ahí se ha sugerido el término “evaporación solar”, que enfatiza la estrecha correlación entre la energía solar y la evaporación.

La radiación es el modo de transferencia de calor por el cual el sol transfiere energía a la Tierra. Se produce en el núcleo del sol debido a los procesos de fusión de partículas y fotones de alta energía. La mayoría de esta energía viaja en forma de radiación electromagnética. Este espectro corresponde a la radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura de 5800 K [25].

La irradiancia solar, es la potencia radiante incidente por metro cuadrado de una superficie (W/m^2). La radiación solar que llega al suelo es dispersada, absorbida o transmitida en función de las cantidades y tipos de componentes en la atmósfera, por lo tanto, la irradiancia en la superficie de la Tierra cambia respecto a la atmósfera. Cuando la radiación solar cruza la atmósfera, existen diferentes efectos que producen una reducción de aproximadamente un 30 % cuando llega a la Tierra. La radiación solar se reduce debido a la absorción, dispersión y reflexión. La dispersión ocurre cuando una parte de la radiación se desvía de su propagación original debido a las moléculas o partículas encontradas. Por otro lado, la absorción es causada por moléculas en la atmósfera que absorben energía en longitudes de ondas específicas, por ejemplo, el ozono (O_3) absorbe casi por completo la radiación ultravioleta, el vapor de agua (H_2O) y metano (CH_4) absorben longitudes en el infrarrojo lejano [26].

Existe una porción que alcanza directamente la superficie terrestre sin sufrir un cambio de dirección llamada radiación solar directa. La longitud del camino de radiación solar a través de la atmósfera está parametrizada por el término “masa de aire”, que describe la trayectoria de la radiación al cenit y al nivel del mar. Por definición la masa de aire aumenta a medida que crece el ángulo del cenit solar (θ_z). Para las aplicaciones solares, como condición estándar, se considera una masa de aire AM1.5, que corresponde a un $\theta_z = 48.2^\circ$ respecto a la posición del cenit (Figura 2). La irradiancia solar en la superficie terrestre a la altura del nivel del mar a $\theta_z = 48.2^\circ$, tiene una potencia de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$.

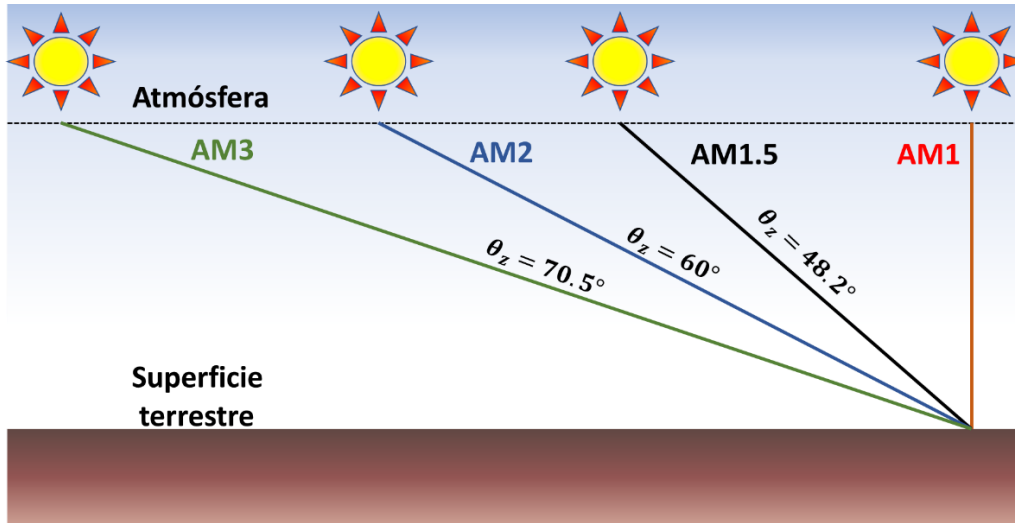


Figura 2: La masa de aire aumenta a medida que crece el ángulo del cenit solar.

2.4 Principios de los sistemas de evaporación solar

Las propiedades ópticas y térmicas de los materiales se pueden aprovechar para el diseño de sistemas de evaporación solar. La absorptancia solar es la relación del total de energía solar absorbida a la radiación incidente; se considera la capacidad de un material para absorber la radiación solar. La absorptancia solar total para un ángulo de incidencia dado está determinada según la ecuación (4), con la distribución de irradiancia solar estándar (AM1.5):

$$\alpha_s = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} (1 - \rho_\lambda) \cdot I_\lambda^{AM1.5} d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I_\lambda^{AM1.5} d\lambda} \quad (4)$$

donde λ_{min} , λ_{max} corresponden a las longitudes de onda mínima y máxima, ρ_λ es la reflectancia, I_λ es la longitud de onda dependiente de la irradiancia solar.

Así, un material absorbedor debe tener una alta absorptancia en longitudes de onda de 300 a 2500 cm^{-1} para convertirlo en energía calorífica [27].

Cuando una superficie de un material está sujeta a la radiación electromagnética, una fracción de la energía de los fotones se puede transformar en otras formas de energía: energía térmica y fotovoltaica a través de procesos fotovoltaicos, fotoquímicos y fototérmicos. Los procesos

fototérmicos consisten en una conversión directa de radiación solar en calor. El efecto fototérmico se produce a través de la fotoexcitación, que da como resultado la producción de energía térmica. Los mecanismos de conversión fototérmica se pueden clasificar como: a) calentamiento plasmónico localizado, b) vibración térmica de moléculas y c) relajación no radiativa de semiconductores, ver Figura 3 [27].

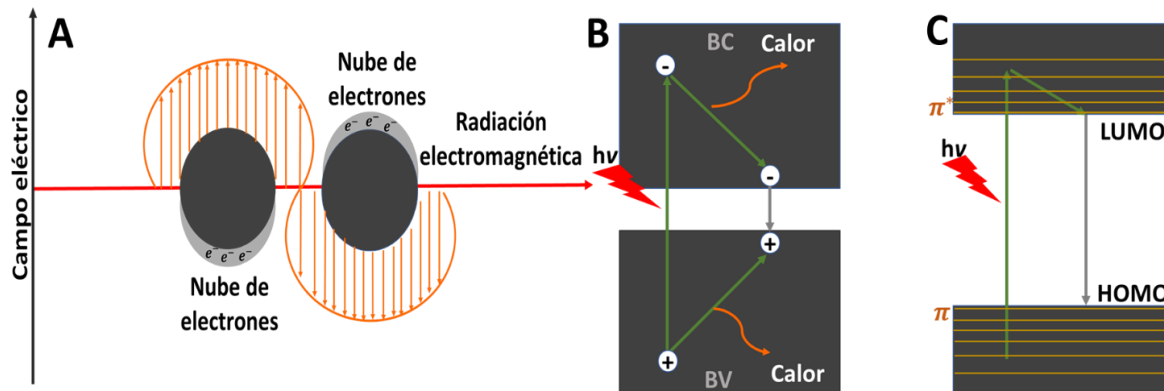


Figura 3: Tipos de mecanismos de conversión fototérmica. (A) Calentamiento plasmónico localizado, (B) vibración térmica de moléculas y (C) relajación no radiativa de semiconductores

2.4.1 Calentamiento plasmónico localizado

El efecto plasmónico localizado ocurre por la absorción de la radiación electromagnética, donde los electrones libres de conducción se excitan a estados de mayor energía dentro de la banda de conducción. El efecto de resonancia plasmónica es una oscilación coherente que ocurre cuando la frecuencia de los fotones coincide con la frecuencia de los electrones de la superficie metálica [28].

2.4.2 Relajación no radiativa

Para materiales semiconductores, se produce una absorción de la radiación electromagnética en longitudes que coinciden con la banda prohibida. La relajación no radiativa es un proceso en semiconductores mediante el cual los portadores de carga (electrones y huecos) se recombinan liberando un fonón. Dado que se genera un fonón, en la recombinación no radiativa se produce calor, aumentando la temperatura del material [29,30].

2.4.3 Vibración térmica molecular

Para los materiales orgánicos, la forma de generar calor es a través de la vibración reticular cuando absorben radiación electromagnética. El proceso de absorción de radiación por parte de una molécula puede llevarse a cabo por transiciones electrónicas entre diferentes niveles de energía; las transiciones comúnmente encontradas son σ al estado excitado σ^* y orbital π al estado excitado π^* . Los orbitales moleculares asociados con los enlaces sencillos en las moléculas orgánicas se nombran orbitales sigma σ . La mayoría de los enlaces simples de carbono tales como C-C, C-H, O-H y C-O tienen brechas grandes de energía entre σ y σ^* ; por tanto, su transición no se da bajo la radiación solar. Por otro lado, el doble enlace contiene dos tipos de orbitales σ y π , los enlaces π pueden excitarse del orbital π al π^* con menor energía en el rango visible, debido a que los electrones están menos fuertemente unidos.

Así, cuando un material se ilumina con radiación electromagnética que coincide con una posible transición electrónica dentro de la molécula, un electrón absorbe la luz y se excita desde el estado fundamental (HOMO) a un orbital de mayor energía (LUMO). La longitud de onda de estas bandas depende del espaciado de niveles electrónicos. La brecha de energía entre el orbital HOMO y LUMO disminuye con un mayor número de enlaces π . El calor se genera cuando los electrones excitados se relajan a través del acoplamiento electrón-fonón y, por tanto, la energía se transfiere de los electrones excitados a la red cristalina, lo que resulta en un aumento de temperatura [31].

En el estudio de evaporación solar de agua, los mecanismos de transferencia de calor son factores determinantes en la eficiencia de evaporación. El calor es la forma de energía que puede transferirse de un sistema a otro como resultado de un gradiente de temperatura y se puede transferir de tres modos diferentes: conducción, convección y radiación como se observa en la Figura 4 [32].

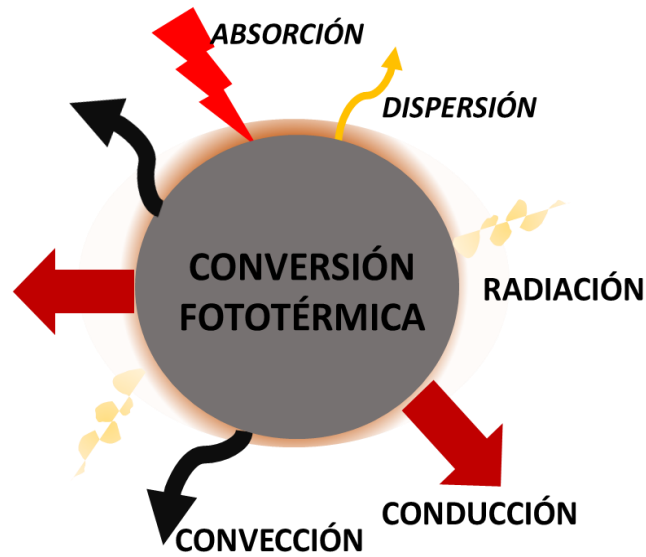


Figura 4: Mecanismos de transferencia de calor

2.4.4 Conducción

La conducción es el proceso de transportar energía (energía interna) desde una región de alta temperatura a una región de baja temperatura dentro de un cuerpo a través del movimiento molecular. La conducción puede tener lugar en sólidos, líquidos o gases. En gases y líquidos, la conducción se debe a las colisiones y a la difusión durante su movimiento aleatorio. En sólidos, se debe a la combinación de vibraciones de las moléculas en una red y el transporte de energía por electrones libres. La velocidad de conducción de calor a través de un medio depende de la geometría del medio, su grosor y el material del medio, así como la diferencia de temperatura a través del medio.

La ley de conducción de calor de Fourier establece que el flujo de calor, resultante de la conducción térmica, es proporcional a la magnitud del gradiente térmico con un signo opuesto, como se describe en la ecuación (5):

$$q = \frac{\dot{Q}}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

dónde q es el flujo de calor [W/m^2] y k [$W/m \cdot K$] es la conductividad térmica del material [33].

2.4.5 Convección

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento e involucra los efectos combinados de conducción y movimiento fluido. Cuanto más rápido sea el movimiento del fluido, mayor será la transferencia de calor por convección. La velocidad de transferencia de calor por convección depende de la geometría y la temperatura de la superficie, así como de la temperatura, la velocidad y las propiedades termofísicas del fluido. La tasa de transferencia de calor por convección desde una superficie a un fluido viene dada por la ecuación (6):

$$q = hA (T_s - T_\infty) \quad (6)$$

dónde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, A representa el área superficial del sólido, T_s y T_∞ son la temperatura de la superficie y el fluido, respectivamente [34].

2.4.6 Radiación térmica

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de las configuraciones electrónicas. La cantidad de energía radiante que emite una superficie depende de la temperatura absoluta y de la naturaleza de la superficie. Un radiador perfecto, llamado cuerpo negro, emite energía radiante de su superficie a una tasa \dot{Q} , la que se describe por la ecuación (7):

$$\dot{Q} = \sigma AT^4 \quad (7)$$

donde A es el área del cuerpo, T es la temperatura absoluta (K) y σ es una constante conocida como Stefan Boltzmann. Esta ecuación establece que la tasa de radiación total aumenta muy rápidamente con la temperatura. Los cuerpos reales no cumplen con la especificación de una radiación ideal y emiten radiación a una velocidad menor que los cuerpos negros y se expresa según la ecuación (8):

$$\dot{Q} = \varepsilon A \sigma T^4 \quad (8)$$

donde ε es definido como la emitancia de la superficie [35].

2.5 Sistemas convencionales de evaporación solar

Las tecnologías de evaporación solar comunes incluyen calentadores solares, estanques y alambiques solares. En la generación de vapor mediante estos dispositivos, el volumen del agua se calienta entre 50 y 90 °C (para evaporación de agua) [36]. Estas tecnologías utilizan concentración óptica costosa para calentar el agua. En algunos casos, se utilizan materiales con alta capacidad de absorción de luz, pero la eficiencia de conversión solar sigue siendo relativamente baja (e.g. 30-40 %), debido a la disipación de calor al agua a granel [37].

Se ha estudiado el efecto del acoplamiento de un colector solar de placa plana para aumentar la eficiencia de evaporación de agua [38]. Además, se han explorado concentradores ópticos con diferentes geometrías como disco parabólico [39,40], lentes Fresnel [41], utilizados para evaporar agua. Estos sistemas implican una alta concentración óptica y algunos de ellos necesitan vacío para reducir la pérdida de calor por convección, lo que aumenta la complejidad y costo a los sistemas fototérmicos. Por lo tanto, es necesario desarrollar sistemas de conversión de energía solar rentables y de alta eficiencia para la generación de vapor.

2.6 Sistemas no convencionales de evaporación solar

Para aprovechar de manera eficiente la energía solar, se deben desarrollar tecnologías para que los procesos de conversión fototérmica y de transferencia de calor sean más eficientes energéticamente y así, lograr su sustentabilidad. Existen diferentes investigaciones que se enfocan en resolver los factores que afectan la eficiencia de evaporación:

2.6.1 Absorción solar y conversión de energía

La irradiación solar en una masa de aire AM1.5 es de 1000 W/m²; esta es inadecuada para lograr una alta tasa de evaporación de agua. Para absorber más radiación solar, se deben introducir sistemas con materiales fototérmicos. En este sentido, hay dos corrientes principales según la posición de los materiales fototérmicos: sistemas volumétricos (VSSG) y sistemas interfaciales (ISSG) como se observa en la Figura 5.

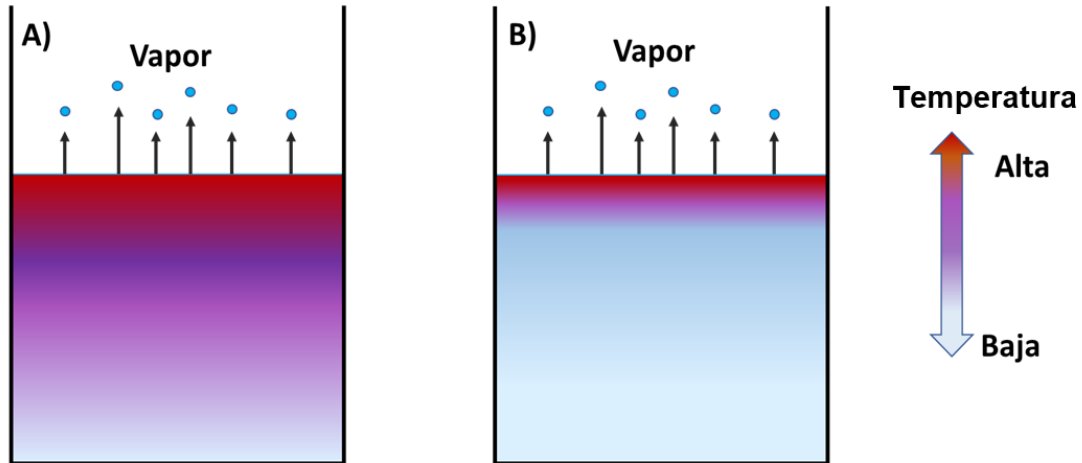


Figura 5: (A) Sistemas volumétricos, (B) Sistemas interfaciales

Los metales y los semiconductores son comúnmente materiales fototérmicos solares asentados en el fondo del agua debido a su alta densidad. Cuando se usan estos materiales, una gran parte de la irradiancia solar incidente se transfiere a todo el depósito, lo que resulta en grandes pérdidas de calor sensible (llamados sistemas volumétricos). Al reducir sus dimensiones a la nanoescala, pueden funcionar como materiales volumétricos. En la última década, el progreso en el campo de la nanotecnología ha traído una revolución en el diseño de materiales inteligentes para diversas aplicaciones. Las nanopartículas son de gran interés en óptica, ya que tienen propiedades plasmónicas e interactúan fuertemente con la radiación electromagnética. Los mecanismos de generación de vapor mejorados con nanopartículas son: absorción de luz incidente para producir calor por nanopartículas plasmónicas y rápida transferencia de calor en el agua [36]. La longitud de onda de resonancia del plasmón puede ajustarse por la composición, el tamaño, geometría, ancho de espacio entre partículas y entorno circundante [37].

En las últimas décadas, se realizaron varios estudios para abordar la eficiencia de los sistemas de evaporación. En 2013, Neumann et al. [42] utilizaron la alta conductividad térmica de nanopartículas de SiO_2/Au iluminadas por luz solar las cuales lograron una conversión fototérmica del 80 %. Sin embargo, la eficiencia de evaporación de este método fue alrededor de 24 %. De esta manera, se ha comprobado que los absorbentes interfaciales son beneficiosos para mejorar la vaporización, pero es difícil encontrar métodos de síntesis confiables para la solución a los posibles problemas de contaminación asociados con estos materiales.

Por otra parte, se ha evaluado el desempeño de materiales de baja densidad, como el carbón, que pueden permanecer en la interfaz aire-agua. A este tipo de materiales se les denomina receptores solares interfaciales. Ghasemi et al. [43] estudiaron estos sistemas desarrollando una capa de carbón (10 mm de espesor) que soporta una capa de grafito exfoliado (5 mm de espesor); el grafito exfoliado involucró un tratamiento con ácido nítrico de al menos 100 veces. Con este sistema se obtuvo una eficiencia de evaporación de 85 %, resultado de las características de la estructura, que incluyeron aislamiento térmico, absorción en el espectro solar y poros hidrofílicos.

En este sentido, el calentamiento interfacial localiza la energía solar donde se produce la evaporación y minimiza las pérdidas de calor que conducen a una mayor eficiencia. Existen diferentes artículos que abordan la temática a través del desarrollo de materiales fototérmicos tales como nanotubos de carbono [44], óxido de grafeno [45], o NPs de oro [46]; e ingeniería de estructuras de superficies, por ejemplo, diseños biomiméticos [47], bidimensionales [30] o tridimensionales [48]. Acorde con los materiales fototérmicos, existen tres tipos principales de absorbedores interfaciales, a saber, materiales plasmónicos, materiales semiconductores y materiales a base de carbón [49]. Una revisión detallada de los materiales utilizados en los sistemas solares interfaciales se discutirá en la Sección 2.7.

2.6.2 Reducción de pérdidas innecesarias

Es importante la optimización de los parámetros del sistema interfacial considerando los factores externos que afectan la evaporación, los cuales se describieron en la Sección 2.3 (calidad del agua, temperatura, humedad del aire y radiación solar). Estos conceptos se exploraron en este trabajo para el diseño, fabricación y evaluación de sistemas solares para lograr una generación de calor localizada eficiente en evaporación de agua. Así, el calentamiento localizado y la disminución de pérdida de calor, hace a los sistemas ISSG una vía efectiva para la generación de vapor. Para lograr un sistema interfacial, es necesario cumplir de manera simultánea una alta absorción ($\alpha_s > 90 \%$), transporte de agua y la mínima pérdida de calor en el volumen [12,50].

La estructura de los evaporadores solares interfaciales influye en su rendimiento y función manipulando la ubicación de la interfaz fototérmica. Se pueden clasificar en dos categorías A) Contacto directo y B) Contacto indirecto como se muestra en la Figura 6.

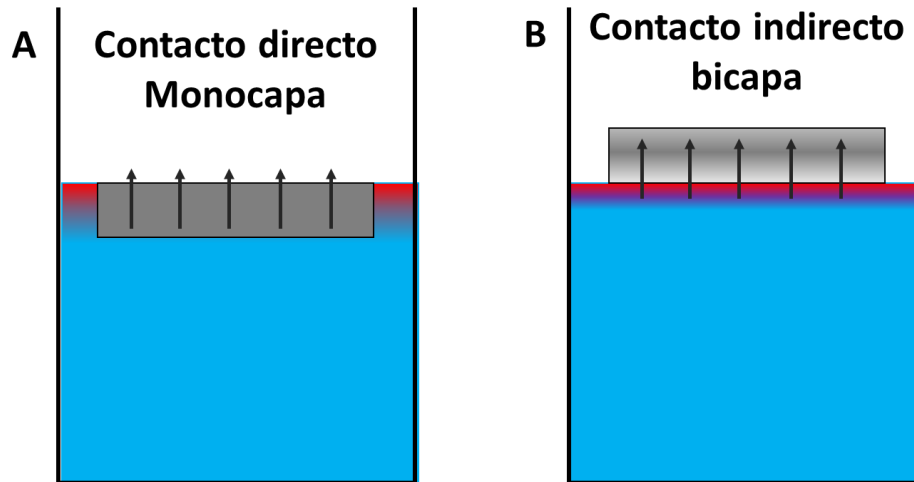


Figura 6: Clasificación de evaporadores solares interfaciales. (A) Contacto directo (B) Contacto indirecto

El contacto directo puede concentrar el calor en la interfaz aire-agua, promoviendo una mejor eficiencia de evaporación, lo que significa que la superficie del material fototérmico puede estar a la misma altura de la interfaz como se muestra en la Figura 6A. Para una mejor concentración de irradiación solar, la interfaz de evaporación se puede separar de la superficie del agua original. En el contacto indirecto ver Figura 6B, el líquido puede elevarse a una interfaz más alta para vaporizarse a través de un bombeo de agua. Una de las mayores ventajas de este modo es que la transferencia de calor hacia abajo puede ser en gran medida resistido, lo que resulta en una eficiencia alta de la generación de vapor [51,52]. Para proporcionar la información de fondo de los sistemas interfaciales, en la siguiente sección se describen los materiales fototérmicos utilizados para la evaporación solar.

2.7 Materiales fototérmicos en evaporación solar

Los materiales fototérmicos utilizados en aplicaciones de calor localizado deben cumplir con los estándares básicos: altamente absorbente sobre el espectro de radiación solar, mientras que es capaz de producir y entregar energía térmica a un volumen limitado del agua. Mediante la manipulación de morfologías, estructuras a granel y componentes químicos, se han investigado

diferentes materiales fototérmicos para aumentar la absorción de luz y la generación de calor y por lo tanto, promover la eficiencia de evaporación [53].

2.7.1 Metales

Los metales nobles, como el oro (Au) [54], plata (Ag), aluminio (Al) [55], cobre (Cu), etc. han sido investigados como materiales plasmónicos para generar calor localizado [56]. Por ejemplo, Lapotko [57] propuso la generación de burbujas de vapor por medio de AuNPs; las AuNPs localizaron las longitudes de onda y al mismo tiempo amplificaron la dispersión óptica y, por tanto, mejoraron la eficiencia de evaporación. Otro ejemplo es la investigación de Jin et al. [58] donde se generó vapor mediante la dispersión de nanopartículas de oro en agua y alcanzaron una conversión térmica de 80.3 % bajo $220,000 \text{ W/m}^2$. Estas investigaciones precedentes se llevaron a cabo en un fluido en volumen, con temperaturas por debajo del punto de ebullición [59]. Por otro lado, se han desarrollado estructuras flotantes para generar vapor con bajas concentraciones ópticas. Tal es el caso de Bae et al. [60] al desarrollar una estructura de oro con huecos de 0-200 nm; la estructura flotó en la interfaz agua-aire y bombeó agua por efecto capilar a la superficie, logrando una conversión térmica de hasta 57 % a $20,000 \text{ W/m}^2$. Con el mismo concepto Chen et al. [61] desarrollaron películas compuestas de nanofibras de poli(p-fenileno benzobisoxazol) mediante una técnica de ensamblaje capa por capa usando como soporte nanopartículas de Au, dando como resultado una eficiencia de evaporación 83 %.

Recientemente se han propuesto otros metales para aplicaciones de alta temperatura. En 2018, Tao et al. [62] desarrollaron una nanoestructura porosa de Cu_9S_5 con un tamaño promedio de poro de 200 nm; el material mostró una amplia absorción solar ($\alpha_s = 91.7 \%$ en la región de longitud de onda 250-2000 nm) que permitió una eficiencia de 80.2 %.

2.7.2 Semiconductores

Los semiconductores son otro tipo de materiales que se han utilizado para aumentar el rendimiento de evaporación, gracias a la recombinación no radiativa [32]. Los óxidos de titanio se han investigado por su absorción de luz, bajo costo y alta estabilidad térmica. Sirva de ejemplo la investigación de Wang et al. [63], donde se sintetizaron nanopartículas de Ti_2O_3 por el proceso

de molienda, logrando reducir la banda prohibida a 0.1 eV que dota de capacidad de absorber energía solar en todo el espectro electromagnético; logrando una eficiencia de evaporación de 92 %. Otros materiales semiconductores que han sido investigados como evaporadores solares son óxidos bimetálicos [64], nanopartículas de Fe_3O_4 [65] y Ti_2C_3 [66]; además, con el fin de optimizar la eficiencia de evaporación, se han desarrollado microestructuras como estructuras 3D [48] o nanoesferas [67] de materiales semiconductores.

2.7.3 Materiales con base en carbono

Los materiales con base en carbono tienen un gran potencial para la conversión de energía sustentable y evaporación interfacial [68]. Éstos ofrecen ventajas sobre los metales y semiconductores y son comúnmente utilizados en la desalinización de agua debido a su alta absorción, robustez, baja densidad, estabilidad química y bajo costo [69].

La investigación de materiales con base en carbono para aplicaciones de calentamiento localizado incluye frecuentemente: óxido de grafeno (GO) [70,71], óxido de grafeno reducido (rGO) [72], nanotubos de carbono (CNTs) [44], nanotubos de carbono de pared simple/múltiple (SWCNTs, MWCNTs) [73], negro de humo/grafito (CB) [74], materiales de carbón de base biológica [75], o compósitos de estos materiales [76]. En 2016, Zhang et al. [77], fabricaron un compuesto tridimensional (3D) de espuma de grafeno y un material de cambio de fase (cera de parafina) y se determinó una eficiencia de 79.9 % bajo una iluminación de 1.5 soles. De la misma manera, en 2018, Liu et. al [78] diseñaron un carbón mesoporoso soportado en una estructura de geopolímero y reportaron una eficiencia de 84.95 %. En el mismo año, Lin et. al [79] fabricaron una espuma de melanina carbonizada soportada en una espuma polimérica de polipirrol; con ella obtuvieron una eficiencia de evaporación de 87.3 % debido a su absorción solar > 96 % y alta porosidad. En la Tabla 1 se muestran algunas configuraciones de evaporadores solares con materiales a base de carbón/suporte.

Tabla 1: Configuración de evaporador solar con materiales a base de carbón/soporte.

Composición	Soporte	Tasa de evaporación (W m⁻¹ K⁻¹)	Eficiencia (%) (Simulador solar:1000 W/m²)
Melanina carbonizada[79]	Polipirrol	1.27	87.3
Grafito[80]	Madera	1.15	80
Grafito[81]	Madera	1.64	91.8
Bambú carbonizado[82]	Espuma PS	3.13	132
Filtro de fibra de carbono[83]	Espuma	1.22	79.4
Madera carbonizada[84]	PS	1.45	91.3

En los últimos años, se han reportado dos estructuras basadas en carbono con alta eficiencia de evaporación solar interfacial, a saber, aerogeles y esponjas de carbono 3D. Los aerogeles y esponjas de carbono pueden considerarse como una mezcla de una parte fototérmica (carbono) y una parte aislante (huecos de aire) [85]. Estos materiales tienen ventajas que facilitan la generación de vapor solar interfacial, se pueden resumir en cinco ventajas principales: primero, la morfología porosa y a nanoescala reduce el reflejo de la luz y la dispersión de luz dentro de los poros, mejorando la absorción. Segundo, la porosidad induce baja conductividad térmica, que puede reducir la pérdida de calor en el sistema. Tercero, se reduce la pérdida de calor por convección debido a que por la estructura porosa el vapor se separa en pequeñas unidades en su interior. Cuarto, los poros interconectados ofrecen muchos canales para el transporte rápido y el escape de vapor. Finalmente la porosidad ocasiona baja densidad ($< 0.5 \text{ g cm}^{-3}$), lo que hace que las estructuras floten naturalmente sin soporte [86]. Por ejemplo, en 2020 Storer et al. [87] prepararon aerogeles fototérmicos de nanohojas de óxido de grafeno reducido (RGO), fibras de celulosa a partir de paja de arroz y alginato de sodio (SA), se reportó una absorción de luz de 96-97 % y se logró una disminución de pérdida de energía de radiación y convección lo que llevó a una eficiencia de evaporación del 88.9 % bajo 1000 W/m².

En la Tabla 2 se presentan desarrollos de evaporadores solares interfaciales sin soporte adicional bajo una irradiación de 1000 W/m². Si bien estos sistemas lograron una alta eficiencia, hasta donde

se sabe, no se ha reportado un sistema interfacial que involucre como material fototérmico una estructura sintetizada a partir de desechos de PET, que evite el uso de un soporte adicional, lo cual se analiza en la siguiente sección.

Tabla 2: Tamaño de poro, densidad, absorción y evaporación solar con diferentes tipos de materiales porosos sin soporte adicional.

Composición	Tamaño de poro (μm)	Densidad (g cm^{-3})	Absorción (%)	Tasa de evaporación ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Eficiencia (%) (Simulador solar: 1000W/m^2)
Aerogel de RGO, fibras de celulosa de SA [87]	-	3.4	96-97	2.25	88.9
Aerogel de grafeno[85]	-	-	-	1.2	76.9
Pan carbonizado[88]	>100	0.202	97.5	0.92	71.4
Aerogel de grafeno[89]	37.9	-	100	-	53
Láminas de grafeno alineadas[90]	25–35	0.007	98	1.57	83.56
Celulosa negra [91]	-	-	-	-	57
Espuma de carbón con $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$[92]	-	0.005	45	1.694	-
Espuma de oligoanilinas [16]	-	3.22	95	1.1687	80.5

2.8 Polietilentereftalato (PET)

El PET es un poliéster químicamente estable, cuya estructura molecular se muestra en la Figura 7.

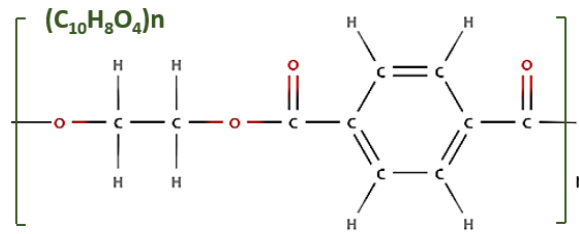


Figura 7: Estructura molecular de polietilentereftalato (PET) [93].

Las propiedades físicas del PET han sido las razones por las que su uso ha aumentado en las últimas décadas con una multitud de aplicaciones, utilizado en todo el mundo para el embalaje de agua embotellada y otras bebidas [93]. El PET no solo brinda conveniencia a la vida humana, sino también trae desastre para el medio ambiente. Una gran cantidad de botellas de tereftalato de polietileno (PET) se desechan diariamente después de su uso. Por lo tanto, el reciclaje de botellas de plástico ha suscitado considerable atención en los últimos años como una medida efectiva para disminuir el impacto ambiental. Las formas más comunes de reciclaje del PET incluyen la incineración de residuos, remanufactura y reciclaje químico. Debido a que los desechos de PET tienen un alto contenido de carbono y bajas cantidades de materias minerales e impurezas, la carbonización es una medida efectiva para reciclar el PET, ya que convierte los desechos en materiales valiosos de carbono para su uso en campos como conversión y almacenamiento de energía [19,94].

2.8.1 Carbonización de PET

El proceso de tratamiento para conversión de precursores como el PET a materiales de carbono es llamado carbonización. Incluye la liberación de varios gases hidrocarburos y átomos como especies gaseosas para dar un residuo con alto contenido de carbono (material con base en carbono).

El carbono es uno de los elementos más abundantes en la Tierra que tiene propiedades únicas debido a sus orbitales híbridos, los cuales se forman a partir de la combinación de orbitales atómicos s y p en nuevos orbitales híbridos (sp , sp^2 y sp^3). Estas hibridaciones conducen a la

formación de muchos alótropos de carbono, por ejemplo, cero-dimensionales (0D) como nanopartículas, unidimensionales (1D) como nanotubos de carbono, bidimensionales (2D) como láminas de grafeno y tridimensionales (3D) como diamante [95]. Como resultado, los productos de carbono producidos a partir de PET incluyen carbones amorfos, nanomateriales de carbono, grafito y grafeno [96].

La carbonización puede ser llevada a cabo bajo diferentes condiciones en procesos catalíticos y anóxicos. La carbonización catalítica se realiza bajo la presencia de catalizadores. En 2018 se produjeron nanotubos de carbón a partir de residuos de PET utilizando un catalizador comercial de Ni-Mo/Al₂O₃ [97] mediante pirólisis con gas N₂ a una temperatura de 700 °C; observaron que el porcentaje de productos gaseosos fue de 35.5 % y una gran cantidad de productos de carbón. Por otra parte, en la carbonización anóxica el polímero es directamente calentado en ausencia de oxígeno. Laszlo et al. [98] observaron que la carbonización directa del PET a alta temperatura bajo atmósfera inerte (N₂) da un material con bajo porcentaje de carbón, entre 17 y 22 % (w/w) a 700 °C. Por otro lado, Zhang et. al [99] reportaron la obtención de materiales con porcentaje de carbón de 25 % (w/w) con sales fundidas como ZnCl₂ y NaCl a 550 °C en atmósfera de aire. Basado en el mayor porcentaje de carbón obtenido al utilizar ZnCl₂ y NaCl se han desarrollado estructuras 3D para aplicaciones en la generación de vapor solar; el NaCl tiene ventajas al ser una materia prima económica y sostenible ya que se genera naturalmente en grandes cantidades, con un precio promedio de US \$66-79/tonelada mientras que el ZnCl₂ tiene un precio de US \$500–1000/tonelada [100,101]. Por lo tanto, la producción de carbón se puede mejorar en gran medida mediante el uso de NaCl. En este sentido, se reportaron [102] nanoestructuras 3D de grafeno altamente cristalino mediante el uso de NaCl; el producto exhibió una estructura mesoporosa uniforme, alta conductividad eléctrica, así como una alta superficie específica.

2.9 Análisis numérico de evaporación solar interfacial

La evaporación de agua no es un proceso simple de explicar, debido a la interacción de muchos parámetros como la salinidad, la humedad, temperatura, entre otros mencionados anteriormente. Hoy en día existen varias simulaciones y análisis matemáticos basados en el balance de energía y

agua, así como en la transferencia de masa que ayudan a explicar el mecanismo de evaporación solar interfacial:

2.9.1 Método de transferencia de masa

Mediante este método la evaporación se parametriza en términos de un coeficiente de transferencia de masa, que es una función de la fuerza impulsora de evaporación o la concentración de vapor. Así, la tasa de evaporación se describe en términos de la ecuación (9):

$$E = f_D(\bar{u})(e_s^* - e_a) \quad (9)$$

donde E es la tasa de evaporación [$kg\ m^{-2}h^{-1}$], $f_D(\bar{u})$ es una función de la velocidad media del viento, e_s^* es la presión de vapor de saturación del agua a la temperatura de la superficie del agua y e_a es la presión de vapor de saturación [103].

2.9.2 Balance de agua

El método de balance de agua para estimar la evaporación utiliza la conservación de masa y es utilizado comúnmente para determinar la evaporación en lagos. La expresión general usada es la de la ecuación (10):

$$E = (P + I_{sf} + I_{gf}) - (O_{sf} + O_{gf}) + \Delta S \quad (10)$$

donde E es la tasa de evaporación, P es la tasa de precipitación sobre el volumen del agua, I_{sf} es la entrada de agua subterránea, O_{sf} es la salida de agua superficial, O_{gf} es la salida de agua subterránea y ΔS es el cambio en el almacenamiento [104].

2.9.3 Balance de energía

El método de balance de energía para estimar la tasa de evaporación (E) [$kg\ m^{-2}h^{-1}$] se basa en la ley de conservación de energía, descrita según la ecuación (11):

$$E = \frac{R_n - H - G}{h_w} \quad (11)$$

donde R_n es la radiación entrante, H es el calor latente de evaporación, G el calor conducido en el agua, h_w entalpía de evaporación. Este método puede proporcionar una resolución de evaporación espacial, sin embargo, este método es muy intensivo en datos [105].

Sin embargo, pocos estudios han prestado atención a los mecanismos de pérdida de calor en los receptores solares interfaciales utilizados para el calentamiento solar aire-agua. Esto puede ayudar a encontrar explicaciones cuantitativas del rendimiento a fin de comprender la interrelación entre la potencia de entrada, la temperatura de la superficie del receptor solar interfacial y la tasa de evaporación.

Para simplificar el análisis de transferencia de calor se hacen suposiciones en el sistema interfacial asumiendo las siguientes consideraciones:

- (1) La radiación solar incide en un receptor solar plano. La luz del medio ambiente no se considera.
- (2) El material fototérmico es poroso para permitir el escape de vapor.
- (3) El material de depósito que contiene el agua es un térmico perfecto.
- (4) El aire está inactivo y permanece a una temperatura no afectada $T=25$ °C.
- (5) Tanto el aire como el vapor de agua se comportan como gases ideales con propiedades térmicas sin cambios en el rango de temperatura dado.

2.9.4 Energía de evaporación

La energía térmica transferida en el proceso de evaporación incluye el calor latente (h_{LV}) y el calor sensible calculado utilizando la capacidad calorífica del agua (C) y el aumento de la temperatura del agua desde la temperatura inicial (T_0) hasta la final (T_f), ya que se supone que la temperatura de vapor es la misma que la del absorbedor. Por lo tanto, la energía utilizada para la evaporación del agua es dada por la siguiente ecuación (12):

$$Q_{evap} = E[h_{LV} + C(T_f - T_0)] \quad (12)$$

donde la tasa de evaporación E [$kg\ m^{-2}h^{-1}$] se calcula a partir de la ecuación (13) [106]:

$$E = \frac{m_{loss}}{\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 t} \quad (13)$$

donde m_{loss} es la masa del agua evaporada en un determinado tiempo, D es el diámetro del generador solar y t el tiempo de irradiación.

3 JUSTIFICACIÓN

Actualmente, el estrés hídrico es un problema global. Una alternativa para su mitigación es la destilación solar, la cual se considera la técnica más ecológica y económicamente viable para la producción de agua dulce [107]. Los evaporadores son una parte fundamental en los sistemas de destilación solar. Los sistemas ISSG logran una mayor eficiencia (90 %) que los sistemas VSSG (< 50 %) [11]. En su mayoría, consisten en un material fototérmico y un soporte de baja densidad [62].

Los sistemas ISSG con base en carbono han reportado altas eficiencias entre el 50 % y el 90 % [87,91], sin embargo, la mayoría de los materiales utilizados son muy exigentes en términos de métodos de fabricación; por ejemplo, las bajas temperaturas utilizadas (< -50 °C) cuando se fabrican aerogeles de carbono mediante liofilización [108], las altas temperaturas (> 1000 °C) necesarias durante la carbonización de café [109] o el uso de ácidos concentrados para preparar GO [77]. Además muchas estructuras también necesitan soportes como celulosa o poliestireno para ayudar al absorbedor solar a flotar, absorber el agua y reducir las pérdidas de calor no deseadas, lo que da como resultado configuraciones complejas del dispositivo [79,83]. Por esta razón, es necesario desarrollar rutas de síntesis más fáciles para que los ISSG proporcionen propiedades prácticas en evaporación solar interfacial. En este trabajo se investigó por primera vez el desarrollo de un ISSG con un monolito de carbón a partir de botellas de PET reciclado sin un soporte adicional. Se sintetizó un monolito de carbón mediante un método fácil de calentamiento en atmósfera de aire a temperaturas < 600 °C utilizando NaCl.

Las botellas de PET se han convertido en uno de los principales desechos plásticos posconsumo y por ende en un gran problema para el medio ambiente [95]. Por este motivo, también se buscó minimizar los residuos de PET y obtener un material de carbón de alto valor agregado a través de una técnica libre de solventes.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Desarrollar monolitos de carbón mediante la carbonización de PET reciclado adicionando NaCl; para aplicaciones de evaporación de agua con una eficiencia > 50 %.

4.2 Objetivos específicos

- Encontrar los parámetros óptimos de síntesis del carbón monolítico a partir de PET reciclado por medio de un diseño experimental Taguchi.
- Analizar los monolitos de carbón por medio de SEM, TGA, DSC, XRD, XPS, porosimetría, espectroscopía RAMAN y ensayos mecánicos; con la finalidad de evaluar las propiedades adecuadas de los carbones.
- Analizar la eficiencia de evaporación solar interfacial de los monolitos de carbón mediante un simulador solar a escala de laboratorio.

5 METODOLOGÍA CIENTÍFICA

La metodología que se empleó se dividió en dos etapas:

1. Síntesis del carbón
2. Análisis de eficiencia del evaporador solar interfacial

5.1 Materiales

- Residuos de botellas de PET
- NaCl (99.5 % grado reactivo)
- Agua destilada (pureza 99.5 %)

5.1.1 Variables experimentales

Para sintetizar el carbón las variables consideradas fueron:

- Temperatura de síntesis
- Relación másica PET/NaCl
- Tiempo de carbonización

5.2 Síntesis de carbón

Se limpiaron las botellas de PET, luego se cortaron en trozos de 2 mm x 5 mm. La mezcla de PET/NaCl se colocó en un crisol de alúmina (diámetro de 5 cm), se introdujo a un horno con atmósfera de aire y se sometió a un precalentamiento por 10 min a 290 °C y posteriormente a un calentamiento a una velocidad de 15 °C/min según el diseño y optimización experimental descrito en la sección 5.2.1. El material resultante se enjuagó con agua destilada para remover la sal residual. Finalmente, se recuperó el carbón monolítico, el cual tuvo un diámetro aproximado de 3.8 cm y espesor de 1 cm.

5.2.1 Etapa 1: Diseño experimental

Para esta etapa se utilizó el método Taguchi ya que reduce drásticamente el número de pruebas mediante un diseño especial de matrices ortogonales. Este método minimiza los efectos de factores que no se pueden controlar y proporciona un enfoque simple, eficiente y sistemático para especificar los parámetros óptimos en el proceso de fabricación. Una de las características necesarias para la aplicación del carbón en evaporación solar interfacial, fue diseñar una estructura monolítica, definida como una sola pieza de material poroso que contiene varios tipos de canales interconectados o separados [110]. Por esta razón, el objetivo del diseño experimental en la etapa 1 fue la optimización de la **integridad física** del carbón monolítico para mantener la geometría general del ISSG, por lo cual se consideraron **2 configuraciones del método Taguchi**. La integridad física se refiere a garantizar las propiedades geométricas y dar confiabilidad de la estructura completa para su aplicación a la escala deseada [111]; esta se determinó por análisis de imágenes por ImageJ considerando una circunferencia base con diámetro de 3.8 cm (determinado por el diámetro del crisol) y se restaron las áreas faltantes de la circunferencia; se le asignó un porcentaje de integridad física, siendo 100 % la circunferencia base.

El método Taguchi utiliza una función de pérdida para calcular la desviación entre los valores experimentales y los valores deseados, que se convierte en una relación señal-ruido (S/R). En este sentido, la fórmula estándar del método Taguchi mayor es mejor se utilizó como se muestra en la ecuación (14):

$$\text{Mayor es mejor} = \frac{S}{R} = -10 \log_{10} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \quad (14)$$

donde S/R es la señal ruido (unidades dB), n es el número de repeticiones del experimento, Y_i son los datos observados en el i -ésimo experimento.

Además de la relación S/R , se empleó un análisis estadístico de la varianza (ANOVA) para estimar la varianza de error y determinar la importancia relativa de los diferentes factores. La importancia relativa se define como la diferencia entre los valores de respuesta S/R mayor y menor de cada factor [112–114].

En la Tabla 3 se muestran los rangos y niveles de las variables experimentales del **Taguchi 1 preliminar**. La aplicación del monolito en evaporación solar no requiere una grafitización de carbón, por lo cual los rangos de temperatura seleccionados tuvieron un máximo de 750 °C debido a que Przepiórski et al. [115] reportaron una grafitización mayoritaria a partir de esta; según la literatura es necesario una relación de NaCl mínima de 1/5 en peso para que exista una interacción entre los monómeros del PET y un máximo de NaCl de 5/1 en peso para evitar la grafitización, por lo tanto se seleccionaron los niveles de relación másica entre estos rangos; los niveles de tiempo se seleccionaron con base a investigaciones anteriores respecto a su influencia en la grafitización del carbón [116,117].

Tabla 3: Variables y rangos del diseño experimental para carbón (Taguchi preliminar).

Variables independientes	Unidades	Rangos y niveles		
		1	2	3
A. Temperatura	° C	550	650	750
B. Tiempo	min	5	10	15
C. Relación másica PET/NaCl	g/g	0.3	0.6	1

De los resultados obtenidos, se predijo el ajuste óptimo de los parámetros. Posteriormente, se ejecutó una corrida con las condiciones óptimas obtenidas a partir del análisis estadístico del **Taguchi 1 preliminar** y se realizó la optimización de las variables mediante un diseño experimental Taguchi (**Taguchi 2 optimización**). Sólo los materiales con base en carbono con integridad física > 90 %, obtenidos en esta sección se produjeron para todas las caracterizaciones. Para ambos diseños Taguchi se realizaron 3 réplicas de cada arreglo y se estudió la importancia de cada factor a través de análisis de varianza (ANOVA). Se calcularon valores como desviación estándar y la contribución de cada factor en la integración física.

5.2.2 Técnicas de caracterización de carbón

1. La observación de las microestructuras de las superficies se realizó por SEM y TEM.
2. El análisis térmico gravimétrico (TGA) y la calorimetría diferencial de barrido (DSC) se llevaron a cabo de manera simultánea en crisoles de alúmina a una velocidad de calentamiento de 15 °C/min en atmósfera de aire.
3. El análisis de porosidad se determinó por adsorción/desorción de nitrógeno (método BET) y por la norma estandarizada ASTM-C642-13.
4. Para estudiar las estructuras de fases se utilizaron XRD y RAMAN.
5. La composición elemental de la superficie fue caracterizada por XPS.
6. La absorbancia de 300-1000 nm se midió a través del espectrofotómetro UV-Vis.
7. El módulo de Young se determinó a través de un ensayo de compresión mecánica con una celda de carga de 500 N marca Instron.

5.3 Etapa 2: Eficiencia del evaporador solar interfacial

La evaluación de la eficiencia de evaporación se realizó sobre una solución acuosa de 3.5 % en peso de cloruro de sodio (NaCl), que es la salinidad promedio del agua del océano [11,118]. Para ello se usaron 50 mL de la solución salina en vaso de precipitado con un diámetro de 4 cm sobre el cual se colocó el material ISSG; el vaso de precipitado se colocó sobre una balanza digital con una distancia de 15 cm con respecto al simulador solar. El sistema completo se introdujo en un cámara de aluminio para evitar la irradiación externa. El sistema se irradió con un simulador solar que consistió en una lámpara de Xe de 100W y la intensidad fue medida con un piranómetro; se monitoreó la temperatura del agua, de la interfaz agua-vapor y del ambiente por termopares tipo T con una resolución de medición entre -200 °C y 260 °C; como se muestra en la Figura 8.

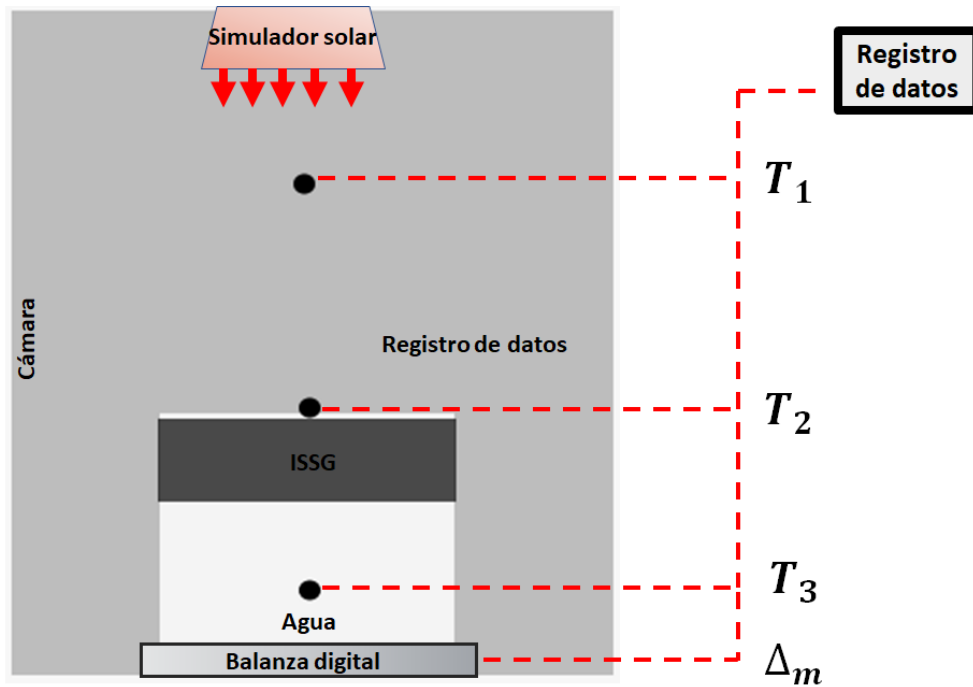


Figura 8: Caracterización del sistema ISSG. La fuente de luz irradia al prototipo y se mide el cambio de masa y temperatura.

Se realizaron diferentes configuraciones del carbón con propósitos de comparación de los ISSG seleccionados. La configuración 8M-SP, con 8 mm de espesor, sin perforaciones; la configuración 5M-SP con 5 mm de espesor, sin perforaciones; y la configuración 5M-CP con 5 mm de espesor y 10 perforaciones con un diámetro de 1.5 mm; como se observa en la Figura 9.



Figura 9: Dibujo esquemático de las configuraciones de carbón (A) 8M-SP (B) 5M-SP y (C) 5M-CP.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Optimización de la síntesis de carbón

Se utilizó el método estadístico Taguchi para el análisis de las variables que afectan la integridad física del monolito de carbón. En el diseño de experimentos de la Etapa 1 (preliminar) se realizó un arreglo ortogonal de Taguchi. Se analizó el efecto de 3 factores con 3 niveles cada uno, por lo tanto, se usó un arreglo ortogonal L₉ como se observa la Tabla 4.

Tabla 4: Arreglo ortogonal aplicado para identificar los parámetros óptimos para la obtención de carbón.

N° de corrida	Temperatura (° C)	Tiempo (min)	Relación másica PET/NaCl
C1	550	5	0.3
C2	550	10	0.6
C3	550	15	1
C4	650	5	0.6
C5	650	10	1
C6	650	15	0.3
C7	750	5	1
C8	750	10	0.3
C9	750	15	0.6

La variable respuesta fue el porcentaje de integridad física del monolito de carbón (ver Figura 10) y a los datos obtenidos se les realizó un análisis estadístico donde se reporta la media, desviación estándar y la relación S/R con la relación establecida *mayor es mejor*.

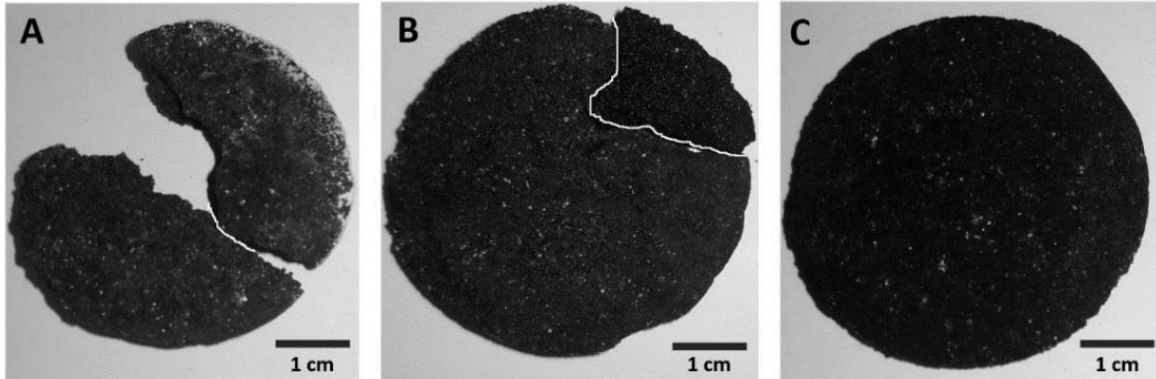


Figura 10: Análisis visual de integridad física del carbón monolítico. (A) C-7: 45.5 %, (B) C-3: 72.7 %, (C) P-3: 97.3%

Se determinaron los niveles óptimos de cada factor con la relación señal ruido (S/R) ver Figura 11, con la relación establecida *mayor es mejor*. Las mismas condiciones óptimas podrían verse en la Tabla 5 con la media, desviación estándar y relación S/R de las repeticiones.

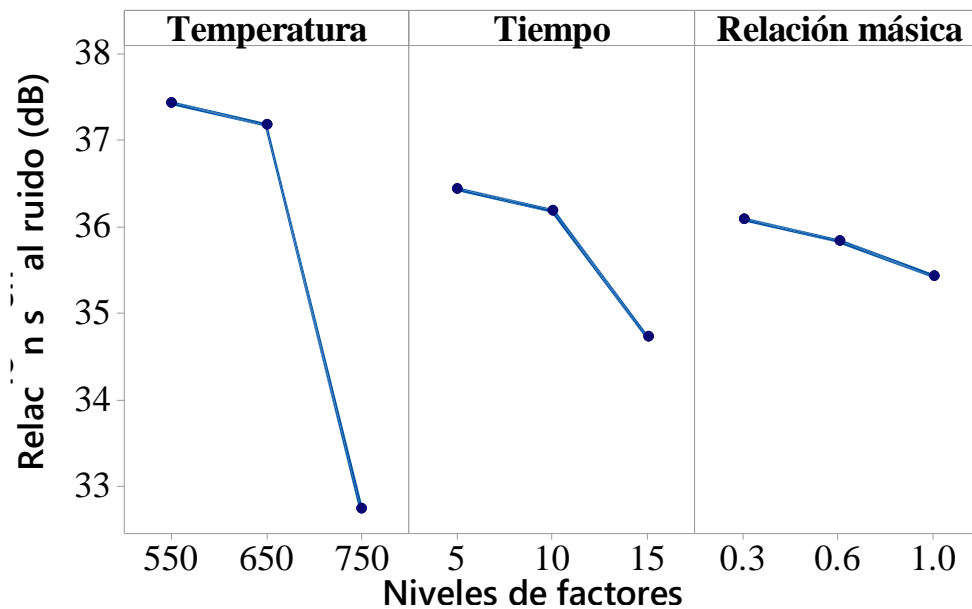


Figura 11: Efectos principales de la relación SR para Taguchi preliminar.

Se observa que el factor de la temperatura tuvo el mayor efecto sobre la variable de respuesta; es decir, causa mayor diferencia entre su nivel alto y bajo. La importancia relativa se define como la diferencia entre los valores de respuesta S/R mayor y menor de cada factor; el orden de importancia de los factores fue el siguiente:

Temperatura (4.69) > Tiempo (1.72) > Relación másica (0.66)

Tabla 5: Valores de integridad monolítica de carbón, media, desviación estándar, y relación S/R con número de repeticiones.

Corrida	R1 (%)	R2 (%)	R3 (%)	Media	Desviación estándar	Relación S/R
				\bar{X}		$-10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\left(\frac{1}{X_i^2}\right)\right]$
1	82.5	76.6	78.9	79.3	2.97	37.97
2	84.5	87.3	78	83.2	4.77	38.38
3	72.7	54.2	65.5	64.1	9.32	35.94
4	78.8	80.5	74.7	78.0	2.98	37.82
5	63.2	78.7	68.3	70.0	7.89	36.80
6	67.9	68	75	70.3	4.07	36.91
7	45.5	50.1	47.2	47.6	2.32	33.53
8	45.6	44.2	51.1	46.9	3.64	33.38
9	41	34.5	35.8	37.1	3.43	31.31

Además, se empleó un análisis estadístico de varianza (ANOVA) para comprender el porcentaje de contribución de cada parámetro; el cual sirve para determinar la importancia relativa de diferentes factores como se puede observar en la Tabla 6. En la Figura 12 se muestra la contribución de los factores en la integridad monolítica.

Tabla 6: Análisis de varianza (ANOVA) para % de integridad monolítica (SN: mayor es mejor)

Factores	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Contribución	Cuadrado medio	Razón F
Temperatura	2	1650.61	86.06 %	825.30	33.46
Tiempo	2	117.45	6.12 %	58.72	2.38
Relación másica	2	100.50	5.24 %	50.25	2.04
Error	2	49.33	2.57 %	24.66	
Total	8	1917.88	100.00 %		

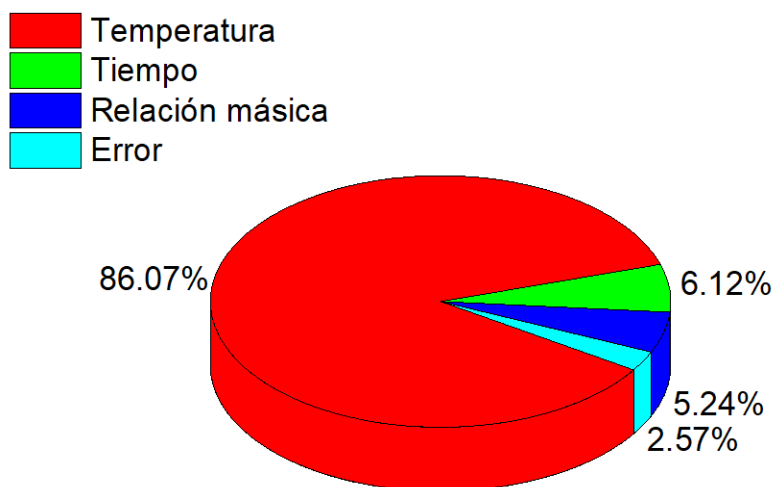


Figura 12: Contribución de los factores en la integridad del monolito en la etapa 1 preliminar.

Los resultados obtenidos sugieren que a medida que la temperatura aumenta después de 575 °C, la integridad monolítica disminuye, esto se atribuye a que a mayor temperatura, aumenta la degradación del material con base en carbono [119]. El valor óptimo de la temperatura para una mayor integridad física del carbón fue 550 °C. Mediante la configuración óptima determinada por la media de medias, se realizó la predicción de resultados, los cuales no coinciden con la combinación de parámetros realizados (Tabla 7). Así, de acuerdo con la aplicación de este diseño, se encontró que las condiciones óptimas para el proceso fueron:

- Temperatura: 550 °C (nivel 1)
- Tiempo: 5 min (nivel 1)
- Relación másica: 0.6 (nivel 2).

Tabla 7: Media de medias y predicción de media con la configuración óptima.

Nivel	Temperatura	Tiempo	Relación másica	Media
1	75.58 %	68.31 %	65.53 %	
2	72.79 %	66.77 %	66.12 %	
3	43.89 %	57.18 %	60.60 %	
Predicción	550 °C	5 min	0.6	81.84 %

6.2 Optimización por el método Taguchi y ANOVA.

Se realizó una corrida con la predicción de media de medias de las condiciones óptimas definidas en el Taguchi 1 preliminar, obteniendo un porcentaje de integridad física del 88.2 %. Tomando en cuenta el resultado, se realizaron pruebas preliminares para definir los niveles del método Taguchi de optimización y se usó un arreglo ortogonal L₉; los rangos y niveles se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8: Variables y rangos del diseño experimental para la síntesis de carbón (Taguchi 2 optimización).

Variables independientes	Unidades	Rangos y niveles		
		1	2	3
A. Temperatura	° C	550	575	600
B. Tiempo	min	5	7	9
C. Relación másica PET/NaCl	g/g	0.45	0.5	0.6

Para validar la maximización de la relación S/R de la integridad física del monolito de carbón, en la Tabla 9 se presenta la media y la relación S/R de la integridad física. Se observó que la media

y la relación S/R aumentaron, alcanzando valores de integridad > 90 %. Se corrobora la información presentada en la Tabla 6, donde se clasifica el orden de influencia de los factores, siendo la temperatura el factor de mayor contribución. Al disminuir la temperatura, el tiempo y la relación másica de la síntesis, se logró disminuir la variación de resultados, aumentando la integridad física del monolito de carbón.

Tabla 9: Condiciones experimentales para la optimización de integridad monolítica del carbón. Medias y relación S/R.

N° de corrida	Temperatura (° C)	Tiempo (min)	Relación másica PET/NaCl	Integridad monolítica	
				Media (%)	Relación S/R
P1	550	5	0.45	92.6	39.3
P2	550	7	0.5	95.3	39.5
P3	550	9	0.6	97.3	39.7
P4	575	5	0.5	99.3	39.9
P5	575	7	0.6	87.6	38.8
P6	575	9	0.45	88.6	38.9
P7	600	5	0.6	55.3	34.4
P8	600	7	0.45	63.6	35.9
P9	600	9	0.5	54.6	33.3

Para correlacionar la integridad física del monolito de carbón con una propiedad física cuantitativa, se realizó una prueba de compresión mecánica. Se seleccionaron los carbones con mayor % integridad física, a saber, P1, P3, P4, se descartó el carbón P2, debido a que se desintegró en agua. Se realizaron 3 repeticiones de las mediciones y se reportó la media. En la Figura 13, se muestra la relación de la integridad física del monolito y el módulo de Young, se puede observar que a mayor módulo de Young la integridad monolítica aumenta. En estudios de aerogel de carbón vítreo obtenidos por pirólisis [120], se reportaron valores de 2.4 - 2.7 kPa, los cuales son menores a los obtenidos en esta tesis. Por otro lado, los valores obtenidos en esta investigación son menores a los reportados para estructuras monolíticas de carbón activado [121] (e.g. 20.7 MPa), sin embargo,

son suficientes para permitir la manejabilidad de los monolitos de carbón sin afectar su integridad física.

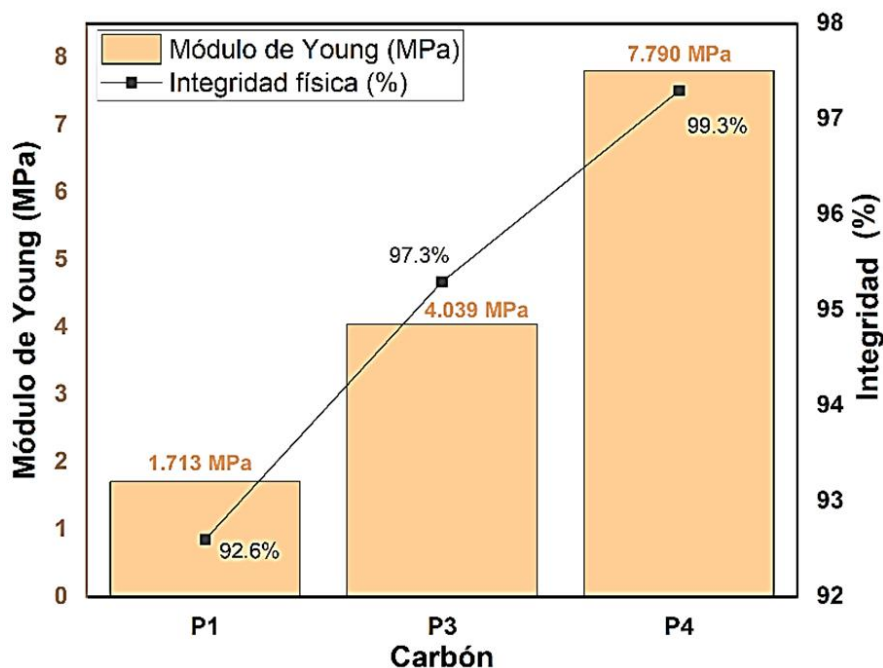


Figura 13: Relación del Módulo de Young e integridad física del monolito de carbón P1, P3, P4.

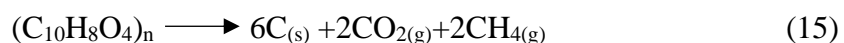
6.3 Efecto de la temperatura, relación másica (PET/NaCl) y tiempo

6.3.1 Temperatura de síntesis de carbón

La temperatura fue el parámetro de mayor influencia en la integridad monolítica del carbón. Se observó que para una temperatura > 600 °C disminuyó significativamente la integridad física del carbón monolítico. A 550 °C el proceso de formación de carbón da lugar a vapores, los cuales provocan la formación de poros en los monolitos. Por otro lado, se observó que a temperaturas mayores, se promovió la degradación térmica del carbón [122,123]. Los vapores de descomposición se ven afectados por el rango de temperatura de combustión, Levchik et al. [124] reportó que en todo el rango de temperatura principal de descomposición se forma el CO y CO₂, mientras a altas temperaturas (> 900 °C) la combustión de plástico liberó CO₂ y agua.

El análisis del comportamiento térmico del PET permite analizar las propiedades del carbón resultante. Para esto, se determinó la estabilidad térmica del PET con diferentes cantidades de NaCl mediante TGA Y DSC. Los análisis TGA y DSC se realizaron en mezclas de 10-25 mg, en atmósfera de aire, a una velocidad 15 °C/min. En la Figura 13B se observa un proceso endotérmico a 245.93 °C atribuido a la fusión del PET [125]; se notó también un exotérmico a 420.18 °C, el cual se atribuye a la descomposición del PET [126]. Este último pico exotérmico estuvo acompañado por una pérdida de masa de aproximadamente el 83 %, ver TGA en la Figura 14A.

Se ha reportado que durante la descomposición térmica del PET, se producen fragmentos de cadena terminados en vinilo a partir de la escisión del enlace de éster y aparecen anillos aromáticos [127]; esto conduce a la formación de carbón como lo sugiere la ecuación 15 [19,119,128]:



A diferencia de la Figura 14B, en las Figuras 14D-F, se observan adicionalmente dos picos exotérmicos entre 500 y 750 °C, los cuales pueden ser asignados al ordenamiento a largo alcance del carbón. En estudios recientes [127] se determinó el pico endotérmico de carbonización de PET a 791.1 °C, como la grafitización del material de carbono residual.

El aumento de los valores del Módulo de Young al incrementar la temperatura de síntesis del monolito de carbón (P1, P3, P4), concuerdan con el comportamiento de los materiales con base en carbono expuestos en [129], que indican endurecimiento y fortalecimiento a altas temperaturas. Sin embargo, son inconsistentes con la integridad monolítica, ya que a temperaturas > 575 °C, en nuestro caso, la integridad disminuye. Esto se atribuye a la pérdida de peso por oxidación a temperatura > 575 °C [130].

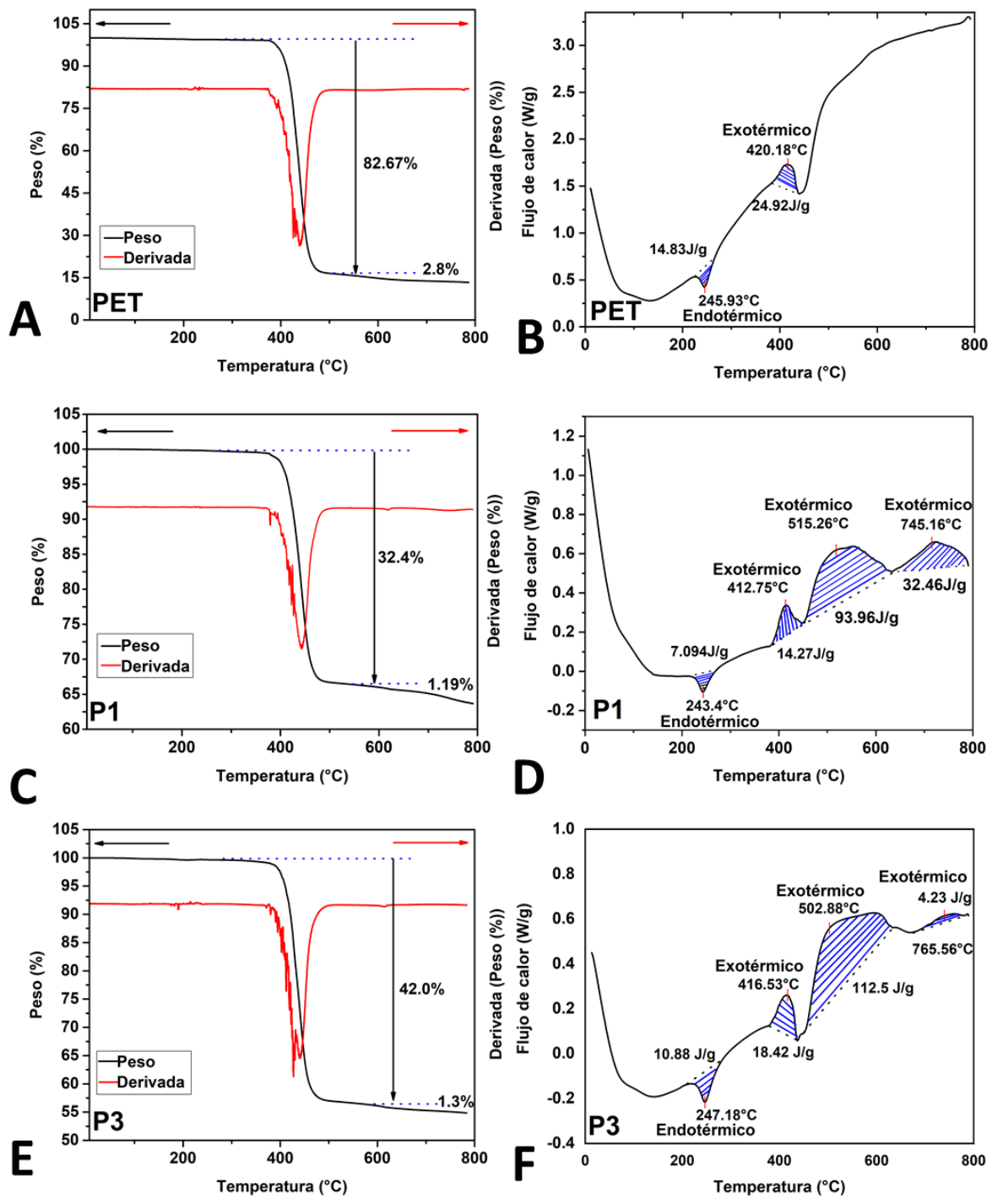


Figura 14: Termogramas: TGA, primera derivada de TGA y DSC (A) PET (B) DSC PET, (C) P1 (D) DSC P1, (E) P3 (F) DSC P3

6.3.2 Relación másica PET/NaCl

En las muestras P1 (**mayor %** en peso de **NaCl**) y P3 (**menor %** en peso de **NaCl**), estudiadas a través de TGA (Figura 14 B y C), se observaron pérdidas de peso menores que con la muestra de PET **sin NaCl** (Figura 14A). Cabe destacar que, con las temperaturas utilizadas en este trabajo, no se observaron pérdidas de peso correspondientes al NaCl debido a que su fusión tiene lugar a 801 °C [131]; por lo cual no influye en la pérdida de peso del PET. El orden de la pérdida de peso según la relación másica de PET/NaCl fue:

$$P1 (0.45 \text{ de PET/NaCl}) > P3 (0.6 \text{ de PET/NaCl}) > \text{PET (PET sin NaCl)}$$

Considerando la ecuación (15) se llevaron a cabo los cálculos estequiométricos (Tabla 10) para % de carbón con la ecuación 16 [132]:

$$\% C = \frac{\Delta m \cdot M}{n \cdot M_{\text{gas}} m_0} \quad (16)$$

Donde Δm es la pérdida de peso, M es la masa molar del PET, M_{gas} es la masa molar del gas liberado, n el número de moléculas liberadas por molécula de partida y m_0 el peso inicial de la muestra.

Tabla 10: Cálculo estequiométrico % C con pérdida de peso de TGA

Muestra	Punto inicial (°C)	Punto final (°C)	Pérdida de peso %	Cálculo estequiométrico % C
PET	370.65	503.7	82.67	6.72
P1	367.46	539.57	32.4	25.92
P3	369.46	516.25	42.0	25.84

La carbonización directa del PET en atmósfera de aire provocó una pérdida de peso mayor que con NaCl, por lo tanto, se obtuvo un menor % C. Se pudo observar que con NaCl la pérdida de peso de PET disminuye, dando un % C mayor, estos datos coinciden con lo reportado experimentalmente por [99]. Este fenómeno puede estar relacionado con el efecto del NaCl que evita la difusión del oxígeno y al mismo tiempo la volatización del carbón formado. Estos resultados concuerdan con investigaciones previas, donde observan la capacidad de NaCl para disminuir la oxidación térmica, fenómeno que promueve el agotamiento del carbón [116,133].

Se determinó la entalpía de fusión por la integración numérica del área bajo el pico endotérmico en DSC. En la Tabla 11 se observa que al disminuir la cantidad de NaCl aumenta la entalpía de fusión, que según la literatura, puede estar atribuido a la mayor transferencia de calor a la mezcla PET/NaCl [134].

Tabla 11: Entalpía de fusión de muestras PET, P1, P3.

Muestra	Relación másica (PET/NaCl)	Rango de fundición		Entalpia de fusión (J/g)
		T _i (°C)	T _f (°C)	
PET	0	224	260	14.83
P1	0.45	220	273	7.094
P3	0.6	221	280.8	10.88

Se sabe que el efecto de NaCl consiste no sólo en proteger al carbón de la oxidación a alta temperatura, sino también aumenta la cristalización del material con base en carbono. Además, se ha comprobado que las sales contribuyen al crecimiento de cristales de carbón a baja temperatura, debido a la cinética de disolución de impurezas [135]. La cristalinidad influye en las propiedades mecánicas de los monolitos de carbón, por lo que uno de los objetivos de esta investigación es la caracterización estructural mediante XRD y espectroscopía RAMAN.

6.3.2.1 Caracterización estructural del carbón

Los resultados de XRD se muestran en la Figura 15A. El análisis demuestra la eliminación efectiva del NaCl por el tratamiento de lavado de agua, que puede ser atribuido a su solubilidad en agua [136]. Las muestras exhibieron picos amplios que indican la baja cristalinidad de los materiales de carbono o del carbón amorfo. Otros estudios [122] por XRD de un material de carbono obtenido a 620 °C mostró dos reflexiones amplias centradas en 21.1 y 43 °2θ. El halo se atribuyó a planos cristalinos en matrices hexagonales ordenadas de corto alcance de carbón amorfo. La segunda reflexión superpuesta entre 40-50 °2θ se sugirió en los planos (100) y (101) con planos cristalinos ordenados de corto alcance. Estos halos amorfos coinciden con los reportados en la Figura 15A; la baja cristalinidad puede ser atribuida a las bajas temperaturas de síntesis (< 600 °C) y la baja cantidad de NaCl; ya que la alta temperatura (> 2500 °C), proporciona un ambiente ideal para la grafitización de materiales con base en carbono [135,137]. En estudios anteriores [116] se ha observado el efecto de NaCl en la síntesis de carbón grafitico a través de pirólisis en atmósfera de aire con sales fundidas; se observó que el proceso de grafitización se inició a temperaturas > 1100 °C con una relación aproximada de 5:1 en peso de NaCl. Este método permitió dilucidar la protección de oxidación a altas temperaturas y la promoción de la grafitización. Sin embargo, en la presente investigación se obtuvo carbón amorfo por las temperaturas utilizadas y un porcentaje en peso de NaCl ~50 % menor que los valores reportados. Como se sabe, el carbono cristalino tiene alta conductividad térmica [138,139], mientras que el carbono amorfo suprime el transporte de calor y, por lo tanto, es útil para la localización de calor e importante para la mejora de la evaporación solar [140].

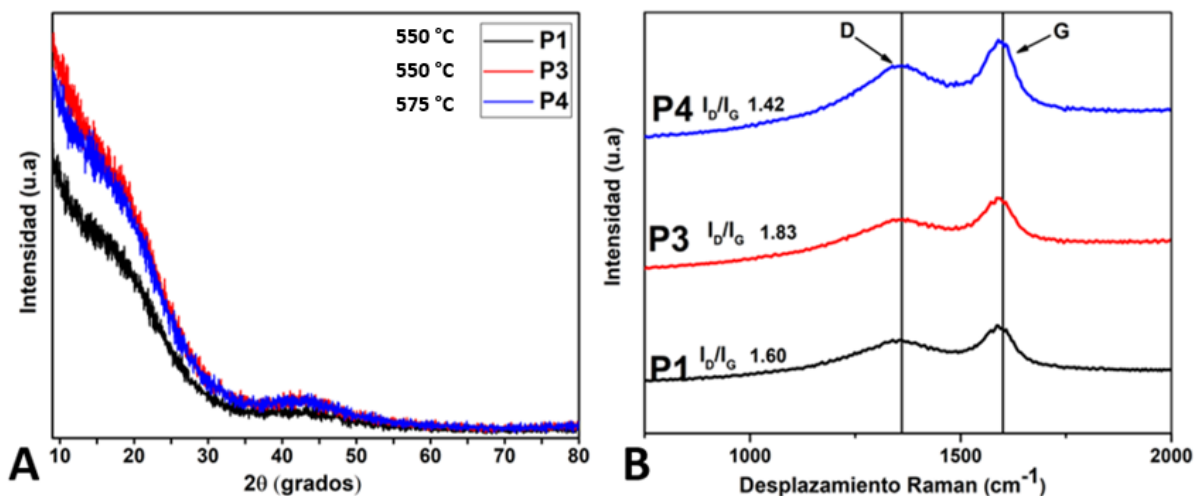


Figura 15: Caracterización estructural de carbonos P1, P3, P4 (A) DRX, (B) Espectroscopía Raman.

Los resultados de espectroscopía Raman se presentan en la Figura 15B usando un láser de excitación de 532 nm. Se notó la presencia de dos bandas en todos los casos entre 1350 y 1575 cm^{-1} que corresponden a las bandas D y G respectivamente. La banda D ha sido asociada a la vibración de los átomos de carbono con enlaces sp^3 sueltos en grafito desordenado. La banda G, está relacionado con la vibración del carbono sp^2 en una red hexagonal bidimensional, como en grafeno. Por lo tanto, el cálculo de la relación de las intensidades de las bandas (I_D/I_G) es proporcional al desorden del material, e inversamente proporcional a la cristalinidad de los carbonos [141,142]. La relación I_D/I_G del carbón P4 fue menor que las demás muestras, lo que indica un menor desorden, originado por una mayor temperatura. En otras investigaciones [143] se sintetizó un carbón a partir de madera a temperaturas entre 1000-1600 $^{\circ}\text{C}$; la grafitización se obtuvo a una temperatura > 1600 $^{\circ}\text{C}$. En la investigación presente, los rangos de temperatura utilizados (< 600 $^{\circ}\text{C}$) no permitieron una mayor grafitización del material con base en carbono; no obstante, se evidenció un mayor ordenamiento cristalino es las muestras sintetizadas a mayor temperatura.

Por otro lado, como se mencionó, las sales de NaCl pueden actuar como medio para promover la grafitización. Se ha sugerido [144] que la grafitización es ocasionada por tensiones de compresión generadas por la sal en la matriz de carbón. El carbón P3 mostró una relación I_D/I_G mayor, es decir, un mayor desordenamiento, lo que puede ser ocasionado por una menor cantidad de NaCl produciendo mayores defectos sp^3 [145].

6.3.3 Tiempo de carbonización

Cabe señalar que un aumento considerable en el grado de cristalización a menudo se puede lograr mediante el uso de sales y un tratamiento térmico prolongado a temperaturas superiores 1300 °C en atmósfera de aire [146]. Un estudio del efecto del tiempo de residencia en la composición química de un carbón [147] encontró que con un aumento en el tiempo de residencia causó un cambio estructural atribuido a las hibridaciones C sp^3 y al aumento de los grupos funcionales de oxígeno, debido a la difusión superficial existente. En este contexto, se obtuvieron espectros XPS de C1s para comparar el cambio de contenido elemental de las muestras P1, P3 y P4. Los valores de energía de enlace (BE) se corrigieron usando el valor de 284.80 eV para el nivel de C1s del carbono. En la Figura 16 se indica que todos los espectros se pueden deconvolucionar en cuatro componentes gaussianos; el componente más grande se atribuyó al carbón grafitico sp^2 , y los otros componentes menores se asignan a -C-OH (285.7-285.9 eV), -C=O (287.0-287.2 eV) y -COOH (289.8-290.1 eV). Se observó que para P3 el porcentaje atómico de oxígeno fue de 18.9 % lo que indica que la relación C/O disminuyó en comparación con los otros carbones; esto coincide con los resultados de la espectroscopía Raman que confirma un mayor contenido de defectos. Este fenómeno está relacionado el tiempo de reacción y menor cantidad de NaCl. Por lo contrario, el carbón P4 tuvo un porcentaje atómico de oxígeno del 14.1 %, el cual está relacionado con una mayor temperatura de síntesis [99,148].

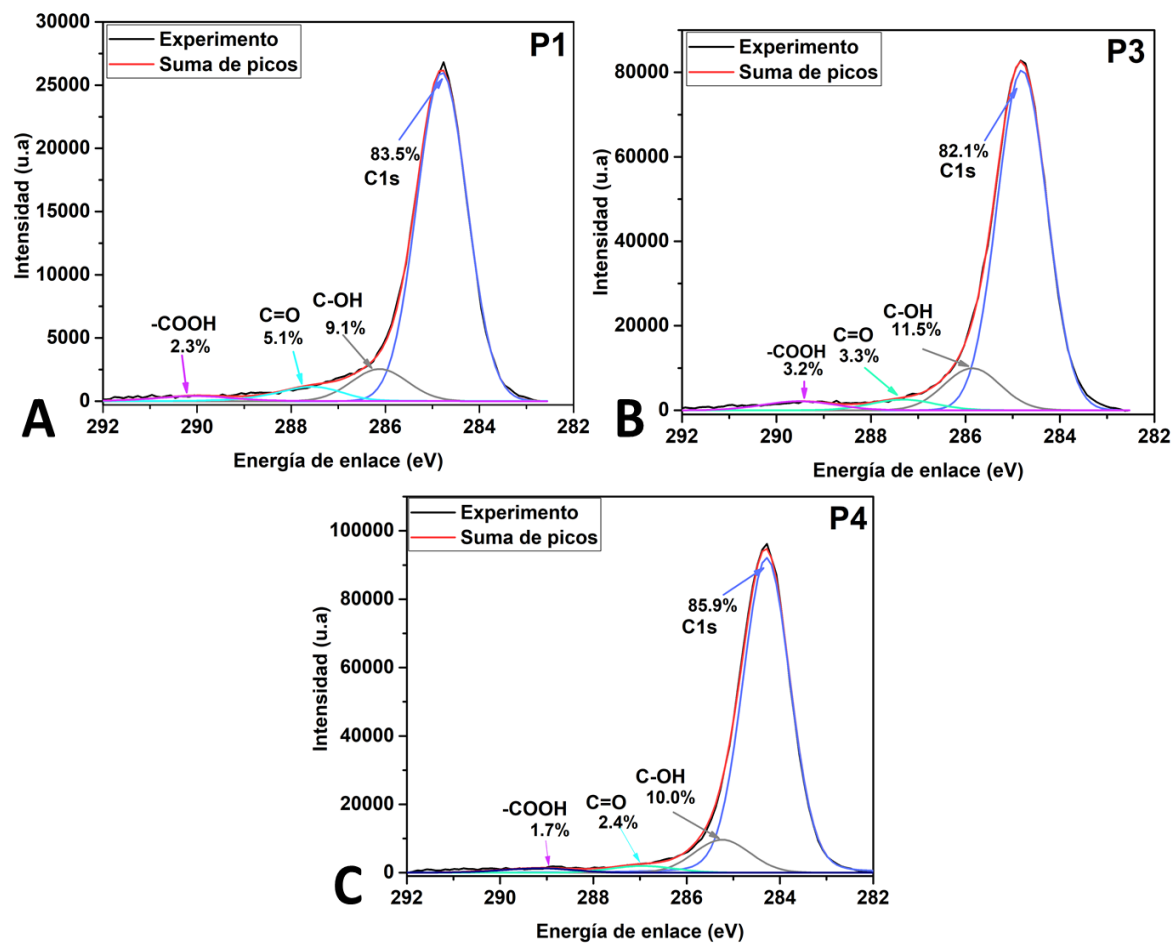


Figura 16: Espectro de XPS de alta resolución para C1s (P1-P3-P4).

6.3.4 Morfología

Para obtener información sobre los poros, se utilizó el microscopio electrónico de barrido (SEM) operado en bajo vacío; las micrografías se presentan en la Figura 17A. Para todos los monolitos de carbón se observaron macropartículas en forma de hojuelas lisas de 1 a 3 μm interconectadas entre sí con macroporos en el rango de 160-180 μm . Tales características coinciden con un reporte sobre la carbonización de PET [116] a una temperatura de 467 $^{\circ}\text{C}$ que conduce a la formación de carbón amorfo con estructuras de superficies planas.

Mediante TEM se observó que las paredes de las hojuelas tienen microporos en el rango de 0.5 a 2 nm (ver Figura 17B); originados durante el proceso de síntesis que formó vapores [130]. Al sintetizar carbón de PET con sales fundidas han observado la presencia de microporos entre 0.5-0.64 nm en las paredes de las macropartículas de carbón; estos se atribuyeron principalmente a la condensación intermolecular de fragmentos de cadena terminados en vinilo y la interconexión de anillos aromáticos [99].

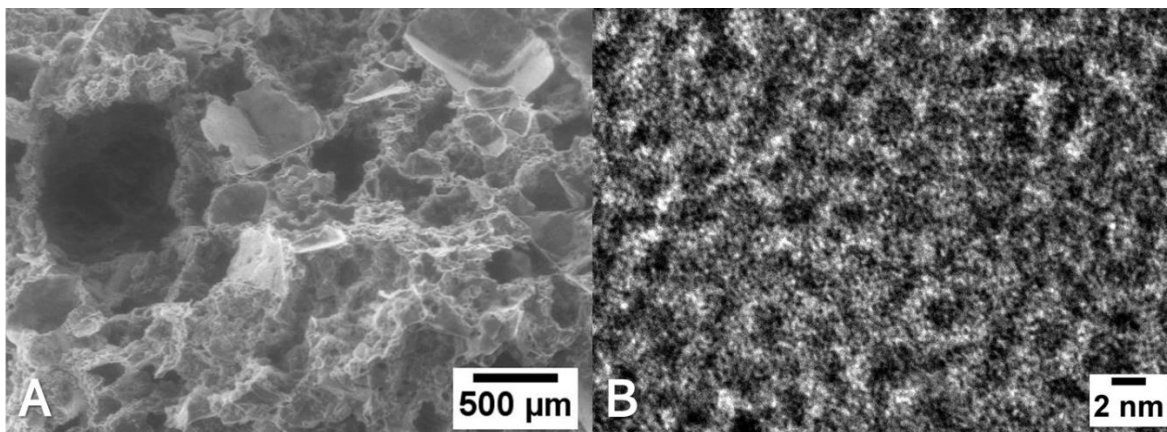


Figura 17: Micrografías de Carbón P1: (A) SEM 25x, (B) TEM.

6.3.5 Porosidad

Como se discutió anteriormente las propiedades de carbón están en función de la temperatura de síntesis, el tiempo y la relación de PET/NaCl, incluyendo el grado de grafitización, tamaño y porosidad [149]. La superficie específica de las estructuras porosas fue calculada para cada muestra mediante el modelo BET; las curvas de fisisorción de N_2 se muestran en la Figura 18. Según la clasificación de las isothermas de adsorción de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), las isothermas de los carbones son Tipo I, que sugieren una naturaleza microporosa del material. Estas observaciones fueron similares a los resultados previos para el carbón activado derivado de PET [150,151].

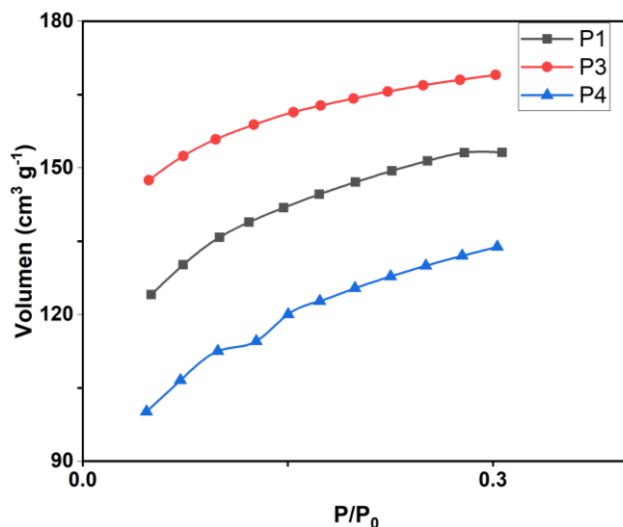


Figura 18: Isotermas de adsorción de N2. P1 (Negro), P3 (Rojo), P4 (Azul).

El orden de la superficie específica fue el siguiente:

$$P4 (444.6 \text{ m}^2/\text{g}) < P1(544.0 \text{ m}^2/\text{g}) < P3 (613.7 \text{ m}^2/\text{g})$$

Se observó que P4 tiene menor superficie específica, esto puede estar relacionado con el aumento de la temperatura que pudo haber inducido la contracción de la estructura de carbón, que resulta en una disminución en la superficie específica [152]. En investigaciones anteriores se ha mostrado el efecto de la temperatura respecto a la superficie específica de un material con base en carbono sintetizado con KCl-ZnCl₂ [117]; se comprobó que mayor temperatura se colapsó la estructura, provocando una disminución en la superficie específica. A través de las micrografías de SEM se calculó el diámetro de macroporos promedio. El orden de porosidad fue:

$$P1 (163.2 \text{ }\mu\text{m}) < P4 (172.1 \text{ }\mu\text{m}) < P3 (177.6 \text{ }\mu\text{m})$$

Se observa que el crecimiento de los macroporos aumentó al disminuir la cantidad de NaCl. Por lo tanto, el carbón P3 tiene un mayor porcentaje de macroporos. El aumento en el tamaño de los macroporos también está relacionado con el incremento del tiempo de reacción [147]. Se ha mostrado que el aumento en el volumen de macroporos se asocia a la prolongación del tiempo de

residencia en el horno, debido a que puede causar el colapso de poros y así, una mayor proporción de macroporos interconectados [153].

Como se mencionó, la adsorción de agua es un factor importante para aplicaciones de evaporación de agua. Para ciertas aplicaciones, la porosidad por sí sola no tiene impacto directo en la adsorción. Para estudiar la capacidad de adsorción de agua se calculó el volumen de espacios porosos permeables según la Norma ASTM-C642-13. El procedimiento consistió en secar las muestras hasta obtener una masa constante (A). Después por no menos de 48 horas se sumergieron en agua y se registró el peso (B). Las muestras se sumergieron en agua en un recipiente adecuado y se hirvieron durante 5 horas, se dejaron enfriar a temperatura ambiente por 14 horas y se registró el peso (C). Posteriormente se determinó la masa aparente en el agua (D). El porcentaje del volumen de poros permeables se determinó con las ecuaciones 17-19:

$$\text{Densidad (material seco)} = [A/(C - D)] \cdot \rho = g_1 \quad (17)$$

$$\text{Densidad aparente} = [A/(A - D)] \cdot \rho = g_2 \quad (18)$$

$$\text{Volumen de poros permeables (\%)} = [(g_1 - g_2)/g_2] \cdot 100 \quad (19)$$

El orden de volumen de poros permeables se observó con una tendencia similar a la macroporosidad:

$$P1 (24.5 \%) < P4 (43.6 \%) < P3 (49.8 \%)$$

El volumen de poros permeables se puede asociar con el incremento de poros interconectados. Esto ha sido defendido en un estudio de un evaporador solar de madera [154] donde se demostró que los poros interconectados adsorben eficientemente el agua conduciéndola hacia la superficie debido al efecto capilar. Además, se han fabricado materiales porosos a partir de biopolímeros naturales [155], donde se concluye que la interconectividad de los poros es un factor importante para la accesibilidad de suspensiones líquidas, gaseosas y partículas; el tamaño de poro también fue considerado uno de los factores con más efecto, reportaron tamaños de >10 nm (microporos) y >50 nm (macroporos), sus resultados coinciden con los datos obtenidos en este trabajo.

6.3.6 Propiedades ópticas

Una de las propiedades principales que influyen en las características necesarias para un sistema de evaporación, es la alta absorción en el espectro solar. Las propiedades ópticas se evaluaron mediante un espectrómetro UV-Vis con esfera de integración. Se midió la reflectancia en el intervalo de 300 a 1000 nm. La absorptancia se obtuvo a partir de la ecuación 20, con base a la ecuación 4 con límites en integrales de 300 a 1000 nm:

$$\alpha_s = \frac{\int_{0.3}^1 (1-\rho_\lambda) \cdot I_\lambda^{AM1.5} d\lambda}{\int_{0.3}^1 I_\lambda^{AM1.5} d\lambda} \quad (20)$$

En la Figura 19 se presentan los resultados de reflectancia y los valores de absorptancia. Se puede observar que en todos los casos se tuvieron absorptancias > 90 %.

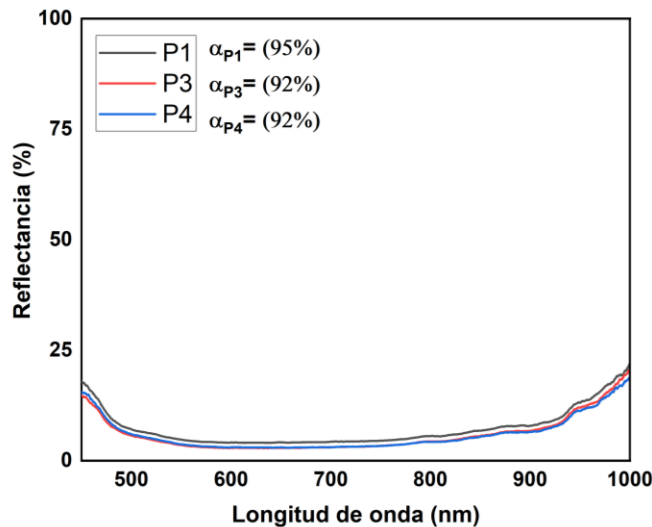


Figura 19: Reflectancia solar de 300-1000 nm de los carbonos P1, P3 y P4.

De acuerdo a reportes en la literatura [156], los resultados de alta absorptancia pueden ser originados por:

(1) Porosidad. La alta porosidad resulta en un índice de refracción bajo, por lo tanto, una reflexión de luz mucho más baja. Las estructuras porosas pueden crear múltiples reflejos dentro de los poros y así aumentar la absorción de luz (Figura 20). Se han desarrollado diseños de un recubrimiento

antirreflejante, que evidencian un mejor rendimiento debido a un patrón poroso en su material [157]. Por lo tanto, la porosidad de los carbones obtenidos puede ser considerada como un parámetro que influye en las propiedades ópticas del carbón.

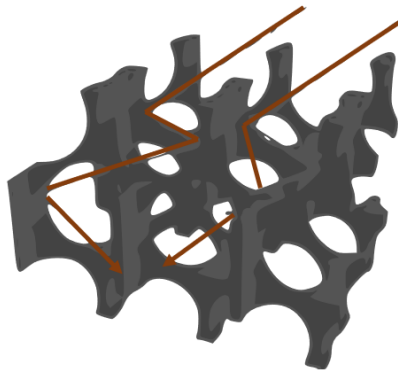


Figura 20: Múltiples reflexiones de luz dentro de los poros.

(2) Vibración térmica molecular. Debido a los niveles de energía estrechamente espaciados de los electrones libres π en los materiales con base en carbono, la radiación electromagnética se absorbe y los electrones excitados se relajan a su estado fundamental, liberando calor [158].

6.4 Análisis de eficiencia de evaporación

Para este análisis, la temperatura inicial fue similar para todas las mediciones (Figura 21A). Se diseñaron las diferentes configuraciones (8M-SP, 5M-SP, 5M-CP) del ISSG P1, P3 y P4; se efectuaron 3 réplicas en la medición de evaporación, reportándose la media.

En la Figura 21 se presentan varias mediciones realizadas en un lapso de 1 hora con irradiación de 1000 W/m^2 . Como se muestra en la Figura 21B, el ISSG P3 presentó mayor pérdida de peso. Cabe señalar que, en todas las mediciones, la temperatura del volumen del agua fue similar para todas las muestras. Por otro lado, la temperatura en la superficie del carbón si depende del ISSG, alcanzando mayor temperatura en ISSG P3. Además, se encontró que el cambio de masa depende también de la configuración del monolito de carbón (Figura 21D). La disminución en el cambio de masa se debe a que, al existir perforaciones en el carbón, se reduce el área del absorbedor, lo que disminuye la absorción en el ISSG por el monolito. Con respecto al espesor del monolito, existe una disminución de cambio de masa aproximada al 5 % cuando se disminuye el espesor de 8 a 5 mm, tal como se puede observar al comparar las Figuras 21B y 21C. Se pudo observar que con

mayor espesor se obtuvo mayor cambio de masa, esto se atribuye a que, al aumentar el espesor existe mayor volumen de contacto con el agua.

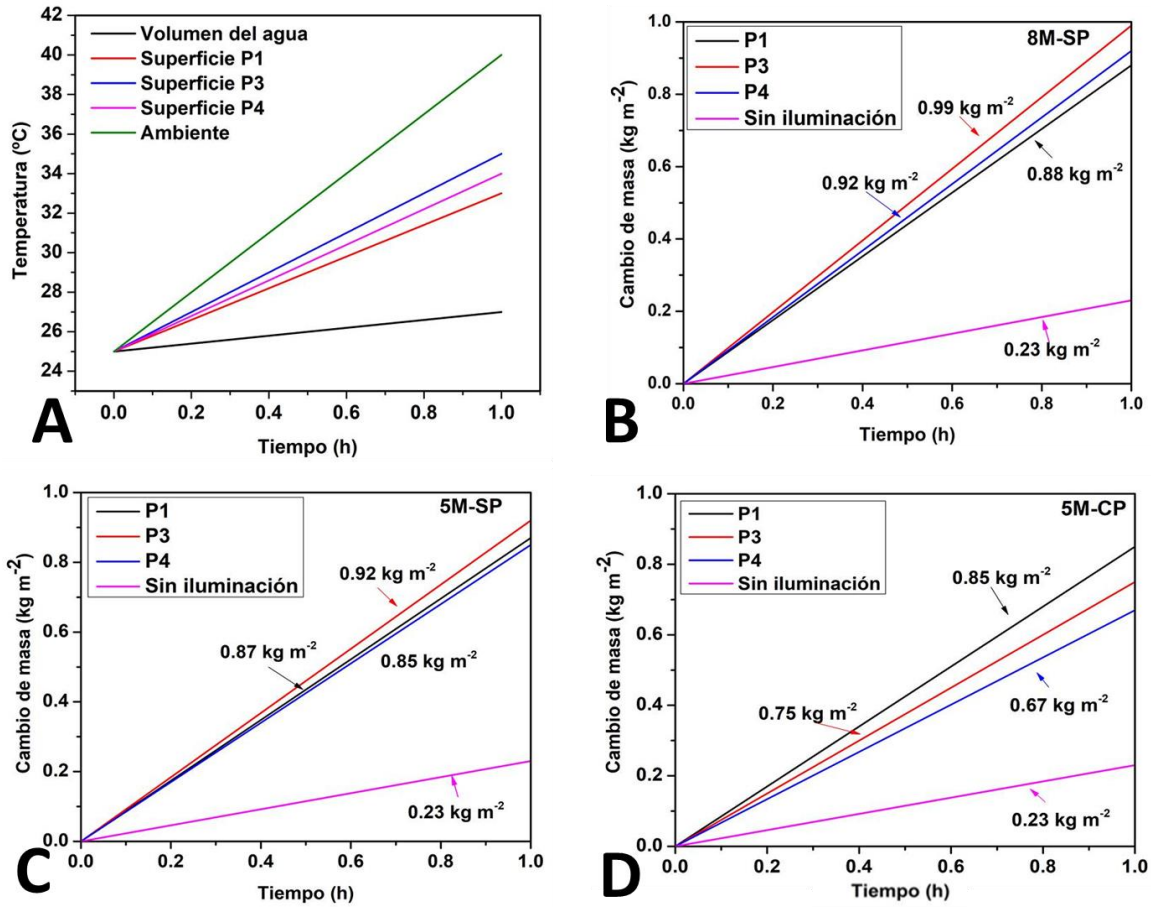


Figura 21: (A) Temperatura promedio registrada. Cambio de masa de carbones P1, P3 y P4 (B) 8M-SP (C) 5M-SP (D) 5M-CP.

Se evaluó el rendimiento del sistema de evaporación solar interfacial de los carbones **P1**, **P3** y **P4** mediante la eficiencia de evaporación solar (η_{stv}). Como se mencionó, la tasa de evaporación es uno de los indicadores más comunes para evaluar la eficiencia de evaporación solar [106]. La eficiencia de evaporación solar puede ser calculada usando la ecuación 21:

$$\eta_{stv} = \frac{\dot{m}h_{LV}}{q_i} \quad (21)$$

donde \dot{m} es la tasa de evaporación, q_i es la densidad de iluminación de 1000 W/m^2 , y h_{LV} es un término que asocia es el calor sensible de evaporación y entalpía de evaporación y se determina con la ecuación 22:

$$h_{LV} = C\Delta T + \Delta h \quad (22)$$

donde C es el calor específico del agua ($4.2 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$), ΔT es el cambio de temperatura del absorbedor y Δh es la entalpía de evaporación a una temperatura relativa [31].

Los resultados se presentan en la Figura 22, como se puede notar, se tiene la misma tendencia que la pérdida de masa de agua. Al considerar los factores necesarios para una eficiente evaporación solar interfacial, se puede deducir que el carbón con mayor superficie específica (P3) dio como resultado una eficiencia de evaporación mayor (63 %). Estos datos coinciden con los resultados expuestos en [140] que estudiaron un evaporador de carbón poroso obtenido a partir de polímeros y determinaron que al aumentar la superficie específica aumenta la tasa y eficiencia de evaporación. Para el carbón P1, se observó que aún con una mayor absorptancia comparado con los carbones P3 y P4, no se logró una mayor eficiencia con una configuración 8M-SP y 5M-SP. Sin embargo, se observó mayor eficiencia al realizar perforaciones al ISSG P1 (5M-CP), esto se debe a que estas perforaciones mejoraron el escape de vapor.

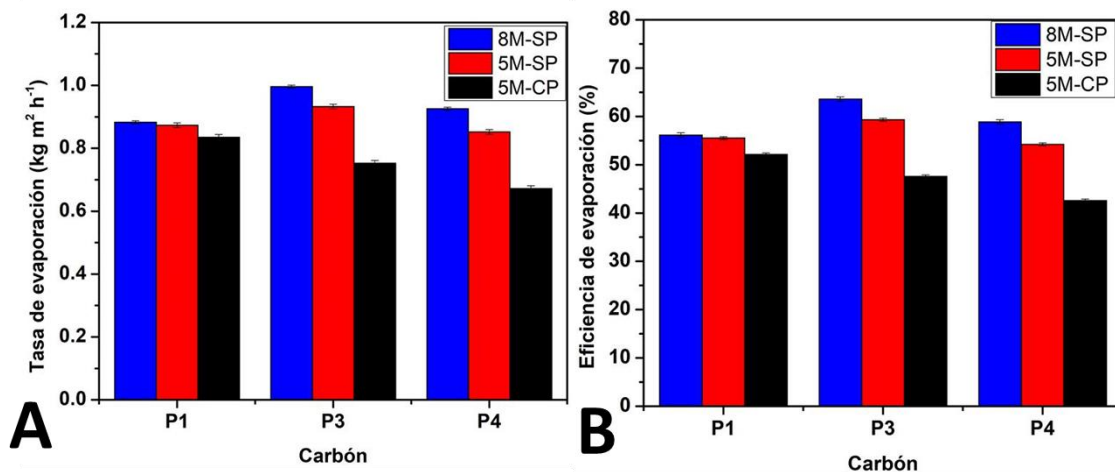


Figura 22: Carbones P1, P3 y P4 con configuraciones 8M-SP, 5M-SP y 5M-CP. (A) Tasa de evaporación, (B) Eficiencia de evaporación.

La eficiencia de generación solar a energía térmica se calculó con la ecuación 23:

$$\eta_{stt} = \frac{m_{loss}(C\Delta T_s + h_{Lv}) + (m_b C + m_g C_g) \cdot \Delta T_b}{A \cdot q_i \cdot t} \quad (23)$$

La eficiencia de pérdida térmica se calculó con la ecuación 24:

$$\eta_{tl} = 100 - \eta_{ttv} \quad (24)$$

donde m_{loss} , m_b y m_g son las masas del vapor producido, del agua dentro del vaso y del vaso de vidrio, respectivamente; C y C_g son las capacidades de calor específicas del agua y el vaso de precipitado de vidrio ($0.84 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$), respectivamente; ΔT_s y ΔT_b son los cambios de temperatura (las temperaturas en tiempo final en comparación con la temperatura inicial del agua) de agua a la interfaz aire-agua y el volumen de agua en el vaso de precipitados, respectivamente; A es el área abierta del vaso de precipitados (5 cm); q_i es la energía solar específica del área incidente (mWcm^{-2}) y t el tiempo de irradiación respectivamente [106].

Para la configuración 8M-SP se encontró el siguiente orden en la eficiencia de conversión solar a térmica (η_{stt}):

$$P3 (76.47 \%) > P4 (63.78 \%) > P1 (61.85 \%)$$

Para la configuración 5M-SP, el orden la eficiencia de conversión solar a térmica (η_{stt}) fue:

$$P3 (67.63 \%) > P4 (59.18 \%) > P1 (57.11 \%)$$

Para la configuración 5M-CP el orden la eficiencia de conversión solar a térmica (η_{stt}) determinado, fue:

$$P1 (76.13 \%) > P4 (70.40 \%) > P3 (57.22 \%)$$

El ISSG P3 mostró la mayor eficiencia de conversión solar, lo que se atribuye al mayor porcentaje de poros permeables. Las configuraciones 8M-SP y 5M-SP mostraron tendencias similares, es decir, que, al disminuir el porcentaje de poros permeables, disminuyó la conversión de energía solar a térmica. Las perforaciones favorecieron al ISSG P1 al permitir la transferencia de agua y escape de vapor. Estos datos coinciden con la eficiencia de evaporación solar discutidos anteriormente. El ISSG P4 con perforaciones aumentó la pérdida de calor y por lo tanto disminuyó la eficiencia de evaporación solar. La pérdida de calor en todos los carbones tiene la misma

tendencia al disminuir el espesor; también, al realizar perforaciones, se aumenta la pérdida de calor ver Tabla 12.

Tabla 12: Eficiencia de pérdida de calor de ISSG P1, P3, P4.

ISSG	Eficiencia 8M-SP (%)	Eficiencia 5M-SP (%)	Eficiencia 8M-CP (%)
P1	43.9	44.5	47.1
P3	36.4	40.7	52.4
P4	41.1	45.8	57.4

6.5 Observaciones finales

El principal alcance de este trabajo fue evaluar las propiedades fisicoquímicas del monolito de carbón obtenido a partir de PET reciclado y NaCl, para su aplicación en evaporación solar; por lo cual se relacionaron las propiedades de los monolitos y su influencia en la eficiencia de evaporación solar.

En la Figura 23 se puede observar la relación de la integridad física, el módulo de Young y la superficie específica de los monolitos de carbón. Los valores obtenidos del módulo de Young en esta investigación fueron suficientes para permitir integridad física de los monolitos de carbón; como se pudo observar, el monolito P4 tiene mayor integridad física, sin embargo, tiene menor superficie específica; esto puede estar relacionado con el aumento de la temperatura de síntesis que pudo haber inducido la contracción de la estructura de carbón y disminuir la cantidad de microporos. Todos los materiales con base en carbono, excepto el grafito altamente orientado, contienen poros [152], de esta manera se puede explicar la disminución de superficie específica de P4 en función a la cristalinidad del material; ya que con mayor temperatura de síntesis se obtuvo un menor desorden del material ($I_D/I_G = 1.4$) y así una menor superficie específica, estos datos coinciden con lo expuesto por [159].

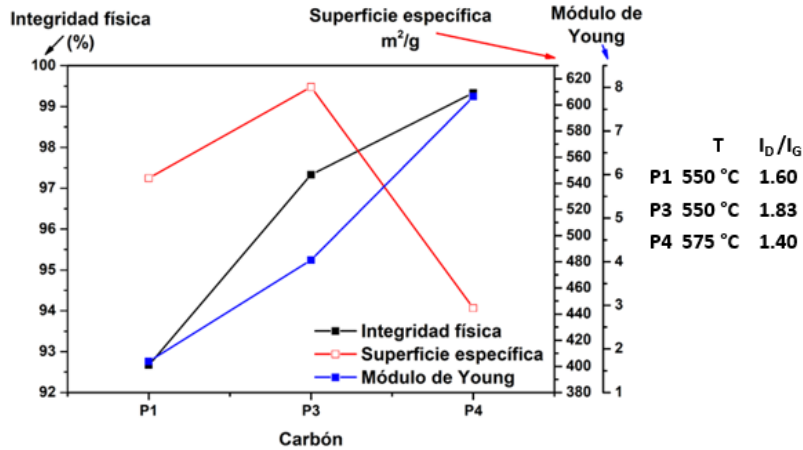


Figura 23: Relación entre la integridad física, módulo de Young y superficie específica.

Por otro lado, como se mencionó, la adsorción de agua y la absorción solar son factores importantes para aplicaciones de evaporación de agua. Para la presente aplicación, la porosidad por sí sola no tiene impacto directo en la adsorción de agua; por lo cual, se relacionó el porcentaje del volumen de poros permeables y la absorción solar con la eficiencia de evaporación (configuración 8M-SP) ver Figura 24. A pesar de la mayor absorción solar que presentó el ISSG P1, se pudo observar una menor eficiencia de evaporación, esto puede ser explicado por la importancia de la interrelación de propiedades, debido a que contiene menor volumen de poros permeables que evita el escape de vapor.

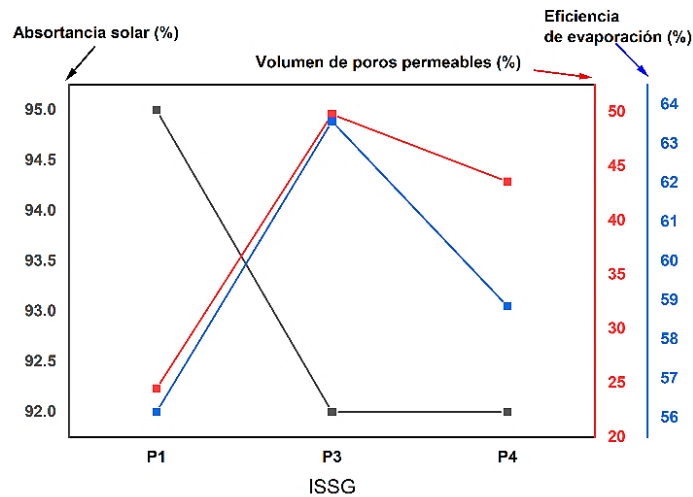


Figura 24: Relación entre la absorptancia solar y volumen de poros permeables en la eficiencia de evaporación.

Como se menciona en la revisión de la literatura, existe poca información sobre la carbonización de desechos de botellas de PET para su uso como ISSG y hasta donde se sabe no hay información sobre un ISSG de este material que evite el uso de un soporte. En la Figura 25 se presenta la comparación de los ISSG sin soporte reportados en la literatura y los resultados de la investigación presente. Se puede observar que los valores de ISSG P3 están dentro del rango de los valores reportados de eficiencia de evaporación (50 y 90 %); por lo que en este trabajo se demuestra que los monolitos de carbón obtenidos son posibles candidatos para una adecuada evaporación de agua.

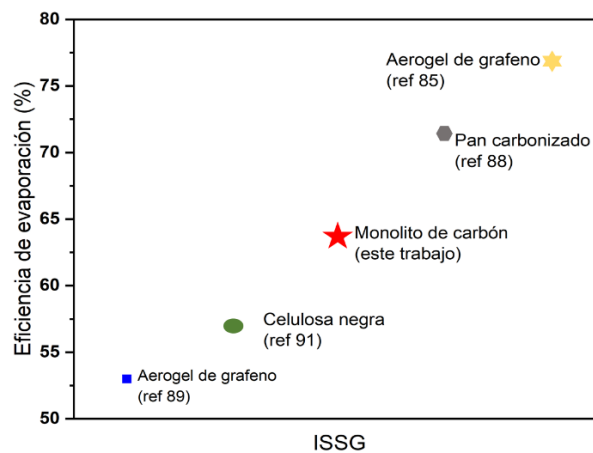


Figura 25: Eficiencia de evaporación (1000 W/m^2) de ISSG P3 en comparación con otras eficiencias reportadas en la literatura.

7 CONCLUSIONES

- Se desarrollaron estructuras monolíticas de carbón sintetizadas mediante la carbonización en atmósfera de aire de PET reciclado adicionando NaCl. Estas estructuras están interconectadas con macroporos y en sus paredes contienen microporos.
- Se encontraron las condiciones óptimas para el proceso de formación de estructuras monolíticas de carbón, las cuales fueron 550 °C, 5 min de reacción y una relación másica de 0.6 PET/NaCl a través del método Taguchi. Al optimizar estas condiciones se obtuvieron carbones con una integridad monolítica mayores que 90 %. Mediante análisis de varianza (ANOVA) se mostró que la temperatura es el factor que tiene más contribución en la integridad monolítica y eficiencia de evaporación.
- Por el método BET se determinó la superficie específica que oscila entre 444-613 m²/g y el porcentaje de volumen de poros permeables de 24-49 %. A través de XRD y espectroscopía Raman, se encontró que la estructura del carbón fue amorfa. Por medio de XPS se encontró que las estructuras contienen mayormente enlaces de carbón grafítico *sp*² y en menor medida grupos funcionales tales como C-OH, C-O, COOH.
- Utilizando un simulador solar a escala laboratorio, se observó un menor aprovechamiento de la radiación solar al disminuir el espesor del ISSG debido a que existió mayor pérdida de calor en el volumen del agua. Los estudios mostraron que la permeabilidad de los poros es la propiedad que más influye en la evaporación solar. Se probó que la suma de influencias de estas características logra una alta eficiencia de evaporación (> 60 %).

8 REFERENCIAS

- [1] P.N. Tri, S. Rtimi, T.A. Nguyen, M.T. Vu. Physics, Electrochemistry, Photochemistry, and Photoelectrochemistry of Hybrid Nanoparticles, in: Noble Met. Oxide Hybrid Nanoparticles Fundam. Appl., Elsevier, 2018: pp. 95–123.
- [2] T. Lin, Y.Q. Zhang, L. Zhang, F. Klappenberger. On-surface chemistry of alkyne derivatives, in: Encycl. Interfacial Chem. Surf. Sci. Electrochem., Elsevier, 2018: pp. 324–334.
- [3] Hibridación - significado de hibridación diccionario. (n.d.). <https://es.thefreedictionary.com/hibridación> (accessed September 6, 2020).
- [4] F.J. Garcia-Vidal, L. Martín-Moreno, J.B. Pendry. Surfaces with holes in them: New plasmonic metamaterials. *J. Opt. A Pure Appl. Opt.* 7 (2005) S97.
- [5] Photoexcitation | Definition of Photoexcitation by Merriam-Webster. (n.d.). <https://www.merriam-webster.com/dictionary/photoexcitation> (accessed September 6, 2020).
- [6] L. Novo, M. Isabel. Método de liofilización. (2007).
- [7] K.R. Ranjan, S.C. Kaushik. Exergy analysis of the active solar distillation systems integrated with solar ponds. *Clean Technol. Environ. Policy.* 16 (2014) 791–805.
- [8] G. Zieke, Pmpca. Development of a low-cost, high-efficiency solar distillation unit for small-scale use in rural communities (Master Thesis), Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2017.
- [9] P.K. Cornejo, M.V.E. Santana, D.R. Hokanson, J.R. Mihelcic, Q. Zhang. Carbon footprint of water reuse and desalination: a review of greenhouse gas emissions and estimation tools. *J. Water Reuse Desalin.* 4 (2014) 238–252.
- [10] Y. Zhang, L. Liu, K. Li, D. Hou, J. Wang. Enhancement of energy utilization using nanofluid in solar powered membrane distillation. *Chemosphere.* 212 (2018) 554–562.
- [11] C. Chen, Y. Kuang, L. Hu. Challenges and Opportunities for Solar Evaporation. *Joule.* 3 (2019) 683–718.
- [12] L. Zhu, M. Gao, C.K.N. Peh, G.W. Ho. Recent progress in solar-driven interfacial water evaporation: Advanced designs and applications. *Nano Energy.* 57 (2019) 507–518.
- [13] Y. Xu, J. Ma, D. Liu, H. Xu, F. Cui, W. Wang. Origami system for efficient solar driven distillation in emergency water supply. *Chem. Eng. J.* 356 (2019) 869–876.

- [14] M. Ju, Y. Yang, J. Zhao, X. Yin, Y. Wu, W. Que. Macroporous 3D MXene architecture for solar-driven interfacial water evaporation. *J. Adv. Dielectr.* 09 (2019) 1950047.
- [15] L. Zhu, M. Gao, C.K.N. Peh, X. Wang, G.W. Ho. Self-Contained Monolithic Carbon Sponges for Solar-Driven Interfacial Water Evaporation Distillation and Electricity Generation. *Adv. Energy Mater.* 8 (2018) 1702149.
- [16] Q. Chen, Z. Pei, Y. Xu, Z. Li, Y. Yang, Y. Wei, Y. Ji. A durable monolithic polymer foam for efficient solar steam generation. *Chem. Sci.* 9 (2018) 623–628.
- [17] A.R. Kamali. Molten Salt Conversion of Plastics into Highly Conductive Carbon Nanostructures, in: *Green Prod. Carbon Nanomater. Molten Salts Appl.*, Springer Singapore, Singapore, 2020: pp. 109–140.
- [18] A. Natali Murri, V. Medri, E. Papa, L. Laghi, C. Mingazzini, E. Landi. Porous Geopolymer Insulating Core from a Metakaolin/Biomass Ash Composite. *Environments.* 4 (2017) 86.
- [19] S. Chen, Z. Liu, S. Jiang, H. Hou. Carbonization: A feasible route for reutilization of plastic wastes. *Sci. Total Environ.* 710 (2020) 136250.
- [20] K. Sampathkumar, T. V. Arjunan, P. Senthilkumar. Water desalination by solar energy, in: *Wastewater Reuse Manag.*, Springer Netherlands, 2013: pp. 323–351.
- [21] D. Brutin. *Droplet Wetting and Evaporation From Pure to Complex Fluids*, 2015.
- [22] A. Manzur, J. Cardoso. Velocidad de evaporación del agua. *Rev. Mex. Fis. E.* 61 (2015) 31–34.
- [23] Z. Mor, S. Assouline, J. Tanny, I.M. Lensky, N.G. Lensky. Effect of Water Surface Salinity on Evaporation: The Case of a Diluted Buoyant Plume Over the Dead Sea. *Water Resour. Res.* 54 (2018) 1460–1475.
- [24] D. Huddart, T. Stott. *Earth environments : past, present and future*, J. Wiley & Sons, 2010.
- [25] D. Chwieduk. Solar Radiation—Fundamentals, in: *Sol. Energy Build.*, Elsevier, 2014: pp. 1–19.
- [26] S. Karathanasis. *Linear Fresnel Reflector Systems for Solar Radiation Concentration*, Springer International Publishing, Cham, 2019.
- [27] M. Gao, L. Zhu, C.K. Peh, G.W. Ho. Solar absorber material and system designs for photothermal water vaporization towards clean water and energy production. *Energy Environ. Sci.* 12 (2019) 841–864.
- [28] Z. Wang, P. Cheng. Enhancements of absorption and photothermal conversion of solar

- energy enabled by surface plasmon resonances in nanoparticles and metamaterials. *Int. J. Heat Mass Transf.* 140 (2019) 453–482.
- [29] J.H. Yang, L. Shi, L.W. Wang, S.H. Wei. Non-Radiative Carrier Recombination Enhanced by Two-Level Process: A First-Principles Study. *Sci. Rep.* 6 (2016) 1–10.
- [30] Z. Xie, Y. Duo, Z. Lin, T. Fan, C. Xing, L. Yu, R. Wang, M. Qiu, Y. Zhang, Y. Zhao, X. Yan, H. Zhang. The Rise of 2D Photothermal Materials beyond Graphene for Clean Water Production. *Adv. Sci.* 7 (2020) 1902236.
- [31] L. Zhu, M. Gao, C.K.N. Peh, G.W. Ho. Recent progress in solar-driven interfacial water evaporation: Advanced designs and applications. *Nano Energy.* 57 (2019) 507–518.
- [32] L. Zhu, M. Gao, C.K.N. Peh, G.W. Ho. Solar-driven photothermal nanostructured materials designs and prerequisites for evaporation and catalysis applications. *Mater. Horizons.* 5 (2018) 323–343.
- [33] P.A. Konstantinidis, G.C. Koltsakis, A.M. Stamatelos. Transient heat transfer modelling in automotive exhaust systems. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 211 (1997) 1–15.
- [34] J.H.L. Iv, J.H. Lienhard. *A heat transfer TEXBOOK.* (2003) 759.
- [35] Y.A.C.& Y. Cengel. *Heat Transfer.* (2002) 896.
- [36] P. Wang. Emerging investigator series: The rise of nano-enabled photothermal materials for water evaporation and clean water production by sunlight. *Environ. Sci. Nano.* 5 (2018) 1078–1089.
- [37] Z. Liu, H. Song, D. Ji, C. Li, A. Cheney, Y. Liu, N. Zhang, X. Zeng, B. Chen, J. Gao, Y. Li, X. Liu, D. Aga, S. Jiang, Z. Yu, Q. Gan. Extremely Cost-Effective and Efficient Solar Vapor Generation under Nonconcentrated Illumination Using Thermally Isolated Black Paper. *Glob. Challenges.* 1 (2017) 1600003.
- [38] M. Boukar, A. Harmim. Effect of climatic conditions on the performance of a simple basin solar still.: A comparative study. *Desalination.* 137 (2001) 15–22.
- [39] M. Fathy, H. Hassan, M. Salem Ahmed. Experimental study on the effect of coupling parabolic trough collector with double slope solar still on its performance. *Sol. Energy.* 163 (2018) 54–61.
- [40] B. Chaouchi, A. Zrelli, S. Gabsi. Desalination of brackish water by means of a parabolic solar concentrator. *Desalination.* 217 (2007) 118–126.

- [41] W.T. Xie, Y.J. Dai, R.Z. Wang, K. Sumathy. Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 2588–2606.
- [42] O. Neumann, A.S. Urban, J. Day, S. Lal, P. Nordlander, N.J. Halas. Solar vapor generation enabled by nanoparticles. *ACS Nano.* 7 (2013) 42–49.
- [43] H. Ghasemi, G. Ni, A.M. Marconnet, J. Loomis, S. Yerci, N. Miljkovic, G. Chen. Solar steam generation by heat localization. *Nat. Commun.* 5 (2014) 4449.
- [44] Y. Wang, L. Zhang, P. Wang. Self-Floating Carbon Nanotube Membrane on Macroporous Silica Substrate for Highly Efficient Solar-Driven Interfacial Water Evaporation. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 4 (2016) 1223–1230.
- [45] L. Shi, Y. Wang, L. Zhang, P. Wang. Rational design of a bi-layered reduced graphene oxide film on polystyrene foam for solar-driven interfacial water evaporation. *J. Mater. Chem. A.* 5 (2017) 16212–16219.
- [46] H. Cao, T. Cui, W. Wang, S. Li, X. Tang, H. Wang, G. Zhu. Green-synthesizing Ag nanoparticles by watermelon peel extract and their application in solar-driven interfacial evaporation for seawater desalination. *Mater. Res. Express.* 7 (2020) 045005.
- [47] R. Feng, Y. Qiao, C. Song. A perspective on bio-inspired interfacial systems for solar clean-water generation. *MRS Commun.* 9 (2019) 3–13.
- [48] Y. Shi, R. Li, Y. Jin, S. Zhuo, L. Shi, J. Chang, S. Hong, K.C. Ng, P. Wang. A 3D Photothermal Structure toward Improved Energy Efficiency in Solar Steam Generation. *Joule.* 2 (2018) 1171–1186.
- [49] L. Chen, H. Wang, S. Kuravi, K. Kota, Y.H. Park, P. Xu. Low-cost and reusable carbon black based solar evaporator for effective water desalination. *Desalination.* 483 (2020).
- [50] G. Liu, J. Xu, K. Wang. Solar water evaporation by black photothermal sheets. *Nano Energy.* 41 (2017) 269–284.
- [51] H. Bai, T. Zhao, M. Cao. Interfacial solar evaporation for water production: From structure design to reliable performance. *Mol. Syst. Des. Eng.* 5 (2020) 419–432.
- [52] M. Gao, L. Zhu, C.K. Peh, G.W. Ho. Solar absorber material and system designs for photothermal water vaporization towards clean water and energy production. *Energy Environ. Sci.* 12 (2019) 841–864.
- [53] S. Wang, I.N. Partial, F. Of, T.H.E. Requirements, F.O.R. The, D. Of, M. Of, A. Science. Photo-thermal application of a polydimethylsiloxane foam embedded with carbon

- nanoparticles for interfacial solar water evaporation. (2019).
- [54] N.J. Hogan, A.S. Urban, C. Ayala-Orozco, A. Pimpinelli, P. Nordlander, N.J. Halas. Nanoparticles Heat through Light Localization. *Nano Lett.* 14 (2014) 4640–4645.
- [55] L. Zhou, Y. Tan, J. Wang, W. Xu, Y. Yuan, W. Cai, S. Zhu, J. Zhu. 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination. *Nat. Photonics.* 10 (2016) 393–398.
- [56] S. V. Boriskina, T.A. Cooper, L. Zeng, G. Ni, J.K. Tong, Y. Tsurimaki, Y. Huang, L. Meroueh, G. Mahan, G. Chen. Losses in plasmonics: from mitigating energy dissipation to embracing loss-enabled functionalities. *Adv. Opt. Photonics.* 9 (2017) 775.
- [57] D. Lapotko. Optical excitation and detection of vapor bubbles around plasmonic nanoparticles. *Opt. Express.* 17 (2009) 2538.
- [58] H. Jin, G. Lin, L. Bai, A. Zeiny, D. Wen. Steam generation in a nanoparticle-based solar receiver. *Nano Energy.* 28 (2016) 397–406.
- [59] M. Morciano, M. Fasano, U. Salomov, L. Ventola, E. Chiavazzo, P. Asinari. Efficient steam generation by inexpensive narrow gap evaporation device for solar applications. *Sci. Rep.* 7 (2017).
- [60] K. Bae, G. Kang, S.K. Cho, W. Park, K. Kim, W.J. Padilla. Flexible thin-film black gold membranes with ultrabroadband plasmonic nanofocusing for efficient solar vapour generation. *Nat. Commun.* 6 (2015) 1–9.
- [61] M. Chen, Y. Wu, W. Song, Y. Mo, X. Lin, Q. He, B. Guo. Plasmonic nanoparticle-embedded poly(p-phenylene benzobisoxazole) nanofibrous composite films for solar steam generation. *Nanoscale.* 10 (2018) 6186–6193.
- [62] F. Tao, Y. Zhang, K. Yin, S. Cao, X. Chang, Y. Lei, D. Wang, R. Fan, L. Dong, Y. Yin, X. Chen. A plasmonic interfacial evaporator for high-efficiency solar vapor generation. *Sustain. Energy Fuels.* 2 (2018) 2762–2769.
- [63] J. Wang, Y. Li, L. Deng, N. Wei, Y. Weng, S. Dong, D. Qi, J. Qiu, X. Chen, T. Wu. High-Performance Photothermal Conversion of Narrow-Bandgap Ti_2O_3 Nanoparticles. *Adv. Mater.* 29 (2017) 1603730.
- [64] Y. Shi, R. Li, L. Shi, E. Ahmed, Y. Jin, P. Wang. A Robust $\text{CuCr}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2$ Composite Photothermal Material with Underwater Black Property and Extremely High Thermal Stability for Solar-Driven Water Evaporation. *Adv. Sustain. Syst.* 2 (2018) 1700145.

- [65] H. Liu, C. Chen, G. Chen, Y. Kuang, X. Zhao, J. Song, C. Jia, X. Xu, E. Hitz, H. Xie, S. Wang, F. Jiang, T. Li, Y. Li, A. Gong, R. Yang, S. Das, L. Hu. High-Performance Solar Steam Device with Layered Channels: Artificial Tree with a Reversed Design. *Adv. Energy Mater.* 8 (2018) 1701616.
- [66] R. Li, L. Zhang, L. Shi, P. Wang. MXene Ti₃C₂: An Effective 2D Light-to-Heat Conversion Material. *ACS Nano.* 11 (2017) 3752–3759.
- [67] M. Zhu, Y. Li, G. Chen, F. Jiang, Z. Yang, X. Luo, Y. Wang, S.D. Lacey, J. Dai, C. Wang, C. Jia, J. Wan, Y. Yao, A. Gong, B. Yang, Z. Yu, S. Das, L. Hu. Tree-Inspired Design for High-Efficiency Water Extraction. *Adv. Mater.* 29 (2017) 1704107.
- [68] M.F.L. De Volder, S.H. Tawfick, R.H. Baughman, A.J. Hart. Carbon nanotubes: Present and future commercial applications. *Science* (80-.). 339 (2013) 535–539.
- [69] M.A. Worsley, S. Charnvanichborikarn, E. Montalvo, S.J. Shin, E.D. Tylski, J.P. Lewicki, A.J. Nelson, J.H. Satcher, J. Biener, T.F. Baumann, S.O. Kucheyev. Toward Macroscale, Isotropic Carbons with Graphene-Sheet-Like Electrical and Mechanical Properties. *Adv. Funct. Mater.* 24 (2014) 4259–4264.
- [70] C. Finnerty, L. Zhang, D.L. Sedlak, K.L. Nelson, B. Mi. Synthetic Graphene Oxide Leaf for Solar Desalination with Zero Liquid Discharge. *Environ. Sci. Technol.* 51 (2017) 11701–11709.
- [71] R. Wan, G. Shi. Accelerated evaporation of water on graphene oxide. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 19 (2017) 8843–8847.
- [72] J. Lou, Y. Liu, Z. Wang, D. Zhao, C. Song, J. Wu, N. Dasgupta, W. Zhang, D. Zhang, P. Tao, W. Shang, T. Deng. Bioinspired Multifunctional Paper-Based rGO Composites for Solar-Driven Clean Water Generation. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 8 (2016) 14628–14636.
- [73] X. Wang, Y. He, X. Liu, J. Zhu. Enhanced direct steam generation via a bio-inspired solar heating method using carbon nanotube films. *Powder Technol.* 321 (2017) 276–285.
- [74] Y. Liu, J. Chen, D. Guo, M. Cao, L. Jiang. Floatable, Self-Cleaning, and Carbon-Black-Based Superhydrophobic Gauze for the Solar Evaporation Enhancement at the Air-Water Interface. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 7 (2015) 13645–13652.
- [75] N. Xu, X. Hu, W. Xu, X. Li, L. Zhou, S. Zhu, J. Zhu. Mushrooms as Efficient Solar Steam-Generation Devices. *Adv. Mater.* 29 (2017) 1606762.
- [76] Y. Wang, C. Wang, X. Song, S.K. Megarajan, H. Jiang. A facile nanocomposite strategy to

- fabricate a rGO-MWCNT photothermal layer for efficient water evaporation. *J. Mater. Chem. A*. 6 (2018) 963–971.
- [77] L. Zhang, R. Li, B. Tang, P. Wang. Solar-thermal conversion and thermal energy storage of graphene foam-based composites. *Nanoscale*. 8 (2016) 14600–14607.
- [78] F. Liu, B. Zhao, W. Wu, H. Yang, Y. Ning, Y. Lai, R. Bradley. Low Cost, Robust, Environmentally Friendly Geopolymer-Mesoporous Carbon Composites for Efficient Solar Powered Steam Generation. *Adv. Funct. Mater.* 28 (2018) 1803266.
- [79] X. Lin, J. Chen, Z. Yuan, M. Yang, G. Chen, D. Yu, M. Zhang, W. Hong, X. Chen. Integrative solar absorbers for highly efficient solar steam generation. *J. Mater. Chem. A*. 6 (2018) 4642–4648.
- [80] T. Li, H. Liu, X. Zhao, G. Chen, J. Dai, G. Pastel, C. Jia, C. Chen, E. Hitz, D. Siddhartha, R. Yang, L. Hu. Scalable and Highly Efficient Mesoporous Wood-Based Solar Steam Generation Device: Localized Heat, Rapid Water Transport. *Adv. Funct. Mater.* 28 (2018) 1707134.
- [81] K. Kim, S. Yu, C. An, S.W. Kim, J.H. Jang. Mesoporous Three-Dimensional Graphene Networks for Highly Efficient Solar Desalination under 1 sun Illumination. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 10 (2018) 15602–15608.
- [82] Y. Bian, Q. Du, K. Tang, Y. Shen, L. Hao, D. Zhou, X. Wang, Z. Xu, H. Zhang, L. Zhao, S. Zhu, J. Ye, H. Lu, Y. Yang, R. Zhang, Y. Zheng, S. Gu. Carbonized Bamboos as Excellent 3D Solar Vapor-Generation Devices. *Adv. Mater. Technol.* 4 (2019) 1800593.
- [83] H. Li, Y. He, Y. Hu, X. Wang. Commercially Available Activated Carbon Fiber Felt Enables Efficient Solar Steam Generation. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 10 (2018) 9362–9368.
- [84] P.F. Liu, L. Miao, Z. Deng, J. Zhou, H. Su, L. Sun, S. Tanemura, W. Cao, F. Jiang, L.D. Zhao. A mimetic transpiration system for record high conversion efficiency in solar steam generator under one-sun. *Mater. Today Energy*. 8 (2018) 166–173.
- [85] Y. Fu, G. Wang, X. Ming, X. Liu, B. Hou, T. Mei, J. Li, J. Wang, X. Wang. Oxygen plasma treated graphene aerogel as a solar absorber for rapid and efficient solar steam generation. *Carbon N. Y.* 130 (2018) 250–256.
- [86] T. Li, H. Liu, X. Zhao, G. Chen, J. Dai, G. Pastel, C. Jia, C. Chen, E. Hitz, D. Siddhartha, R. Yang, L. Hu. Scalable and Highly Efficient Mesoporous Wood-Based Solar Steam Generation Device: Localized Heat, Rapid Water Transport. *Adv. Funct. Mater.* 28 (2018)

1707134.

- [87] D.P. Storer, J.L. Phelps, X. Wu, G. Owens, N.I. Khan, H. Xu. Graphene and Rice-Straw-Fiber-Based 3D Photothermal Aerogels for Highly Efficient Solar Evaporation. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 12 (2020) 15279–15287.
- [88] Y. Zhang, S.K. Ravi, J.V. Vaghasiya, S.C. Tan. A Barbeque-Analog Route to Carbonize Moldy Bread for Efficient Steam Generation. *IScience*. 3 (2018) 31–39.
- [89] Y. Fu, G. Wang, T. Mei, J. Li, J. Wang, X. Wang. Accessible Graphene Aerogel for Efficiently Harvesting Solar Energy. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 5 (2017) 4665–4671.
- [90] P. Zhang, J. Li, L. Lv, Y. Zhao, L. Qu. Vertically Aligned Graphene Sheets Membrane for Highly Efficient Solar Thermal Generation of Clean Water. *ACS Nano*. 11 (2017) 5087–5093.
- [91] G. Ni, S.H. Zandavi, S.M. Javid, S. V. Boriskina, T.A. Cooper, G. Chen. A salt-rejecting floating solar still for low-cost desalination. *Energy Environ. Sci.* 11 (2018) 1510–1519.
- [92] Z. Fang, S. Jiao, B. Wang, W. Yin, G. Pang. A Flexible, Self-Floating Composite for Efficient Water Evaporation. *Glob. Challenges*. 3 (2019) 1800085.
- [93] C.B. Crawford, B. Quinn. Physiochemical properties and degradation, in: *Microplastic Pollut.*, Elsevier, 2017: pp. 57–100.
- [94] R. Zhang, X. Ma, X. Shen, Y. Zhai, T. Zhang, C. Ji, J. Hong. PET bottles recycling in China: An LCA coupled with LCC case study of blanket production made of waste PET bottles. *J. Environ. Manage.* 260 (2020).
- [95] N.A. El Essawy, A.H. Konsowa, M. Elnouby, H.A. Farag. A novel one-step synthesis for carbon-based nanomaterials from polyethylene terephthalate (PET) bottles waste. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 67 (2017) 358–370.
- [96] A. Bazargan, C.W. Hui, G. McKay. Porous carbons from plastic waste. *Adv. Polym. Sci.* 266 (2013) 01–26.
- [97] A.A. Aboul-Enein, A.E. Awadallah, A.A.H. Abdel-Rahman, A.M. Haggag. Synthesis of multi-walled carbon nanotubes via pyrolysis of plastic waste using a two-stage process. *Fullerenes Nanotub. Carbon Nanostructures*. 26 (2018) 443–450.
- [98] K. László, A. Bóta, I. Dékány. Effect of heat treatment on synthetic carbon precursors. *Carbon N. Y.* 41 (2003) 1205–1214.
- [99] B. Zhang, C. Song, C. Liu, J. Min, J. Azadmanjiri, Y. Ni, R. Niu, J. Gong, Q. Zhao, T. Tang.

- Molten salts promoting the “controlled carbonization” of waste polyesters into hierarchically porous carbon for high-performance solar steam evaporation. *J. Mater. Chem. A.* 7 (2019) 22912–22923.
- [100] J. Rubin, P.E. Garder, C.E. Morris, K.L. Nichols, J.M. Peckenham, P. McKee, A. Stern, T.O. Johnson. *Maine Winter Roads: Salt, Safety, Environment and Cost: Executive Summary.* (2010).
- [101] A.A. Kadam, H.S. Lade, D.S. Lee, S.P. Govindwar. Zinc chloride as a coagulant for textile dyes and treatment of generated dye sludge under the solid state fermentation: Hybrid treatment strategy. *Bioresour. Technol.* 176 (2015) 38–46.
- [102] A.R. Kamali. Scalable fabrication of highly conductive 3D graphene by electrochemical exfoliation of graphite in molten NaCl under Ar/H₂ atmosphere. *J. Ind. Eng. Chem.* 52 (2017) 18–27.
- [103] E. Sartori. A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces. *Sol. Energy.* 68 (2000) 77–89.
- [104] C.P. Musy André, Hingray Benoit. *Hydrology: A Science for Engineers*, 2014.
- [105] H.G.R. Davenport A.J, Hicks B.B. *Evaporation into the atmosphere*, 1991.
- [106] F. Tao, A. Valenzuela Garcia, T. Xiao, Y. Zhang, Y. Yin, X. Chen. Interfacial Solar Vapor Generation: Introducing Students to Experimental Procedures and Analysis for Efficiently Harvesting Energy and Generating Vapor at the Air-Water Interface. *J. Chem. Educ.* 97 (2020) 1093–1100.
- [107] Y. Yang, Y. Sui, Z. Cai, B. Xu. Low-Cost and High-Efficiency Solar-Driven Vapor Generation Using a 3D Dyed Cotton Towel. *Glob. Challenges.* 3 (2019) 1900004.
- [108] Y. Li, T. Gao, Z. Yang, C. Chen, Y. Kuang, J. Song, C. Jia, E.M. Hitz, B. Yang, L. Hu. Graphene oxide-based evaporator with one-dimensional water transport enabling high-efficiency solar desalination. *Nano Energy.* 41 (2017) 201–209.
- [109] C.F. Wang, C.L. Wu, S.W. Kuo, W.S. Hung, K.J. Lee, H.C. Tsai, C.J. Chang, J.Y. Lai. Preparation of efficient photothermal materials from waste coffee grounds for solar evaporation and water purification. *Sci. Rep.* 10 (2020) 12769.
- [110] L. Matoh, B. Žener, R.C. Korošec, U.L. Štangar. Photocatalytic water treatment, in: *Nanotechnol. Eco-Efficient Constr.*, Elsevier, 2019: pp. 675–702.
- [111] P.W.R. Beaumont. *The Structural Integrity of Composite Materials and Long-Life*

- Implementation of Composite Structures. *Appl. Compos. Mater.* (2020) 1–30.
- [112] E. Bagci, Ş. Aykut. A study of Taguchi optimization method for identifying optimum surface roughness in CNC face milling of cobalt-based alloy (stellite 6). *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 29 (2006) 940–947.
- [113] T. Kivak. Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 50 (2014) 19–28.
- [114] M. Farbodi. Application of Taguchi method for optimizing of mechanical properties of polystyrene-carbon nanotube nanocomposite. *Polym. Polym. Compos.* 25 (2017) 177–184.
- [115] J. Przepiórski, J. Karolczyk, K. Takeda, T. Tsumura, M. Toyoda, A.W. Morawski. Porous Carbon Obtained by Carbonization of PET Mixed with Basic Magnesium Carbonate: Pore Structure and Pore Creation Mechanism. *Ind. Eng. Chem. Res.* 48 (2009) 7110–7116.
- [116] A.R. Kamali, J. Yang, Q. Sun. Molten salt conversion of polyethylene terephthalate waste into graphene nanostructures with high surface area and ultra-high electrical conductivity. *Appl. Surf. Sci.* 476 (2019) 539–551.
- [117] P. Zhang, Z.A. Qiao, Z. Zhang, S. Wan, S. Dai. Mesoporous graphene-like carbon sheet: High-power supercapacitor and outstanding catalyst support. *J. Mater. Chem. A.* 2 (2014) 12262–12269.
- [118] J.M. Carcione, G.S. Seriani, D. Gei. Acoustic and electromagnetic properties of soils saturated with salt water and NAPL. *J. Appl. Geophys.* 52 (2003) 177–191.
- [119] S. V. Pol, V.G. Pol, D. Sherman, A. Gedanken. A solvent free process for the generation of strong, conducting carbon spheres by the thermal degradation of waste polyethylene terephthalate. *Green Chem.* 11 (2009) 448–451.
- [120] R.W. Pekala, C.T. Alviso, J.D. LeMay. Organic aerogels: microstructural dependence of mechanical properties in compression. *J. Non. Cryst. Solids.* 125 (1990) 67–75.
- [121] J.P.B. Mota, A.E. Rodrigues, E. Saatchian, D. Tondeur. Dynamics of natural gas adsorption storage systems employing activated carbon. *Carbon N. Y.* 35 (1997) 1259–1270.
- [122] A.R. Kamali. *Green Production of Carbon Nanomaterials in Molten Salts and Applications*, Springer Singapore, 2020.
- [123] M. Inagaki, J.M.D. Tascón. Chapter 2 Pore formation and control in carbon materials. *Interface Sci. Technol.* 7 (2006) 49–105.

- [124] S. V. Levchik, E.D. Weil. A review on thermal decomposition and combustion of thermoplastic polyesters. *Polym. Adv. Technol.* 15 (2004) 691–700.
- [125] N. Tanaka. Two equilibrium melting temperatures and physical meaning of DSC melting peaks in poly(ethylene terephthalate). *Polymer (Guildf)*. 49 (2008) 5353–5356.
- [126] N. Hamidi. Kinetics Study of the Thermal Decomposition of Post-consumer Poly(Ethylene Terephthalate) in an Argon Atmosphere. *J. Macromol. Sci. Part B Phys.* 58 (2019) 219–247.
- [127] A.R. Kamali, J. Yang, Q. Sun. Molten salt conversion of polyethylene terephthalate waste into graphene nanostructures with high surface area and ultra-high electrical conductivity. *Appl. Surf. Sci.* 476 (2019) 539–551.
- [128] A. Brems, J. Baeyens, C. Vandecasteele, R. Dewil. Polymeric cracking of waste polyethylene terephthalate to chemicals and energy. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 61 (2011) 721–731.
- [129] L. (Lin) Ye, Y.W. Mai, Z. Su. Composites technologies for 2020 : proceedings of the Fourth Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-4) : University of Sydney, Australia, 6-9 July 2004, Woodhead, 2004.
- [130] F. Zhang, F. Ahmed, G. Holzhüter, E. Burkel. Growth of diamond from fullerene C₆₀ by spark plasma sintering. *J. Cryst. Growth.* 340 (2012) 1–5.
- [131] P. Haseli, P. Majewski, F. Christo, M. Raven, S. Klose, F. Bruno. Experimental Kinetic Analysis of Potassium Extraction from Ultrapotassic Syenite Using NaCl-CaCl₂Salt Mixture. *ACS Omega.* 5 (2020) 16421–16429.
- [132] M. Toledo. TGA evaluation, n.d. <http://www.mt.com> (accessed September 8, 2020).
- [133] G.D. Semchenko, I.Y. Shuteeva, O.N. Slepchenko, L.A. Angolenko. Protection of graphite and graphite-containing materials from oxidation. *Refract. Ind. Ceram.* 46 (2005) 260–267.
- [134] O. Ola, Y. Chen, Y. Zhu. Three-dimensional carbon foam nanocomposites for thermal energy storage. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 191 (2019) 297–305.
- [135] A.R. Kamali, D.J. Fray. Molten salt corrosion of graphite as a possible way to make carbon nanostructures. *Carbon N. Y.* 56 (2013) 121–131.
- [136] J.L. Aragonés, E. Sanz, C. Vega. Solubility of NaCl in water by molecular simulation revisited. *J. Chem. Phys.* 136 (2012) 244508.
- [137] Y.Q. Zhu, T. Sekine, T. Kobayashi, E. Takazawa, M. Terrones, H. Terrones. Collapsing carbon nanotubes and diamond formation under shock waves. *Chem. Phys. Lett.* 287 (1998)

689–693.

- [138] G. Yuan, Y. Li, X. Long, Z. Cui, Z. Dong, Y. Cong, J. Zhang, X. Li. Tuning anisotropic thermal conductivity of unidirectional carbon/carbon composites by incorporating carbonaceous fillers. *J. Mater. Sci.* 55 (2020) 5079–5098.
- [139] B. Kumanek, D. Janas. Thermal conductivity of carbon nanotube networks: a review. *J. Mater. Sci.* 54 (2019) 7397–7427.
- [140] D. Wu, J. Liang, D. Zhang, C. Zhang, H. Zhu. Solar evaporation and electricity generation of porous carbonaceous membrane prepared by electrospinning and carbonization. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 215 (2020) 110591.
- [141] N.A. El Essawy, A.H. Konsowa, M. Elnouby, H.A. Farag. A novel one-step synthesis for carbon-based nanomaterials from polyethylene terephthalate (PET) bottles waste. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 67 (2017) 358–370.
- [142] M.S. Dresselhaus, A. Jorio, A.G. Souza Filho, R. Saito. Defect characterization in graphene and carbon nanotubes using Raman spectroscopy. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 368 (2010) 5355–5377.
- [143] A. Gutiérrez-Pardo, J. Ramírez-Rico, R. Cabezas-Rodríguez, J. Martínez-Fernández. Effect of catalytic graphitization on the electrochemical behavior of wood derived carbons for use in supercapacitors. *J. Power Sources.* 278 (2015) 18–26.
- [144] Z. He, L. Gao, X. Wang, B. Zhang, W. Qi, J. Song, X. He, C. Zhang, H. Tang, H. Xia, X. Zhou. Improvement of stacking order in graphite by molten fluoride salt infiltration. *Carbon N. Y.* 72 (2014) 304–311.
- [145] K. Vijayarangamuthu, S. Ahn, H. Seo, S.-H. Yoon, C.-M. Park, K.-J. Jeon. Temporospacial Control of Graphene Wettability. *Adv. Mater.* 28 (2016) 661–667.
- [146] X. Li, G. Yuan, A. Brown, A. Westwood, R. Brydson, B. Rand. The removal of encapsulated catalyst particles from carbon nanotubes using molten salts. *Carbon N. Y.* 44 (2006) 1699–1705.
- [147] B. Lesiak, L. Kövér, J. Tóth, J. Zemek, P. Jiricek, A. Kromka, N. Rangam. C sp²/sp³ hybridisations in carbon nanomaterials – XPS and (X)AES study. *Appl. Surf. Sci.* 452 (2018) 223–231.
- [148] C. Zhang, X. Wang, H. Wang, X. Wu, J. Shen. Ambient Pressure-Dried Graphene–Composite Carbon Aerogel for Capacitive Deionization. *Processes.* 7 (2019) 29.

- [149] V.Z. Shemet, A.P. Pomytkin, V.S. Neshpor. High-temperature oxidation behaviour of carbon materials in air. *Carbon N. Y.* 31 (1993) 1–6.
- [150] I. Fernández-Morales, M.C. Almazán-Almazán, M. Pérez-Mendoza, M. Domingo-García, F.J. López-Garzón. PET as precursor of microporous carbons: Preparation and characterization. *Microporous Mesoporous Mater.* 80 (2005) 107–115.
- [151] P. Rai, K.P. Singh. Valorization of Poly (ethylene) terephthalate (PET) wastes into magnetic carbon for adsorption of antibiotic from water: Characterization and application. *J. Environ. Manage.* 207 (2018) 249–261.
- [152] A. Kumar, H.M. Jena. Preparation and characterization of high surface area activated carbon from Fox nut (*Euryale ferox*) shell by chemical activation with H₃PO₄. *Results Phys.* 6 (2016) 651–658.
- [153] O. Üner, Y. Bayrak. The effect of carbonization temperature, carbonization time and impregnation ratio on the properties of activated carbon produced from *Arundo donax*. *Microporous Mesoporous Mater.* 268 (2018) 225–234.
- [154] P. Qiu, F. Liu, C. Xu, H. Chen, F. Jiang, Y. Li, Z. Guo. Porous three-dimensional carbon foams with interconnected microchannels for high-efficiency solar-to-vapor conversion and desalination. *J. Mater. Chem. A.* 7 (2019) 13036–13042.
- [155] U.G.T.M. Sampath, Y.C. Ching, C.H. Chuah, J.J. Sabariah, P.C. Lin. Fabrication of porous materials from natural/synthetic biopolymers and their composites. *Materials (Basel).* 9 (2016).
- [156] P. Wang. Emerging investigator series: the rise of nano-enabled photothermal materials for water evaporation and clean water production by sunlight. *Environ. Sci. Nano.* 5 (2018) 1078–1089.
- [157] M.K. Hedayati, M. Elbahri. Antireflective coatings: Conventional stacking layers and ultrathin plasmonic metasurfaces, a mini-review. *Materials (Basel).* 9 (2016).
- [158] V.-D. Dao, H.-S. Choi. Carbon-Based Sunlight Absorbers in Solar-Driven Steam Generation Devices. *Glob. Challenges.* 2 (2018) 1700094.
- [159] S. Wang, A. Morelos-Gómez, Z. Lei, M. Terrones, K. Takeuchi, W. Sugimoto, M. Endo, K. Kaneko. Correlation in structure and properties of highly-porous graphene monoliths studied with a thermal treatment method. *Carbon N. Y.* 96 (2016) 174–183.