



Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería

**“Carbón derivado de sargazo
para almacenamiento de carga”**

TESIS

Para obtener el título de:

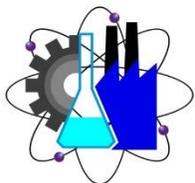
INGENIERA QUÍMICA

Presenta:

Cecilia Gonzalez Escobar

Director de tesis

Dr. Mohan Kumar Kesarla



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación	6
1.3. Objetivos	7
1.3.1. Objetivo general	7
1.3.2. Objetivos específicos.....	7
1.4. Hipótesis.....	7
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Sistemas de almacenamiento de energía	9
2.2. Supercapacitores.....	11
2.3. Historia de los supercapacitores.....	13
2.4. Diferencia entre supercapacitores y otros dispositivos	15
2.4.1. Diferencias entre baterías y supercapacitores.....	15
2.4.2. Diferencias entre celdas combustible y supercapacitores	16
2.4.3. Diferencias entre capacitor y supercapacitor.....	16
2.5. Componentes de un supercapacitor	17
2.5.1. Electrodo	18

2.5.2. Electrolito.....	18
2.5.3. Separador.....	20
2.5.4. Colector de corriente	21
2.6. Clasificación de los supercapacitores según su mecanismo de almacenamiento de carga	21
2.6.1. Capacitivo.....	21
2.6.2. Pseudocapacitivo	24
2.6.3. Supercapacitores híbridos	26
2.7. Materiales de carbono de alta superficie	27
2.7.1. Nanotubos de carbón	28
2.7.2. Aerogeles	29
2.7.3. Nanofibras de carbono	30
2.7.4. Grafeno/óxido de grafeno reducido	32
2.7.5. Carbón activado	34
2.8. Preparación de carbón activado.....	34
2.8.1. Carbonización.....	34
2.8.2. Activación	35
2.9. Carbón activado derivado de biomasa para almacenamiento de carga	36
2.10. Sargazo	37
2.10.1 Composición del sargazo	40
2.10.2 Distribución y origen.....	41
2.10.3 El sargazo en México	43
2.11. Diseño de celda electroquímica para pruebas de rendimiento	45
2.11.1. Sistema de tres electrodos	45
2.12. Ensayos electroquímicos	46

2.12.1.	Voltametría cíclica	46
2.12.2.	Carga-descarga galvanostática.....	47
2.12.3.	Espectroscopia de impedancia electroquímica	47
2.13.	Parámetros de evaluación para supercapacitores	48
2.13.1.	Capacitancia.....	48
2.13.2.	Densidad de energía	49
2.13.3.	Densidad de potencia.....	49
CAPITULO III. METODOLOGÍA.....		50
3.1.	Materiales y equipo	50
3.2.	Metodología teórico experimental.....	51
3.2.1.	Obtención de carbono	51
3.2.2	Activación química.....	54
3.2.3	Preparación del electrodo.....	55
3.2.4	Sistema electroquímico	57
CAPITULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....		58
4.1.	Técnicas de análisis físico.....	58
4.1.1.	Difracción de Rayos X (XRD)	58
4.1.2.	Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)	60
4.1.3.	Espectroscopia de Rayos X de Energía Dispersiva (EDS).....	61
4.1.4.	Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).....	72
4.1.5.	Análisis de Área Superficial Específica (BET)	75
4.1.6.	Espectroscopía Raman	78

4.2. Técnicas de análisis electroquímico	80
4.2.1. Sargazo carbonizado a diferentes temperaturas	80
4.2.2. Sargazo carbonizado y activado con KOH	90
4.2.3. Efecto de la activación con KOH	101
CAPITULO V. CONCLUSIONES.....	107
5.1. Conclusiones	107
5.2. Recomendaciones.....	109
REFERENCIAS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Estructura de la producción de energía primaria del año 2022.	4
Figura 2.1 Diagrama Ragone de dispositivos de almacenamiento de energía.....	13
Figura 2.2 Componentes de un supercapacitor.....	18
Figura 2.3 <i>Proceso de carga-descarga y formación de la doble capa eléctrica</i>	22
Figura 2.4 <i>Representación de estructuras EDLC: modelo de Helmholtz, modelo de Gouy-Chapman y modelo de Gouy-Chapman-Stern</i>	24
Figura 2.5 <i>a) Hoja de grafeno siendo enrollada en forma de cilindro (b) Nanotubos de carbono de pared simple (c) Nanotubos de carbono de paredes múltiples</i>	29
Figura 2.6 Estructura típica de algas marinas con sus partes principales	40
Figura 2.7 Aspecto general, láminas y flotadores de las especies pelágicas de sargazo(a-c) <i>S. fluitans</i> III, (d-e) <i>S. natans</i> I, (g-i) <i>S. natans</i> VIII. Barras de escala: 5 mm	44
Figura 2.8 Dibujo esquemático de un sistema de tres electrodos: (a) electrodo de trabajo, (b) electrodo de referencia y (c) contraelectrodo.....	46
Figura 3.1 Identificación del morfotipo <i>S. natans</i> I en la muestra de sargazo recolectada.	52
Figura 3.2 <i>Procesos de selección de sargazo (a) Muestra recolectada de sargazo, (b) basura retirada de la muestra, (c) sargazo libre de residuos</i>	53
Figura 3.3 Barca de alúmina con sargazo triturado antes del proceso de calcinación .	54
Figura 3.4 <i>Activación química del carbono derivado de sargazo (a) mezcla de carbono con una solución saturada de KOH, (b) mezcla después de 12 horas a 80 °C y (c) carbón obtenido después del tratamiento de activación, lavado y secado</i>	55
Figura 3.5 Suspensión preparada con IPA y Nafión de la muestra CS-700A.....	57

Figura 4.1 Difractograma de rayos X de las muestras (a) sin activar y (b) activadas con KOH	59
Figura 4.2 Difractograma de rayos X del carbonato de calcio (CaCO_3)	59
Figura 4.3 Micrografía SEM (a) CS-600, (b) CS-600A, (c) CS-700, (d) CS-700A, (e) CS-800, (f) CS-800A, (g) CS-900, y (h) CS-900A.	60
Figura 4.4 Análisis elemental por EDS (a) muestras CS-600 y (b) muestra CS-600A .	63
Figura 4.5 Mapeo elemental de la muestra CS-600 (a) micrografía representativa, (b) detección de oxígeno, (c) detección de magnesio, (d) detección de azufre y (e) detección de calcio	64
Figura 4.6 Mapeo elemental de la muestra CS-600A (a) micrografía representativa, (b) detección de oxígeno, (c) detección de magnesio, (d) detección de azufre y (e) detección de calcio	64
Figura 4.7 Análisis elemental por EDS (a) muestras CS-700 y (b) muestra CS-700A .	66
Figura 4.8 Mapeo elemental de la muestra CS-700 (a) micrografía representativa, (b) detección de oxígeno, (c) detección de magnesio, (d) detección de azufre y (e) detección de calcio	66
Figura 4.9 Mapeo elemental de la muestra CS-700A (a) micrografía representativa, (b) detección de oxígeno, (c) detección de magnesio, (d) detección de azufre y (e) detección de calcio	67
Figura 4.10 Análisis elemental por EDS (a) muestras CS-800 y (b) muestra CS-800A	68
Figura 4.11 Mapeo elemental de la muestra CS-800 (a) micrografía representativa, (b) detección de oxígeno, (c) detección de magnesio, (d) detección de azufre, y (e) detección de calcio.	69

Figura 4.12 Mapeo elemental de la muestra CS-800A (a) micrografía representativa, (b) detección de oxígeno, (c) detección de magnesio, (d) detección de azufre, y (e) detección de calcio.....	69
Figura 4.13 Análisis elemental por EDS (a) muestras CS-900 y (b) muestra CS-900A	71
Figura 4.14 Mapeo elemental de la muestra CS-900 (a) micrografía representativa, (b) detección de oxígeno, (c) detección de magnesio, (d) detección de azufre y (e) detección de calcio.....	71
Figura 4.15 Mapeo elemental de la muestra CS-900A (a) micrografía representativa, (b) detección de oxígeno, (c) detección de magnesio, (d) detección de azufre y (e) detección de calcio.....	72
Figura 4.16 <i>Espectros FTIR de las muestras de carbono sin activar.</i>	74
Figura 4.17 Espectros FTIR de las muestras de carbono activadas con KOH.....	74
Figura 4.18 Isotermas de adsorción-desorción de N ₂ de las muestras activadas de carbón de sargazo.....	77
Figura 4.19 <i>Espectros Raman de las muestras antes y después de la activación (a) CS-600/CS-600A, (b) CS-700/CS-700A, (c) CS-800/CS-800A y (d) CS-900/CS-900A.</i>	79
Figura 4.20 Voltamogramas de la muestra CS-600 dependientes de la velocidad de escaneo.....	81
Figura 4.21 (a) <i>Perfiles de CDG de la muestra CS-600 a diferentes densidades de corriente</i> (b) <i>capacitancia específica de la muestra CS-600 calculada a diferentes densidades de corriente.</i>	82
Figura 4.22 Diagrama de Nyquist de la muestra CS-600	83

Figura 4.23 Voltamogramas de la muestra CS-700 dependientes de la velocidad de escaneo.....	84
Figura 4.24 (a) <i>Perfiles de CDG de la muestra CS-700 a diferentes densidades de corriente</i> (b) <i>capacitancia específica de la muestra CS-700 calculada a diferentes densidades de corriente</i> (c) <i>retención de capacitancia porcentual en 5000 ciclos de carga y descarga</i> y (d) <i>diagrama de Nyquist de la muestra CS-700</i>	85
Figura 4.25 Voltamogramas de la muestra CS-800 dependientes de la velocidad de escaneo.....	86
Figura 4.26 (a) <i>Perfiles de CDG de la muestra CS-800 a diferentes densidades de corriente</i> (b) <i>capacitancia específica de la muestra CS-800 calculada a diferentes densidades de corriente</i> (c) <i>retención de capacitancia porcentual en 5000 ciclos de carga y descarga</i> y (d) <i>diagrama de Nyquist de la muestra CS-800</i>	87
Figura 4.27 Voltamogramas de la muestra CS-900 dependientes de la velocidad de escaneo.....	88
Figura 4.28 (a) <i>Perfiles de CDG de la muestra CS-900 a diferentes densidades de corriente</i> (b) <i>capacitancia específica de la muestra CS-900 calculada a diferentes densidades de corriente</i> (c) <i>retención de capacitancia porcentual en 5000 ciclos de carga y descarga</i> y (d) <i>diagrama de Nyquist de la muestra CS-900</i>	90
Figura 4.29 Voltamogramas de la muestra CS-600A dependientes de la velocidad de escaneo.....	91
Figura 4.30 (a) <i>Perfiles de CDG de la muestra CS-600A a diferentes densidades de corriente</i> (b) <i>capacitancia específica de la muestra CS-600A calculada a diferentes</i>	

densidades de corriente (c) retención de capacitancia porcentual en 5000 ciclos de carga y descarga y (d) diagrama de Nyquist de la muestra CS-600A.....	92
Figura 4.31 Voltamogramas de la muestra CS-700A dependientes de la velocidad de escaneo.....	93
Figura 4.32 (a) Perfiles de CDG de la muestra CS-700A a diferentes densidades de corriente (b) capacitancia específica de la muestra CS-700A calculada a diferentes densidades de corriente (c) retención de capacitancia porcentual en 5000 ciclos de carga y descarga y (d) diagrama de Nyquist de la muestra CS-700A.....	95
Figura 4.33 Voltamogramas de la muestra CS-800A dependientes de la velocidad de escaneo.....	96
Figura 4.34 (a) <i>Perfiles de CDG de la muestra CS-800A a diferentes densidades de corriente</i> (b) <i>capacitancia específica de la muestra CS-800A calculada a diferentes densidades de corriente</i> (c) <i>retención de capacitancia porcentual en 5000 ciclos de carga y descarga</i> y (d) <i>diagrama de Nyquist de la muestra CS-800A</i>	98
Figura 4.35 Voltamogramas de la muestra CS-900A dependientes de la velocidad de escaneo.....	99
Figura 4.36 (a) Perfiles de CDG de la muestra CS-900A a diferentes densidades de corriente (b) capacitancia específica de la muestra CS-900A calculada a diferentes densidades de corriente (c) retención de capacitancia porcentual en 5000 ciclos de carga y descarga y (d) diagrama de Nyquist de la muestra CS-900A.....	100
Figura 4.37 Voltamogramas obtenidos a 5 mVs ⁻¹ de las diferentes muestras antes y después de la activación (a) CS-600/CS-600A, (b) CS-700/CS-700A, (c) CS-800/CS-800A y (d) CS-900/CS-900A.....	102

Figura 4.38 Capacitancia específica obtenida de las curvas de VC a 5 mVs^{-1} de las diferentes muestras antes y después de la activación.	103
Figura 4.39 Comparación de las curvas de CDG de las diferentes muestras antes y después de la activación a una densidad de corriente de 0.25 A g^{-1} , (a) CS-600/CS-600A, (b) CS-700/CS-700A, (c) CS-800/CS-800A, y (d) CS-900/CS-900A.....	104
Figura 4.40 Capacitancia específica obtenida de las curvas de CDG de las diferentes muestras antes y después de la activación.....	105
Figura 4.41 Diagramas de Nyquist obtenidos de las pruebas de EIE de las diferentes muestras antes y después de la activación (a) CS-600/CS-600 ^a , (b) CS-700/CS-700A, (c) CS-800/CS-800A, y (d) CS-900/CS-900A.....	106

Índice de tablas

Tabla 2.1 Composición del sargazo.....	41
Tabla 3.1 Lista de reactivos	50
Tabla 3.2 Lista de materiales y equipos.....	51
Tabla 4.1 cuantificación química elemental de las diferentes muestras de carbono	62
Tabla 4.2 Área superficial, tamaño de poro y volumen de poro de las muestras activadas de carbón de sargazo.....	78

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM por recibirme y permitirme formar parte de su comunidad estudiantil, además de brindarme todas las facilidades e infraestructura para poder realizar mi estancia de investigación. Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), proyecto No. IN211523, de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), UNAM, por el financiamiento de este trabajo.

A la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería por brindarme las bases para mi desarrollo académico y profesional. De igual forma agradezco a todos los profesores que han sido parte de este proceso, compartiendo siempre su experiencia y sabiduría.

Agradezco a mi asesor y director de tesis, el Dr. Mohan Kumar Kesarla por permitirme formar parte de su equipo de trabajo, por la confianza que ha depositado en mí y permitirme llevar a cabo este proyecto. También mi más grande admiración hacia él por su compromiso y entrega con la ciencia y la educación.

Gracias al Grupo de Ciencia de Materiales, al Dr. Tathagata Kar por su apoyo en cada paso de este trabajo, por compartir conmigo muchos de sus conocimientos e impulsarme a siempre seguir aprendiendo, por sus valiosos consejos que siempre tomo en cuenta y por la amistad que me ha brindado. A la Dra. Maura Casales Díaz por brindarme todas las facilidades para poder realizar este trabajo, sus consejos y por su compromiso con todo el equipo. Al M.I.Q. José Juan Ramos Hernández, quien me guió cuando recién me integraba al grupo y me enseñó a trabajar y a ver la ciencia con

entusiasmo, a cuestionar todo y jamás quedarme con la duda de algo. De igual forma agradezco su gran apoyo con la caracterización de los diferentes materiales.

A mis compañeros y amigos de laboratorio, Esperanza Román, Karla Calderón, Israel Martínez, René Ayala y Carlos Ortega. Con quienes pude contar siempre que lo necesité. Gracias por tantos momentos divertidos y las interminables charlas que hicieron de esta estancia algo muy especial.

A mi familia, especialmente a mis tíos Felipe Gabriel y Laurentina González, quienes, cuando tuve que salir de casa para poder estudiar, me abrieron las puertas de su hogar y me trataron como a una hija, siempre viendo que yo estuviera bien y apoyándome.

Pero sobre todo le agradezco a mis padres Agustín González Ríos y Aída Escobar Jaime por todo los esfuerzos y sacrificios que tuvieron que hacer para que yo pudiera cumplir esta meta, por siempre estar ahí, animándome y no dejando que me rindiera, por darme todo y hacer de mí una gran persona. También a mi hermano César que siempre está para mí y que de vez en cuando me hace poner los pies en la tierra. A los tres, infinitas gracias, los amo.

RESUMEN

Los supercapacitores son dispositivos de almacenamiento de energía que han surgido como respuesta a las nuevas demandas energéticas. La implementación de estos dispositivos podría favorecer la transición hacia energías más limpias y bajas en carbono. Tener sistemas de almacenamiento de energía altamente eficientes hace que, sin importar la intermitencia de la fuente, siempre se cuente con energía limpia y que esta sea más accesible para todos.

La búsqueda de materiales para estas aplicaciones ha sido exhaustiva y actualmente se estudian diferentes materiales derivados de biomasa, incluidas algunas algas como el sargazo. México ha sido uno de los países más afectados por la llegada masiva de estas algas flotantes, por lo que hacer uso de estos residuos naturales, podría contribuir a reducir los daños provocados por la acumulación de sargazo en las costas del Caribe Mexicano.

Para este trabajo se preparan cuatro materiales para el almacenamiento de carga, utilizando sargazo como precursor de carbono. El sargazo recolectado se limpia a fondo y se carboniza bajo una atmósfera inerte en el rango de temperatura de 600 a 900 °C. Para mejorar la porosidad del material y la superficie de los materiales de carbono, se lleva a cabo un paso adicional de activación con hidróxido de potasio (KOH) a 800 °C.

Las muestras preparadas, cuando se caracterizan con técnicas físicas avanzadas (por ejemplo, difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido, espectroscopia de energía dispersiva, espectros Raman y analizador de área superficial) indican una

diferencia significativa en la composición química, área de superficie, porosidad y morfología de las muestras de sargazo carbonizado pre y post activado.

Cuando se someten a mediciones electroquímicas (voltametría cíclica, carga-descarga galvanostática y espectroscopia de impedancia electroquímica) en un electrolito de KOH 6M, los carbonos activados con KOH muestran una mejora significativa en sus propiedades de almacenamiento de carga, en comparación con las de sus homólogos no activados.

La activación con KOH, da como resultado una alta porosidad y una superficie efectiva mejorada, que se atribuye al rendimiento electroquímico mejorado del carbono derivado del sargazo. Por otro lado, la presencia de abundante CaCO_3 cristalino (confirmado a partir del patrón DRX) también actúa como un componente pseudocapacitivo en las muestras activadas con KOH, lo que en última instancia conduce a su excelente comportamiento de almacenamiento de carga. Entre las muestras analizadas, el sargazo que se carboniza a $700\text{ }^\circ\text{C}$ y posteriormente se activa con KOH, exhibe una superficie máxima de $1510\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ y muestra la capacitancia electroquímica específica más alta, que es de $276,5\text{ F g}^{-1}$.

ABSTRACT

Supercapacitors are energy storage devices that have emerged as response to the new energy demands. The implementation of these devices could favor the transition towards cleaner, low-carbon energies. Having highly efficient energy storage systems means that, regardless of the intermittency of the source, there is always available clean energy and there is increasingly accessible to everyone.

The search for materials for these applications has been exhaustive and different materials derived from biomass are currently being studied, including some algae such as sargassum. Mexico has been one of the countries most affected by the massive arrival of these floating algae, so making use of this natural waste could contribute to reducing the damage caused by the accumulation of sargassum on the coasts of the Mexican Caribbean.

For this work, four materials are prepared for charge storage, using sargassum as a carbon precursor. The collected sargassum is thoroughly cleaned and carbonized under an inert atmosphere in the temperature range of 600 to 900 °C. To improve the material porosity and surface of carbon materials, an additional activation step is carried out with potassium hydroxide (KOH) at 800 °C.

The prepared samples, when characterized with advanced physical techniques (e.g., X-ray diffraction, scanning electron microscopy, energy dispersive spectroscopy, Raman spectra and surface area analyzer) indicate a significant difference in chemical composition, surface area, porosity, and morphology of the pre- and post-activated carbonized sargassum samples.

When subjected to electrochemical measurements (cyclic voltammetry, galvanostatic charge-discharge and electrochemical impedance spectroscopy) in a 6M KOH electrolyte, KOH-activated carbons show a significant improvement in their charge storage properties, compared to those of their non-activated homologues.

Activation with KOH results in high porosity and improved effective surface area, which is attributed to the improved electrochemical performance of sargassum-derived carbon. On the other hand, the presence of abundant crystalline CaCO_3 (confirmed from the XRD pattern) also acts as a pseudocapacitive component in the KOH-activated samples, which ultimately leads to their excellent charge storage behavior. Among the tested samples, sargassum that is carbonized at 700 °C and subsequently activated with KOH, exhibits a maximum surface area of 1510 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ and shows the highest specific electrochemical capacitance, which is 276.5 F g^{-1} .

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La energía eléctrica se ha convertido en uno de los pilares fundamentales del desarrollo humano. La revolución industrial es considerada una época de transición energética que trajo cambios fundamentales en todas las esferas de la existencia humana. Hoy en día es casi inconcebible una vida sin electricidad, ya que es necesaria para muchas de las actividades de la vida cotidiana. La actividad industrial, el transporte, la atención médica, la comunicación y otras actividades básicas de la sociedad se verían limitadas sin este recurso [1]

Hasta la fecha la mayor producción y consumo de energía proviene de combustibles fósiles, el uso de este tipo de energía ha impulsado en gran medida el desarrollo de muchas de las tecnologías que conocemos actualmente, incluso una gran cantidad de ellas aún dependen de la energía proveniente de estas fuentes. Sin embargo, los combustibles fósiles son una fuente de energía no renovable. A pesar de esto, la producción de energía proveniente de estos combustibles sigue siendo significativamente mayor que la de otras fuentes [2].

La producción de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles ha contribuido en gran medida, al calentamiento global. Durante este proceso de producción se generan y emiten a la atmósfera una gran cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) tales como dióxido de carbono, óxido de nitrógeno y otros compuestos orgánicos volátiles [3].

Los GEI son los principales responsables del aumento en la temperatura de la superficie terrestre y de la atmósfera inferior. Estos gases se caracterizan por su gran

potencial de calentamiento, debido a la facilidad que estos tienen para la absorción de radiación infrarroja. Existe una gran variedad de gases con un potencial de calentamiento más eficaz que el del dióxido de carbono (CO_2), como el metano CH_4 o el óxido nitroso N_2O . Sin embargo, el CO_2 es uno de los gases que se produce en mayor cantidad como consecuencia de las diferentes actividades antropogénicas, tales como la agricultura, el transporte, la industria y por supuesto la producción de energía eléctrica [4].

Es claro que el avance económico y el progreso humano han resultado en un aumento en la cantidad de CO_2 y otros GEI en la atmósfera. Existe un acuerdo amplio en la investigación sobre la relación entre las emisiones de CO_2 , el consumo de energía y la producción económica (Producto Interno Bruto, PIB). Esta perspectiva sostiene que la energía es un recurso fundamental en el proceso productivo de un país. Por lo tanto, un aumento en la producción económica y la cantidad de energía utilizada tendrá un impacto directo en la cantidad de CO_2 liberado a la atmósfera, lo que a su vez contribuye significativamente al problema global de las emisiones de GEI [5, 6].

Esto hace que el cuidado del medioambiente sea también un tema político de relevancia. En un esfuerzo por mitigar los daños ya causados al planeta, se han planteado nuevas estrategias y políticas energéticas que promueven un desarrollo sostenible. En septiembre de 2015, 193 países firmaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, como plan de acción para abordar diversos desafíos globales. Los ODS se fundamenta en tres pilares principales: economía, sociedad y medioambiente [7-9].

En diciembre de ese mismo año en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) se estableció el acuerdo de

París. Un nuevo acuerdo global en el que cada país presentó su plan nacional de acción para hacer frente al cambio climático. En estos planes se abordaron diversas cuestiones, pero uno de los aspectos más importantes fue como cada país planeaba reducir las emisiones de GEI [10, 11].

Disminuir el consumo de energía podría ser una estrategia para reducir la generación de GEI, y dar cumplimiento a los acuerdos para un desarrollo sostenible. Sin embargo, tal medida es poco realista y podría afectar negativamente el desarrollo económico [12, 13].

El uso de energías renovables podría ser la respuesta a estos nuevos requerimientos, ya que la energía obtenida a partir de fuentes renovables es sostenible, limpia y no contamina el medioambiente. De acuerdo con los datos brindados por la Administración de Información de Energía (EIA), el uso de fuentes de energía renovable ha crecido entre las economías desarrolladas y en desarrollo. El fortalecimiento de estos recursos energéticos es vital para una nueva transición energética que conduzca a la reducción de emisiones de GEI [5].

En 2011 México produjo 219.5 millones de toneladas de energía equivalente al petróleo, de la cual se estimó que el 6.98% provino de energías renovables [14]. En 2022, de acuerdo con los datos reportados por el Sistema de Información Energética (SIE), **Figura 1.1**, se estimó que el 15.4% de la producción nacional de energía primaria, provino de fuentes renovables [15].

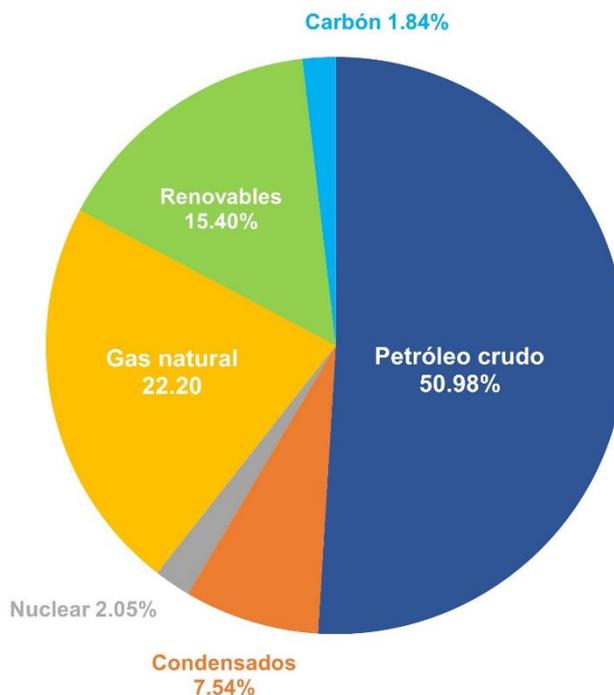


Figura 1.1 Estructura de la producción de energía primaria del año 2022. Adaptado de Ref. [15].

Esto indica que en la última década ha habido un aumento en la utilización de recursos renovables para la producción de energía limpia. Sin embargo, la transición hacia energías limpias o bajas en carbono no ha sido tan rápida como se esperaba. En la actualidad, se enfrentan varios desafíos y limitaciones en la implementación de energías renovables, principalmente debido a la intermitencia y variabilidad de sus fuentes, como es el caso de la energía eólica y solar. La implementación a gran escala de estas energías renovables depende de la disponibilidad de tecnologías para su almacenamiento [16].

Por lo que existe una nueva demanda de dispositivos de almacenamiento de energía altamente eficientes y respetuosos con el medioambiente. Esta nueva necesidad

ha llevado al desarrollo de dispositivos muy interesantes como los supercapacitores, cuyo mecanismo de almacenamiento se basa en interacciones electrostáticas. Estos dispositivos se caracterizan por su alta capacitancia específica, ciclo de vida largo y una alta densidad de potencia [17, 18].

Sin embargo, el desarrollo de estos dispositivos aún enfrenta algunos desafíos, ya que presentan bajas densidades de energía y sus costos de producción aún son altos. Una de las estrategias para superar estos desafíos es desarrollar nuevos materiales de electrodo, idealmente materiales de carbono, ya que estos tienen un área superficial muy grande, son altamente porosos, tienen un bajo costo y son respetuosos con el medioambiente [19, 20].

Los materiales derivados de biomasa han sido ampliamente estudiados ya que provienen de materias primas renovables altamente disponibles, no emiten GEI y su síntesis es relativamente simple [21].

Desde 2011, año tras año grandes masas de sargazo han arribado a las playas del Caribe Mexicano, provocando grandes problemas económicos y ambientales. Esto ha vuelto urgente la búsqueda de alternativas para el aprovechamiento de estos residuos de biomasa [22, 23]. El sargazo podría considerarse una fuente abundante de carbono [24], gracias a su composición rica en carbohidratos y algunos polisacáridos complejos además de su alta disponibilidad en las costas del caribe mexicano [24, 25]. Este carbono podría aprovecharse en diversas aplicaciones, incluyendo su uso como material para almacenamiento de energía.

1.2. Justificación

Las llegadas masivas de sargazo a las costas del Caribe Mexicano se han convertido en un problema económico y ecológico. Al ser un problema relativamente nuevo, aún no existe una estrategia adecuada para la gestión y aprovechamiento de estos residuos. Debido a esto, el sargazo termina siendo desechado como basura en lugares inadecuados o se deja en las playas donde se descompone y provoca la muerte de múltiples especies marinas.

De continuar esta situación, las comunidades costeras se verán cada vez más afectadas, no solo en cuestiones económicas debido a la disminución de turismo, sino que también comenzará a verse afectada la salud de estas comunidades, esto como consecuencia de la continua exposición a los gases tóxicos generados por la descomposición del sargazo.

Utilizar el sargazo como precursor de carbono y su aplicación para almacenamiento de energía es una estrategia completamente viable, ya que el sargazo es un recurso renovable, altamente disponible y que hasta el momento no tiene algún uso comercial. El desarrollo de dispositivos de almacenamiento de energía con carbón derivado de sargazo, podría ser una alternativa para cubrir las nuevas demandas energéticas, y contribuir en el cumplimiento de los objetivos para un desarrollo sostenible y hacer de las energías limpias un recurso accesible para todos.

La implementación de estos nuevos sistemas de almacenamiento de energía podría beneficiar a la industria eléctrica y también podría contribuir en el sector de energías limpias del país. Al mismo tiempo que se apoya a las comunidades costeras,

afectadas por la llegada de sargazo, al aprovechar y hacer una mejor disposición de estos residuos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Estudiar el efecto de la activación con KOH sobre la capacitancia electroquímica del carbono poroso derivado de sargazo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Lavado y secado minucioso de las algas sargazo recolectadas en las regiones costeras de México
- Preparación de cuatro muestras de carbono derivado de sargazo a diferentes temperaturas de calcinación
- Activación química de las muestras de carbono obtenidas de sargazo
- Revisar propiedades físicas de las muestras de carbono obtenidas con técnicas avanzadas
- Realizar pruebas electroquímicas con todas las muestras de carbono derivado de sargazo
- Estudiar y analizar el efecto de la activación química sobre el rendimiento electroquímico

1.4. Hipótesis

El sargazo puede ser utilizado como precursor orgánico de carbono debido a su composición, morfología, y alta disponibilidad. La activación química mejora el

rendimiento electroquímico del carbón derivado de sargazo, por lo que puede ser utilizado como material de electrodo para supercapacitores.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Sistemas de almacenamiento de energía

El almacenamiento de energía es un proceso que involucra la conversión y retención de un tipo específico de energía, con el propósito de utilizarla en momentos posteriores. Cuando esta energía almacenada es requerida, se transforma y libera de manera eficiente para su uso. Si bien el proceso de almacenamiento de energía es inherentemente complejo, su complejidad varía según el sistema de almacenamiento de energía (SAE) utilizado y el mecanismo de almacenamiento que lo rige. Sin embargo, en esencia, este proceso subyace en todos los SAE [16].

Las industrias convencionales de generación de energía eléctrica no suelen contar con instalaciones de almacenamiento, ya que la energía va directamente desde las plantas hasta los consumidores. Esto implica que la electricidad debe utilizarse en el momento en que se produce. A pesar de la variabilidad de la demanda eléctrica, las grandes plantas de energía están diseñadas para satisfacer picos máximos de demanda, que son muy poco comunes. Esto las vuelve costosas e ineficientes.

Aquí es donde los SAE entran en juego, ya que permiten separar la producción de energía de su entrega, autogenerarla o comprarla. El acceso a SAE podría permitir ajustar la capacidad de generación de energía y producir solo la cantidad necesaria para satisfacer la demanda eléctrica promedio. Esto puede conducir a sistemas de generación de electricidad más eficientes, económicos y sostenibles [26].

Por lo tanto, los SAE desempeñan un papel crucial en la gestión de la energía en los sistemas eléctricos. Además de ayudar a equilibrar la oferta y la demanda de

electricidad, pueden facilitar la integración de fuentes de energía renovable en la red eléctrica de manera más eficiente. En los últimos años, el desarrollo y uso de energías renovables han experimentado un crecimiento rápido. Sin embargo, los recursos renovables son intermitentes, lo que condiciona la implementación de energías provenientes de estas fuentes. Esta implementación también depende, en gran medida, de la disponibilidad de tecnologías de almacenamiento de energía que sean eficientes, asequibles y escalables [27, 16].

Hoy en día, disponemos de diversas tecnologías que permiten el almacenamiento, la conversión y la aplicación de energía. En general, las múltiples tecnologías y mecanismos para almacenamiento de carga se clasifican en cuatro categorías principales: mecánica, química, electroquímica y eléctrica. Las baterías son uno de los dispositivos de almacenamiento de energía más utilizados. Estos dispositivos almacenan energía química; el movimiento de iones entre los electrodos de la batería provoca ciertas reacciones químicas, estas permiten la liberación de energía suficiente para hacer funcionar una amplia gama de dispositivos, desde encender una linterna hasta hacer arrancar un automóvil [28, 16].

Sin embargo, tecnologías más avanzadas como los supercapacitores, cuyo funcionamiento se basa en el almacenamiento de energía electroquímica, aún están en proceso de desarrollo. Afortunadamente, los avances logrados hasta el momento son alentadores, y se espera que, en un futuro cercano, contemos con dispositivos de alto rendimiento capaces de satisfacer la creciente demanda de energía [18].

2.2. Supercapacitores

Los supercapacitores (SC), también llamados ultracapacitores o capacitores electroquímicos de doble capa (EDLC, siglas en inglés) [29], son dispositivos de almacenamiento de energía que desempeñan un papel muy importante dentro de los sistemas de almacenamiento electroquímico [30].

Basados en el mecanismo de almacenamiento de energía, los supercapacitores se pueden clasificar en dos categorías. La primera es como capacitor eléctrico de doble capa (EDLC), cuya capacitancia proviene de la energía electrostática acumulada en la interfase electrodo-electrolito. O la segunda como pseudocapacitor, en cuyo mecanismo se da lugar a procesos de transferencia de carga faradaicos rápidos y reversibles. Actualmente también se estudian materiales que combinan ambos mecanismos para el almacenamiento de carga y son llamados supercapacitores híbridos [29, 31, 32].

Los SC se construyen a partir de cuatro componentes principales: dos electrodos fabricados a partir de materiales altamente porosos y con una alta área superficial. Un electrolito que provee de iones que son fundamentales para los procesos capacitivos. Un separador conductor de iones y aislante de electrones que previene posibles cortocircuitos, y un colector de corriente, el cual funciona como una vía conductora de baja resistencia, permitiendo el flujo de electrones desde el electrodo hacia el circuito externo [33-35].

Los SC destacan por su alta densidad de potencia, baja resistencia interna, estabilidad térmica, tiempos de carga y descarga ultrarrápidos, y también por su alta estabilidad cíclica, estos dispositivos pueden someterse a miles, incluso millones de ciclos antes de que su rendimiento se degrade al 80% de su capacidad inicial [33, 36].

En la **Figura 2.1.** se presenta el diagrama conocido como Ragone. En este diagrama se presentan los principales dispositivos de almacenamiento y conversión de energía. Se observa como los SC cubren la brecha que existe entre los capacitores convencionales y las baterías. Los SC presentan una densidad de potencia mayor a la de las baterías y las celdas de combustible. Sin embargo, en términos de densidad de energía su rendimiento aún sigue siendo inferior con respecto a estos mismos dispositivos [37-39]. Esta limitación ha impulsado la investigación y desarrollo de nuevos materiales para su aplicación en SC, el objetivo es obtener un dispositivo que sea altamente eficiente, que genere tanto altas densidades de energía como de potencia.

Las aplicaciones de los SC son amplias y se utilizan siempre que se necesite almacenar o liberar grandes cantidades de energía en un periodo de tiempo muy corto. Por ejemplo, en vehículos eléctricos híbridos, los SC desempeñan un papel fundamental. Al combinarse con la batería principal del vehículo, los SC pueden proporcionar una alta densidad de potencia durante la aceleración. De manera similar, durante la desaceleración, estos SC almacenan la energía generada a partir del frenado regenerativo, contribuyendo así a la eficiencia general del sistema [40, 41].

También son empleados como fuentes de alimentación en sistemas de respaldo, donde brindan respuestas inmediatas en caso de cortes de energía. Además, desempeñan un papel crucial como estabilizadores en redes eléctricas sujetas a fluctuaciones de carga. Asimismo, se utiliza en la generación de energías renovables para complementar el sistema y mantener una producción constante de estas fuentes energéticas [42-44].

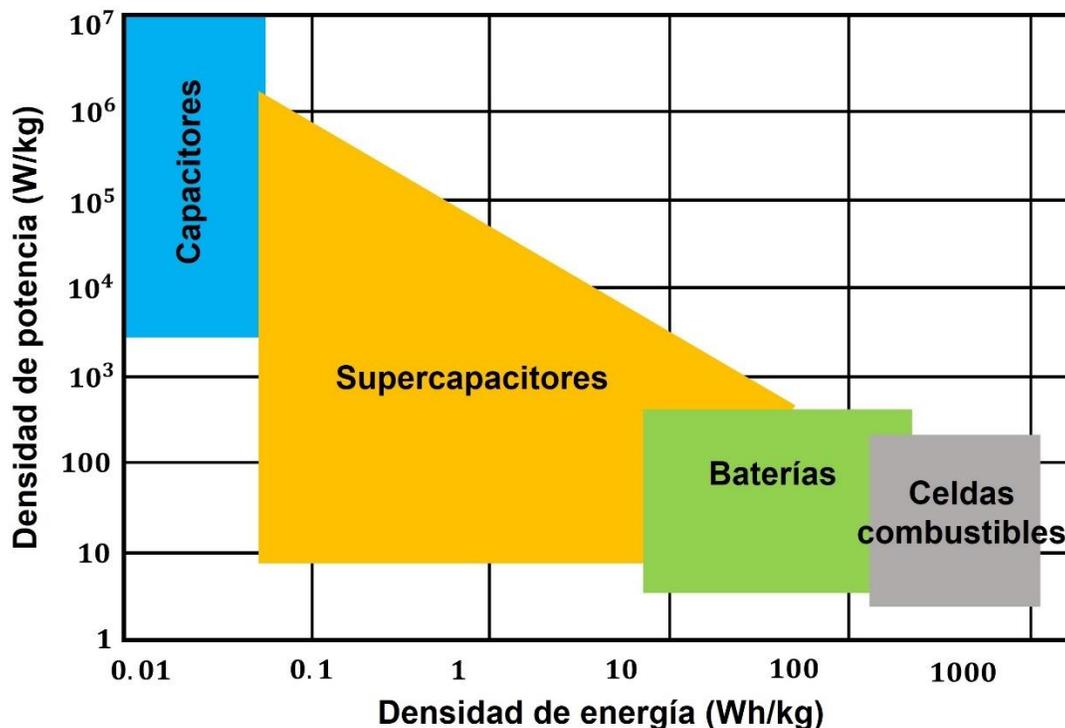


Figura 2.1 Diagrama Ragone de dispositivos de almacenamiento de energía. La información y valores han sido adaptados de Ref. [37].

2.3. Historia de los supercapacitores

El surgimiento de los SC se remonta al año de 1745, cuando se construyó la botella de Leyden, la cual consistía en un recipiente de vidrio con sus paredes internas y externas recubiertas con láminas de metal, el vidrio funcionaba como un aislante entre estas capas. Esta estructura permitió la acumulación de cargas en la superficie de las placas, las cargas positivas se acumulaban en una placa y las negativas en otra, y cuando estos dos electrodos se conectaban mediante un cable, se producía el proceso de descarga [18].

Posteriormente, en 1879 von Helmholtz, describió por primera vez el concepto de la doble capa eléctrica. Este concepto fue retomado años más adelante por Gouy y

Chapman, ellos afirmaban que por la distribución de Boltzmann los iones se acumulaban a cierta distancia de la superficie del electrodo, formando una doble capa difusa. En 1924, Stern, sugirió que en la interfaz electrodo-electrolito se forma una doble capa eléctrica que se compone de dos regiones, la región más cercana al electrodo está formada por una capa compacta de iones, como la descrita por Helmholtz y una segunda capa, que es la región difusa, formada por la distribución de iones solvatados [45, 46].

En 1957, fue desarrollado y patentado el primer capacitor electrolítico por Becker para General Electric [47]. Para este dispositivo utilizaron carbón poroso crudo en un electrolito acuoso. Más adelante en 1961, fueron creados y patentados los primeros supercapacitores comerciales por la American Oil Company, Standard Oil of Ohio (SOHIO). Estos dispositivos ya no contenían electrolitos acuosos y sus electrodos eran elaborados con pasta de carbón [35, 39, 48, 49].

Entre 1975 y 1980 B. E. Conway, estudio extensivamente las propiedades del RuO_2 , esta investigación fue fundamental para comprender las propiedades pseudocapacitivas del RuO_2 y otros materiales de electrodo [50].

A principios de la década de 1980, fueron desarrollados para aplicaciones militares los primeros SC de alta potencia, por el Pinnacle Research Institute (PRI). Y en 1992, se dio inicio al Programa de Desarrollo de Ultracapacitores dirigido por el Departamento de Energía de EE. UU. (DOE). El principal objetivo de este programa era obtener un dispositivo de alta densidad de energía [51]. Desde entonces ha surgido una variedad de SC, cada uno diseñado para suplir diferentes necesidades del mercado.

2.4. Diferencia entre supercapacitores y otros dispositivos

2.4.1. Diferencias entre baterías y supercapacitores

Las baterías y los SC se construyen de forma muy similar, ambos dependen de procesos electroquímicos para su funcionamiento. Sin embargo, los procesos electroquímicos que se dan en estos dispositivos son distintos, y estas diferencias influyen directamente en sus propiedades de almacenamiento. Las baterías se basan en la conversión de energía química a partir de reacciones redox, durante estas reacciones se aprovecha el potencial reductor de especies químicas, como los iones de litio, donde la especie química “pierde” un electrón y se obtiene un ion cargado positivamente. El transporte de los iones se da mediante el electrolito y el transporte de los electrones mediante un circuito externo a partir del cual se extrae la energía eléctrica necesaria para alimentar una gran variedad de dispositivos [52]. Por otro lado, los SC se basan en interacciones electrostáticas sobre la superficie del material [53, 54].

Otra diferencia entre estos dispositivos es su velocidad de carga, las reacciones redox muchas veces se ven restringidas por la velocidad de difusión de los iones, sobre todo cuando estos iones deben difundir grandes distancias o su concentración en el medio es baja. En general, las baterías suelen presentar altas densidades de energía, sin embargo, al estar sujetas a la velocidad de difusión de los iones, sus tiempos de carga pueden ser más lentos [55].

Los SC a diferencia de las baterías, exhiben tiempos de carga más rápidos, debido a la naturaleza del mecanismo de almacenamiento de estos dispositivos. Al almacenar la energía en forma de cargas sobre la superficie del material, su respuesta a los cambios en el potencial es más rápida, convirtiéndolos en dispositivos de alta potencia, pero con

baja densidad de energía, precisamente porque estas interacciones sólo se dan en la superficie del material [54, 55].

2.4.2. Diferencias entre celdas combustible y supercapacitores

Estos dispositivos se diferencian principalmente por sus mecanismos de almacenamiento de energía, las celdas combustibles son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química mediante reacciones redox en energía eléctrica. En estos dispositivos hay un flujo continuo de un combustible y un oxidante, los cuales se suministran desde el exterior provocando reacciones redox y el ánodo y cátodo solo son los medios de transferencia de carga, permitiendo llevar la corriente eléctrica directamente a un circuito externo [38].

Por este motivo las celdas combustibles son más adecuadas para la generación continua de energía, pero a pesar de esto tienen una mayor capacidad de almacenamiento que los SC. Sin embargo, los SC son dispositivos más accesibles y de alta densidad de potencia, es decir que la energía que almacenan la pueden liberar rápidamente [38].

2.4.3. Diferencias entre capacitor y supercapacitor

El mecanismo de almacenamiento de energía de estos dos dispositivos es el mismo, el cual se basa en la separación de cargas. Sin embargo, los SC tienen una mayor capacidad de almacenamiento de energía en comparación con los capacitores convencionales. Esto se debe principalmente a que en los capacitores convencionales almacenan la energía eléctrica en un campo eléctrico generado entre dos placas conductoras que son separadas por un dieléctrico, el cual acumula magnitudes iguales

de cargas positivas y negativas. La capacitancia de estos dispositivos se puede calcular en faradios (F) a partir de la siguiente ecuación [48]:

$$C = \frac{A \times \varepsilon}{d} \quad (1)$$

Donde A es el área superficial de las placas, ε es la permitividad del material dieléctrico y d es la distancia entre las placas.

Mientras que los SC se componen de dos electrodos de materiales porosos de alta superficie y un separador líquido o sólido, que permite la formación de interfases electrodo-electrolito (doble capa eléctrica), donde se almacena la energía en forma electrostática. Debido a la alta área superficial de los materiales de electrodo, los SC pueden almacenar una mayor cantidad de cargas [37, 48].

La capacitancia de los SC, a diferencia de los capacitores convencionales, no está determinada por el espesor del separador, si no por el espesor de la doble capa eléctrica en la interfaz electrodo-electrolito [48].

2.5. Componentes de un supercapacitor

Los supercapacitores constan de cuatro componentes principales, los cuales son esenciales para su funcionamiento. Dependiendo de los materiales utilizados en estos componentes la eficiencia del SC se puede ver afectada, positiva o negativamente. En la **Figura 2.2** se muestra el esquema general de un supercapacitor.

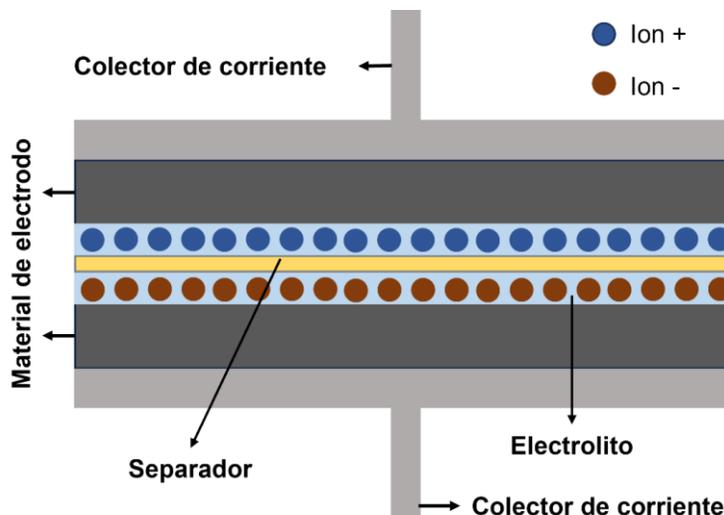


Figura 2.2 Componentes de un supercapacitor, adaptado de Ref. [56].

2.5.1. Electrodo

El rendimiento de una celda electroquímica depende en gran medida del electrodo utilizado. Por esta razón los esfuerzos se han centrado en la investigación de nuevos materiales de electrodo. Para obtener electrodos con rendimientos electroquímicos superiores se deben cumplir ciertos criterios. El material debe tener una gran área superficial, alta conductividad eléctrica, estructura de poros controlada, estabilidad térmica, buena humectabilidad superficial, estabilidad cíclica y que su obtención sea sencilla y de bajo costo. Idealmente también se busca que estos materiales sean compatibles para la formación de materiales compuestos [37, 48, 57].

2.5.2. Electrolito

Otro elemento clave para mejorar el rendimiento de los supercapacitores es el electrolito, la correcta selección de este puede hacer que el supercapacitor alcance voltajes más altos. Generalmente los electrolitos tienen un rango de voltaje en el que se

mantienen estables, si se aplica un voltaje más alto, este líquido puede descomponerse e interferir con el correcto funcionamiento de la celda. Por lo tanto, la capacidad de la celda para alcanzar voltajes altos está limitada por el electrolito y su capacidad para mantenerse estable [58].

Propiedades como conductividad térmica, baja viscosidad, estabilidad térmica, baja toxicidad y buena estabilidad cíclica, también son determinantes para la elección del electrolito adecuado. Hasta ahora, no se ha encontrado un electrolito ideal que satisfaga todas las condiciones necesarias para su uso en dispositivos electroquímicos, pero existe una gran variedad de electrolitos que dependiendo del tipo de dispositivo y su aplicación, pueden ser utilizados y obtener el máximo provecho de sus propiedades específicas [59]. Los electrolitos utilizados en los EDLC se pueden dividir en varias categorías:

- **Electrolitos acuosos**

Estos son ampliamente utilizados en etapas de investigación debido a su bajo costo y abundancia. Los electrolitos acuosos más comúnmente utilizados son H_2SO_4 , KOH , Na_2SO_4 y NH_4Cl . Estos electrolitos también destacan por su alta conductividad iónica y baja toxicidad. Una de sus principales desventajas es su estrecha ventana potencial (~ 1.2 V) [20, 33, 37].

- **Electrolitos orgánicos**

Estos son los electrolitos comerciales más utilizados, su rango de operación puede ir desde 0 hasta 2.2-3 V. Sin embargo, suelen presentar una baja conductividad y pueden ser potencialmente peligrosos debido a su flamabilidad y

toxicidad [60, 61]. Los electrolitos orgánicos que se utilizan comúnmente son el acetonitrilo y carbonato de propileno [37].

- **Líquidos iónicos**

Los líquidos iónicos son sales fundidas, este tipo de electrolitos no son tóxicos ni inflamables, además presentan una alta estabilidad térmica y química, buena conductividad a temperaturas por arriba de los 60° y una ventana potencial mucho más amplia (0 a 2-6 V, típicamente 4.5 V). Desafortunadamente estos electrolitos presentan viscosidades relativamente altas y su conductividad puede verse afectada a temperaturas cercanas a la ambiental, además de que suelen ser costosos [20, 33, 62, 63]. Los líquidos iónicos más estudiados para esta aplicación son los líquidos a base de imidazolio, pirrolidinio y amonio cuaternario, como el 1-etil-3-metilimidazolio, 1-butil-1-metilpirrolidinio bis[(trifluorometil)sulfonyl]imida y el tetralquilamonio, respectivamente [20, 64].

- **Electrolitos de estado sólidos/cuasi-sólidos**

Estos electrolitos podrían ser la solución a los problemas de fuga que pueden presentar los electrolitos líquidos. Sin embargo, estos electrolitos aún presentan conductividades iónicas bajas, que podrían limitar la capacidad de carga y descarga rápida que caracteriza a los SC [59, 61].

2.5.3. Separador

El separador en un SC es una capa dieléctrica que se coloca entre los dos electrodos para evitar el contacto directo entre ellos. Su función principal es prevenir cortocircuitos y permitir que los iones se muevan entre los electrodos, a través del electrolito, durante el proceso de carga y descarga.

Algunas de las consideraciones que se deben tomar en cuenta al momento de seleccionar el separador adecuado es que, estos deben ser materiales que no conduzcan la electricidad de forma significativa y que su resistencia iónica sea mínima. También deben ser químicamente estables y resistentes a los componentes de la solución electrolítica [37, 65]. Las hojas de papel de celulosa son uno de los materiales más utilizados como separador en SC y baterías alcalinas, debido a sus excelentes propiedades mecánicas y características como humectabilidad, bajo costo, ligereza y alta porosidad [66].

2.5.4. Colector de corriente

Los colectores de corriente son el medio de contacto entre los electrodos y el circuito externo, estos recogen y transportan la corriente de los electrodos a las cargas externas. El diseño del colector debe garantizar una distribución uniforme de la corriente eléctrica a través de los electrodos. Por lo tanto, los colectores deben estar hechos con materiales conductores, generalmente metales, como aluminio, acero o hierro. Estos materiales también deben ser resistentes a los componentes del electrolito [37, 56].

2.6. Clasificación de los supercapacitores según su mecanismo de almacenamiento de carga

2.6.1. Capacitivo

Este tipo de supercapacitores son conocidos como capacitores electroquímicos de doble capa (EDLC). La capacitancia de los EDLC proviene de la energía electrostática acumulada en la interfaz electrodo-electrolito. Los procesos capacitivos, o también conocidos como no faradaicos, involucran solamente la adsorción o desorción de

especies cargadas. Durante este proceso no se involucra ninguna transferencia de electrones hacia o desde la superficie del electrodo. Y debido a que las cargas no pasan a través de la interfaz electrodo-electrolito, se da lugar a la formación de una doble capa, similar a la de los capacitores convencionales [67], así como se observa en la **Figura 2.3**.

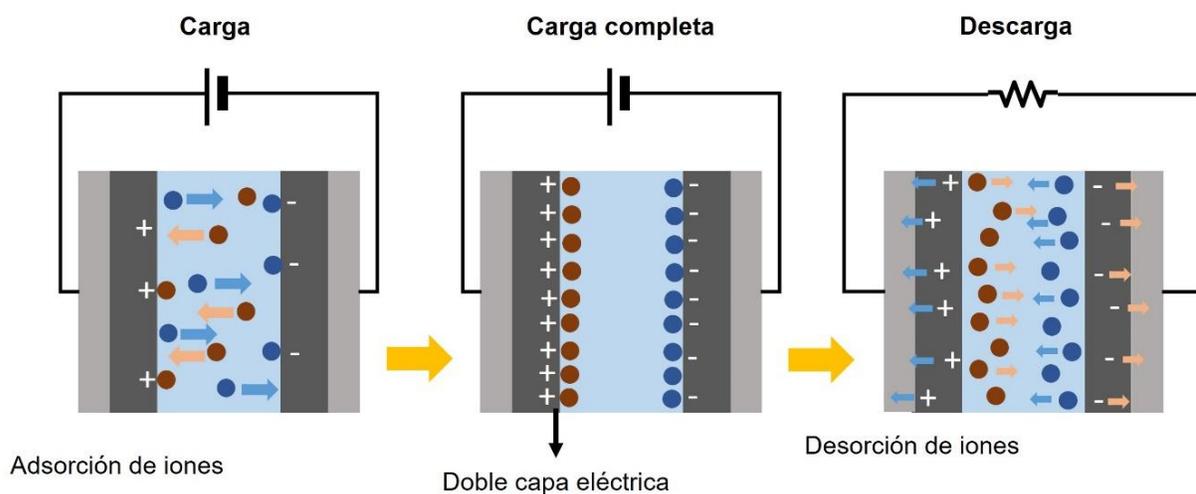


Figura 2.3 Proceso de carga-descarga y formación de la doble capa eléctrica

La doble capa eléctrica es un mecanismo de almacenamiento capacitivo y fue descrito en 1879 por Hermann von Helmholtz. Este modelo explica que cuando se coloca una superficie cargada eléctricamente en un electrolito, se forma una capa de iones inmóvil con carga opuesta y esta interacción que se da entre las cargas es puramente electrostática [57, 58]. La capacitancia descrita por este modelo puede presentarse de la siguiente manera [57]:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (2)$$

Donde ε_T es la constante electrolítica dieléctrica, ε_0 es la constante dieléctrica del vacío, d es el espesor efectivo de la doble capa y A es el área de la superficie del electrodo.

El siguiente modelo fue propuesto por Gouy y Chapman, donde se describe que, debido a la distribución de Boltzmann, los iones no forman una capa compacta sobre la superficie cargada, sino que, los iones acumulados se extienden a cierta distancia de la superficie sólida, formando una doble capa difusa [46].

En 1920, Stern combinó el modelo de Helmholtz con el modelo de Gouy-Chapman. Durante la formación de la doble capa eléctrica se da lugar a la existencia de dos regiones diferentes de cargas. La primera región es formada por una capa compacta de iones adsorbidos cerca de la superficie y la segunda región es una capa difusa de iones solvatados [45], como se muestra en la **Figura 2.4**. En 1947, Graham refinó aún más este modelo, señalando la adsorción específica de iones en la superficie metálica y dividiendo el modelo en dos subregiones [68]:

- ***El plano de Helmholtz interno (inner Helmholtz plane, IHP)***

La distancia de este plano es definida por el centro de los iones adsorbidos en la superficie del electrodo.

- ***El plano de Helmholtz externo (outer Helmholtz plane, OHP)***

La distancia de este plano está definida por el centro de los iones solvatados:

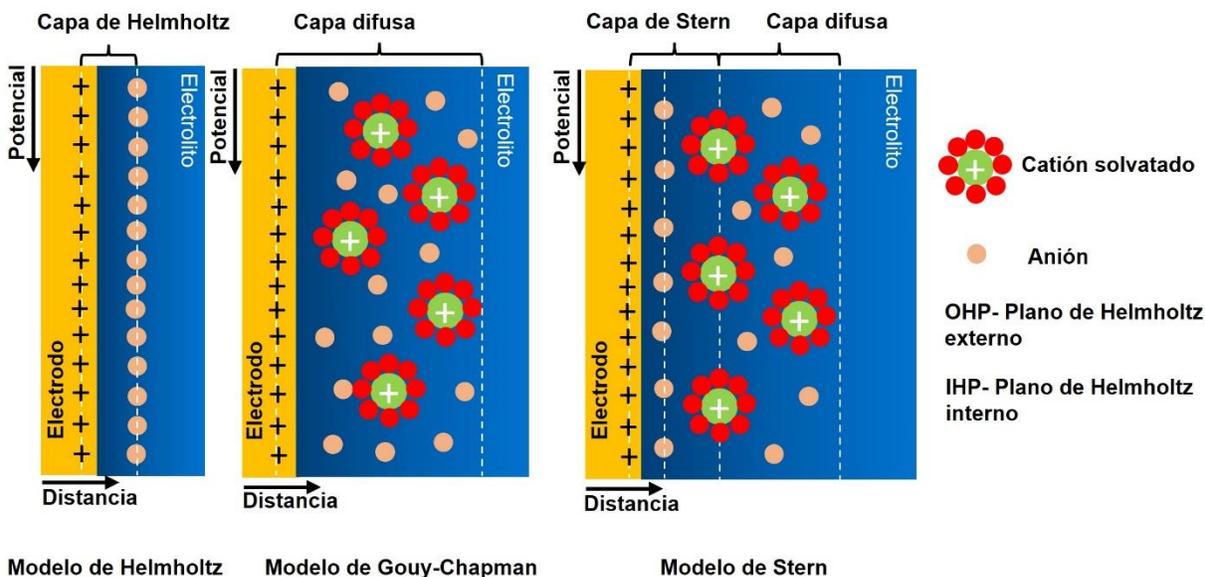


Figura 2.4 Representación de estructuras EDLC: modelo de Helmholtz, modelo de Gouy-Chapman y modelo de Gouy-Chapman-Stern, adaptado de [68].

2.6.2. Pseudocapacitivo

La pseudocapacitancia es un mecanismo de almacenamiento capacitivo que implica reacciones faradaicas reversibles, sin embargo, existen diversos procesos faradaicos que podrían resultar en diferentes características capacitivas electroquímicas [69]. Conway identificó diferentes procesos faradaicos [70]:

- **Deposición a subpotenciales**

Este proceso ocurre cuando los iones metálicos se depositan sobre la superficie de un electrodo metálico distinto a un potencial menos negativo que el potencial de equilibrio. Esto forma una monocapa metálica sobre la superficie del electrodo [71, 72].

- ***Pseudocapacitancia redox***

Se trata de reacciones redox continuas y reversibles que tienen lugar en la superficie o cerca de la superficie de los materiales activos [73].

- ***Pseudocapacitancia de intercalación***

Se refiere a un fenómeno en el que los iones se insertan o se intercalan entre las capas de los materiales de electrodo redox-activos. Este proceso es reversible, lo que conduce a una acumulación de carga sin cambios de fase cristalográfica [69].

A diferencia de las baterías, los supercapacitores son dispositivos con una alta densidad de potencia, es decir que pueden almacenar y liberar energía muy rápidamente. El funcionamiento de los supercapacitores tradicionales o EDLC se basa en el almacenamiento de cargas electrostáticas en la interfaz de los electrodos, es decir es un proceso no faradaico ya que no se involucran reacciones químicas por transferencia de cargas. Este mecanismo de almacenamiento permite generar una gran cantidad de energía en un corto periodo de tiempo, sin embargo, su capacitancia es limitada.

A medida que surgió la necesidad de dispositivos que pudieran proporcionar tanto alta energía como potencia, se desarrollaron los hoy conocidos materiales pseudocapacitivos. Se podría decir que el funcionamiento de estos materiales se encuentra en un punto intermedio entre los EDLC y las baterías convencionales, ya que no se ajusta completamente a la definición clásica de ninguno de estos dispositivos.

Las reacciones faradaicas superficiales del pseudocapacitor se derivan de la transferencia de carga superficial o cercana a la superficie, que es diferente a una batería. Y a pesar de que su cinética de reacción es tan rápida que su comportamiento se asemeja

al de un EDLC, su origen no es electrostático, por lo tanto, solo puede considerarse como una forma complementaria de un EDLC. Los pseudocapacitores exhibe formas similares a las de un EDLC en las curvas VC y CDG, motivo por el que es utilizado el prefijo “pseudo”, para poder diferenciarlo [74].

2.6.3. Supercapacitores híbridos

Los materiales de carbono han sido ampliamente estudiados para su aplicación en supercapacitores, debido a sus fascinantes características. Los materiales de carbono son abundantes, amigables con el medio ambiente, son materiales de bajo costo, tienen un área superficial ultra alta, características estructurales únicas, una alta conductividad eléctrica y una excelente estabilidad química. Sin embargo, los EDLC basados en carbono aún presentan algunas limitaciones como baja capacitancia específica y densidad de energía [75].

Por otro lado, el estudio de los óxidos de metales de transición ha tenido grandes avances en el campo de la electroquímica. Los óxidos metálicos son materiales electroactivos que poseen múltiples estados de oxidación, esta característica es interesante ya que posibilita el proceso de transferencia de cargas para generar pseudocapacitancia [76, 77].

Estos materiales además de contar con una alta actividad redox, presentan capacitancias específicas muy altas. Pero al igual que los EDLC también tienen algunas limitaciones, como baja conductividad eléctrica, lo cual afecta directamente la eficiencia en la transferencia de cargas, reduciendo la velocidad de reacción en los electrodos del SC. Este tipo de materiales presentan baja área superficial y una reducida estabilidad cíclica que compromete su capacidad para almacenar energía [78-80].

Un supercapacitor híbrido combina los principios de almacenamiento de energía de un EDLC y un pseudocapacitor. Estos dos mecanismos al no compartir las mismas limitaciones, las características de uno compensan las deficiencias o limitaciones del otro, y las características que comparten se ven potencializadas. Por lo que la combinación de estos dos mecanismos de almacenamiento da como resultado, un dispositivo de alto rendimiento con una alta densidad de energía y potencia, y una capacidad de almacenamiento de energía mejorada [56, 81].

2.7. Materiales de carbono de alta superficie

Debido a los mecanismos de almacenamiento de carga de los SC y las propiedades electroquímicas que se buscan aprovechar, los materiales de alta superficie han adquirido mayor atención. Una alta área superficial se relaciona directamente con la eficiencia del supercapacitor. Los mecanismos de almacenamiento de estos dispositivos se basan en procesos de superficie como adsorción y desorción de iones y moléculas cargadas, por lo tanto, tener un material de alta área superficial, proporcionará una mayor cantidad de sitios activos para estos procesos, aumentando la capacitancia del material.

Los materiales de carbono han sido ampliamente utilizados como material de electrodo, ya que en general, estos materiales son económicos y fáciles de producir. Se caracterizan por tener una alta área superficial y buena conductividad eléctrica, lo que resulta de gran utilidad para su aplicación en supercapacitores. Las estructuras de carbono son diversas y cada una tiene propiedades únicas. Otra ventaja es que estas estructuras pueden ser modificadas tanto física como químicamente, lo que permite potenciar sus propiedades y dar lugar al desarrollo de nuevos y mejores materiales [37, 48, 82].

2.7.1. Nanotubos de carbón

Los nanotubos de carbono (NTC) son estructuras nanométricas, y están formados por capas de grafeno que tienen una disposición hexagonal de átomos de carbono. Estas capas de grafeno forman una estructura cilíndrica, similar a la de un tubo. Los NTC destacan por su alta conductividad eléctrica y térmica, también por sus propiedades mecánicas y ópticas. Los NTC son estructuras novedosas y existen dos tipos principales, NTC de una sola pared, es decir que están formados por una sola capa de grafeno (**Figura 2.5 (b)**), la cual se enrolla formando un tubo simple con un diámetro típico de 1.4 nm. También existen NTC de paredes múltiples, estos se forman a partir de varias capas cuya disposición forma tubos concéntricos (**Figura 2.5 (c)**) con un espaciado aproximado de 3.4 Å entre cada capa tubular y un diámetro típico entre 10-20 nm. [83-86].

Su área superficial altamente accesible, baja resistividad y alta estabilidad, son otras de las propiedades que han convertido a los NTC en excelentes candidatos para una gran cantidad de aplicaciones, especialmente para su uso como material de electrodo para supercapacitores. En este tipo de aplicación se pueden introducir grupos funcionales en la superficie de la estructura o combinar con algunos óxidos metálicos, dotándola de algunas propiedades redox que pueden mejorar el rendimiento del supercapacitor [84, 87-89].

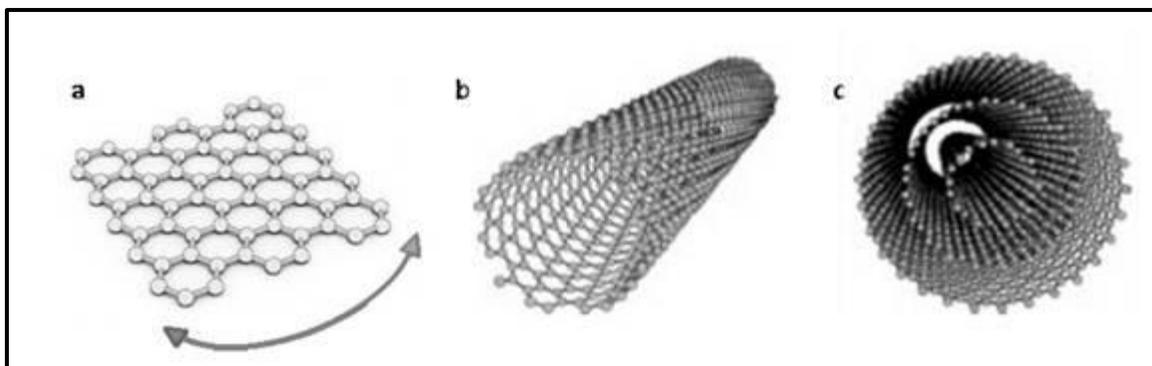


Figura 2.5 a) Hoja de grafeno siendo enrollada en forma de cilindro (b) Nanotubos de carbono de pared simple (c) Nanotubos de carbono de paredes múltiples. Adaptado de Ref. [90].

2.7.2. Aerogeles

Los aerogeles de carbono son materiales de carbono formados por una red tridimensional de partículas sólidas que forman una matriz altamente porosa. Los aerogeles también se caracterizan por ser materiales ultraligeros y esto se debe a que entre el 90 y el 99% del volumen de la estructura es ocupado por gas. La preparación de los aerogeles se divide en tres pasos [91, 92]:

- **Gelificación**

En este paso se crea una suspensión coloidal de las partículas precursoras en un líquido. A esta suspensión se le adiciona un agente gelificante, el cual hace que las partículas precursoras se agrupen facilitando la reticulación de estas partículas, formando así una estructura tridimensional.

Los NTC [93], el grafeno [94], algunos carbonos derivados de biomasa y las estructuras derivadas de MOF [95], son algunos de los precursores que se utilizan y estudian para la creación de aerogeles.

- **Secado**

Este paso consiste en la eliminación del disolvente que contiene el hidrogel obtenido en el paso anterior. Al eliminar el disolvente queda solo la estructura sólida formada por las partículas precursoras. Las propiedades texturales de este material dependen en gran medida de este paso. Existen tres métodos principales de secado que son liofilización, secado supercrítico y secado a temperatura ambiente.

- **Carbonización**

Finalmente se obtiene el aerogel el cual es sometido a un proceso térmico bajo una atmósfera inerte, las temperaturas que se utilizan durante este proceso deben ser controladas para obtener un buen grado de grafitización o para evitar una densificación excesiva. Por lo tanto, este paso es de gran importancia para mejorar su estabilidad mecánica, su conductividad eléctrica y algunas otras propiedades.

Las propiedades de los aerogeles, como alta área superficial, ligereza, estructura altamente porosa, buena conductividad eléctrica, entre otras, han permitido que estos materiales sean ampliamente utilizados como material de electrodo para supercapacitores [96].

2.7.3. Nanofibras de carbono

Las nanofibras de carbón (NFC) son estructuras unidimensionales (1D), estas estructuras consisten en redes de carbono con hibridación sp^2 parcialmente similares a los NTC. Sin embargo, lo que diferencia a las NFC y a los NTC es que, los NTC están

formados por capas de grafeno que se enrollan y forman una estructura cilíndrica hueca, mientras que las NFC tienen una estructura sólida [97].

Las NFC son estructuras prometedoras para almacenamiento de energía, tienen excelentes propiedades como estabilidad química, resistencia mecánica, una buena distribución de tamaño de poro y una alta área superficial. Adicionalmente, las estructuras 1D tienen una menor longitud de difusión de iones lo que es ideal para mejorar la capacitancia en dispositivos capacitivos de doble capa. Existe una gran variedad de diámetros de nanofibras, estos pueden variar según el método y las condiciones de síntesis [98, 99]. Los principales métodos para la síntesis de NFC son:

- ***Deposición química de vapor***

Para la obtención de NFC con este método se requiere de un precursor de carbono, el cual se mezcla con un catalizador que es cuidadosamente seleccionado. Esta mezcla es introducida en un horno a alta temperatura bajo una atmósfera inerte. Finalmente, de la mezcla del catalizador y el carbón elemental obtenido del precursor bajo estas condiciones, se obtiene el carbón en la forma alotrópica deseada, en este caso NFC [97].

- ***Electrohilado y pirólisis de nanofibras poliméricas***

Esta técnica es utilizada para producir NFC a partir de algún precursor polimérico como el poliacrilonitrilo (PAN), poliimida (PI), alcohol Polivinílico (PVA), fluoruro de polivinilideno (PVDF) o brea. Una vez elegido el polímero, este se mezcla con un solvente orgánico adecuado para formar una solución viscoelástica. Para este método de síntesis se utiliza un equipo de electrohilado que, bajo condiciones adecuadas, permite el desplazamiento de la solución precursora y la

evaporación del solvente, obteniendo fibras finas. Estas fibras poliméricas forman un tipo de red o estera no tejida, la cual se puede recolectar y posteriormente llevar a un tratamiento térmico con atmósfera inerte. El tratamiento térmico permite convertir el polímero en NFC puras y cristalinas [100, 101].

- ***Pirólisis de biomateriales***

Este proceso consiste en la carbonización pirolítica de biomateriales nanofibrosos, como la celulosa bacteriana, para obtención de NFC. También se pueden obtener nanofibras poliméricas derivadas de biomasa, particularmente de las plantas, por su alto contenido en celulosa, material del cual se puede obtener fácilmente fibras de tamaño nanométrico. Estas nanofibras naturales de igual forma son sometidas a un tratamiento térmico para finalmente obtener NFC [21, 102].

2.7.4. Grafeno/óxido de grafeno reducido

El grafeno es una forma alotrópica de carbono. Su estructura 2D se compone de una sola capa de átomos de carbono dispuestos en forma hexagonal. Las láminas de grafeno son la base para la construcción de otros alótropos importantes, cuando se apilan varias láminas de grafeno, se forma una estructura 3D de grafito. Si una o varias capas se enrollan de forma cilíndrica, forma nanotubos de carbono, que son estructuras 1D. Alternativamente, si la capa se envuelve formará fullerenos, estructuras 0D [103, 104].

En 2004 este material fue aislado y reportado por primera vez. Desde entonces, ha despertado gran interés debido a sus increíbles propiedades, como alta conductividad eléctrica, gran resistencia mecánica, buena conductividad térmica y amplia área

superficial. Gracias a estas propiedades, el grafeno se ha destacado como la opción más prometedora para satisfacer las demandas de un electrodo ideal [105-107].

La dificultad de producir láminas de alta calidad a gran escala ha impedido que la implementación de estos materiales sea exitosa hasta el momento, por lo que el proceso de síntesis sigue siendo uno de los mayores desafíos. En la actualidad, existen varios métodos utilizados para obtener grafeno. Uno de ellos es el método “top-down”, que consiste en la exfoliación mecánica de grafito, y el otro es el método “bottom-up”, con el cual se busca cultivar grafeno a partir de precursores orgánicos y catalizar el crecimiento in situ sobre un sustrato [104].

El óxido de grafeno es un material que se puede obtener de manera sencilla mediante la oxidación química y exfoliación del grafito. Para lograr la oxidación química del grafito generalmente es utilizando el método Hummers, que consiste en una mezcla ácida compuesta por grafito, ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3), a la cual posteriormente se le adiciona permanganato de potasio ($KMnO_4$) para iniciar la oxidación [108, 109]. Básicamente durante el proceso de oxidación química y exfoliación del grafito, se introducen funcionalidades de oxígeno en la superficie plana del grafeno, lo que da como resultado la formación de óxido de grafeno [106].

La modificación estructural del grafeno y sus derivados se ha investigado ampliamente, y se ha demostrado que el dopaje con heteroátomos o la combinación con polímeros, nanopartículas u óxidos metálicos puede mejorar el desempeño electroquímico de estos materiales [107].

2.7.5. **Carbón activado**

Los carbonos activados son materiales altamente porosos y uno de los materiales más utilizados en supercapacitores comerciales. Estos carbonos se pueden obtener a partir de diferentes precursores, como biomasa, carbón, breas, entre otros. En general, los precursores son materiales abundantes, lo que hace que la obtención de carbonos activados sea altamente rentable [110].

La preparación de carbonos activados consiste básicamente en dos etapas: carbonización y activación. La carbonización es un proceso térmico controlado que generalmente se lleva a cabo a bajas temperaturas, entre 400 y 850 °C, en una atmósfera inerte. La activación, por otro lado, es un proceso que transforma materiales ricos en carbono en carbón activado. Este proceso permite aumentar la porosidad y el área superficial de los materiales, y se puede llevar a cabo mediante tratamientos físicos o químicos [111, 112].

2.8. **Preparación de carbón activado**

2.8.1. **Carbonización**

Este proceso consiste en someter a temperaturas controladas (generalmente <900 °C en atmósfera inerte), a algunos precursores orgánicos ricos en carbono, como lo pueden ser residuos de biomasa, carbones, coque de petróleo o incluso algunos polímeros. En este proceso de carbonización, los precursores de carbono experimentan una descomposición térmica, conocida como pirólisis, que elimina componentes volátiles. Las reacciones de condensación que se dan durante el tratamiento térmico permiten la reacomodación de la estructura cristalina. Y dependiendo del precursor de carbono y las

condiciones de procesamiento, el material obtenido al final de la carbonización podría tener diferentes propiedades [48].

2.8.2. Activación

La activación es un proceso utilizado para aumentar la porosidad de un material de carbono obtenido por pirólisis. Existen varios métodos de activación, sin embargo, la activación física y química son los más utilizados para la producción de carbonos activados.

2.8.2.1. Activación física

Para la activación mediante este proceso, el precursor de carbono se somete a un proceso de carbonización en una atmósfera inerte a temperaturas entre 400 y 900°C. El siguiente paso es exponer al material a una atmósfera oxidante, generalmente de vapor, CO₂ o una mezcla de ambos, esto a una temperatura de 600-1200 °C. Los poros comienzan a formarse conforme el agente oxidante quema las áreas más reactivas del carbono y elimina compuestos volátiles. La temperatura y el tiempo de activación son factores que influyen directamente en la calidad del carbón activado [36, 48, 113, 114].

2.8.2.2. Activación química

La activación química consiste en impregnar al material carbonizado con cierto agente químico, los más utilizados son el KOH, ácido fosfórico (H₃PO₄), hidróxido de sodio (NaOH), cloruro de zinc (ZnCl₂), cloruro de aluminio (AlCl₃) y cloruro de magnesio (MgCl₂). Una vez impregnado el material con este químico se someten a un tratamiento térmico, generalmente a temperaturas entre 450 y 900 °C. El químico utilizado actúa como agente deshidratador, inhibiendo la formación de alquitrán y la evolución de compuestos volátiles. Durante el tratamiento térmico, el agente activante se “inserta” en

las partículas de carbono haciendo la función de molde para la generación de poros. Una vez finalizado el tratamiento térmico, el material debe ser lavado para eliminar los restos del agente activante, dejando libre la estructura de los poros [113-115].

2.9. Carbón activado derivado de biomasa para almacenamiento de carga

Como se mencionó en la **sección 2.7.5**, los carbones activados son ampliamente utilizados en SC debido a que se pueden obtener a partir de diferentes precursores. La biomasa, un recurso renovable y altamente disponible, puede servir como precursor de carbono [116]. Hay diversas fuentes de materiales de biomasa, que incluyen algunos derivados de plantas, alimentos, microorganismos y animales [117]. Los carbones activados obtenidos de biomasa pueden contener cantidades significativas de ciertos elementos, lo que les confiere ciertas propiedades pseudocapacitivas [60, 118].

El término “biomasa lignocelulósica” se utiliza para describir materiales cuyos componentes principales son celulosa, el compuesto orgánico más abundante en el planeta, lignina y hemicelulosa [119, 120]. Conocer las proporciones de estos componentes en el precursor lignocelulósico es crucial para obtener carbones activados óptimos que cumplan con los requisitos de la tecnología a la que se aplicarán. Estas proporciones influyen directamente en la morfología del material resultante, ya que las tres macromoléculas se descomponen a diferentes velocidades y temperaturas. Dado que la lignina es la molécula más térmicamente estable, suele ser el componente dominante en los materiales carbonizados [121, 122].

Investigaciones han explorado cómo la materia prima influye en la obtención de carbones activados. Se ha demostrado que materiales con mayor contenido de lignina generan mayores cantidades de carbono, con un área superficial elevada y una buena distribución de tamaños de poro [122].

En la actualidad, se están investigando diversas especies de algas como posibles precursores de carbono. Debido a su rápido crecimiento y composición única que las diferencia de las plantas terrestres, las algas han despertado un gran interés. Las algas presentan estructuras uniformes debido a su falta de diferenciación tisular, y tienden a ser ricas en sodio y potasio, elementos que pueden desempeñar un papel similar al de un activador químico [123]. Algunos trabajos han demostrado que la obtención de una alta porosidad en carbonos pirolíticos se relaciona con la presencia de elementos inorgánicos en los precursores de biomasa [124].

Por lo tanto, el proceso de carbonización mediante pirólisis de biomasa se destaca como una de las técnicas más efectivas para la obtención de carbono a partir de residuos abundantes, como el sargazo, una macroalga que ha afectado considerablemente las costas del Caribe mexicano, generando impactos significativos tanto económicos como ambientales. Debido a su alta disponibilidad y la carencia de usos comerciales, el sargazo podría ser empleado como precursor de carbono [24, 125].

2.10. Sargazo

El término sargazo puede hacer referencia a una gran variedad de algas, sin embargo, para una mejor comprensión de este trabajo, este término será utilizado para

referirnos a las macroalgas pelágicas del género *Sargassum*, específicamente a las especies *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans*, algas pardas que pertenecen a la clase *Phaeophyceae*. Estas algas son conocidas por formar grandes y densos lechos sobre la superficie del mar, también llamados “praderas”, que son de gran importancia biológica [126, 127].

Uno de los mayores depósitos de estas algas se encuentra en una región del océano Atlántico norte, conocida como el Mar de los Sargazos. Este lugar es hogar de más de 60 especies bentónicas de sargazo y dos especies pelágicas comunes, *S. fluitans* y *S. natans* [128, 129], cada una con diferentes morfotipos [23].

Los sargazos pelágicos forman grandes acumulaciones en la superficie del agua, las cuales cumplen un papel fundamental para el desarrollo y preservación de diferentes especies de importancia biológica y comercial. Estas densas acumulaciones de algas funcionan como área de desove y también brindan refugio y alimento a una gran cantidad de organismos como tortugas, peces y camarones [128, 130-132].

En general las algas son de gran importancia, especialmente para el mantenimiento de la temperatura y concentraciones de CO₂ atmosférico. Recordemos que más del 70% de la superficie terrestre está cubierta por océanos, los cuales funcionan como grandes sumideros de CO₂. Esto sucede gracias a la capacidad del océano para solubilizar CO₂ y la alta eficiencia fotosintética de las micro y macroalgas, que incluso es mayor a la de las plantas terrestres [133, 134].

Existe una gran diversidad de algas marinas, sin embargo, muchas comparten una estructura común. Estas suelen tener estructuras reproductivas simples y a diferencia de

las plantas terrestres, las algas no poseen un auténtico sistema vascular y tampoco cuenta con hojas, tallos y raíces reales. En la **Figura 2.6** se ilustra la estructura típica de las algas, la cual es formada por los siguientes componentes [133, 135, 25].

- **El talo:** este es el cuerpo vegetativo de la planta y todas sus secciones pueden hacer fotosíntesis.
- **Las láminas o cuchillas:** son estructuras aplanadas parecidas a hojas, su forma ancha y plana les permite absorber la luz solar de forma eficiente, para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis.
- **Los neumatocistos o flotadores:** son pequeñas vesículas llenas de gas, las cuales proporcionan flotación a las cuchillas, manteniéndolas cerca de la superficie donde pueden acceder a la luz solar, que es necesaria para la fotosíntesis.
- **El estipe:** es una estructura parecida a un tallo que conecta las cuchillas y las mantiene en posición para aprovechar la luz solar y permite el transporte de azúcares de las cuchillas al resto de la planta.
- **El holdfast o disco de adhesión:** es una estructura similar a una raíz que funciona como anclaje para sostener a la planta y evita que sea arrastrada por las corrientes. Sin embargo, estas estructuras no sirven para la recolección de nutrientes.
- **La fronda:** es la parte combinada de la “hoja” y el estipe.

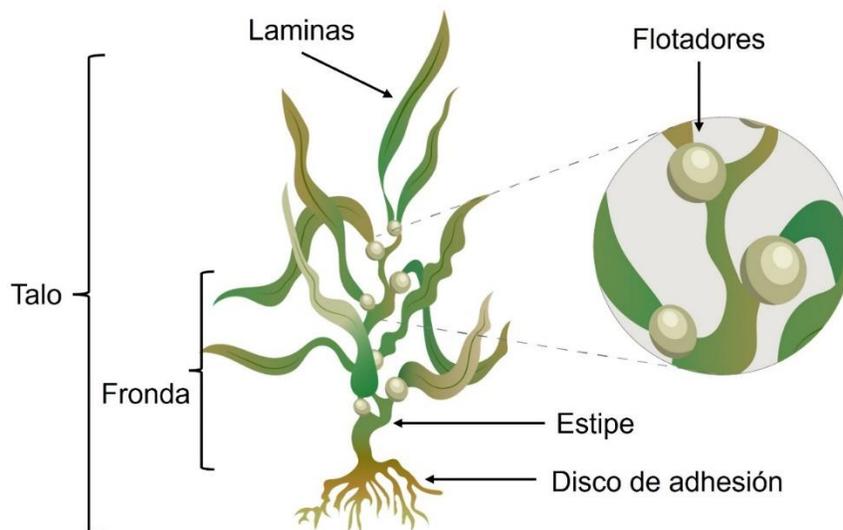


Figura 2.6 Estructura típica de algas marinas con sus partes principales. Adaptada de Ref. [133].

2.10.1 Composición del sargazo

La composición química del sargazo puede ser distinta dependiendo la especie y las condiciones ambientales en las que se desarrolle, pero en general estas algas están compuestas en gran parte por agua (70-90% de peso fresco), carbohidratos que incluyen polisacáridos de glucosa como celulosa y laminarina, al igual que algunos polisacáridos complejos como alginato y fucoidan. También se componen de proteínas, lípidos, y algunos minerales como metales alcalinos. De igual forma el sargazo puede contener cierto porcentaje de lignina, aunque no en cantidades tan altas como en las plantas terrestres, ya que en su ambiente marino no requieren de la rigidez que proporciona este polímero [119, 136-138].

Las algas pardas suelen tener un color verde oliva o marrón oscuro que las caracteriza de otras algas, estos colores se deben principalmente a la presencia del carotenoide fucoxantina [137].

En la **Tabla 2.1.** se muestra un resumen de la composición del sargazo.

Tabla 2.1 Composición del sargazo [139].

% de masa de biomasa seca	Sargazo
Almidón	0.1
Celulosa	20.3
Hemicelulosa	42.8
Lignina	7.3
Proteínas	9.6
Industria extractiva	1.9
Cenizas	17.1
Total	99.1

2.10.2 Distribución y origen

Uno de los registros escritos más antiguos que se tiene sobre estas algas pelágicas, es una carta escrita por Cristóbal Colón, la cual realizó en uno de sus primeros viajes en la que menciona haberse encontrado con grandes parcelas de hierba, las cuales traían “como fruta”. Las embarcaciones de Colón al igual que las de muchos otros marineros debieron haber quedado varadas en lo que hoy conocemos como el mar de los sargazos, lugar que ha sido ampliamente estudiado y hoy se reconoce su gran importancia biológica [140].

Según informes históricos, las mayores acumulaciones de sargazo se encontraban exclusivamente en el Atlántico Norte, principalmente en el Golfo de México y el Mar de los Sargazos [141]. En esta zona se ubican algunas de las corrientes marinas más grandes e importantes que delimitan el Mar de los Sargazos. Durante muchos años, se

observó la llegada esporádica de sargazo a las costas del Golfo de México y el Caribe mexicano. Generalmente llegaban cantidades pequeñas, algunos otros años llegaban cantidades más grandes, pero no resultaban alarmantes.

Sin embargo, en 2011 cantidades inusualmente grandes de sargazo comenzaron a llegar a las costas de las islas del Mar Caribe, las costas caribeñas de América Central y México, y a las costas atlánticas de África occidental [141]. Con la ayuda de equipos especializados como el MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) de la Agencia Espacial Europea, se pudieron detectar grandes cantidades de sargazo en un área del norte de Brasil, identificada como la Región de Recirculación Ecuatorial del Norte (NERR). En esta zona nunca se habían detectado cantidades tan grandes de estas algas, actualmente a esta área se le conoce como el Gran Cinturón de los Sargazos del Atlántico [128, 142].

A mediados del 2014, muchas islas y países del Caribe comenzaron a verse fuertemente afectados por la llegada masiva de estas algas, las cuales se convirtieron en un problema económico, ecológico y de salud para los humanos. Por este motivo se han unido esfuerzos para determinar los factores que llevaron al desarrollo y dispersión del Gran Cinturón de los Sargazos del Atlántico [23].

El crecimiento inusual de estas algas puede ser debido a múltiples factores, hasta la fecha se han discutido varias hipótesis, sin embargo, aún no se sabe con certeza a qué se debe su origen. El crecimiento de estas algas podría ser un efecto del cambio climático, un aumento inusual de la temperatura del océano Atlántico, también podría deberse a cambios en las corrientes marinas, que favorecen el movimiento de la especie [129, 141]. El crecimiento descontrolado de estas algas también podría deberse al

enriquecimiento de las aguas marinas con algunos nutrientes como nitrógeno, hierro y fósforo, esto como consecuencia del desemboque del río Amazonas [143-145].

2.10.3 El sargazo en México

A principios del verano de 2014 las playas del Caribe mexicano fueron invadidas por grandes masas de algas pelágicas, para el otoño de ese mismo año la concentración media de sargazo en el Caribe era 300 veces mayor que la registrada en cualquier otro año de la última década [146]. Desde entonces año tras año grandes cantidades de sargazo cubren las aguas turquesas del Caribe mexicano. Motivados por descubrir el origen de estas algas se estudiaron las especies de sargazo que llegaban a las playas y se descubrió que la fuente no era el Mar de los Sargazos, como se creía inicialmente, sino que provenía de lo que hoy se conoce como el Gran Cinturón de los Sargazos del Atlántico [143].

De acuerdo con algunos estudios, las masas de sargazo que llegan al Caribe mexicano están conformadas principalmente por dos especies de sargazo holopelágico *S. fluitans* y *S. natans* y se han identificado tres morfotipos para esta región que son: *S. fluitans III*, *S. natans I* y *S. natans VIII*.

Todos los morfotipos de *S. natans* se caracterizan por sus tallos lisos y flotadores esféricos. El tipo I de *S. natans* se diferencia del tipo VIII por sus láminas estrechas y la presencia de una espina distal en sus neumatóforos, **Figuras 2.7 (d), (e), (f), (g), (h), (i)**. Mientras que el morfotipo *S. fluitans III* se caracteriza por sus tallos con espinas y flotadores oblongos completamente lisos, **Figuras 2.7 (a), (b), (c)**, [128, 140].

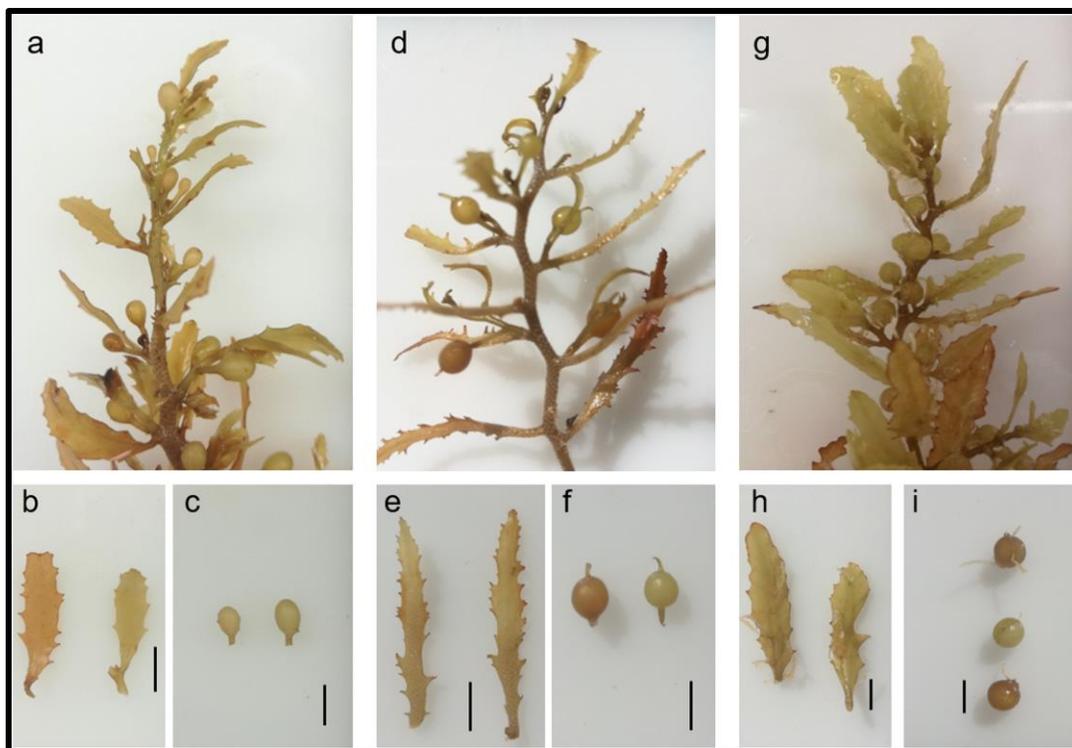


Figura 2.7 Aspecto general, láminas y flotadores de las especies pelágicas de sargazo (a-c) *S. fluitans* III, (d-e) *S. natans* I, (g-i) *S. natans* VIII. Barras de escala: 5 mm. Adaptada de Ref. [128].

La presencia de estas algas flotantes en aguas profundas puede ser positiva ya que brindan refugio y alimento a diversas especies marinas. Sin embargo, cuando estas algas llegan en grandes cantidades a aguas poco profundas y a las playas, comienzan su proceso de descomposición. Durante este proceso se generan grandes cantidades de gas tóxico, y también se crea un ambiente de poca luz y bajo en oxígeno el cual ha provocado la muerte de una gran cantidad de animales marinos. También podría afectar seriamente a los arrecifes de coral, las praderas de pastos marinos cercanos a las costas y por supuesto la salud humana. [24, 147, 148].

La afluencia masiva de sargazo al Caribe Mexicano provoca grandes impactos económicos y ecológicos. Actualmente se buscan nuevas estrategias para una mejor

gestión de estos residuos. La alta disponibilidad y la carencia de usos comerciales de estas algas han despertado el interés de la comunidad científica ya que podrían ser aprovechadas para múltiples aplicaciones [127, 133, 149].

2.11. Diseño de celda electroquímica para pruebas de rendimiento

2.11.1. Sistema de tres electrodos

Este sistema es generalmente utilizado para la evaluación electroquímica de diferentes materiales y bien, como lo indica su nombre, se hace uso de tres electrodos como se ilustra en la **Figura 2.8**. El primero es el electrodo de trabajo, este contiene el material activo. La corriente fluye entre este electrodo y el electrodo auxiliar, el cual funciona como conductor para cerrar el circuito en electrolito. El electrodo de referencia proporciona un punto de referencia estable para medir el potencial eléctrico del electrodo de trabajo. Estos tres electrodos se conectan a un potencióstato el cual controla y mantiene constante el voltaje aplicado al electrodo de trabajo, esto en relación con el electrodo de referencia, mientras mide la corriente eléctrica resultante [37].

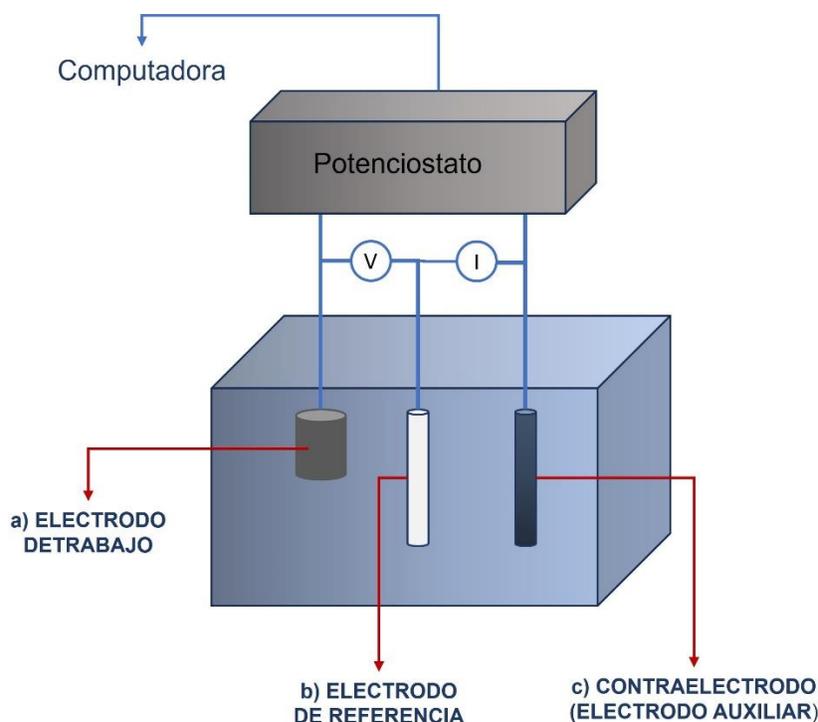


Figura 2.8 Dibujo esquemático de un sistema de tres electrodos: (a) electrodo de trabajo, (b) electrodo de referencia y (c) contraelectrodo. Adaptada de Ref. [37].

2.12. Ensayos electroquímicos

2.12.1. Voltametría cíclica

La voltametría cíclica (VC) es una técnica electroquímica ampliamente utilizada para evaluar las propiedades electroquímicas de diferentes materiales. En esta técnica se impone un campo eléctrico en los electrodos. El voltaje aplicado cambia con el tiempo, mientras esto sucede el equipo registra la corriente resultante. Cuando se llega al potencial establecido, la rampa de voltaje se invierte y esto se repite de forma cíclica. El trazo obtenido del voltaje frente a la corriente se conoce como voltamograma. La ventana potencial en la que se evalúa la actividad redox es determinada principalmente por el electrolito [150, 151].

2.12.2. Carga-descarga galvanostática

Esta técnica consiste en aplicar una corriente constante al dispositivo, mientras la corriente fluye a través del electrodo de trabajo, se obtiene el potencial correspondiente en función del tiempo.

Los resultados obtenidos mediante esta técnica, proporcionan información sobre la capacidad de almacenamiento de energía y la estabilidad del dispositivo. Además, permite evaluar cómo cambian las propiedades del dispositivo a medida que se somete a ciclos repetidos de carga y descarga, lo que es esencial para comprender la vida útil y el rendimiento a largo plazo [150-152].

2.12.3. Espectroscopia de impedancia electroquímica

La espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE) es una técnica utilizada para estudiar las propiedades de interfaces electroquímicas. Esta técnica se basa en la medida de la impedancia, que es la oposición al flujo de corriente en un sistema cuando se aplica una señal alterna de voltaje. La impedancia total de un sistema electroquímico se compone de varias contribuciones, incluyendo la resistencia, reactancia e inductancia. Estos componentes dependen de las propiedades de la interfaz electroquímica.

Los resultados de la espectroscopia de impedancia electroquímica comúnmente se expresan gráficamente como diagramas de Nyquist o Bode. El diagrama de Nyquist representa la impedancia imaginaria ($-Z_{\text{imag}}$) en función de la impedancia real (Z_{real}). Estos diagramas constan de tres regiones principales: un semicírculo a altas frecuencia, una contribución de Warburg (ángulo de 45°) a frecuencias medias y un comportamiento capacitivo de baja frecuencia, representado por una línea casi vertical [150, 153, 154].

2.13. Parámetros de evaluación para supercapacitores

2.13.1. Capacitancia

La capacitancia específica es la cantidad de carga eléctrica que un dispositivo puede almacenar por unidad de masa, por lo que es un parámetro importante para determinar la eficiencia de un SC. La capacitancia específica se puede calcular a partir de las curvas obtenidas de las pruebas de VC y CDG.

Para calcular la capacitancia específica ($F\ g^{-1}$) a partir de las curvas de VC se utiliza la siguiente ecuación [150]:

$$C_{VC} = \frac{\int I\ dV}{2vm\Delta V} \quad (3)$$

Donde, la corriente I (A) es una constante, m es la masa (g) del material activo, v la velocidad de escaneo (Vs^{-1}) y ΔV es la ventana potencial (V).

Para calcular la capacitancia específica ($F\ g^{-1}$) a partir de las curvas de CDG se utiliza la siguiente ecuación [150, 155]:

$$C_{CDG} = \frac{I \times \Delta t}{\Delta V \times m} \quad (4)$$

Donde, I es la corriente (A), Δt es el tiempo de descarga (s), ΔV es la ventana de potencial aplicada (V) y m es la masa del material activo (g).

2.13.2. *Densidad de energía*

La densidad de energía (E_D) es la cantidad total de energía que un SC puede almacenar en relación con su masa. A partir del resultado de capacitancia específica (C_{celda}) obtenida en $F\ g^{-1}$ de las curvas de CDG en un sistema de dos electrodos es posible calcular la energía específica ($Wh\ kg^{-1}$) mediante la ecuación 4 [150, 155]:

$$E_D = \frac{1}{2} C_{celda} (\Delta V)^2 \quad (5)$$

2.13.3. *Densidad de potencia*

La densidad de potencia (P_D) con la unidad $W\ kg^{-1}$ es la capacidad que tiene un dispositivo para liberar o entregar energía rápidamente en forma de potencia eléctrica y es posible calcularla a partir de la siguiente ecuación [150, 155]:

$$P_D = \frac{3600 \times E_D}{\Delta t} \quad (6)$$

CAPITULO III. METODOLOGÍA

3.1. Materiales y equipo

En la **Tabla 3.1** se presenta la lista de reactivos utilizados para la activación de los diferentes carbonos derivados de sargazo y la preparación de las suspensiones o tintas utilizadas para las pruebas electroquímicas.

Tabla 3.1 Lista de reactivos

Reactivo	Fórmula	CAS-No.	Peso molecular (g mol ⁻¹)	Marca
Hidróxido de Potasio	KOH	1310-58-3	56.11	EMSURE/ Sigma Aldrich
Carbonato de Calcio	CaCO ₃	471-34-1	100.08	Sigma Aldrich
Nafion solución de resina perfluorada	-	31175-20-9	-	Sigma Aldrich
1-metil-2-pirrolidinona	C ₅ H ₉ NO	872-50-4	99.13	Sigma Aldrich
Fluoruro de polivinilideno (PVDF 10%)	-(C ₂ H ₂ F ₂) n-	-	n x 64.03	-
Agua desionizada	H ₂ O	-	18.02	
Alcohol Isopropílico	C ₃ H ₈ O	-	60.1	Meyer
Ácido Sulfúrico	H ₂ SO ₄	7664-93-9	98,079	Hycel

En la **Tabla 3.2** se presentan los materiales y equipos utilizados.

Tabla 3.2 Lista de materiales y equipos

Materiales	Equipos
Barca de alúmina	Horno tubular
Espátulas de acero inoxidable	Estufa de aire caliente
Espátula de plástico	Parrilla de calentamiento y agitación
Tiras medidoras de pH	Limpiador ultrasónico
Vasos de precipitado	Balanza analítica
Matraz aforado	Potenciostato
Micropipeta	
Pipeta graduada	
Pipeta Pasteur	
Mortero y pistilo de ágata	
Agitadores magnéticos	
Viales de vidrio	
Tubos Eppendorf	
Tubos Falcon para centrifuga	
Toallas limpiadoras de baja pelusa	
Celda electrolítica de vidrio	
Alambre de cobre	
Electrodo de Ag/AgCl	
Electrodo de Platino	
Electrodo de carbón vitreo	

3.2. Metodología teórico experimental

3.2.1. Obtención de carbono

El sargazo utilizado para este trabajo fue recolectado en las costas de Progreso, en la península de Yucatán, México. El sargazo recolectado cumple con las

características típicas del morfotipo *S. natans* I, el cual se distingue por su tallo liso y la característica espina distal de sus flotadores, **figura 3.1 (a)**.



Figura 3.1 Identificación del morfotipo *S. natans* I en la muestra de sargazo recolectada.

Como primera parte del trabajo se realizó la selección y limpieza de sargazo. Una vez separado el sargazo de residuos no deseados, como restos de otras algas o arena (**Figura 3.2**), se llevó a un proceso de lavado. Este proceso consistió en varios enjuagues con agua potable. Posteriormente el sargazo fue puesto en agitación por al menos 1 hora, acabado el tiempo de agitación se dejó media hora en el limpiador ultrasónico, después de esto se hicieron dos lavados más con agua potable y uno último con agua destilada.



Figura 3.2 Procesos de selección de sargazo (a) Muestra recolectada de sargazo, (b) basura retirada de la muestra, (c) sargazo libre de residuos

Terminado el proceso de lavado, se quitó el exceso de agua y se dejó secar a temperatura ambiente durante una semana, removiendo el material cada 24 horas para un secado más uniforme. El siguiente paso fue triturar el sargazo con ayuda de un mortero de ágata para posteriormente pesarlo. Una vez hecho esto se tomó 1 gramo de sargazo, se colocó en un barco de alúmina y se calcinó en un horno tubular a 600 °C bajo una atmósfera de argón, durante 3 horas y finalmente se obtuvo el material CS-600. Para obtener los materiales CS-700, CS-800 y CS-900 se llevó a cabo el mismo procedimiento, solo que a diferencia del anterior la temperatura de calcinación fue a 700°C, 800°C y 900°C, respectivamente.



Figura 3.3 Barca de alúmina con sargazo triturado antes del proceso de calcinación

3.2.2 Activación química

De las muestras de carbón obtenidas anteriormente (CS-600, CS-700, CS-800 y CS-900) se tomaron 200 mg y se integraron de forma individual en una solución saturada de KOH. La solución saturada con KOH preparada para cada muestra estaba compuesta por 800 mg de KOH y 0.5 ml de agua desionizada. Cada muestra se dejó secar por al menos 12 horas a 80°C para posteriormente ser colocada en un horno tubular con atmósfera de argón a 800°C durante dos horas. El material obtenido con exceso de KOH fue lavado hasta alcanzar un pH de 7. Una vez obtenido el pH deseado se hizo un último

lavado con etanol y se retiró el exceso, finalmente la muestra se dejó secar por 24 horas en un horno de secado y fueron recolectadas para su uso posterior. Las muestras de carbono obtenidas fueron etiquetadas como CS-600A, CS-700A, CS-800A y CS-900A.

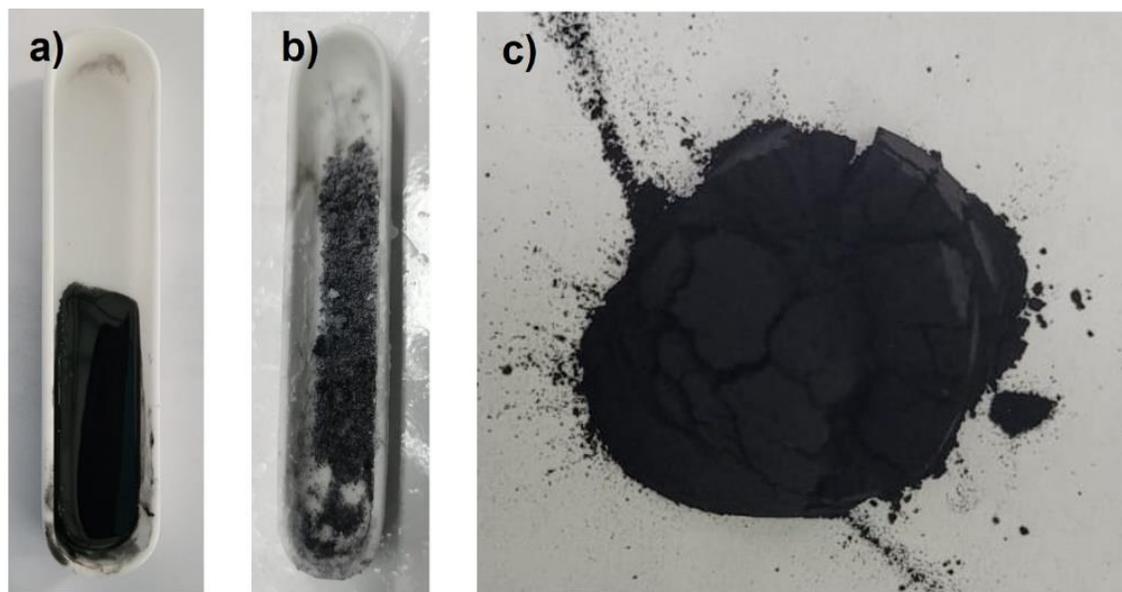


Figura 3.4 Activación química del carbono derivado de sargazo (a) mezcla de carbono con una solución saturada de KOH, (b) mezcla después de 12 horas a 80 °C y (c) carbón obtenido después del tratamiento de activación, lavado y secado.

3.2.3 Preparación del electrodo

Para la preparación de las suspensiones o tintas para el electrodo se utilizaron dos métodos distintos, para las muestras de CS-600, CS-600A, se preparó mezclando 90% en peso de material activo (carbono) con 10% de aglutinante, el aglutinante se compone de fluoruro de polivinilideno (PVDF) disuelto en N-metil-2-pirrolidona (NMP). La mezcla de material activo y aglutinante se sometió a un tratamiento de dispersión ultrasónica durante dos intervalos de 15 minutos, entre cada intervalo de dispersión la mezcla se agitó durante 30 minutos a 100 RPM. La tinta obtenida fue colocada en las proporciones

establecidas sobre un electrodo de carbón vítreo y se dejó secar por al menos 12 horas a 60°C.

El segundo método fue utilizado para las muestras CS-700 y CS-700A, CS-800 y CS-800A y CS-900 y CS-900A. Para preparar la tinta se utilizaron 20 mg de material activo, los cuales se mezclaron con 1 ml de agua desionizada, 2 ml de isopropanol y 3 μ l de Nafión, este último para mejorar la adherencia del material sobre la superficie del electrodo.

A esta mezcla igualmente se le aplicó un tratamiento de dispersión ultrasónico. Después de la adición de cada reactivo la mezcla se dejaba 15 minutos en el limpiador ultrasónico para obtener una mejor dispersión del material. Una vez obtenida la tinta o suspensión, ésta se colocó sobre un electrodo de carbón vítreo y debido a la naturaleza más fluida de la tinta este proceso se tuvo que realizar en 8 pasos, cada paso consistía en añadir una gota, con la cantidad de material indicada para al final tener 500 μ g de material sobre la superficie del electrodo, y dejar secar bajo un flujo de aire a temperatura ambiente. Terminado el último paso, el electrodo con el material activo se dejaba secar por al menos 12 horas a temperatura ambiente.



Figura 3.5 Suspensión preparada con IPA y Nafión de la muestra CS-700A

3.2.4 Sistema electroquímico

Se preparó una celda electroquímica con una configuración de tres electrodos, un electrodo de referencia de Plata/Cloruro de Plata (Ag/AgCl), un electrodo auxiliar de platino y un electrodo de carbón vítreo con el material activo como electrodo de trabajo. Como electrolito se preparó una solución 6M de KOH. Una vez montada la celda y colocado el electrolito, se introduce un flujo de nitrógeno (N_2) durante 15 minutos, esto para desplazar el oxígeno dentro del ambiente de la celda y evitar interferencias en los procesos electroquímicos. Terminado el tiempo de burbujeo con N_2 , se da inicio a las diferentes pruebas electroquímicas.

CAPITULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Técnicas de análisis físico

4.1.1. Difracción de Rayos X (XRD)

A continuación, se muestran los datos de difracción de rayos x obtenidos de las diferentes muestras de carbono derivado de sargazo. En la **Figura 4.1 (a)**, se observan los difractogramas de las muestras calcinadas a diferentes temperaturas. Estos patrones de DRX exhiben características de un material más desordenado, cerca de $2\theta = 25^\circ$ se observa sutilmente el pico que corresponde al plano (002) del grafito, el cual es característico de un carbón amorfo [157, 158]. Los picos que se observan cerca de $\sim 31^\circ$ y $\sim 45^\circ$ (2θ) posiblemente corresponden a compuestos de calcio y magnesio [COD No. 1011236 CaS y No. 9006785 MgO].

Una vez realizado el tratamiento activación con hidróxido de potasio (KOH) se obtienen picos de difracción más estrechos e intensos, **Figura 4.1 (b)**. Estas características pueden indicar una mejora en el ordenamiento de la estructura cristalina, lo que señala la obtención de materiales con mayor cristalinidad [159]. Los picos que se observan en estas muestras corresponden a los picos característicos del carbonato de calcio (**Figura 4.2**), de acuerdo con el patrón estándar (JCPDS 47-1743) estos picos se encuentran en los ángulos 2θ que corresponden a los planos cristalinos (012), (104), (006), (110), (113), (202), (024), (116), (122) del CaCO_3 [160, 161].

La presencia de compuestos como el carbonato de calcio se puede deber al origen del material. El carbono utilizado en este trabajo proviene de un alga marina, por lo que no es de extrañar la presencia de este compuesto en cualquiera de sus formas

polimórficas. Esta sal inorgánica puede provenir de una gran variedad de moluscos con concha, piedra caliza, coccolitóforos, cenizas vegetales, tizas, mármol, entre otros [162].

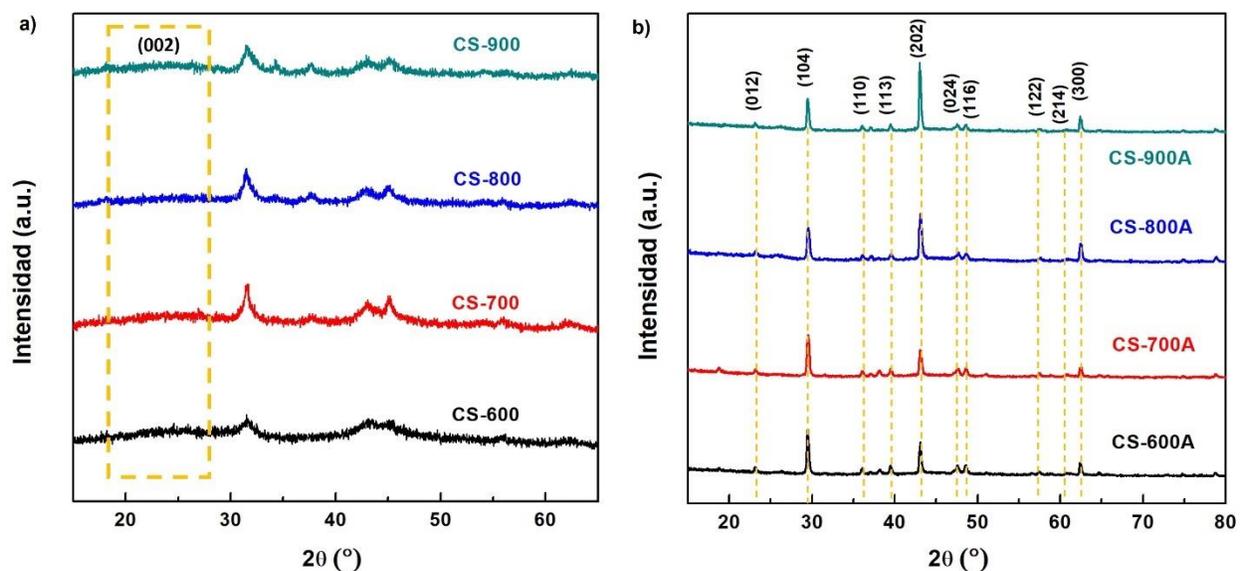


Figura 4.1 Difractograma de rayos X de las muestras (a) sin activar y (b) activadas con KOH

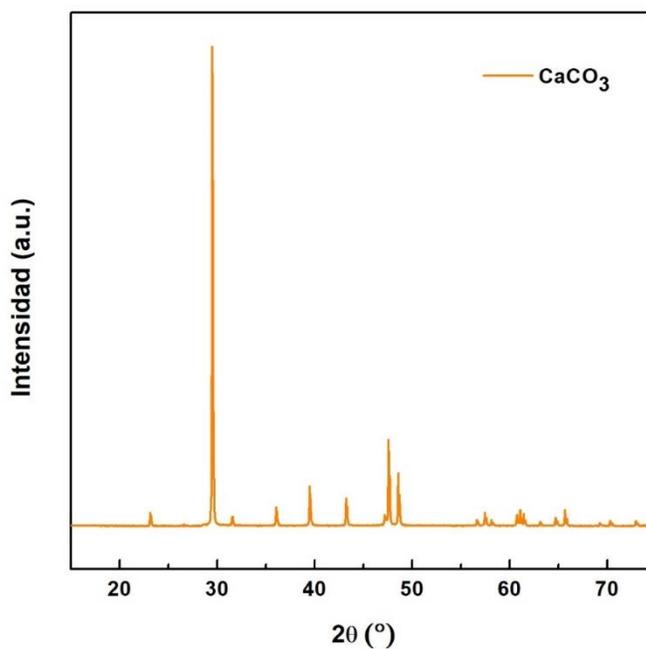


Figura 4.2 Difractograma de rayos X del carbonato de calcio (CaCO₃)

4.1.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

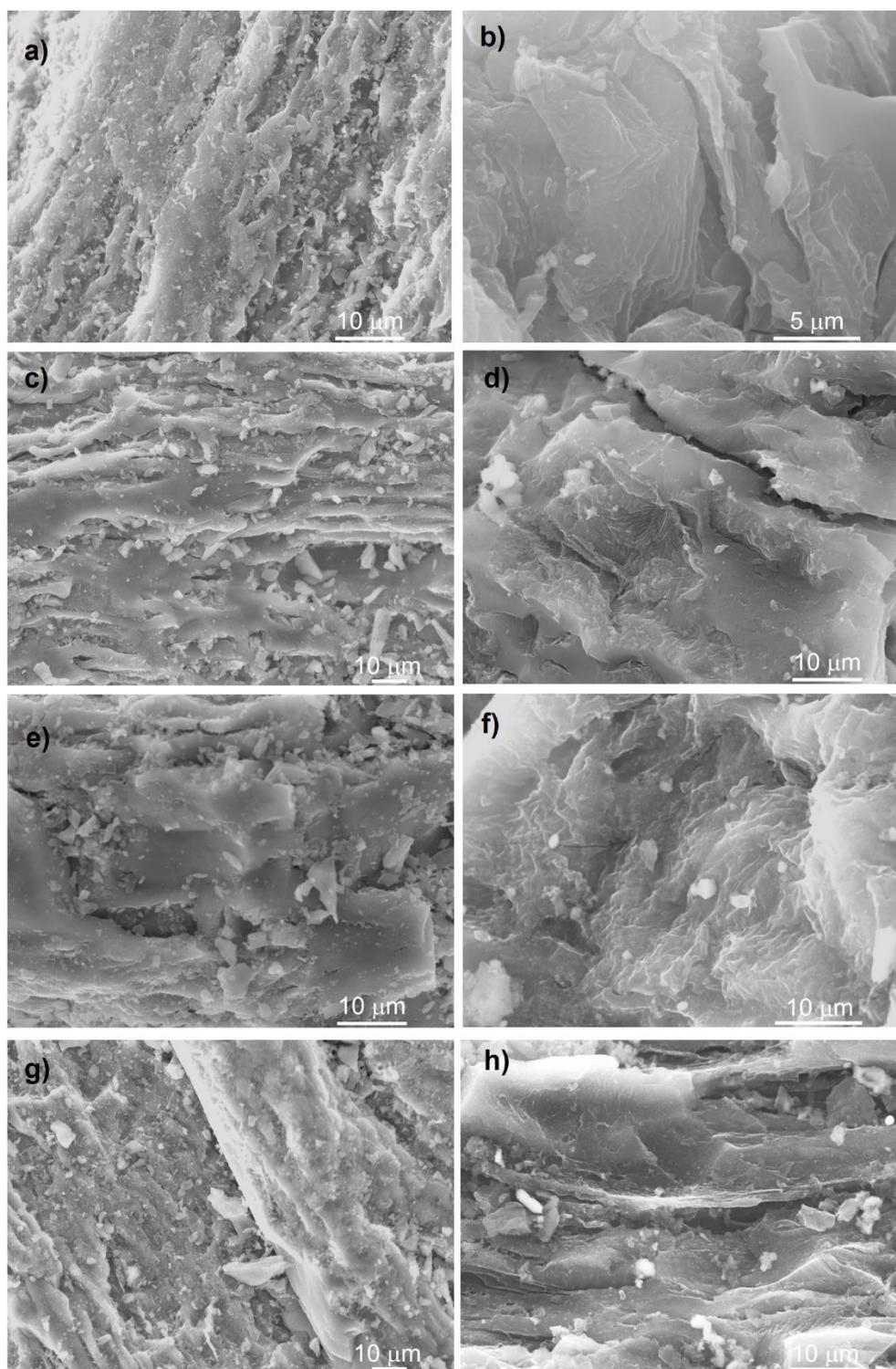


Figura 4.3 Micrografía SEM (a) CS-600, (b) CS-600A, (c) CS-700, (d) CS-700A, (e) CS-800, (f) CS-800A, (g) CS-900, y (h) CS-900A.

En la **Figura 4.3** se muestran las micrografías obtenidas por SEM de los carbonos derivados de sargazo, activados y sin activar. Estas imágenes confirman que después de la activación química hay cambios estructurales en todos los materiales. En las **Figuras 4.3 (a), (c), (e) y (g)** que corresponden a las muestras sin activar, se puede observar que la superficie de los materiales es rugosa, sin la presencia de poros o grietas profundas y también se observa una gran cantidad de pequeñas partículas.

Después de la activación química con KOH, las muestras presentaron una estructura más estratificada y rugosa. En las **figuras 4.3 (b), (d), (f) y (h)** se puede observar una superficie formada por una gran cantidad de láminas u hojas y una mayor cantidad de poros. Esto podría indicar que, en comparación con las muestras sin activar, los carbonos activados podrían tener un área superficial mejorada, con una mayor área de superficie y volumen de poro.

4.1.3. Espectroscopia de Rayos X de Energía Dispersiva (EDS)

Mediante esta técnica se realizó el análisis elemental de todas las muestras de carbón derivado de sargazo. En la **Tabla 4.1** se presenta un resumen de los resultados obtenidos de la cuantificación química elemental de cada muestra de carbono. Al ser materiales derivados de biomasa, se componen de una gran cantidad de elementos, pero principalmente de carbono, oxígeno, magnesio, azufre y calcio.

Tabla 4.1 Cuantificación química elemental de las diferentes muestras de carbono

Muestra	Porcentaje atómico (%)											
	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Sr	Cl
CS-600	71.92	16.18	0.16	2.66	0.21	0.03	0.08	2.05	0.11	6.24	0.35	-
CS-600A	85.08	11.65	-	1.92	0.11	0	-	0.07	-	0.99	0.19	-
CS-700	68.03	19.27	1.36	2.27	0.12	0	0	2.8	0.76	5.19	0.22	-
CS-700A	93.23	5.92	-	0.4	-	0	-	0.08	-	0.3	0.02	-
CS-800	63.89	23.61	1.6	2.69	0.09	0	0	2.27	0.53	5.12	0.2	-
CS-800A	94.47	4.89	-	0.15	0.03	0.01	-	0.2	-	0.17		0.08
CS-900	54.01	32.35	0.14	2.47	0.06	0.01	0	1.93	0.13	8.7	0.19	-
CS-900A	92.58	6.68	-	0.31	0.05	0.03	-	0.08	-	0.22	0.02	0.03

En la **Figura 4.4 (a)** se muestran los espectros obtenidos por EDS para la muestra CS-600, donde se observa una destacable presencia de calcio, azufre, magnesio y oxígeno. Después de la activación la muestra CS-600A, **Figura 4.4 (b)**, muestra una intensificación de la señal de carbono y una disminución en el resto de los elementos.

De acuerdo con la cuantificación química elemental (**Tabla 4.1**), el porcentaje atómico del carbono tuvo un aumento después de la activación, pasó de un 71.92% a 85.08%. Caso contrario sucede con el resto de los elementos cuyo porcentaje atómico se vio disminuido después de la activación química. En el caso del oxígeno, a pesar de que su porcentaje se vio disminuido después de la activación, este sigue teniendo un gran aporte en la composición del material (11.65%). Es importante hacer énfasis sobre la presencia del oxígeno y otros elementos ya que podrían contribuir a las reacciones pseudocapacitivas [163].

Para determinar la distribución de estos heteroátomos se realizó un mapeo elemental. En la **Figura 4.5** se presenta la micrografía de una muestra representativa del carbono CS-600. Las **Figuras 4.5 (b), (c), (d), (e)**. representan el mapeo de oxígeno, magnesio, azufre y calcio, respectivamente. Se observa una distribución homogénea de

todos los elementos. Después de la activación se observa una gran disminución de todos los elementos, especialmente de magnesio como se observa en la **Figura 4.6**. En la micrografía se señala una partícula, la cual, parece estar compuesta principalmente de calcio.

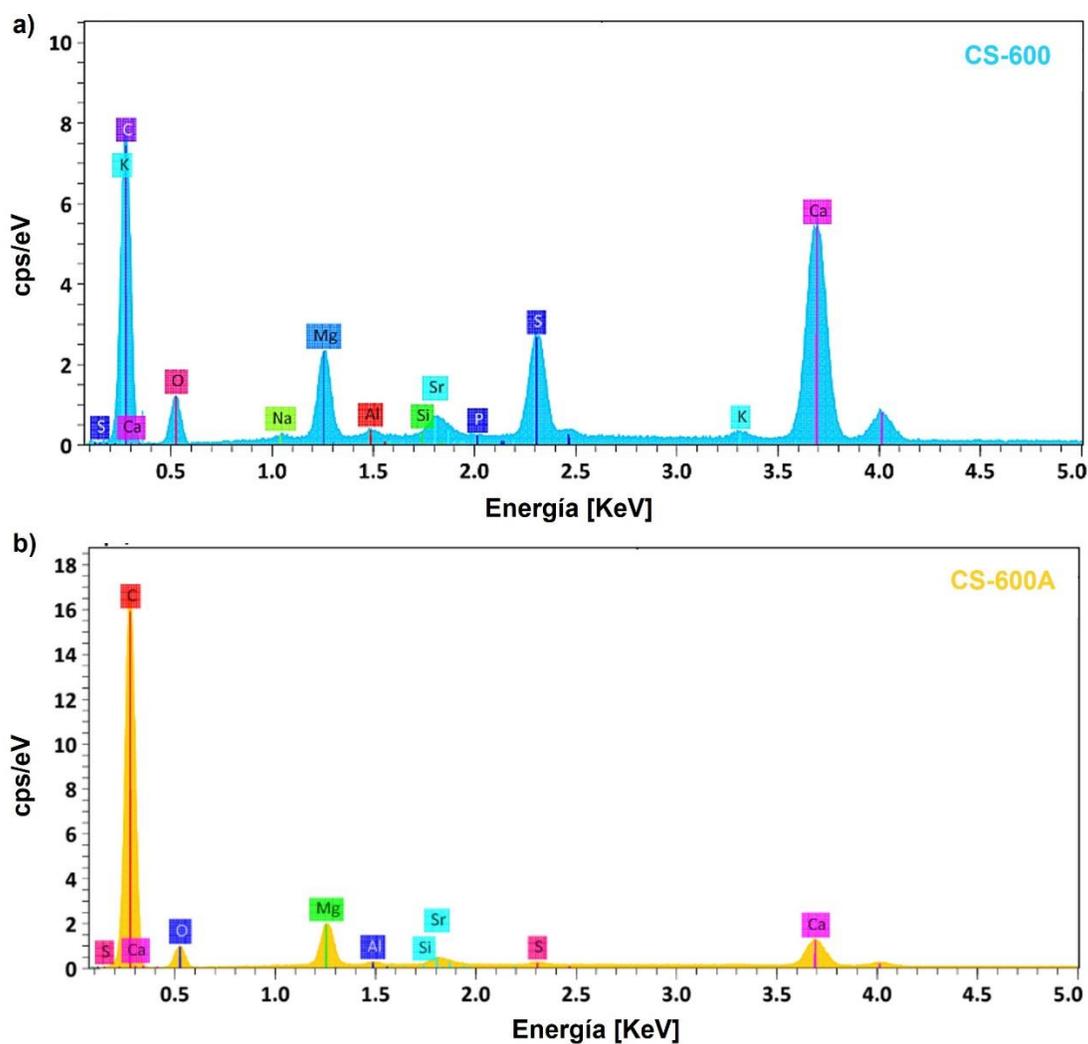


Figura 4.4 Análisis elemental por EDS (a) muestras CS-600 y (b) muestra CS-600A

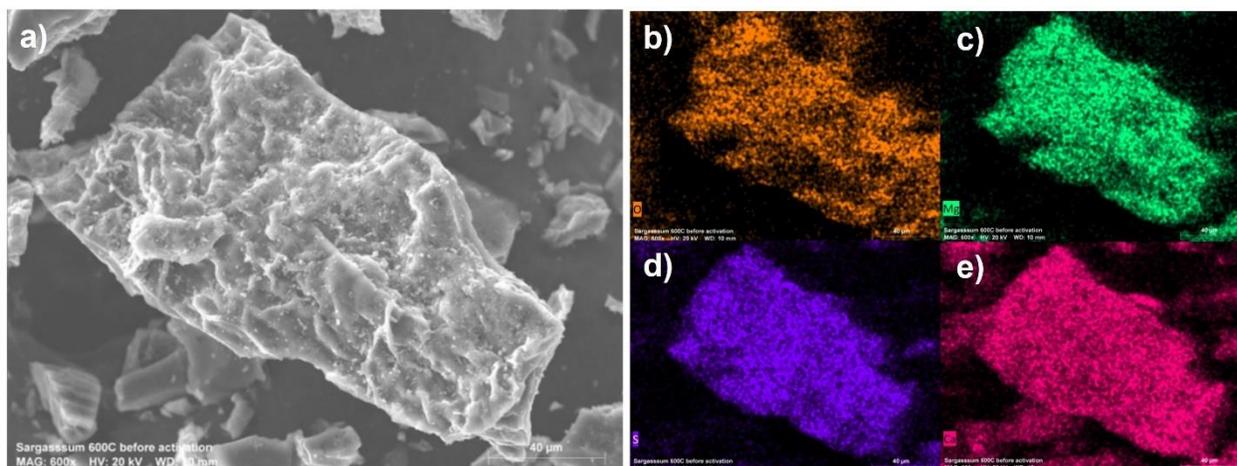


Figura 4.5 Mapeo elemental de la muestra CS-600 (a) micrografía representativa, (b) detección de oxígeno, (c) detección de magnesio, (d) detección de azufre y (e) detección de calcio

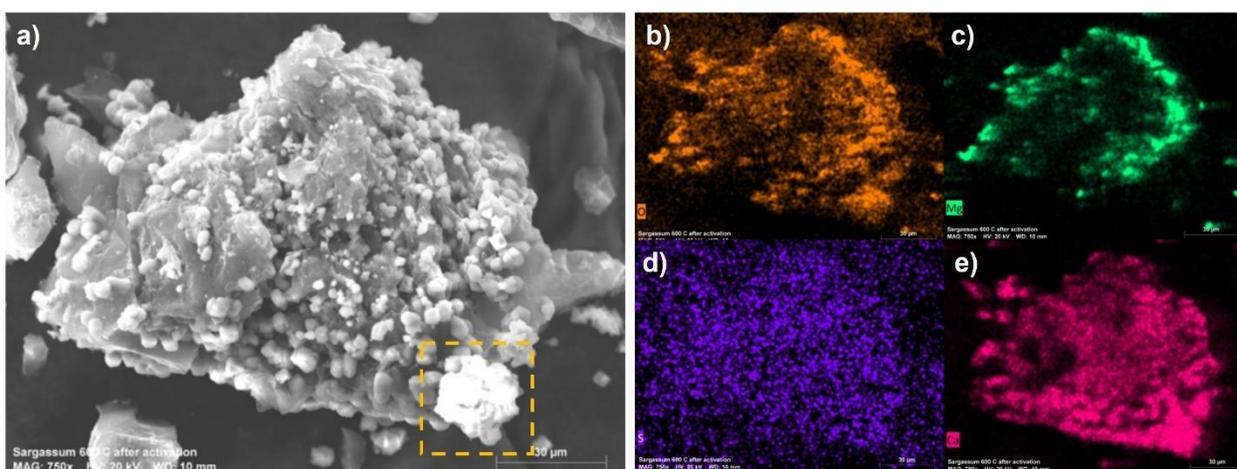


Figura 4.6 Mapeo elemental de la muestra CS-600A (a) micrografía representativa, (b) detección de oxígeno, (c) detección de magnesio, (d) detección de azufre y (e) detección de calcio

En la **Figura 4.7 a)** se pueden observar las señales características de los diferentes elementos presentes en la muestra CS-700. Los elementos que presentan señales de mayor intensidad son carbono, calcio, magnesio, sodio y oxígeno. De acuerdo con el análisis químico elemental los elementos con mayor porcentaje atómico, después del carbono, son el oxígeno y el calcio con un 19.27% y 5.19%, respectivamente.

Después de la activación con KOH, la intensidad de las señales de calcio, sodio y azufre disminuyeron drásticamente, **Figura 4.7 (b)**. A pesar de que en la imagen no es apreciable, también hubo una disminución en los porcentajes de oxígeno y magnesio, que pasaron de 19.27% y 2.27% a un 5.92% y 0.4%, respectivamente. Sin embargo, el aporte de oxígeno aún sigue siendo considerable.

Para estas muestras se realizó un mapeo elemental, en el que se puede observar cómo cambia la distribución de los heteroátomos sobre la superficie del material después de la activación. En la **Figura 4.8** se puede apreciar una gran homogeneidad de los elementos en el material, pero una vez sometido al tratamiento térmico el porcentaje de elementos disminuye y esto se puede observar en los resultados de mapeo de la muestra CS-700A (**Figura 4.9**), donde la distribución de elementos como magnesio y calcio ya no es tan uniforme, **Figura 4.9 (c) y (e)**.

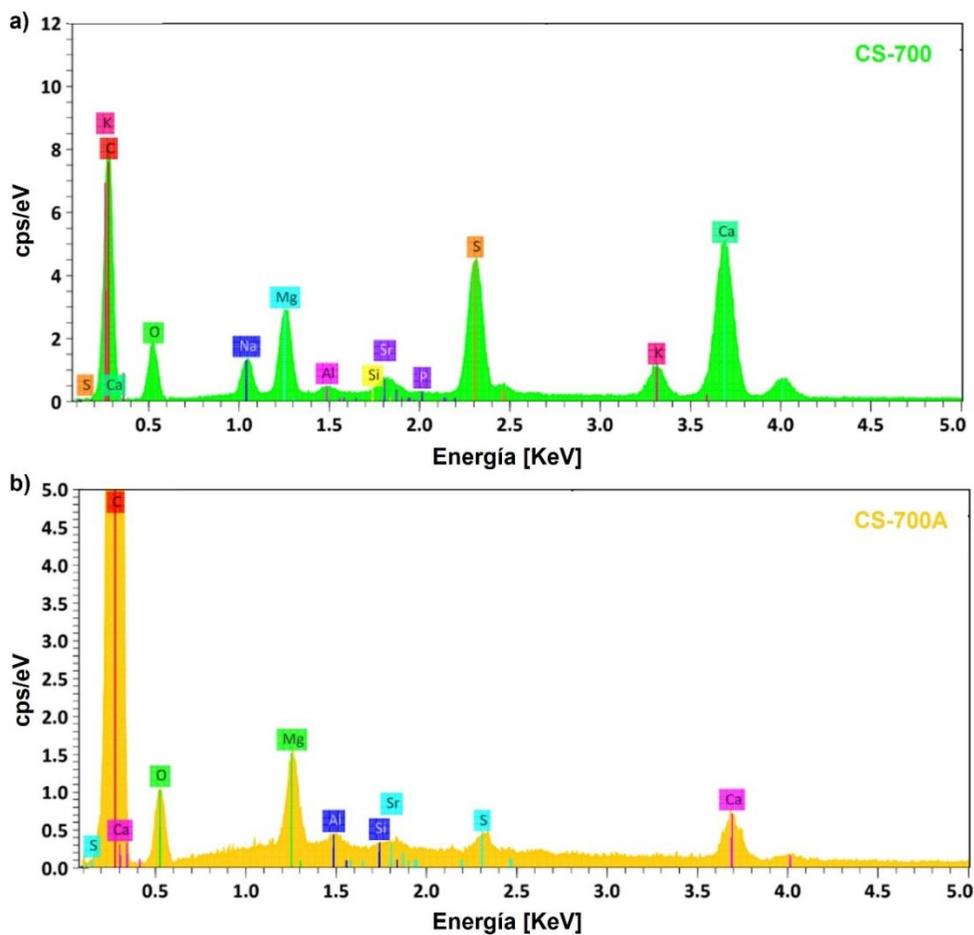


Figura 4.7 Análisis elemental por EDS (a) muestras CS-700 y (b) muestra CS-700A

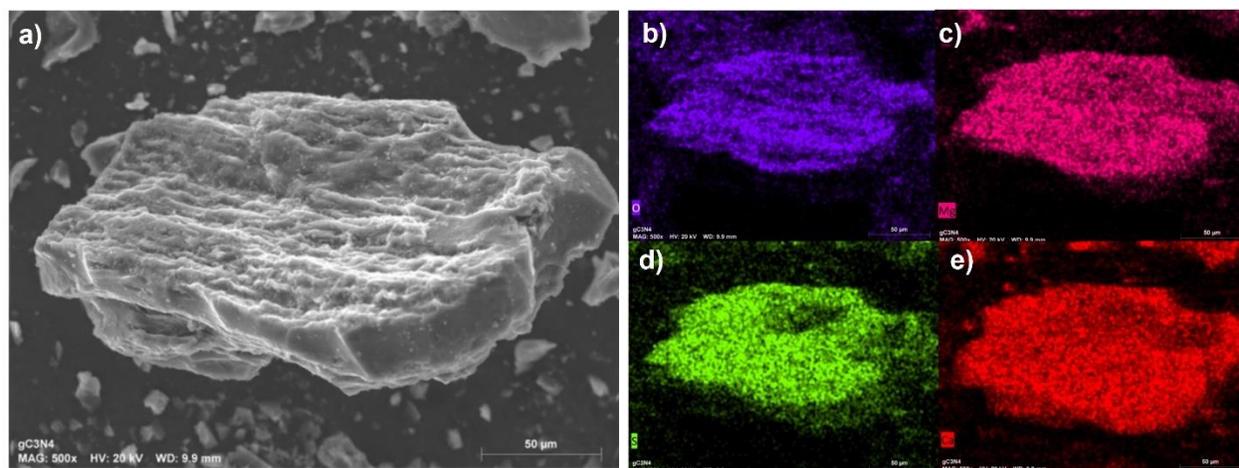


Figura 4.8 Mapeo elemental de la muestra CS-700 (a) micrografía representativa, (b) detección de oxígeno, (c) detección de magnesio, (d) detección de azufre y (e) detección de calcio

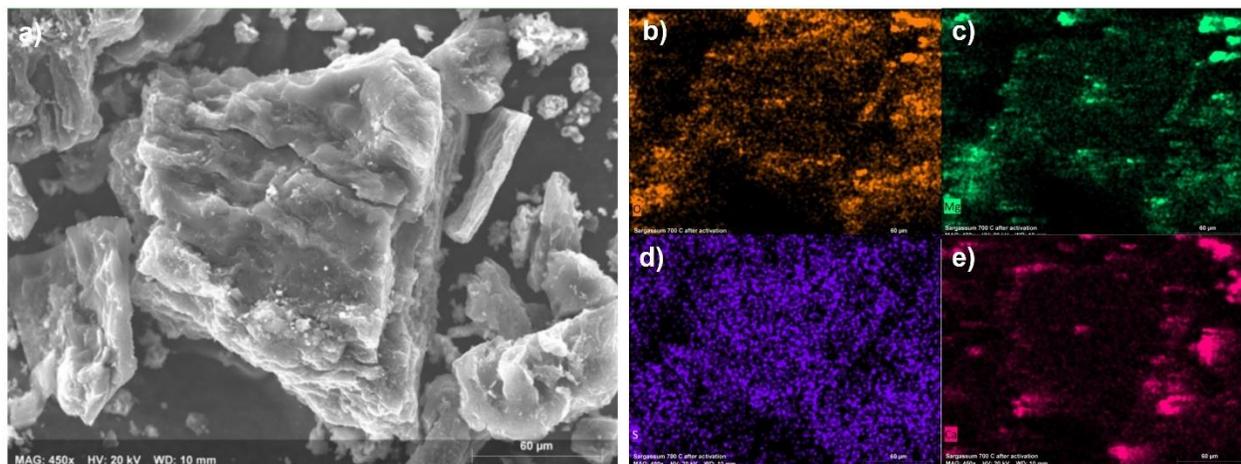


Figura 4.9 Mapeo elemental de la muestra CS-700A (a) micrografía representativa, (b) detección de oxígeno, (c) detección de magnesio, (d) detección de azufre y (e) detección de calcio

En la **Figura 4.10 (a)**, se muestran los picos obtenidos por EDS para la muestra CS-800, donde destaca la presencia de calcio, azufre, magnesio, sodio y oxígeno. Después de la activación la muestra CS-800A, **Figura 4.10 (b)**, muestra una intensificación de la señal de carbono y una disminución en el resto de los elementos.

De acuerdo con la cuantificación química elemental (**Tabla 4.1**), el porcentaje atómico del carbono tuvo un aumento después de la activación, pasó de un 63.89% a 94.47%. Caso contrario sucede con el resto de los elementos cuyo porcentaje atómico se vio disminuido después de la activación química. En el caso del oxígeno, a pesar de que su porcentaje disminuyó después de la activación, este sigue siendo uno de los elementos con mayor aporte en la composición del material (4.89%).

Para determinar la distribución de los heteroátomos se realizó un mapeo elemental. En la **Figura 4.11 (a)**, se presenta la micrografía de una muestra

representativa del carbono CS-800. Las **Figuras 4.11 (b), (c), (d) y (e)**, representan el mapeo de oxígeno, magnesio, azufre y calcio, respectivamente. En esta figura se puede apreciar una distribución muy homogénea de los elementos presentes en el material. Después de la activación se observa una menor presencia de calcio, magnesio y oxígeno **figura 4.12 (b), (c), (d) y (e)**.

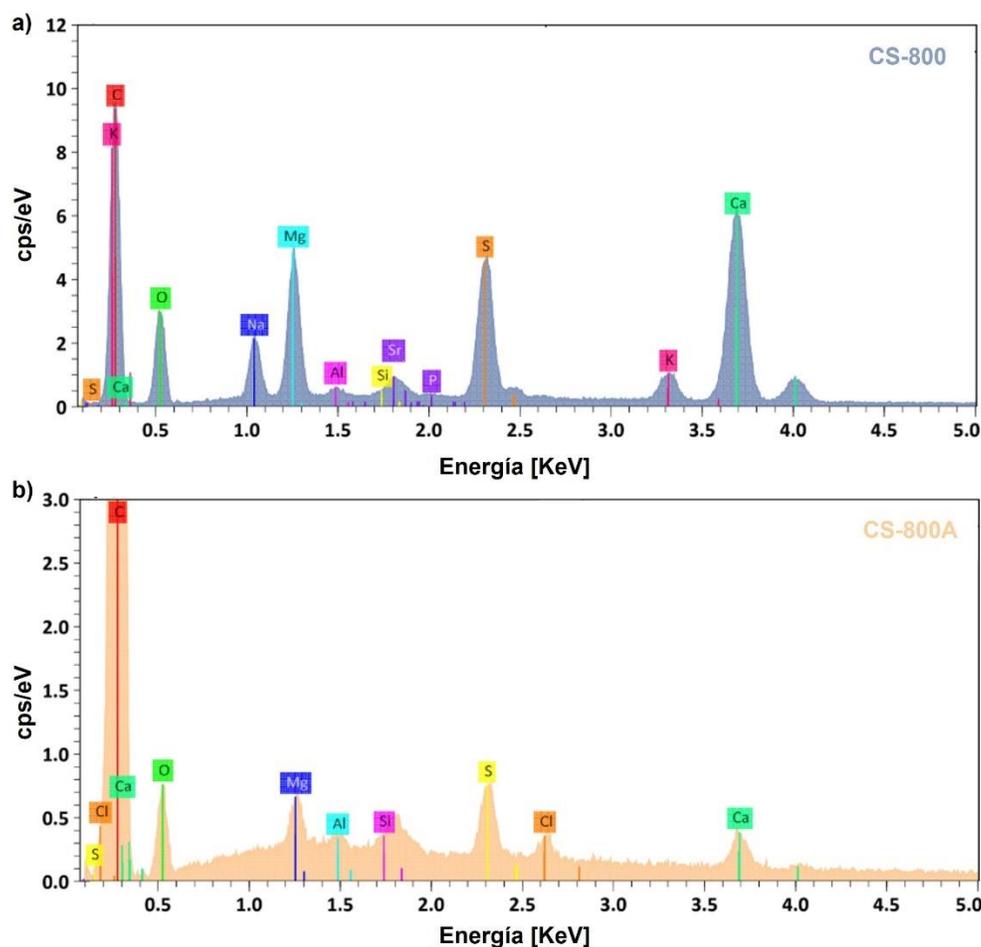


Figura 4.10 Análisis elemental por EDS (a) muestras CS-800 y (b) muestra CS-800A

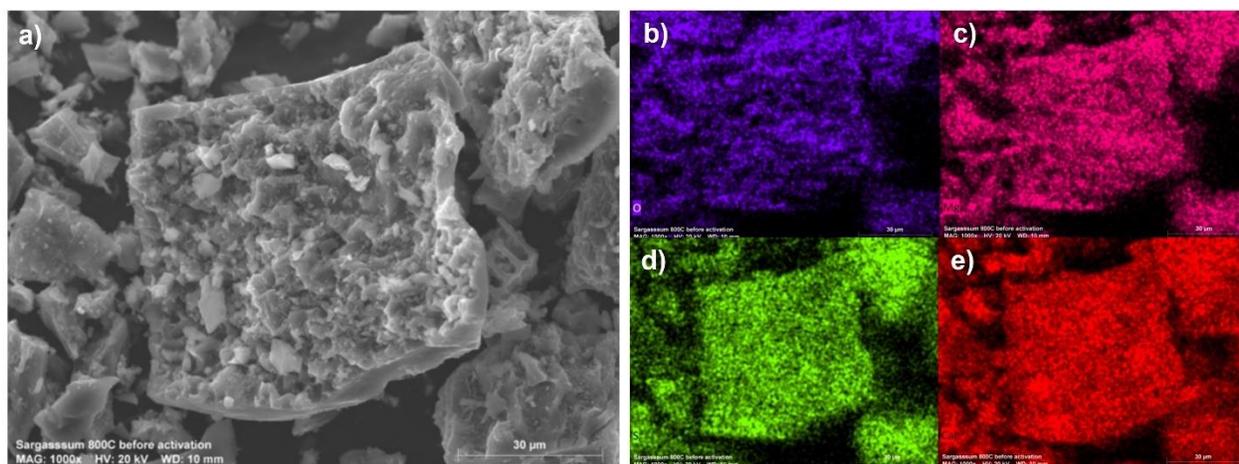


Figura 4.11 Mapeo elemental de la muestra CS-800 (a) micrografía representativa, (b) detección de oxígeno, (c) detección de magnesio, (d) detección de azufre, y (e) detección de calcio.

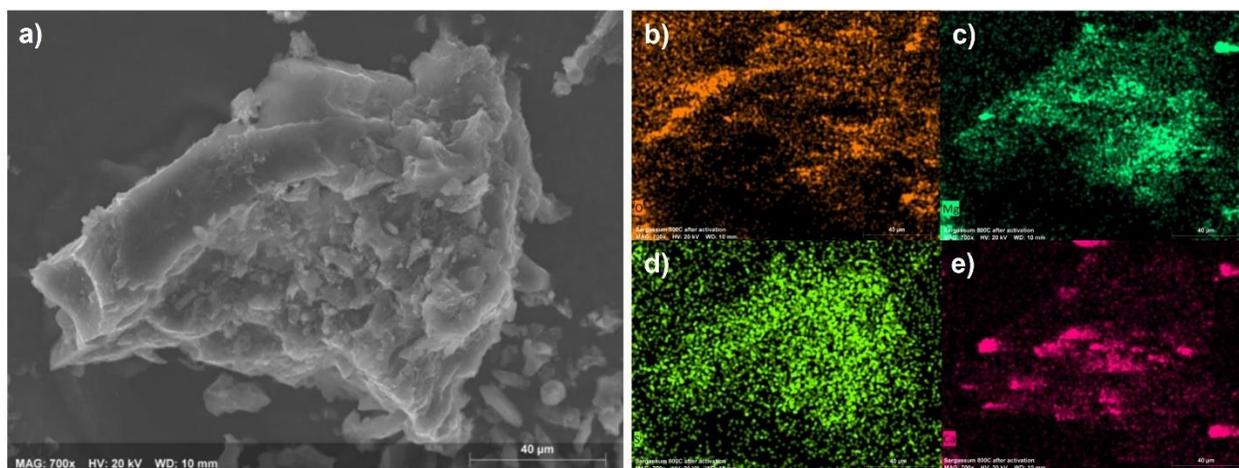


Figura 4.12 Mapeo elemental de la muestra CS-800A (a) micrografía representativa, (b) detección de oxígeno, (c) detección de magnesio, (d) detección de azufre y (e) detección de calcio.

En la **Figura 4.13 (a)**, se pueden observar las señales características de los diferentes elementos presentes en la muestra CS-900. Los elementos que presentan señales de mayor intensidad son carbono, calcio, azufre, magnesio y oxígeno. De

acuerdo con el análisis químico elemental los elementos con mayor porcentaje atómico, después del carbono, son el oxígeno y el calcio con un 32.35% y 8.7%, respectivamente.

Después de la activación con KOH, la intensidad de las señales de calcio, azufre, magnesio y oxígeno disminuyeron drásticamente, **Figura 4.13 (b)**. El porcentaje atómico del oxígeno se redujo a 6.68%, que sigue representando un gran aporte a la composición del material.

Para estas muestras se realizó un mapeo elemental, en el que se puede observar cómo cambia la distribución de los heteroátomos sobre la superficie del material después de la activación. En la **Figura 4.14 (b) y (e)**, se puede apreciar una gran homogeneidad del oxígeno y el calcio en el material, pero una vez sometido al tratamiento térmico el porcentaje de estos elementos disminuye, lo cual se puede observar en los resultados del mapeo de la muestra CS-900A, donde la distribución de oxígeno ya no es tan uniforme y se observa muy poca presencia de elementos como calcio y magnesio, **Figura 4.15 (c) y (e)**.

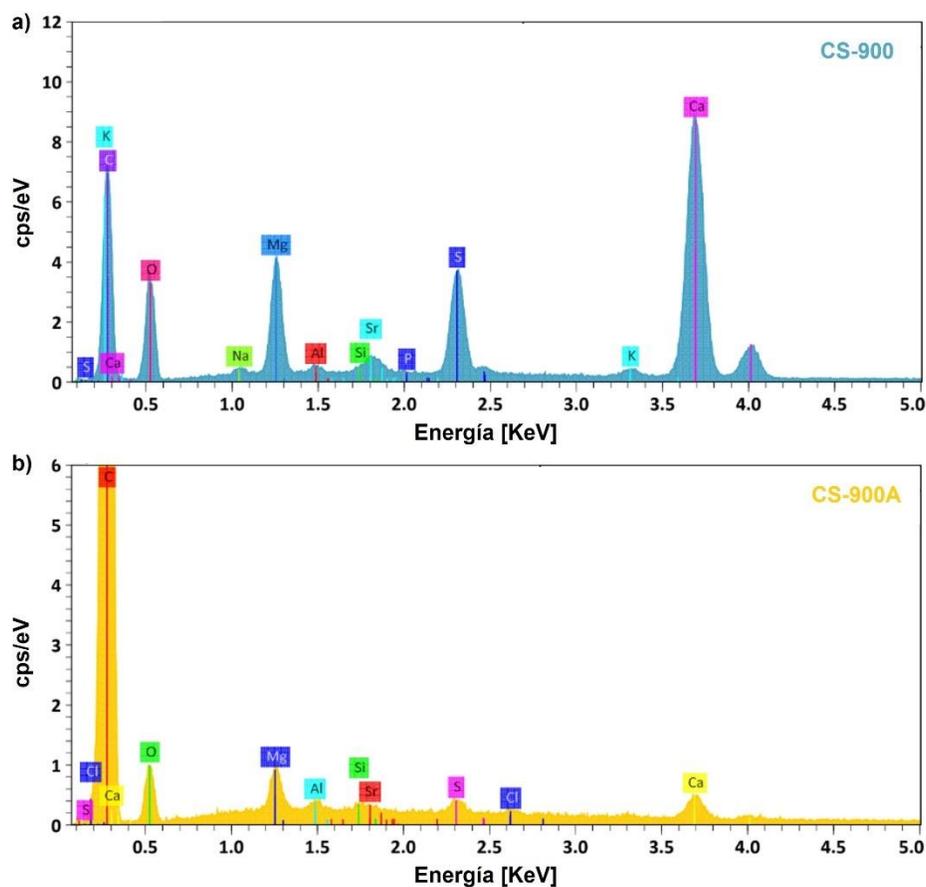


Figura 4.13 Análisis elemental por EDS (a) muestras CS-900 y (b) muestra CS-900A

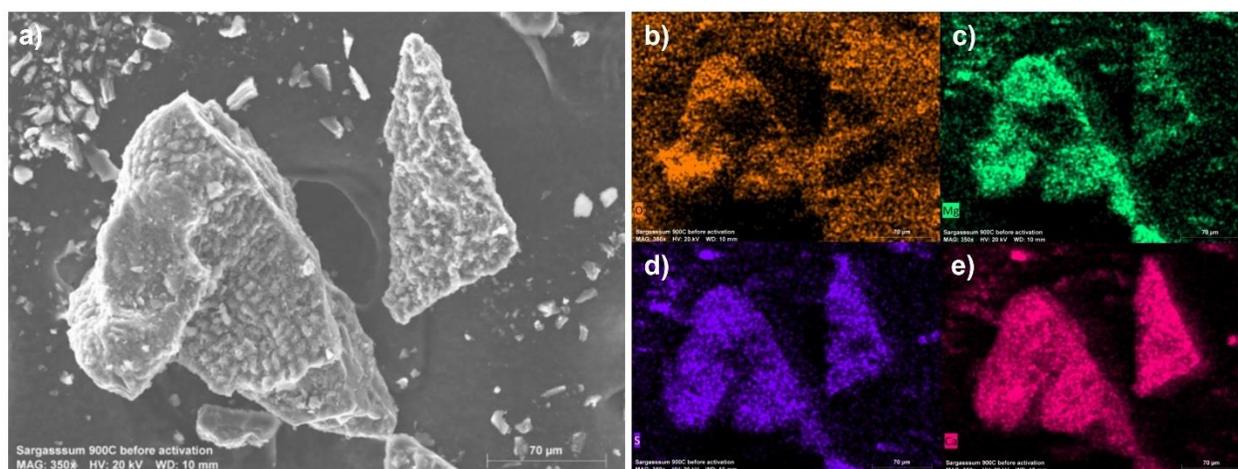


Figura 4.14 Mapeo elemental de la muestra CS-900 (a) micrografía representativa, (b) detección de oxígeno, (c) detección de magnesio, (d) detección de azufre y (e) detección de calcio.

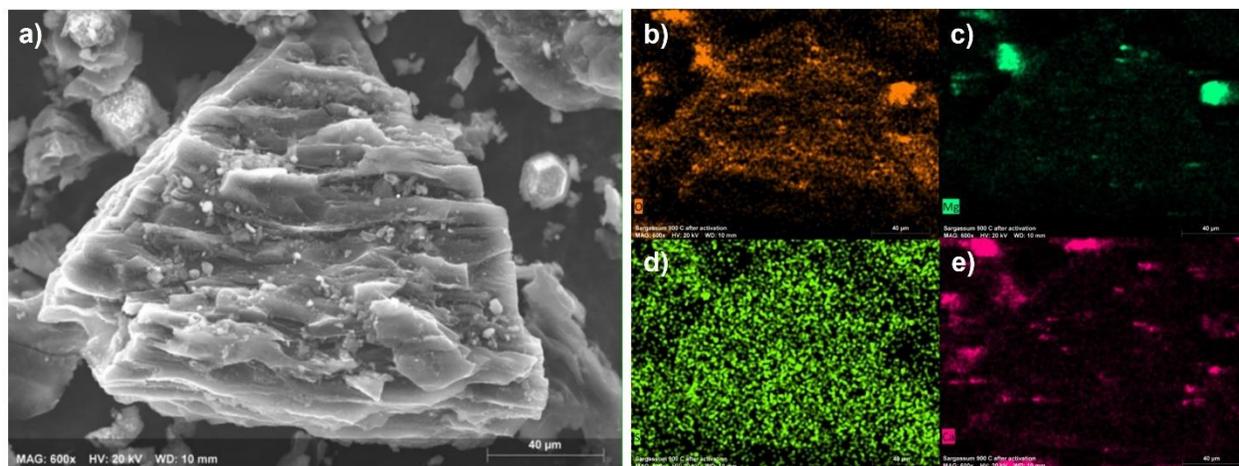


Figura 4.15 Mapeo elemental de la muestra CS-900A (a) micrografía representativa, (b) detección de oxígeno, (c) detección de magnesio, (d) detección de azufre y (e) detección de calcio

4.1.4. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

A partir del análisis de los espectros FT-IR se pueden evaluar las propiedades de superficie de cada una de las muestras de carbono, activado y sin activar. En la **Figura 4.16** se observan cuatro picos, la banda cercana a 1440 cm^{-1} se puede asignar a vibraciones del grupo funcional hidroxilo (O–H), mientras que las bandas que se encuentran alrededor de 1100 cm^{-1} , 855 cm^{-1} y 615 cm^{-1} , corresponden a las vibraciones de estiramiento de C–O, de peróxido (C–O–O) y de C–H (codo CH alquino), respectivamente [164, 165].

Comparando la muestra CS-900 con la muestra CS-600 se puede observar una reducción en la intensidad de los picos correspondientes a los grupos que contienen oxígeno. Esto se puede atribuir a que a altas temperaturas se obtiene un alto grado de grafitización y a la vez una reducción de grupos funcionales con contenido de oxígeno [166].

En la **Figura 4.17**, correspondiente a las muestras activadas, la banda 1397 cm^{-1} se puede asignar a la flexión del enlace C–O–H, el estiramiento C–O–O se observó alrededor de 872 cm^{-1} y finalmente en 707 cm^{-1} se observa una flexión fuera de plano correspondiente al enlace O–H [164, 167].

Como se observa en ambas figuras, los espectros de las diferentes muestras tienen pocas bandas de absorción lo cual indica que estas muestras tienen menos grupos funcionales. Las bandas que se observan se encuentran dentro de la región conocida como “huella dactilar” de materiales de carbono y calcita. Por lo tanto, podríamos asignar los grupos específicamente presentes en las muestras de sargazo carbonizado (activado y sin activado).

Las muestras activadas muestran dos picos principales, uno alrededor de los 1400 cm^{-1} que usualmente es más intenso y otro entre los 880 cm^{-1} y 860 cm^{-1} con una intensidad más débil y estrecha, lo que podría confirmar la presencia del ion carbonato [163], que son parte de algunas sales inorgánicas como el carbonato de calcio. Otros trabajos han reportado espectros FT-IR muy similares, donde se indica que los polimorfos del CaCO_3 como calcita y vaterita, muestran bandas de absorción características en la región $1850\text{-}650\text{ cm}^{-1}$ [168-170].

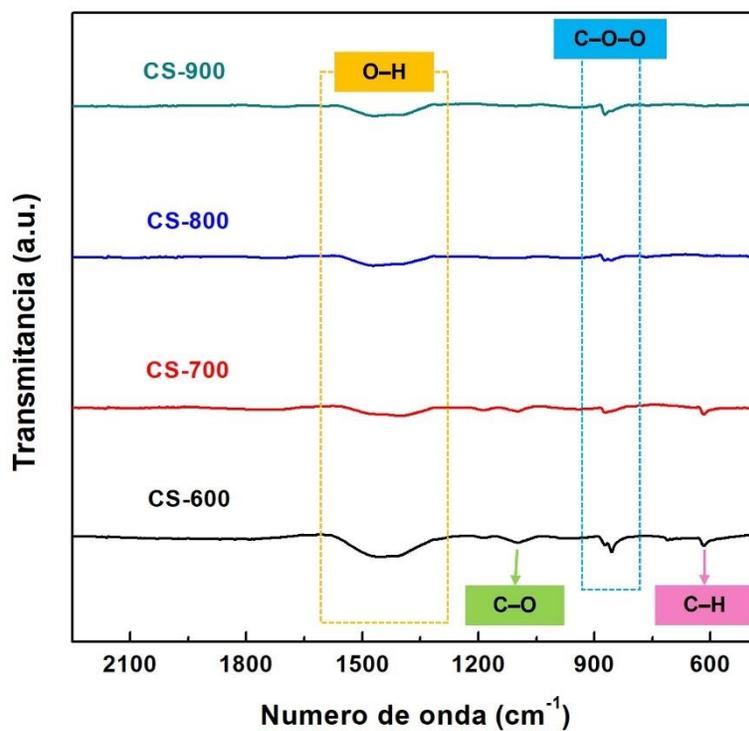


Figura 4.16 Espectros FTIR de las muestras de carbono sin activar.

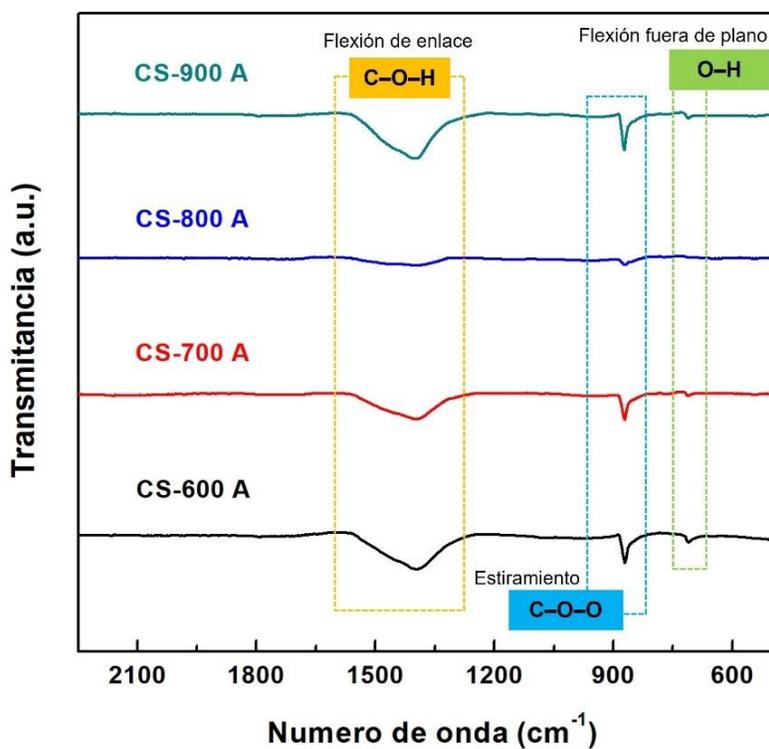


Figura 4.17 Espectros FTIR de las muestras de carbono activadas con KOH

4.1.5. Análisis de Área Superficial Específica (BET)

El análisis de área superficial específica se llevó a cabo mediante el método Brunauer-Emmett-Teller (BET). En la **Figura 4.18** se muestran las isotermas de adsorción-desorción de nitrógeno de las muestras de carbón de sargazo activado. El isoterma de la muestra CS-600A es un Tipo I con una meseta definida y cóncava al eje p/p_0 , este tipo de isoterma puede indicar que este material tiene una alta microporosidad [171].

Las muestras CS-700A, CS-800A y CS-900A presentan un isoterma de tipo IV con una pendiente alta, lo que indica una distribución de tamaños de mesoporos [172]. También se puede observar que a una baja presión relativa hay una gran adsorción, lo que se suele asociar a la existencia de una gran cantidad de microporos. Igualmente, todas las muestras presentan un ciclo de histéresis H3 a una alta presión relativa, lo cual es característico de materiales mesoporosos. Por lo tanto, es posible que en estas muestras exista una distribución de microporos y mesoporos [173-176].

El área superficial estimada, el volumen de poro y el tamaño de poro de las muestras preparadas se presentan en la **Tabla 4.2**, donde se puede apreciar un gran aumento de área superficial y volumen de poro como resultado de la activación con KOH. Se observa como la muestra CS-600 pasa de un área superficial BET de 21.5 a 1504 m^2g^{-1} y un volumen de poro de 0.02 a 0.819 cm^3g^{-1} después de la activación. El mayor aumento de superficie BET se dio en la muestra de sargazo carbonizado a 700 °C después de la activación con KOH. El área superficial para la muestra CS-700A se estima en 1510 m^2g^{-1} , un valor alrededor de 470 veces mayor al obtenido con la muestra sin

activar, la cual fue de apenas $3.2 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$. El volumen de poro para esta misma muestra pasó de 0.01 a $0.95 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$.

Una vez sometidas al tratamiento de activación con KOH las muestras CS-800 y CS-900, pasaron de una superficie BET de 27.77 a $1434 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ y de 6.07 a $1308 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$, respectivamente. En el volumen de poro también se puede observar un gran aumento en ambas muestras. El sargazo carbonizado a $800 \text{ }^\circ\text{C}$ exhibe un volumen de poro de $0.03 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$. Después de la activación, este aumenta a un valor estimado de $0.973 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$. Por otro lado, la muestra carbonizada a $900 \text{ }^\circ\text{C}$ pasa de un volumen de poro de 0.0153 a $0.868 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ una vez aplicado el tratamiento de activación con KOH.

También se puede observar que en todas las muestras se presenta una disminución del tamaño de poro. Esto es más evidente en las muestras CS-700A y CS-900A. El tamaño de poro de las muestras CS-700 y CS-900 se encuentra por arriba de los 100 nm y una vez realizada la activación con KOH el tamaño de poro se reduce a valores cercanos a 25 nm .

De acuerdo con lo antes analizado, no se puede hacer una relación entre la temperatura de calcinación y el aumento de área superficial o el aumento en el volumen de poro, pero si es claro el efecto que tiene la activación con KOH sobre la superficie de estos materiales. Anteriormente ya se han realizado algunos reportes donde se discute el efecto de la activación con KOH sobre la superficie de materiales de carbono [123].

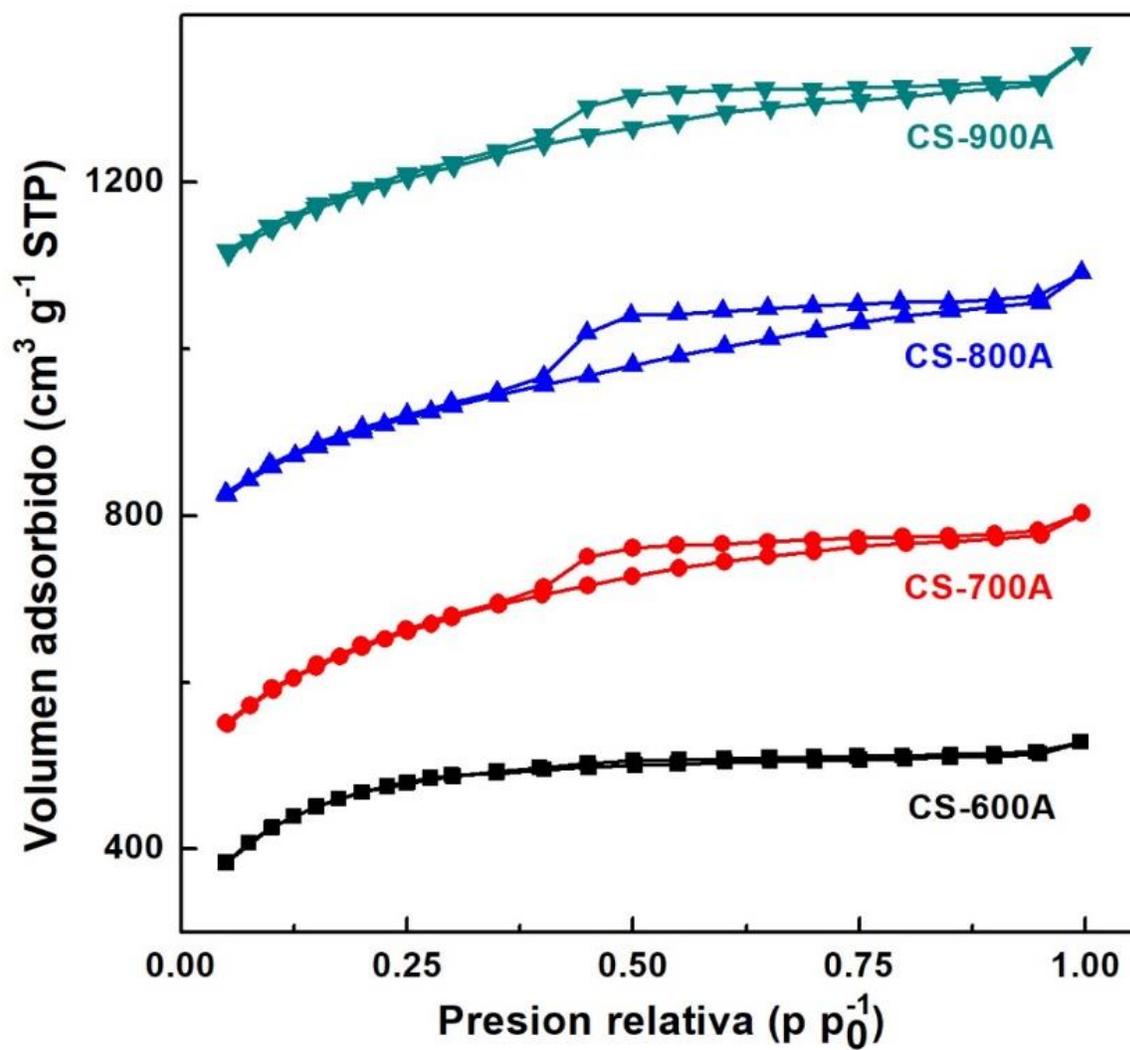


Figura 4.18 Isothermas de adsorción-desorción de N_2 de las muestras activadas de carbón de sorgazo.

Tabla 4.2 Área superficial, tamaño de poro y volumen de poro de las muestras activadas de carbón de sorgo.

Muestra	Área superficial BET ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	Volumen de poro ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)	Tamaño de poro (nm)
CS-600	21.5	0.02	49
CS-600A	1504	0.819	21
CS-700	3.2	0.01	123
CS-700A	1510	0.9521	25
CS-800	27.77	0.03	44
CS-800A	1434	0.973	27
CS-900	6.07	0.0153	101
CS-900A	1308	0.868	26

4.1.6. Espectroscopía Raman

En la figura 4.19 se presentan los espectros Raman de los ocho materiales derivados de sorgo, activados y sin activar. Todas las muestras exhiben bandas que se asocian a estructuras de carbono. Se pueden observar las bandas D y G características a ~ 1344 y $\sim 1585 \text{ cm}^{-1}$, respectivamente. La banda D generalmente se atribuye a defectos y a un mayor desorden en la estructura cristalina, se relaciona con un modo de vibración A_{1g} que es una vibración de tensión de los enlaces C–C con hibridación sp^3 . La banda G se debe a la vibración E_{2g} que se relaciona con la energía de los enlaces sp^2 por lo que esta banda se asigna a las estructuras de grafito [177-180].

Todas las muestras de sargazo carbonizado, tanto activado como no activado, muestran los rasgos característicos bien definidos del carbón. La posición de la banda D observada para las muestras activadas y no activadas es la misma. Sin embargo, se observa un cambio muy pequeño en la banda G hacia números de onda más altos para todas las muestras activadas. Esto posiblemente se deba al cambio en la estructura gráfica de las muestras de sargazo carbonizado después de la activación con KOH.

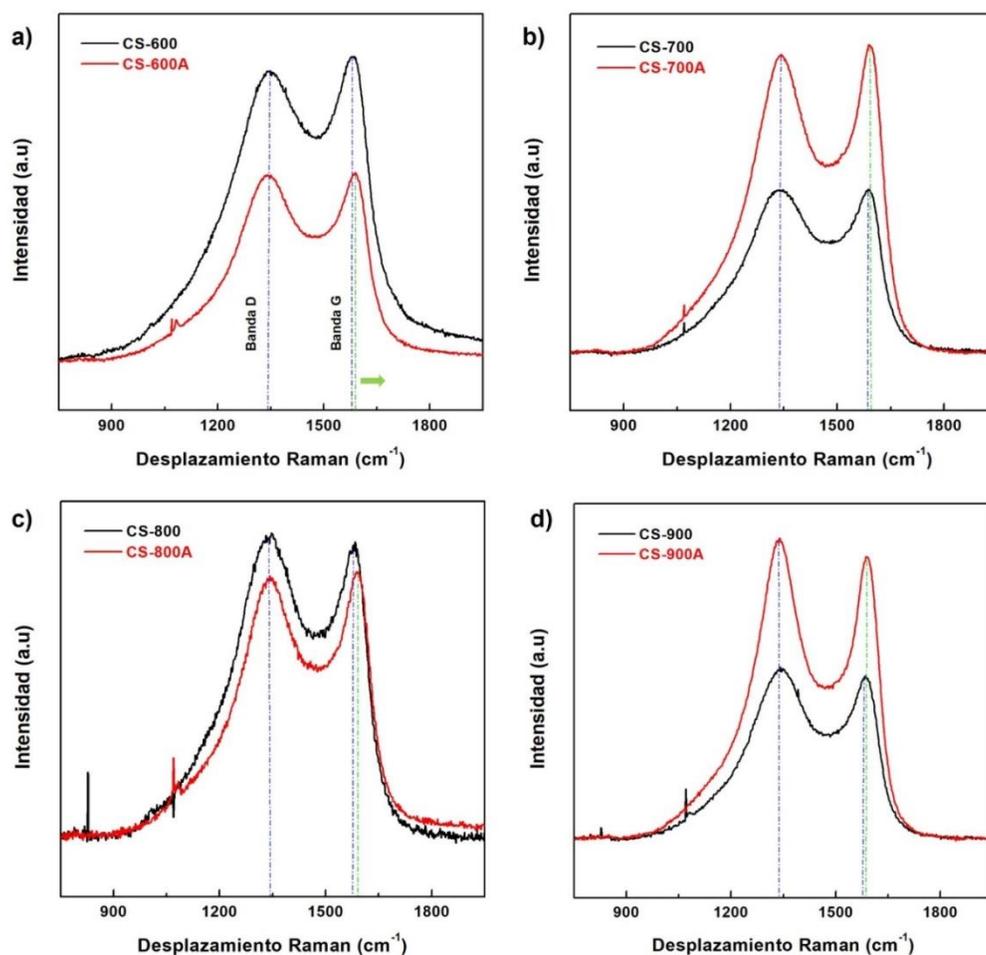


Figura 4.19 Espectros Raman de las muestras antes y después de la activación (a) CS-600/CS-600A, (b) CS-700/CS-700A, (c) CS-800/CS-800A y (d) CS-900/CS-900A.

4.2. Técnicas de análisis electroquímico

Para llevar a cabo las diferentes técnicas electroquímicas se utilizó una celda electroquímica adaptada con una configuración de tres electrodos. Como electrodo de trabajo se utilizó un electrodo de carbón vítreo, en el cual se colocó el material activo. El potencial aplicado a este electrodo fue medido con respecto a un electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) saturado con cloruro de potasio (KCl). Y como contraelectrodo o electrodo auxiliar se utilizó un electrodo de platino (Pt). El sistema electrolítico en el que se realizaron las pruebas fue de 6 M KOH y se utilizó una ventana potencial de -1.0 a 0 V.

4.2.1. Sargazo carbonizado a diferentes temperaturas

4.2.1.1. Muestra carbonizada a 600 °C (CS-600)

Las curvas de voltametría cíclica obtenidas para este material a diferentes velocidades de escaneo ($5\text{--}100\text{ mVs}^{-1}$) se presentan en la **Figura 4.20**. Los voltamogramas obtenidos exhiben una forma rectangular cuasi-ideal característica de materiales capacitivos. Se observa que las corrientes obtenidas de los voltamogramas son dependientes de la velocidad de escaneo. Las curvas de VC presentan una pequeña inclinación conforme aumenta la velocidad de escaneo, pero mantiene su misma forma incluso a una velocidad de escaneo de 100 mVs^{-1} . Esto puede ser evidencia de un comportamiento capacitivo ideal y reversible [80, 181].

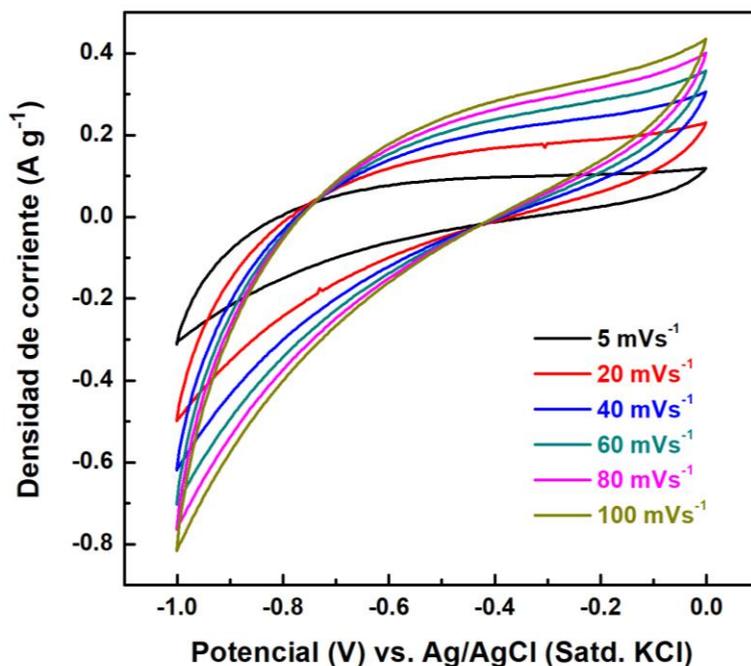


Figura 4.20 Voltamogramas de la muestra CS-600 dependientes de la velocidad de escaneo

En la **Figura 4.21 (a)**, se presentan las curvas de CDG a diferentes densidades de corriente. Estas curvas presentan una forma triangular, esta forma es típica de materiales con características capacitivas de doble capa. Sin embargo, también presenta una caída de IR muy pronunciada al inicio de la curva de descarga, lo cual se puede atribuir a una alta resistencia interna del electrodo [182]. A una densidad de corriente de 0.25 A g^{-1} se estima una capacitancia de 11.8 F g^{-1} . En la **Figura 4.21 (b)** se puede apreciar como este valor decae rápidamente al aumentar la densidad de corriente. Este fenómeno se podría asociar con un aumento en la resistencia del material, provocada por un “atasco de tráfico” de iones dentro de los microporos o interacciones que se pueden dar entre el electrolito y grupos funcionales del carbono [153].

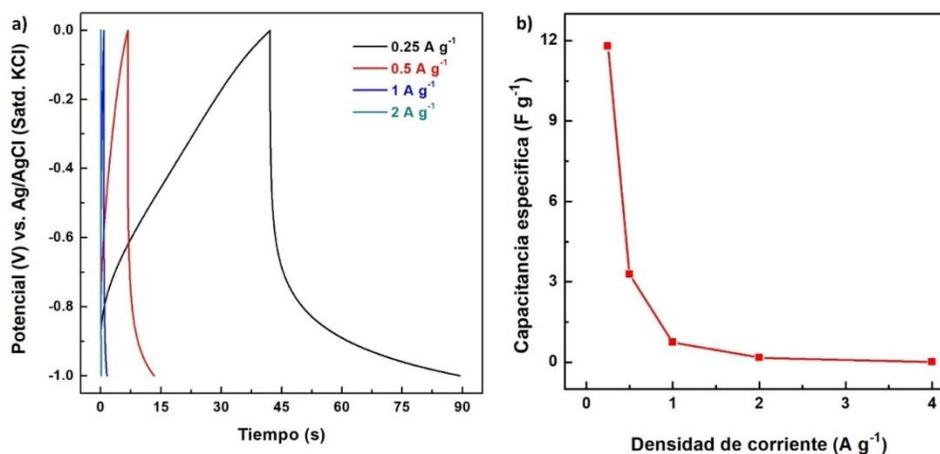


Figura 4.21 (a) Perfiles de CDG de la muestra CS-600 a diferentes densidades de corriente (b) capacitancia específica de la muestra CS-600 calculada a diferentes densidades de corriente.

La Espectroscopia de Impedancia Electroquímica se llevó a cabo en un rango de frecuencia de 100 KHz a 0.01 Hz en un potencial de circuito abierto (OCP). La **Figura 4.22** presenta el diagrama de Nyquist que se obtuvo de la muestra CS-600. Como se puede observar este material presenta una baja resistencia en su primera intersección con el eje real a altas frecuencias (6.5Ω) y no se observa el bucle característico que se suele formar a estas frecuencias. La ausencia de este bucle puede ser indicativo de un buen contacto entre el colector de corriente y el material activo [183]. Se observa la ligera formación de un semicírculo a frecuencias medias. En la zona de baja frecuencia se puede observar la línea inclinada característica de materiales capacitivos, Sin embargo, los valores de impedancia real e imaginaria son muy altos.

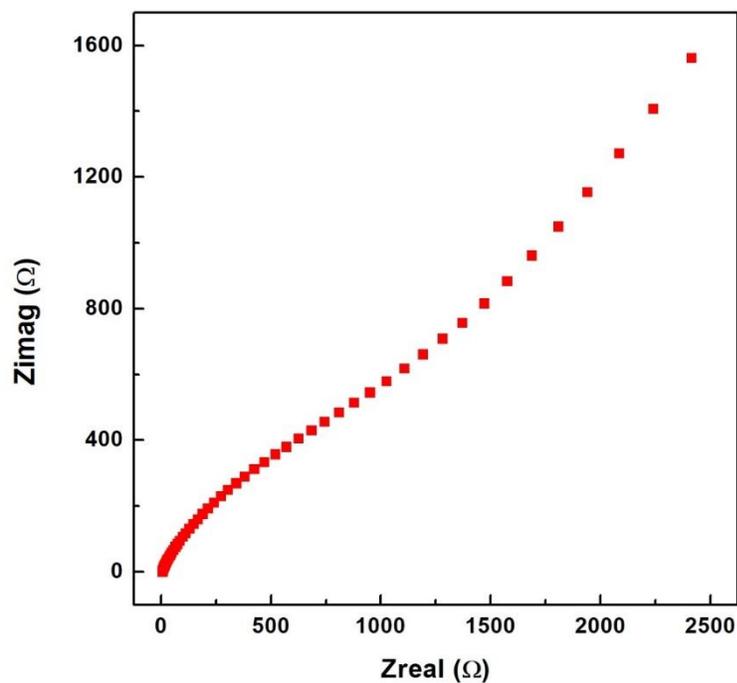


Figura 4.22 Diagrama de Nyquist de la muestra CS-600

4.2.1.2. Muestra carbonizada a 700 °C (CS-700)

Las curvas de VC obtenidas a diferentes velocidades de escaneo (5–100 mVs⁻¹) de la muestra CS-700 se presentan en la **Figura 4.23** en las que se puede apreciar una forma casi rectangular. Se observa una dependencia de la velocidad de escaneo. A 5 mVs⁻¹ se ve la formación de un ligero pico el cual se va atenuando conforme aumenta la velocidad de escaneo.

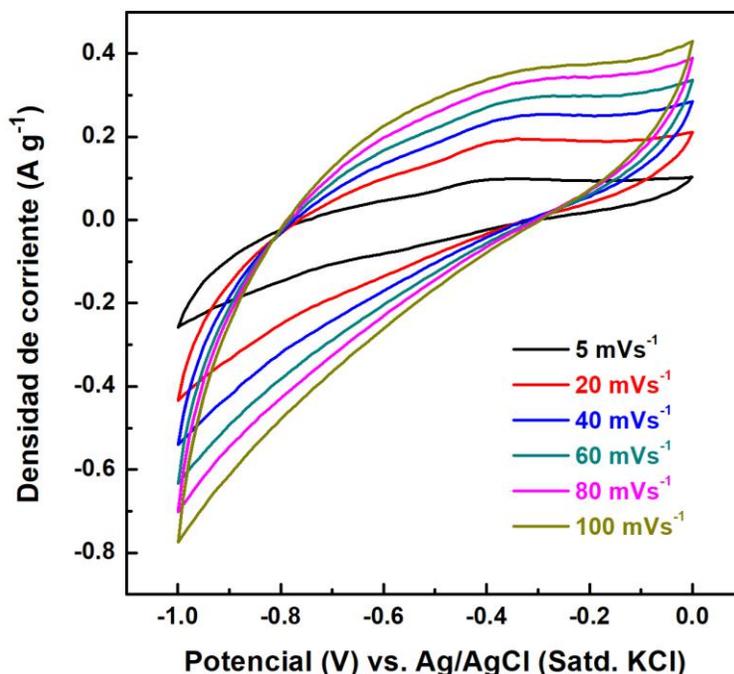


Figura 4.23 Voltamogramas de la muestra CS-700 dependientes de la velocidad de escaneo.

Las curvas CDG a diferentes densidades de corriente presentan una forma triangular, pero con una evidente caída de IR como se observa en la **Figura 4.24 (a)**. Se obtuvo una capacitancia específica de 11.7 F g^{-1} en una densidad de corriente de 0.25 A g^{-1} . En la **Figura 4.24 (b)** se puede apreciar como los valores de capacitancia disminuyen conforme se aumenta la densidad de corriente.

Para evaluar la estabilidad del material se realizó una prueba de 5000 ciclos de carga y descarga, durante los cuales se pudo observar múltiples aumentos y caídas de los valores de capacitancia. Sin embargo, todas las caídas y aumentos sucedieron dentro de un rango muy pequeño por lo que este comportamiento podría ser considerado estable ya que después de 5000 ciclos tiene una retención de capacitancia de 115.2%, como se observa en la **Figura 4.24 (c)**. Es decir que al final de la prueba la capacitancia fue mayor a la inicial, pasó de 4.9 a 5.7 F g^{-1} después de 5000 ciclos de carga y descarga.

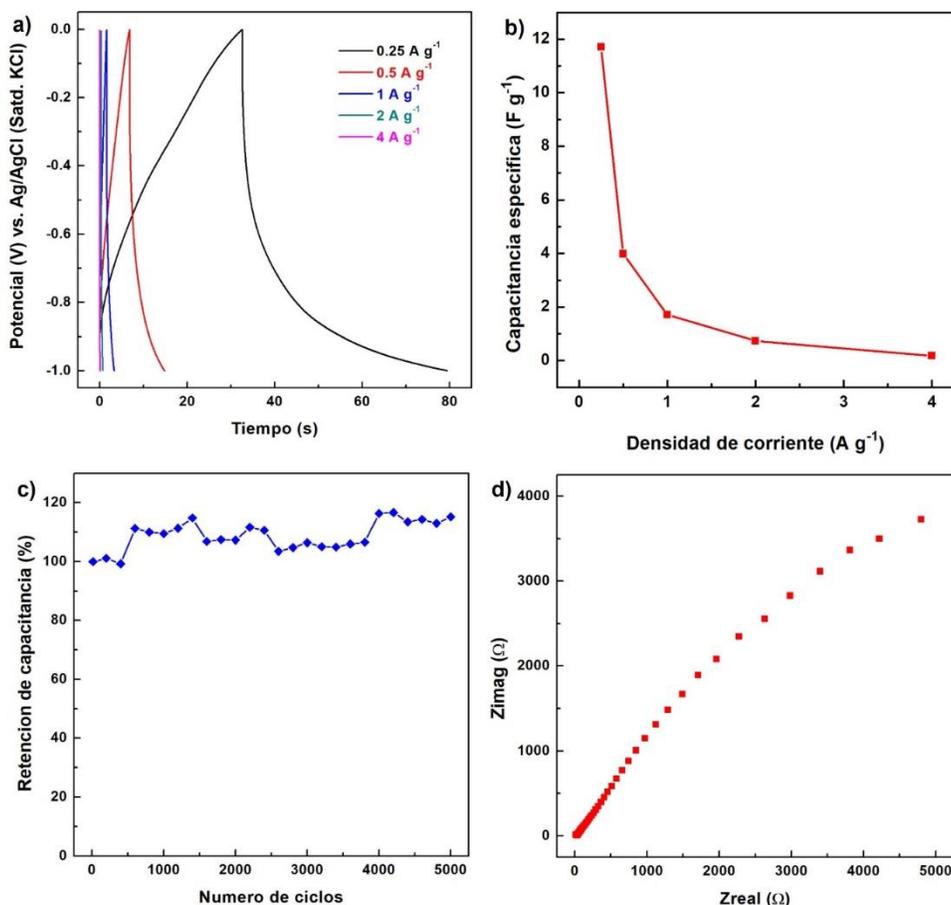


Figura 4.24 (a) Perfiles de CDG de la muestra CS-700 a diferentes densidades de corriente (b) capacitancia específica de la muestra CS-700 calculada a diferentes densidades de corriente (c) retención de capacitancia porcentual en 5000 ciclos de carga y descarga y (d) diagrama de Nyquist de la muestra CS-700.

Con la prueba de EIE, se obtuvo el diagrama de Nyquist para la muestra CS-700 que se presenta en la **Figura 4.24 (d)**. De acuerdo con la primera intersección del eje real su resistencia es igual a 15.8Ω y al igual que la muestra anterior no se observa la formación del semicírculo a altas frecuencias. Este diagrama también nos permite apreciar la formación de una región de difusión a frecuencias medias. Y una línea inclinada a bajas frecuencias, la cual se aleja del ángulo ideal de 90° y podría indicar que

se está produciendo una resistencia a las fugas debido a reacciones redox irreversibles parásitas en el electrodo [184].

4.2.1.3. Muestra carbonizada a 800 °C (CS-800)

En la **Figura 4.25** se presentan las curvas VC obtenidas de la muestra CS-800 a diferentes velocidades de escaneo (5–100 mVs⁻¹). Se pueden observar curvas casi rectangulares que tienen una clara dependencia de la velocidad de escaneo. Se puede apreciar que la forma no se ve afectada, esta se mantiene aún a 100 mVs⁻¹, solo se puede observar una pequeña inclinación que aumenta con la velocidad de escaneo.

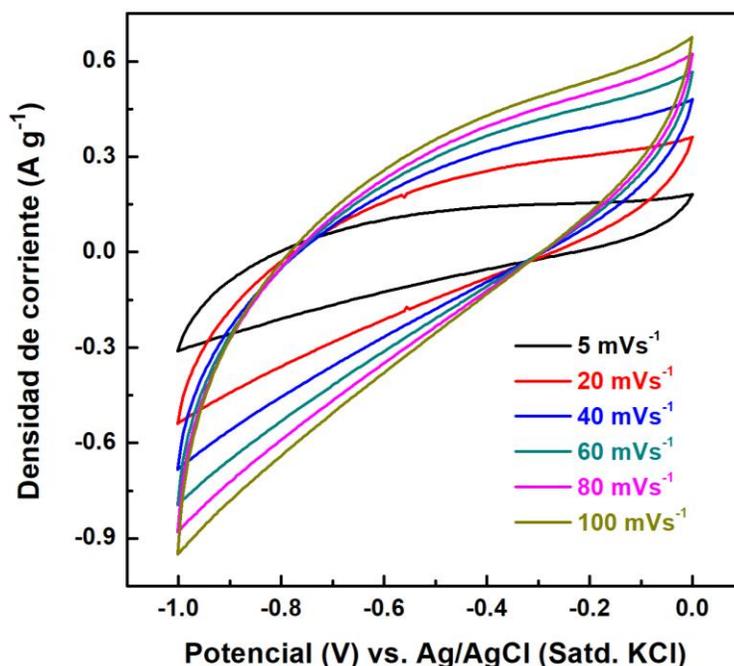


Figura 4.25 Voltamogramas de la muestra CS-800 dependientes de la velocidad de escaneo.

En la **Figura 4.26 a)** se presentan las curvas CDG de la muestra CS-800. Se puede apreciar que estas curvas CDG tienen una forma triangular con una pronunciada caída IR. Con el tiempo de descarga obtenido a 0.25 A g⁻¹ se puede estimar un valor de capacitancia de apenas 4.9 F g⁻¹, valor aún más bajo que el obtenido con otras muestras

sin activar. Pero al igual que las muestras anteriores este valor decae abruptamente al aumentar la densidad de corriente y esto se puede apreciar en la **Figura 4.26 (b)**.

Para evaluar la estabilidad de este material se realizó una prueba de 5000 ciclos de carga y descarga. Al inicio de la prueba, se estimó una capacitancia de 1.6 F g^{-1} , este valor comienza a decaer conforme comienzan a transcurrir los ciclos de carga y descarga. Al finalizar la prueba el valor de capacitancia que se estimó fue de 1.08 F g^{-1} , es decir que este material tuvo una retención de capacitancia del 66.9%, **Figura 4.26 (c)**.

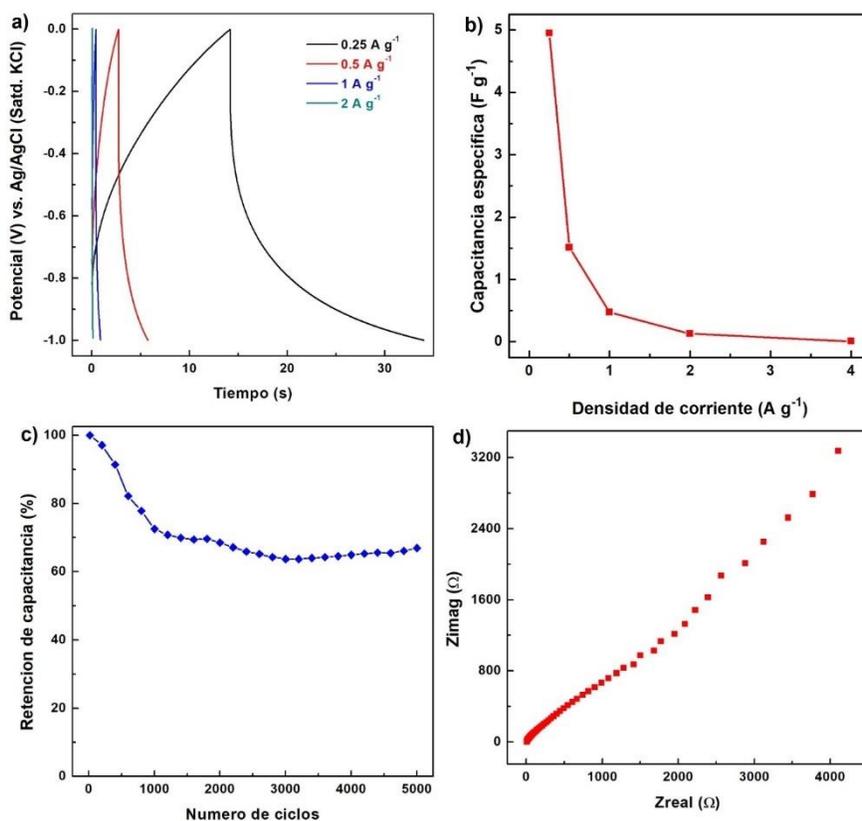


Figura 4.26 (a) Perfiles de CDG de la muestra CS-800 a diferentes densidades de corriente (b) capacitancia específica de la muestra CS-800 calculada a diferentes densidades de corriente (c) retención de capacitancia porcentual en 5000 ciclos de carga y descarga y (d) diagrama de Nyquist de la muestra CS-800.

En la **Figura 4.26 (d)** se presenta el diagrama de Nyquist de la muestra CS-800.

Como se puede observar este material presenta una muy baja resistencia (3.5Ω) a altas

frecuencias, y no se observa la formación del bucle característico a estas frecuencias. A frecuencias intermedias se observa la formación de una zona de difusión. En esta muestra es más notable la parte de difusión, lo cual podría ser evidencia de algunas limitaciones difusivas [185]. A bajas frecuencias el comportamiento capacitivo prevalece, sin embargo, los valores de impedancia real e imaginaria son muy altos.

4.2.1.4. Muestra carbonizada a 900 °C (CS-900)

En la **Figura 4.27** se pueden observar las curvas VC obtenidas para la muestra CS-900 a diferentes velocidades de escaneo ($5\text{--}100\text{ mVs}^{-1}$). Estas curvas presentan una forma casi rectangular, la cual solo presenta una pequeña inclinación conforme aumenta la velocidad de escaneo. No se observa ningún cambio evidente en la forma de las curvas, incluso a 100 mVs^{-1} .

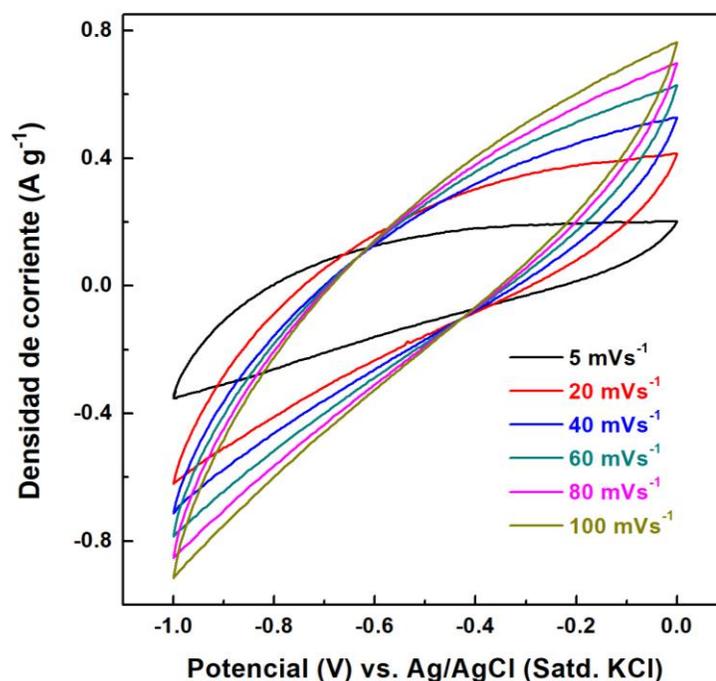


Figura 4.27 Voltamogramas de la muestra CS-900 dependientes de la velocidad de escaneo.

La **Figura 4.28 (a)** presenta las curvas CDG obtenidas a diferentes densidades de corriente de la muestra CS-900. Se observa que estas curvas tienen una forma triangular característica, en la que se observa una caída IR al inicio de la curva de descarga, lo que podría estar relacionado con una alta resistencia interna del electrodo. También se puede observar cómo los valores de capacitancia decaen al aumentar la corriente **Figura 4.28 (b)**. Este material después de 5000 ciclos tiene una retención del 95.8%, **Figura 4.28 (c)**, lo que es una excelente estabilidad, pero con una muy baja capacitancia.

En la **Figura 4.28 (d)** se muestra el diagrama de Nyquist de la muestra CS-900 y se puede observar la ligera formación del semicírculo a altas frecuencias, la amplitud de esta curva se podría atribuir a una pseudo- resistencia de transferencia o a la presencia de grupos funcionales electroactivos en la superficie del material [184]. Esto es seguido por una zona de difusión y una línea casi vertical a bajas frecuencia, evidenciando un comportamiento capacitivo de este material. Comparando con las muestras anteriores, la impedancia real e imaginaria de este material es menor.

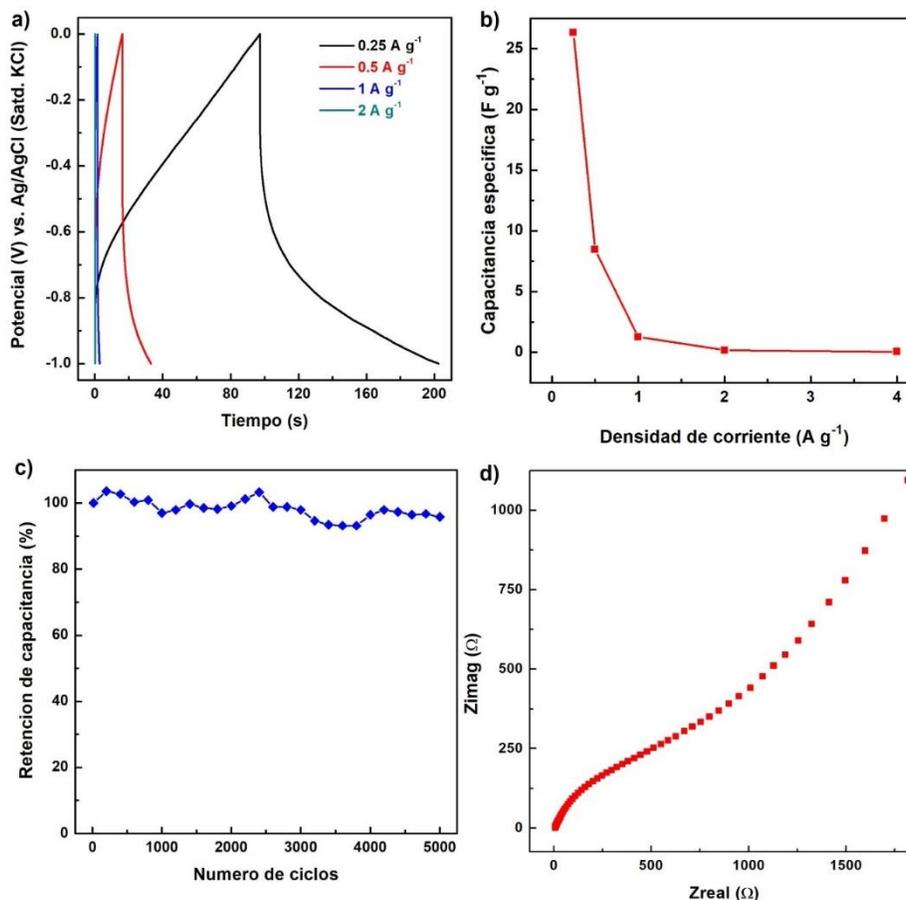


Figura 4.28 (a) Perfiles de CDG de la muestra CS-900 a diferentes densidades de corriente (b) capacitancia específica de la muestra CS-900 calculada a diferentes densidades de corriente (c) retención de capacitancia porcentual en 5000 ciclos de carga y descarga y (d) diagrama de Nyquist de la muestra CS-900.

4.2.2. Sargazo carbonizado y activado con KOH

4.2.2.1. Muestra carbonizada a 600 °C y activada con KOH (CS-600A)

Las curvas VC obtenidas a diferentes velocidades de escaneo (5–100 mVs⁻¹) para este material se presentan en la **Figura 4.29**. Después de la activación con KOH de este material, las curvas siguen presentando una forma rectangular cuasi-ideal. Se observa como la densidad de corriente aumenta conforme aumenta la velocidad de escaneo sin afectar su forma. También se puede apreciar como hubo aumento en el área, lo cual significa una mejora en las propiedades capacitivas del material.

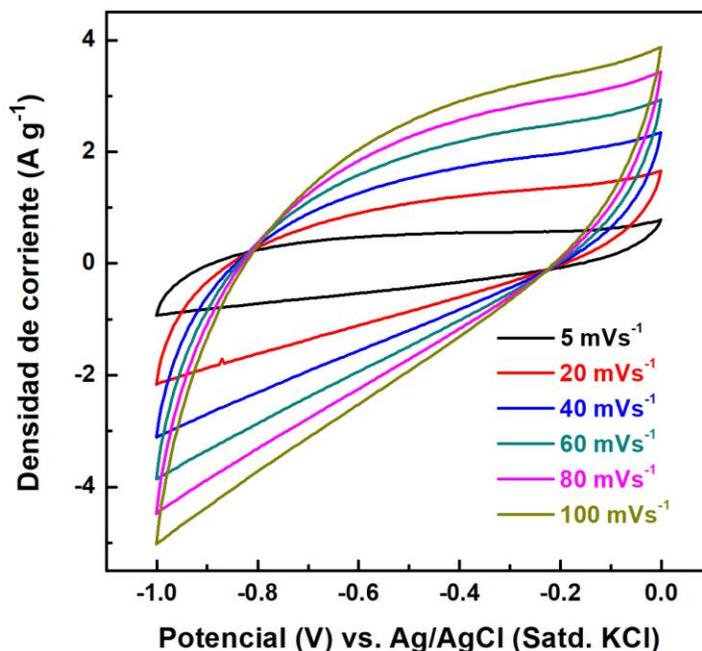


Figura 4.29 Voltamogramas de la muestra CS-600A dependientes de la velocidad de escaneo.

La **Figura 4.30 (a)** presenta las curvas CD a diferentes densidades de corriente de la muestra CS-600A. En esta muestra se observa una clara mejoría en los tiempos de carga y descarga. A una densidad de corriente de 0.25 A g^{-1} se estima una capacitancia específica de 145.4 F g^{-1} , valor casi 12 veces mayor al obtenido antes de la activación. La caída de los valores de capacitancia al aumentar la corriente es mucho menor.

La estabilidad de este material también se evaluó con una prueba de 5000 ciclos de carga y descarga. Inicialmente se estimó una capacitancia de 26 F g^{-1} a una densidad de corriente de 4 A g^{-1} , conforme pasaban los ciclos esta capacitancia fue en aumento. Después de 5000 ciclos este material llegó a un valor de capacitancia de 33.18 F g^{-1} . Esto significa que la retención de capacitancia fue mejorando a través de los ciclos. Una vez finalizada la prueba la retención de este material fue del 127.5%, **Figura 4.30 (c)**.

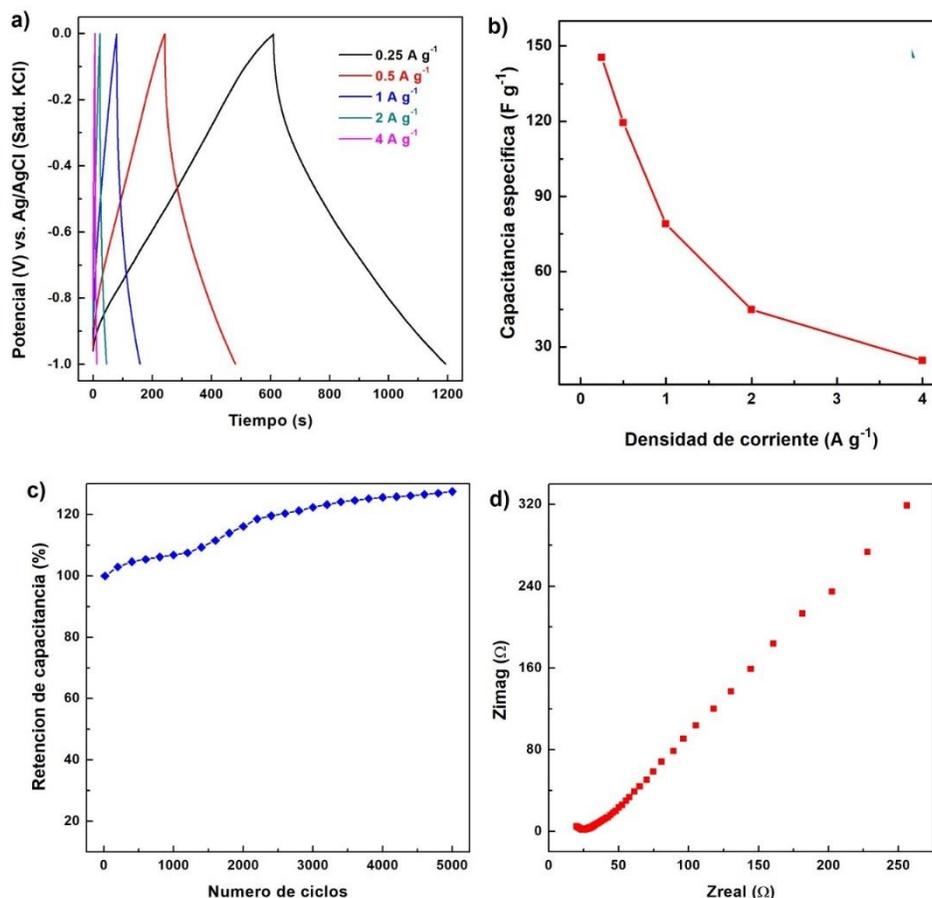


Figura 4.30 (a) Perfiles de CDG de la muestra CS-600A a diferentes densidades de corriente (b) capacitancia específica de la muestra CS-600A calculada a diferentes densidades de corriente (c) retención de capacitancia porcentual en 5000 ciclos de carga y descarga y (d) diagrama de Nyquist de la muestra CS-600A.

El diagrama de Nyquist de la muestra CS-600A **Figura 4.30 (d)** muestra un valor de resistencia a alta frecuencia de 19.86 Ω. Se observa una parte de Warburg entre las frecuencias altas e intermedias. Y una línea inclinada que se asocia al comportamiento capacitivo del material. Sus valores de impedancia real e imaginaria son relativamente bajos.

4.2.2.2. Muestra carbonizada a 700 °C y activada con KOH (CS-700A)

En la **Figura 4.31** se presentan las curvas VC a diferentes velocidades de escaneo (5–100 mVs^{-1}) de la muestra CS-700A, las cuales exhiben algunas mejoras. Estas curvas presentan una mejor forma casi rectangular, lo cual es típico de materiales capacitivos. Al aumentar la velocidad de escaneo se observa un aumento de la densidad de corriente. También se aprecia cómo se mantiene la forma, aún a una alta velocidad de escaneo y solo existe una ligera inclinación de las curvas. De igual forma es evidente el gran aumento del área de las curvas de VC, a una velocidad de escaneo de 5 mVs^{-1} se tiene una capacitancia de 190 F g^{-1} .

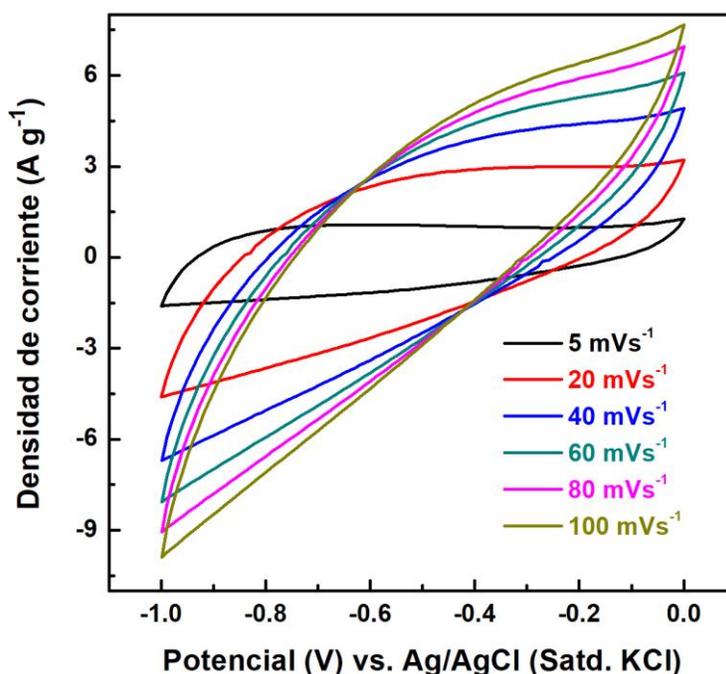


Figura 4.31 Voltamogramas de la muestra CS-700A dependientes de la velocidad de escaneo.

La **Figura 4.32 (a)** presenta las curvas de CDG obtenidas a diferentes densidades de corriente de la muestra CS-700A. Se observa una clara reducción en la caída IR al inicio de la curva de descarga. También se puede observar que las curvas tienen una

forma triangular más simétrica, lo que se puede relacionar con una baja resistencia interna del electrodo [186]. También es importante hacer notar la curva que se marca ligeramente al final de la curva de carga. Esta curva es indicativa de un comportamiento EDLC [187]. Cuando la densidad de corriente se incrementa de 0.25 a 0.5, 1, 2, 4 A g⁻¹ la capacitancia disminuye progresivamente y pasa de 276.5 a 234.5, 198.3, 147.8, 84.7 F g⁻¹, respectivamente, **Figura 4.32 (b)**.

Para esta muestra también se llevó a cabo una prueba de estabilidad con 5000 ciclos de carga y descarga. Se puede observar una disminución progresiva de capacitancia durante esta prueba. Inicialmente se registró una capacitancia de 87.6 F g⁻¹ a una densidad de corriente de 4 A g⁻¹. Apenas transcurridos 1000 ciclos la capacitancia se redujo a 75.9 F g⁻¹, una vez finalizada la prueba de 5000 ciclos la capacitancia que se obtuvo fue de 54.18 F g⁻¹. Por lo que la retención de este material es de 61.8%, **Figura 4.32 (c)**.

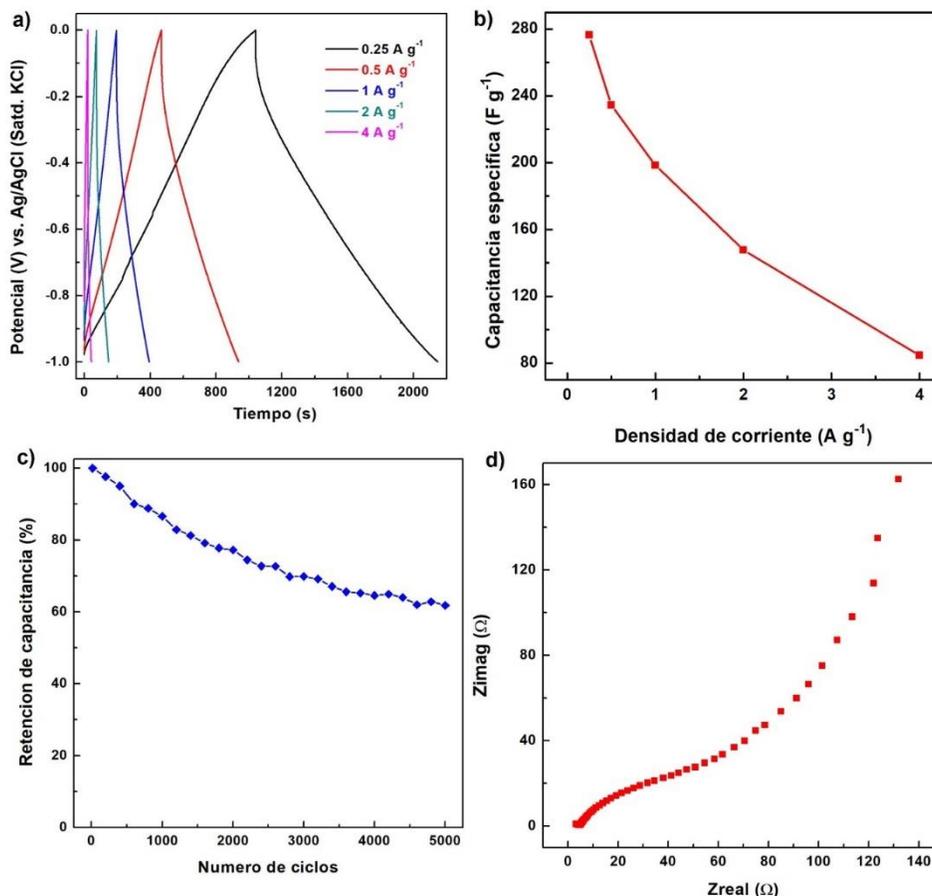


Figura 4.32 (a) Perfiles de CDG de la muestra CS-700A a diferentes densidades de corriente (b) capacitancia específica de la muestra CS-700A calculada a diferentes densidades de corriente (c) retención de capacitancia porcentual en 5000 ciclos de carga y descarga y (d) diagrama de Nyquist de la muestra CS-700A.

En la **Figura 4.32 (d)** se presenta el diagrama de Nyquist que corresponde a la muestra CS-700A, se puede observar que la resistencia de este material a altas frecuencias es muy baja (3.17Ω), pero también se puede apreciar la ligera formación de un amplio semicírculo que, como se explicó en la **sección 4.2.1.4**, podría atribuir a una pseudo-resistencia de transferencia o a la presencia de grupos funcionales electroactivos. En frecuencias bajas la línea se encuentra casi de forma vertical (cercana a 90°), lo que indica un comportamiento altamente capacitivo.

4.2.2.3. Muestra carbonizada a 800 °C y activada con KOH (CS-800A)

En la **Figura 4.33** se presentan las curvas VC de la muestra CS-800^a a diferentes velocidades de escaneo (5–100 mVs⁻¹), estas curvas exhiben mejor forma casi rectangular, típico de materiales capacitivos. Al aumentar la velocidad de escaneo se observa un aumento de la densidad de corriente. La forma de estos voltamogramas se mantiene aún a una velocidad de escaneo de 100 mVs⁻¹. Lo que también se puede observar es que existe una ligera inclinación de las curvas conforme la velocidad de escaneo aumenta. Al igual que las muestras activadas analizadas anteriormente, presenta un evidente aumento de área.

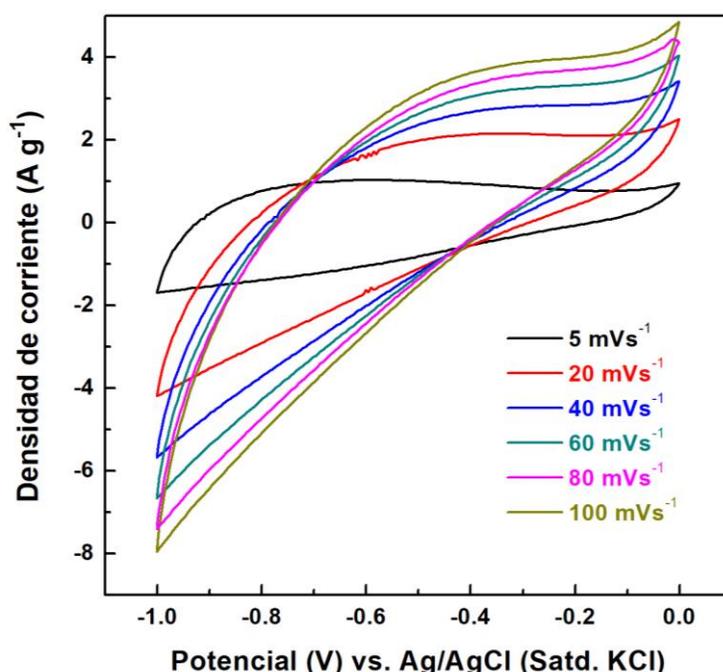


Figura 4.33 Voltamogramas de la muestra CS-800A dependientes de la velocidad de escaneo.

En la **Figura 4.34 (a)** se presentan las curvas de CDG a diferentes densidades de corriente de la muestra CS-800A. Se puede observar que existe una caída IR en la curva de descarga, que podría relacionarse con un aumento en la resistencia interna del

electrodo. La forma de estas curvas se ve mejorada al tener mayor simetría, comparando con las obtenidas con la muestra inicial CS-800. Se observa también la formación de una curvatura, la cual indica un comportamiento de electrodo EDLC. La caída de los valores de capacitancia se da gradualmente al incrementar la densidad de corriente, esto se puede apreciar en la **Figura 4.34 (b)**.

Para evaluar la estabilidad de este material se realizó una prueba de 5000 ciclos de carga y descarga. Con una densidad de corriente de 4 A g^{-1} , se estimó una capacitancia inicial de 43.7 F g^{-1} . Durante la prueba la capacitancia fue en aumento y una vez concluidos los 5000 ciclos, la capacitancia que se obtuvo fue de 54.9 F g^{-1} . Por lo que se puede determinar que la retención de capacitancia de este material es del 125.6%, **Figura 4.34 (c)**.

El diagrama de Nyquist de la muestra CS-800A, se presenta en la **Figura 4.34 (d)**. La resistencia que se obtiene de la primera intersección con el eje real es de 3.15Ω . Esta figura muestra que a frecuencias intermedias existe una parte de difusión, y una capacitiva a bajas frecuencias. Se observa que la línea es casi vertical a bajas frecuencias por lo que se trata de un material con características capacitivas.

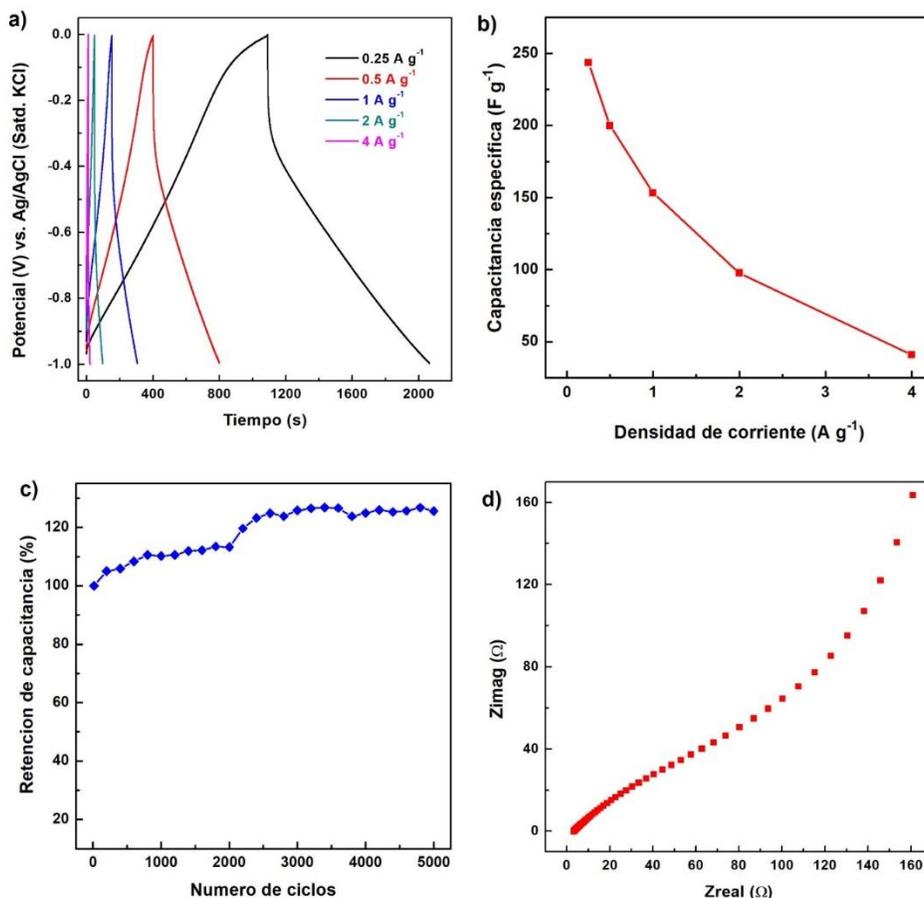


Figura 4.34 (a) Perfiles de CDG de la muestra CS-800A a diferentes densidades de corriente (b) capacitancia específica de la muestra CS-800A calculada a diferentes densidades de corriente (c) retención de capacitancia porcentual en 5000 ciclos de carga y descarga y (d) diagrama de Nyquist de la muestra CS-800A.

4.2.2.4. Muestra carbonizada a 900 °C y activada con KOH (CS-900A)

En la **figura 4.35**, se presentan los voltamogramas obtenidos a diferentes velocidades de escaneo (5–100 mVs⁻¹) de la muestra CS-900A. Estas curvas VC tienen una forma rectangular casi ideal. Se observa que existe una dependencia con la velocidad de escaneo. Cuando la velocidad de escaneo aumenta, la corriente también aumenta y se observa como las curvas crecen y adquieren una ligera inclinación.

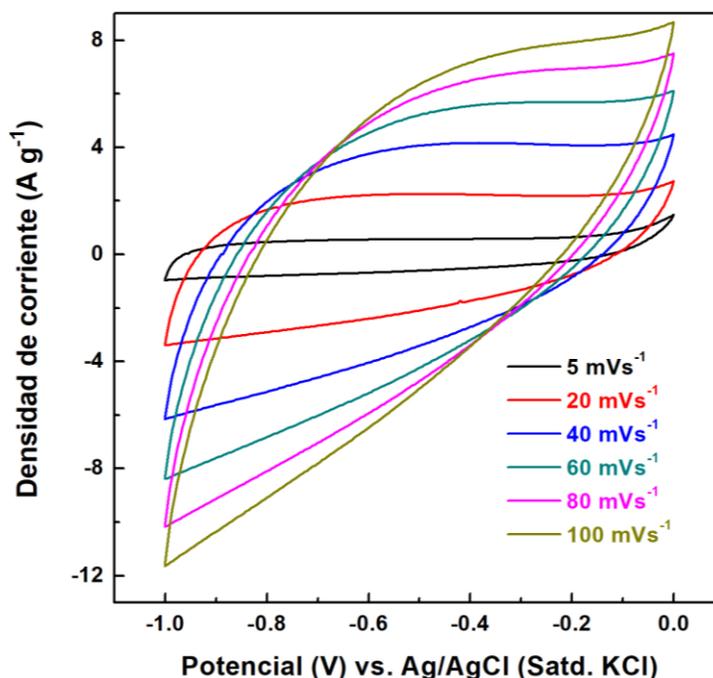


Figura 4.35 Voltamogramas de la muestra CS-900A dependientes de la velocidad de escaneo.

En la **Figura 4.36 (a)** se presentan las curvas de CDG a diferentes densidades de corriente que corresponden a la muestra CS-900A. Algo que es especialmente notorio en estas curvas, es la formación de la curvatura al final de la línea de carga. Esta curva además de indicar un comportamiento de electrodo EDLC, también se debe a la contribución pseudocapacitiva de algunas funcionalidades del oxígeno que pueden existir en la superficie del material [187, 188]. El tiempo de carga y descarga obtenidos con esta muestra son realmente buenos, a una densidad de corriente de 0.25 A g^{-1} se obtiene una capacitancia de 200.77 F g^{-1} y se observa que al aumentar la densidad de corriente la capacitancia disminuye de una forma gradual, **Figura 4.36 (b)**.

Para evaluar la estabilidad del material se realizó una prueba de 5000 ciclos de carga y descarga a una densidad de corriente de 2 A g^{-1} . Inicialmente el valor de capacitancia que se estimó fue de 44 F g^{-1} . Con el transcurso de los ciclos este valor fue

en aumento y una vez finalizados los 5000 ciclos la capacitancia que se obtuvo fue de 137 F g^{-1} , un aumento de casi tres veces su valor inicial de capacitancia. Por lo que la retención de capacitancia de este material se elevó a un 311%, **Figura 4.36 (c)**.

En este diagrama, **Figura 4.36 (d)** a diferencia de los anteriores se puede apreciar una clara formación del semicírculo a altas frecuencias, esto se debe principalmente a que a estas frecuencias los iones no tienen el suficiente tiempo para penetrar dentro de los poros, haciendo que los componentes resistivos tengan mayor influencia [111, 189]. Se observa también una parte de difusión y una línea cercana a 90° en la zona de baja frecuencia, indicando un comportamiento capacitivo puro.

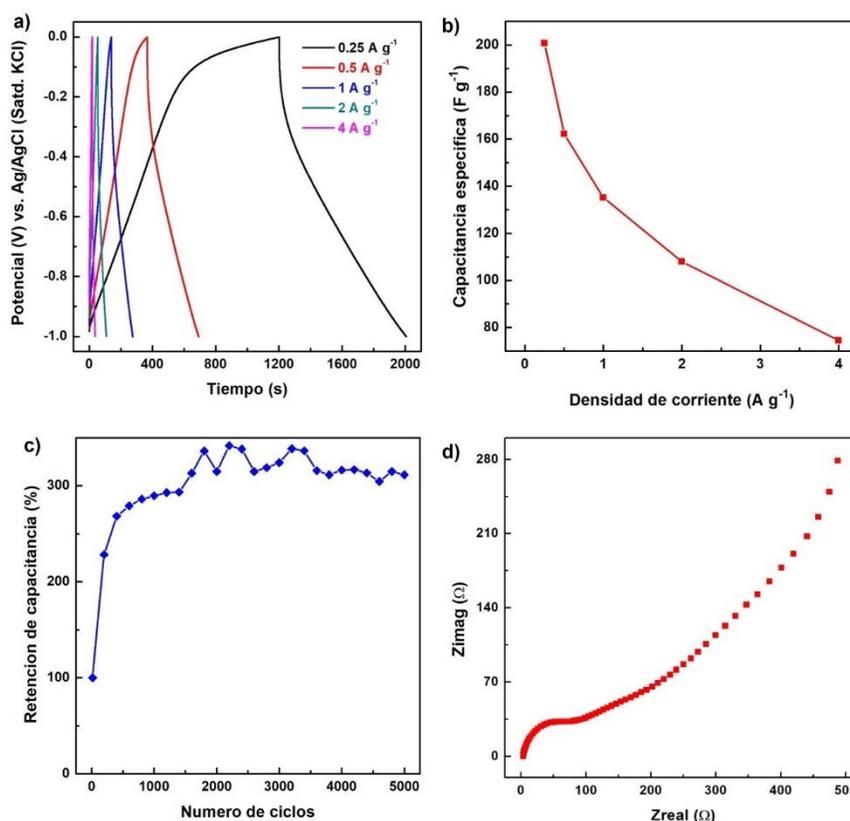


Figura 4.36 (a) Perfiles de CDG de la muestra CS-900A a diferentes densidades de corriente (b) capacitancia específica de la muestra CS-900A calculada a diferentes densidades de corriente (c) retención de capacitancia porcentual en 5000 ciclos de carga y descarga y (d) diagrama de Nyquist de la muestra CS-900A.

4.2.3. Efecto de la activación con KOH

4.2.3.1. Voltametría cíclica (VC)

En la **Figura 4.37** se presentan las curvas VC a 5 mVs^{-1} de los diferentes materiales antes y después de la activación, donde se observa una clara diferencia tanto en la amplitud como en la forma de las curvas. Las curvas que corresponden a las muestras sin activar presentan una forma casi rectangular, evidenciando ciertas características capacitivas. Sin embargo, los resultados de capacitancia obtenidos a partir de estas curvas son muy bajos, como se puede apreciar en la **Figura 4.38**.

Las curvas que corresponden a las muestras activadas presentan una mayor área, estas curvas tienen una forma rectangular cuasi-ideal con amplios picos faradaicos, lo que podría indicar la coexistencia de una capacitancia de doble capa y una pseudocapacitancia [190, 191].

La razón por la que se observan algunos picos redox en los voltamogramas puede ser debido a procesos faradaicos de grupos funcionales con contenido de oxígeno, cuya presencia se confirma con los resultados FTIR discutidos en la **sección 4.1.4**. En la curva correspondiente a la muestra CS-900A se puede observar una disminución en la distorsión de los picos lo que podría relacionarse con la pérdida de grupos funcionales con contenido de oxígeno debido a la alta temperatura [123].

De acuerdo con los resultados obtenidos de las curvas de VC, se pudo observar una mejora significativa en los valores de capacitancia después de la activación, como se muestra en la **Figura 4.38**. Este incremento en los valores de capacitancia se pudo haber dado por el aumento del área superficial, la mejora en la distribución de tamaño de poro y también por la contribución de funcionalidades de oxígeno presentes en la

superficie del material. La capacitancia más alta se obtuvo para la muestra CS-700A con un valor estimado de 190 F g^{-1} .

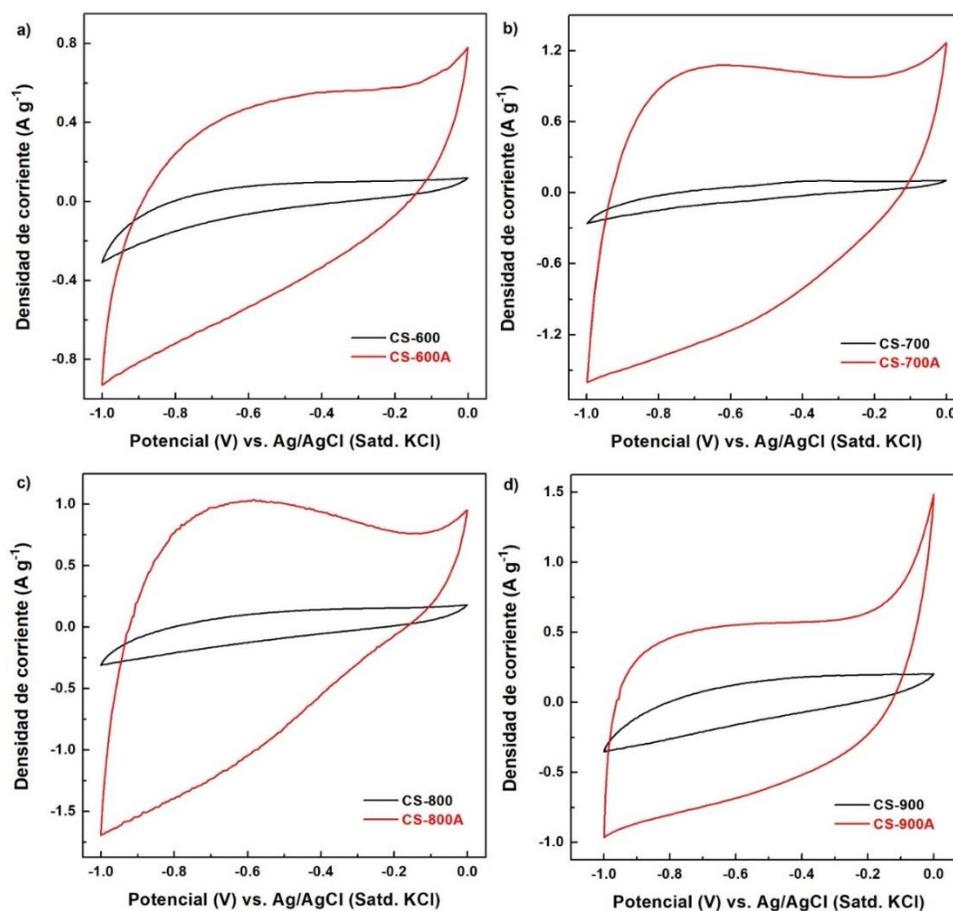


Figura 4.37 Voltamogramas obtenidos a 5 mVs^{-1} de las diferentes muestras antes y después de la activación (a) CS-600/CS-600A, (b) CS-700/CS-700A, (c) CS-800/CS-800A y (d) CS-900/CS-900A

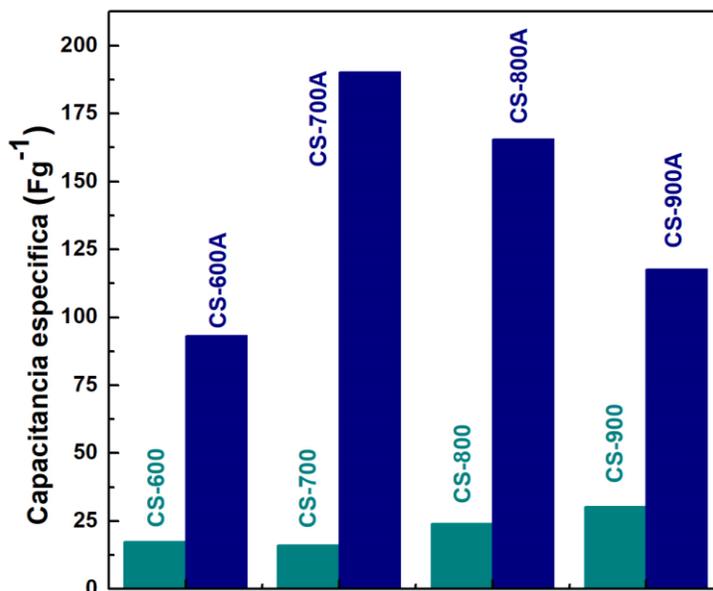


Figura 4.38 Capacitancia específica obtenida de las curvas de VC a 5 mVs^{-1} de las diferentes muestras antes y después de la activación.

4.2.3.2. Carga-descarga galvanostática (CDG)

En las curvas de CDG también se puede observar el efecto de la activación química sobre las propiedades del material. En la **Figura 4.39** se presentan las curvas de CDG a 0.25 A g^{-1} , de los diferentes carbonos antes y después de la activación. Como se observa, después de la activación con KOH, hay un gran aumento en los tiempos de carga y descarga, indicando muy buena capacidad de estas muestras para almacenar energía. La forma de las curvas corresponde a la forma típica de los supercapacitores, se observa que al pasar del estado de carga al de descarga hay una rápida caída de voltaje (caída IR), que usualmente se atribuye a cierta resistencia interna del electrodo. Esta caída IR es más pronunciada en la curva de descarga de la muestra CS-800A, **Figura 4.39 (c)**.

También se puede observar que el comportamiento de las curvas no es completamente lineal, especialmente las curvas que corresponden a las muestras CS-

800A y CS-900A, **Figuras 4.39 (c) y (d)**, presentan una curvatura más pronunciada al final de la línea de carga, lo que podría confirmar existencia de un comportamiento EDLC acompañado de algunas contribuciones pseudocapacitivas otorgadas por la presencia de grupos funcionales con contenido de oxígeno [188, 192].

El mayor valor de capacitancia se obtuvo con la muestra CS-700A, como se observa en la **Figura 4.40**, donde el valor estimado para esta muestra es de 276.5 F g^{-1} . Este alto valor de capacitancia puede deberse a la alta área superficial del material, abundancia de poros y la presencia de funcionalidades de oxígeno en la muestra adquiridas durante el proceso de activación [187].

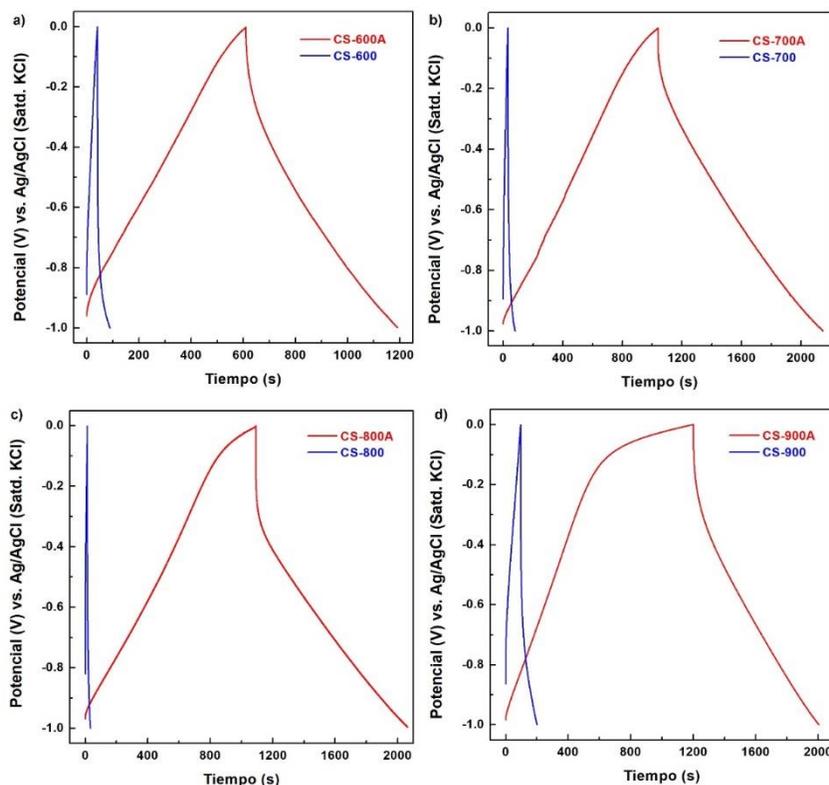


Figura 4.39 Comparación de las curvas de CDG de las diferentes muestras antes y después de la activación a una densidad de corriente de 0.25 A g^{-1} , (a) CS-600/CS-600A, (b) CS-700/CS-700A, (c) CS-800/CS-800A, y (d) CS-900/CS-900A

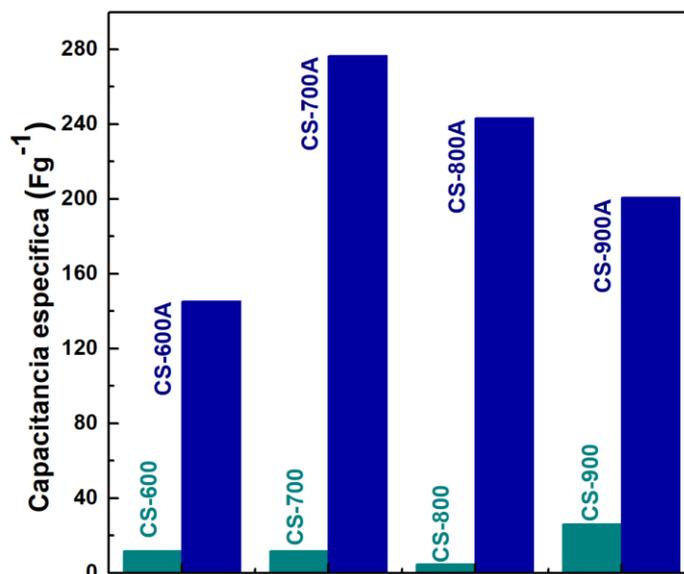


Figura 4.40 Capacitancia específica obtenida de las curvas de CDG de las diferentes muestras antes y después de la activación.

4.2.3.3. Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE)

Los resultados de EIE obtenidos de las diferentes muestras, tanto antes como después de la activación, se presentan en la **Figura 4.41**. Las muestras sin activar presentan valores de impedancia real e imaginarios muy altos, y sus líneas a bajas frecuencias se alejan del ángulo ideal de 90°. En cambio, en el caso de las muestras activadas, las líneas son casi verticales a bajas frecuencias, lo que evidencia un mejor comportamiento capacitivo. En estas frecuencias los iones tienen suficiente tiempo para penetrar completamente en la estructura porosa y formar la doble capa eléctrica, lo que resulta en la formación de esta línea vertical en la zona de baja frecuencia [111, 189].

Los valores de impedancia (Z_{real} y Z_{imag}) obtenidos a bajas frecuencias para las muestras activadas son considerablemente menores en comparación con los obtenidos para las muestras no activadas. Estos valores representan la contribución resistiva debida a la difusión de iones en la estructura de carbono. Esta resistencia se relaciona

directamente con el área superficial del material. Cuando el área superficial y la cantidad de poros son mayores, la resistencia disminuye, ya que se facilita la difusión de los iones en los poros del material [111]. Esto concuerda con los resultados discutidos en la **sección 4.1.5**, donde se demostró que hay un aumento significativo del área superficial en todos los materiales después de la activación con KOH.

En general, todos los materiales después activación presentaron una resistencia relativamente baja, la cual se obtiene de la primera intersección con el eje real, esta resistencia es atribuida a los diferentes elementos de conexión.

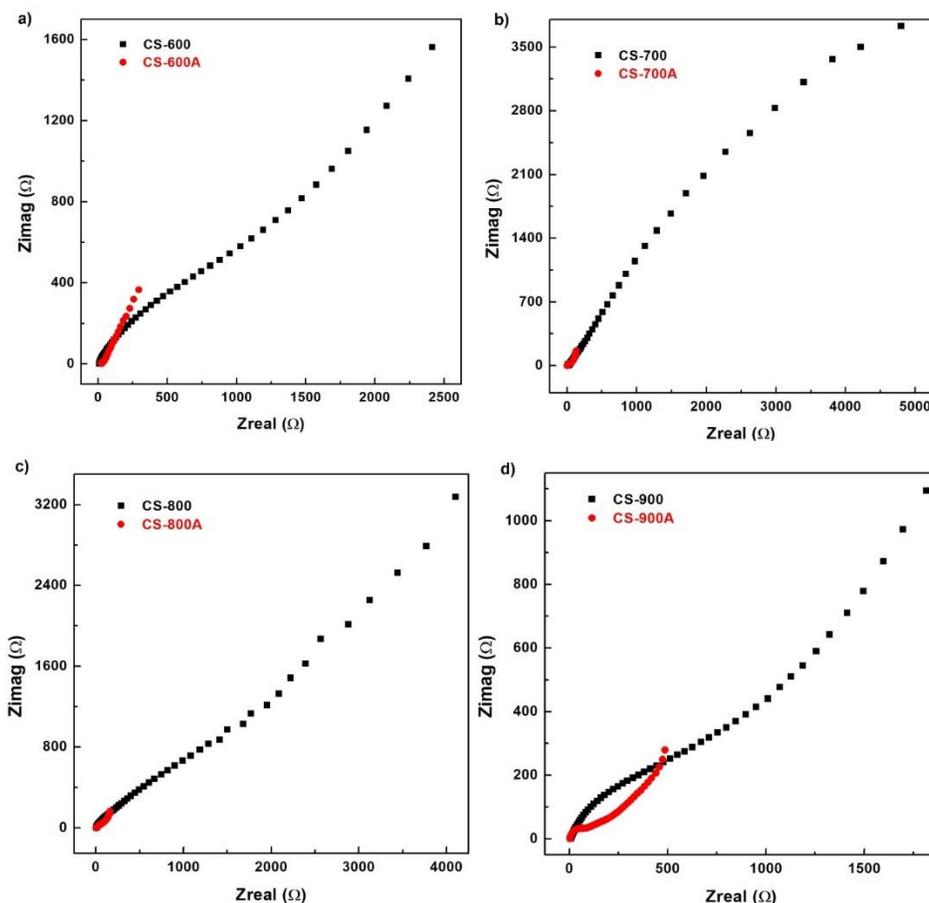


Figura 4.41 Diagramas de Nyquist obtenidos de las pruebas de EIE de las diferentes muestras antes y después de la activación (a) CS-600/CS-600^a, (b) CS-700/CS-700A, (c) CS-800/CS-800A, y (d) CS-900/CS-900A

CAPITULO V. CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

- Se realizó el lavado y secado minucioso de las algas de sargazo recolectadas en las costas de Progreso, en la Península de Yucatán, México.
- Se prepararon cuatro materiales mediante la carbonización de sargazo a diferentes temperaturas, las cuales fueron 600, 700, 800 y 900 °C.
- Se aplicó un tratamiento de activación química con KOH a 800 °C a las cuatro muestras de carbón obtenidas de sargazo.
- Se revisaron las propiedades físicas de las diferentes muestras de carbono obtenidas, esto se realizó mediante técnicas avanzadas como DRX, SEM, EDS, FTIR, BET y RAMAN. Con las cuales se pudieron analizar los cambios físicos que sufrieron los materiales de carbono después de la activación química, como el aumento en el área superficial específica y la mejora en el ordenamiento de la estructura cristalina por la presencia de CaCO_3 . También se pudo confirmar la presencia de funcionalidades de oxígeno y otros elementos.
- Se realizaron pruebas electroquímicas a cada una de las muestras de carbón obtenidas, las técnicas electroquímicas utilizadas fueron voltametría cíclica, carga-descarga galvanostática y espectroscopia de impedancia electroquímica. Todas las muestras presentaron un comportamiento capacitivo. Sin embargo, las muestras obtenidas después de la activación mostraron características que podrían confirmar la coexistencia de una capacitancia de doble capa y una pseudocapacitancia (probablemente por la presencia de carbonato de calcio

cristalino). El comportamiento faradaico se podría atribuir también a la presencia de grupos funcionales de oxígeno.

- Se analizó el efecto de la activación química sobre el rendimiento electroquímico de las muestras de carbono derivado de sargazo. Después de la activación los carbonos mostraron una mejor capacidad de almacenamiento de energía y una mayor estabilidad cíclica. Los mejores resultados se obtuvieron de la muestra CS-700A, que obtuvo un valor de capacitancia estimado de 276.5 F g^{-1} .

5.2. Recomendaciones

Dados los resultados obtenidos, se recomienda hacer un análisis más exhaustivo de las propiedades físicas, el cual podría hacerse a partir de la implementación de un análisis mediante espectrometría de fotoelectrones inducidos por rayos X (XPS). También se podrían realizar más pruebas electroquímicas del carbón de sargazo obtenido a 700 °C y activado con KOH, en otro tipo de electrolitos para analizar su comportamiento y estabilidad en diferentes ventanas de potencial.

Este trabajo se centró en el efecto de la activación química sobre el rendimiento electroquímico de los diferentes carbonos obtenidos de sargazo, pero podría analizarse más a fondo el efecto que tiene la presencia de diferentes heteroátomos debido a la naturaleza del precursor del carbono sobre el rendimiento electroquímico.

Los materiales obtenidos pueden ser utilizados como material de electrodo en dispositivos, tales como los supercapacitores, para aplicaciones en tiempo real.

REFRENCIAS

- [1] Deepak P. Dubal, Y. P. Wu y R. Holze, «Supercapacitors: from the Leyden jar to electric busses,» *ChemTexts volume 2*, nº 13, 2016.
- [2] IEA, «Global Energy Review 2021,» IEA, París, 2021.
- [3] M. Hasanuzzaman, . U. S. Zubir, N. I. Ilham y H. S. Che, «Global electricity demand, generation, grid system, and renewable energy polices: a review,» *WIREs Energy Environ*, vol. 6, 2017.
- [4] K. A. Smith, T. Ball, F. Conen, K. E. , Dobbie, J. y Massheder, A. Rey, «Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes,» *Europen Journal of Soil Science*, vol. 54, 2003.
- [5] M. Salari, R. J. Javid y H. Noghanibehambari, «The nexus between CO2 emissions, energy consumption, and economic growth in the U.S.,» *Economic Analysis and Policy*, vol. 69, pp. 182-194, 2021.
- [6] A. Ahmad, . Y. Zhao, M. Shahbaz, S. Bano, Z. Zhang, S. Wang y Y. Liu, «Carbon emissions, energy consumption and economic growth: An aggregate and disaggregate analysis of the Indian economy,» *Energy Policy*, vol. 96, pp. 131-143, 2016.
- [7] M. A. Omer y T. Noguchi, «A conceptual framework for understanding the contribution of building materials in the achievement of Sustainable Development Goals (SDGs),» *Sustainable Cities and Society*, vol. 52, 2020.

- [8] M. A. Aktar, M. M. Alam y A. Q. Al-Amin, «Global economic crisis, energy use, CO₂ emissions, and policy roadmap amid COVID-19,» *Sustainable Production and Consumption*, vol. 26, pp. 770-781, 2021.
- [9] A. Gazheli, M. Antal y J. v. d. Bergh, «The behavioral basis of policies fostering long-run transitions: Stakeholders, limited rationality and social context,» *Futures*, vol. 69, pp. 14-30, 2015.
- [10] J. Rogelj, M. d. Elzen, N. Höhne, T. Fransen, H. Fekete, H. Winkler y R. Schaeffer, «Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C,» *Nature*, vol. 534, p. 631–639, 2016.
- [11] Susan Solomon, Gian-Kasper Plattner, Reto Knutti y Pierre Friedlingstein, «Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions,» *PNAS*, vol. 106, nº 6, 2009.
- [12] T. Ahmad y D. Zhang, «A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far,» *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1973-1991, 2020.
- [13] S. Ghosh, «Examining carbon emissions economic growth nexus for India: A multivariate cointegration approach,» *Energy Policy*, vol. 38, pp. 3008-3014, 2010.
- [14] G. S. Alemán-Nava, V. H. Casiano-Flores, D. L. Cárdenas-Chávez, R. Díaz-Chavez, N. Scarlat, J. Mahlkecht, J.-F. Dallemand y R. Parra, «Renewable energy

- research progress in Mexico: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, pp. 140-153, 2014.
- [15] Secretaría de Energía , «Balance Nacional de Energía,» Subsecretaría de Planeación y Transición Energética Dirección General de Planeación e Información Energéticas , México, 2022.
- [16] T. M. Gür, «Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage,» *Energy & Environmental Science*, nº 10, 2018.
- [17] Y. Wang, L. Zhang, H. Hou, W. Xu, G. Duan, S. He, K. Liu y S. Jiang, «Recent progress in carbon-based materials for supercapacitor electrodes: a review,» *Journal of Materials Science*, p. 173–200 , 2021.
- [18] Poonam, K. Sharma, A. Arora y S. Tripathi, «Review of supercapacitors: Materials and devices,» *Journal of Energy Storage*, vol. 21, p. 2019, 801-825.
- [19] R. Dubey y V. Guruviah, «Review of carbon-based electrode materials for supercapacitor energy storage,» *Ionics*, vol. 25, p. 1419–1445, 2019.
- [20] G. Wang, L. Zhang y J. Zhang, «A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors,» *Chemical Society Reviews*, nº 2, 2012.
- [21] E. Azwar, W. A. W. Mahari, J. H. Chuah, D.-V. N. Vo, N. L. Ma, W. H. Lam y S. S. Lam, «Transformation of biomass into carbon nanofiber for supercapacitor

- application – A review,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, nº 45, pp. 20811-20821, 2018.
- [22] J. M. Schell, D. S. Goodwin y A. N. Siuda, «Recent Sargassum Inundation Events in the Caribbean: Shipboard Observations Reveal Dominance of a Previously Rare Form,» *Oceanography*, vol. 28, nº 3, pp. 8-10, 2015.
- [23] L. A. R. Iporac, D. C. Hatt, N. K. Bally, A. Castro, E. Cardet, R. Mesidor, S. Olszak, A. Duran, D. A. Burkholder y L. Collado-Vides, «Community-based monitoring reveals spatiotemporal variation of sargasso inundation levels and morphotype dominance across the Caribbean and South Florida,» *Aquatic Botany*, vol. 182, nº 103546, 2022.
- [24] B. Escobar, K. Pérez-Salcedo, I. Alonso-Lemus, D. Pacheco y R. Barbosa, «N-doped porous carbon from Sargassum spp. as metal-free electrocatalysts for oxygen reduction reaction in alkaline media,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, nº 51,21, pp. 30274-30283, 2017.
- [25] K. A. Jung, S.-R. Lim, Y. Kim y J. M. Park, «Potentials of macroalgae as feedstocks for biorefinery,» *Bioresource Technology*, vol. 135, pp. 182-190, 135.
- [26] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li y Y. Ding, «Progress in electrical energy storage system: A critical review,» *Progress in Natural Science*, vol. 19, nº 3, pp. 291-312, 2009.

- [27] H. Ibrahim, A. Ilinca y J. Perron, «Energy storage systems—Characteristics and comparisons,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, nº 5, pp. 1221-1250, 2008.
- [28] F. R. McLarnon y E. J. Cairns, «Energy Storage,» vol. 14, pp. 241-271, 1989.
- [29] J. R. Miller y P. Simon, «Electrochemical Capacitors for Energy Management,» *Science*, vol. 321, pp. 651-652, 2008.
- [30] W. Raza , F. Ali, N. Raza, Y. Luo, K.-H. Kim, J. Yang, S. Kumar, A. Mehmood y E. E. Kwon, «Recent advancements in supercapacitor technology,» *Nano Energy*, vol. 52, pp. 441-473, 2018.
- [31] C. Zhong, Y. Deng, W. Hu, J. Qiao, L. Zhangd y J. Zhang, «A review of electrolyte materials and compositions for electrochemical supercapacitors,» *Chemical Society Reviews*, nº 21, 2015.
- [32] L. L. Zhanga y X. S. Zhao, «Carbon-based materials as supercapacitor electrodes,» *Chemical Society Reviews*, nº 9, 2009.
- [33] W. Gu y G. Yushin, «Review of nanostructured carbon materials for electrochemical capacitor applications: advantages and limitations of activated carbon, carbide-derived carbon, zeolite-templated carbon, carbon aerogels, carbon nanotubes, onion-like carbon, and graphene,» *Energy and Environment*, vol. 3, nº 5, pp. 424-473, 2013.

- [34] A. Burke, «Ultracapacitors: why, how, and where is the technology,» *Journal of Power Sources*, vol. 91, nº 1, pp. 37-50, 2000.
- [35] S. Iqbal, H. Khatoun, A. H. Pandit y S. Ahmad, «Recent development of carbon based materials for energy storage devices,» *Materials Science for Energy Technologies*, vol. 2, nº 3, pp. 417-428, 2019.
- [36] Z. Lin, E. Goikolea, A. Balducci, K. Naoi, P. Taberna, M. Salanne, G. Yushin y P. Simon, «Materials for supercapacitors: When Li-ion battery power is not enough,» *Materialstoday*, vol. 21, nº 4, pp. 419-436, 2018.
- [37] B. K. Kim, S. Sy, A. Yu y J. Zhang, «Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Conversion,» *Handbook of Clean Energy Systems*, 2015.
- [38] M. Winter y R. J. Brodd, «What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors?,» *Chemical Reviews*, vol. 104, p. 4245–4269, 2004.
- [39] R. Kötz y M. Carlen, «Principles and applications of electrochemical capacitors,» *Electrochimica Acta*, vol. 45, nº 15-16, pp. 2483-2498, 2000.
- [40] S. Pay y Y. Baghzouz, «Effectiveness of battery-supercapacitor combination in electric vehicles,» *Bologna Power Tech Conference Proceedings*, vol. 3, p. 6, 2003.
- [41] Q. Zhang y G. Li, «Experimental Study on a Semi-Active Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicle Application,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, pp. 1014-1021, 2020.

- [42] G. Ren, J. Liu, J. Wan, Y. Guo y D. Yu, «Overview of wind power intermittency: Impacts, measurements, and mitigation solutions,» *Applied Energy*, vol. 204, pp. 47-65, 2017.
- [43] M. E. Şahin, F. Blaabjerg y A. Sangwongwanich, «A Comprehensive Review on Supercapacitor Applications and Developments,» *Energies* , vol. 15(3), nº 674, 2022.
- [44] J. Libich, J. Máca, J. Vondrák, O. Čech y M. Sedlaříková, «Supercapacitors: Properties and applications,» *Journal of Energy Storage*, vol. 17, pp. 224-227, 2018.
- [45] H. Wang y L. Pilon, «Accurate Simulations of Electric Double Layer Capacitance of Ultramicroelectrodes,» *Physical Chemistry*, Vols. %1 de %2115, 33, p. 16711–16719, 2011.
- [46] Z. Stojek, «The Electrical Double Layer and Its Structure,» *Electroanalytical Methods* , pp. 3-9, 2009.
- [47] B. H. I, «Low voltage electrolytic capacitor». US Patente US19540423042 19540414 , 23 07 1957.
- [48] A. H. A. Pandolfo, «Carbon properties and their role in supercapacitors,» *Journal of Power Sources*, vol. 157, nº 1, pp. 11-27, 2006.
- [49] P. A. Goodman, H. Li, Y. Gao, Y. Lu, J. Stenger-Smith y J. Redepenning, «Preparation and characterization of high surface area, high porosity carbon

- monoliths from pyrolyzed bovine bone and their performance as supercapacitor electrodes,» *Carbon*, vol. 55, pp. 291-298, 2013.
- [50] B. E. Conway, «Transition from "Supercapacitor" to "Battery" Behavior in Electrochemical Energy Storage,» *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 138, nº 6, pp. 1539-1548, 1991.
- [51] A. Burke, «Prospects for ultracapacitors in electric and hybrid vehicles,» *Proceedings of 11th Annual Battery Conference on Applications and Advances*, Vols. %1 de %2183-188, 1996.
- [52] Villatoro, E. L. E. (2019). UNA NUEVA GENERACION DE BATERIAS. El monstruo de Einstein: la primera imagen de un agujero negro, 6(2), 5.
- [53] V. Augustyn, J. Come, M. A. Lowe, J. W. Kim, P.-L. Taberna, S. H. Tolbert, H. D. Abruña, P. Simon y B. Dunn, «High-rate electrochemical energy storage through Li⁺ intercalation pseudocapacitance,» *Nature Mater*, vol. 12, pp. 518-522, 2013.
- [54] E. Pollak, N. Levy, L. Eliad, G. Salitra, A. Soffer y D. Aurbach, «Review on Engineering and Characterization of Activated Carbon Electrodes for Electrochemical Double Layer Capacitors and Separation Processes,» *Israel Journal of Chemistry* , vol. 48, pp. 287-303, 2008.
- [55] P. Simon, Y. Gogotsi y B. Dunn, «Where Do Batteries End and Supercapacitors Begin?,» *Science*, vol. 343, pp. 1210-1211, 2014.

- [56] A. Muzaffar, M. B. Ahamed, K. Deshmukh y J. Thirumalai, «A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, pp. 123-145, 2019.
- [57] D. P. Chatterjee y A. K. Nandi, «A review on the recent advances in hybrid supercapacitors,» *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 9, pp. 15880-15918, 2021.
- [58] P. Simon y Y. Gogotsi, «Materials for electrochemical capacitors,» *Nature Materials*, vol. 7, pp. 845-854, 2008.
- [59] B. Pal, S. Yang, S. Ramesh, V. Thangadurai y R. Jose, «Electrolyte selection for supercapacitive devices: a critical review,» *Nanoscale Advances*, 2023.
- [60] K. Fic, A. Platek, J. Piwek y E. Frackowiak, «Sustainable materials for electrochemical capacitors,» *Materialstoday*, vol. 21, nº 4, pp. 437-454, 2018.
- [61] F. Wang, X. Wu, X. Yuan, Z. Liu, Y. Zhang, L. Fu, Y. Zhu, Q. Zhou, Y. Wu y W. Huanga, «Latest advances in supercapacitors: from new electrode materials to novel device designs,» *Chemical Society Reviews*, vol. 46, pp. 6816-6854, 2017.
- [62] A. Balducci, R. Dugas, P. Taberna, P. Simon y M. M. P. S. D. Plée, «High temperature carbon-carbon supercapacitor using ionic liquid as electrolyte,» *Journal of Power Sources*, vol. 165, nº 2, pp. 922-927, 2007.
- [63] E. Frackowiak, Q. Abbas y F. Béguin, «Carbon/carbon supercapacitors,» *Journal of Energy Chemistry*, vol. 22, nº 2, pp. 226-240, 2013.

- [64] M. Geppert-Rybczyńska, J. K. Lehmann y A. Heintz, «Physicochemical properties of two 1-alkyl-1-methylpyrrolidinium bis[(trifluoromethyl)sulfonyl]imide ionic liquids and of binary mixtures of 1-butyl-1-methylpyrrolidinium bis[(trifluoromethyl)sulfonyl]imide with methanol or acetonitrile,» *The Journal of Chemical Thermodynamics*, vol. 71, pp. 171-181, 2014.
- [65] B. Szubzda, A. Szmaja, M. Ozimek y S. Mazurkiewicz, «Polymer membranes as separators for supercapacitors,» *Applied Physics A volume*, vol. 117, p. 1801–1809, 2014.
- [66] X. Wang, C. Yao, F. Wang y Z. Li, «Cellulose-Based Nanomaterials for Energy Applications,» *Small*, vol. 13, nº 42, 2017.
- [67] T. Kar, S. Godavarthib, S. K. Pasha, D. Kalim, L. Martínez-Gómez y M. K. Kesarlaa, «Layered materials and their heterojunctions for supercapacitor applications: a review,» *CRITICAL REVIEWS IN SOLID STATE AND MATERIALS SCIENCES*, vol. 47, p. 356–387, 2021.
- [68] S. Balasubramaniam, A. Mohanty, S. K. Balasingam, S. J. Kim y A. Ramadoss, «Comprehensive Insight into the Mechanism, Material Selection and Performance Evaluation of Supercapatteries,» *Nano-Micro Letters*, vol. 12, nº 85, 2020.
- [69] V. Augustyn, P. Simon y B. Dunn, «Pseudocapacitive oxide materials for high-rate electrochemical energy storage,» *Energy & Environmental Science*, nº 5, 2014.

- [70] B. E. Conway, *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*, 1999.
- [71] E. H. Herrero, L. J. Buller y H. D. Abr, «Underpotential Deposition at Single Crystal Surfaces of Au, Pt, Ag and Other Materials,» *Chemical Reviews*, pp. 1897-1930, 2001.
- [72] Moreno y M. J. Kong, *Sobre la electrodeposición metálica*, Lima Perú, 2004.
- [73] . L. Liu, L. Su, Y. Lu, Q. Zhang, L. Zhang, S. Lei, M. D. Levi y X. Yan, «The Origin of Electrochemical Actuation of MnO₂/Ni Bilayer Film Derived by Redox Pseudocapacitive Process,» *Advanced Functional Materials*, vol. 29, 2019.
- [74] Y. Jiang y J. Liu, «Definitions of Pseudocapacitive Materials: A Brief Review,» *Energy & Environmental Materials*, vol. 2, pp. 30-37, 2019.
- [75] Z. Ji, N. Li, M. Xie, X. Shen, W. Dai, K. Liu, K. Xu y G. Zhu, «High-performance hybrid supercapacitor realized by nitrogen-doped carbon dots modified cobalt sulfide and reduced graphene oxide,» *Electrochimica Acta*, vol. 334, 2020.
- [76] S. Lim, N. Huang y H. Lim, «Solvothermal synthesis of SnO₂/graphene nanocomposites for supercapacitor application,» *Ceramics International*, vol. 39, nº 6, pp. 6647-6655, 2013.
- [77] P. Lin, Q. She, B. Hong, X. Liu, Y. Shi, Z. Shi, M. Zheng y Q. Dong, «The Nickel Oxide/CNT Composites with High Capacitance for Supercapacitor,» *Electrochemical Society*, vol. 157, nº 7, 2010.

- [78] P. Bhattacharya, T. Joo, M. Kota y H. S. Park, «CoO nanoparticles deposited on 3D macroporous ozonized RGO networks for high rate capability and ultralong cyclability of pseudocapacitors,» *Ceramics International*, vol. 44, nº 1, pp. 980-987, 2018.
- [79] W. Wei, X. Cui, W. Chen y D. G. Ivey, «Manganese oxide-based materials as electrochemical supercapacitor electrodes,» *Chemical Society Reviews*, vol. 40, nº 3, pp. 1697-1721, 2011.
- [80] T. Kar , M. Casales-Díaz, J. J. Ramos-Hernández, O. Sotelo-Mazón, J. Henao, S. Valdez Rodríguez, S. Godavarthi, S. Liu, Y. Yamauchi y M. K. Kesarla, «CeO₂-x quantum dots decorated nitrogen-doped hollow porous carbon for supercapacitors,» *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 622, pp. 147-155, 2022.
- [81] D. P. Dubal, O. Ayyad, V. Ruiz y P. Gómez-Romero, «Hybrid energy storage: the merging of battery and supercapacitor chemistries,» *Chemical Society Reviews*, vol. 44, pp. 1777-1790, 2015.
- [82] A. Borenstein, O. Hanna, R. Attias, S. Luski, T. Brousse y D. Aurbach, «Carbon-based composite materials for supercapacitor electrodes: a review,» *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 5, pp. 12653-12672, 2017.
- [83] M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus y P. C. Eklund, «Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes: Their Properties and Applications,» Florida, Academic Press, 1995, p. 765.

- [84] H. Pan, J. Li y Y. Feng, «Carbon Nanotubes for Supercapacitor,» *Nanoscale Research Letters*, vol. 5, nº 654, 2010.
- [85] A. E.-M. A. M. Mohamed y M. A. Mohamed, «2 - Carbon nanotubes: Synthesis, characterization, and applications,» *Carbon Nanomaterials for Agri-Food and Environmental Applications: Micro and Nano Technologies*, pp. 21-32, 2020.
- [86] H. Dai, «Carbon nanotubes: opportunities and challenges,» *Surface Science*, vol. 500, nº 1-3, pp. 218-241, 2002.
- [87] C. Bathula, I. Rabani, S. Ramesh, S.-H. Lee, R. R. Palem, A. T. A. Ahmed, H. S. Kim, Y.-S. Seo y H.-S. Kim, «Highly efficient solid-state synthesis of Co₃O₄ on multiwalled carbon nanotubes for supercapacitors,» *Alloys and Compounds*, vol. 887, pp. 161-307, 2021.
- [88] T.-F. Yi, H. Chang, T.-T. Wei, S.-Y. Qi, Y. Li y Y.-R. Zhu, «Approaching high-performance electrode materials of ZnCo₂S₄ nanoparticle wrapped carbon nanotubes for supercapacitors,» *Materiomics*, vol. 7, nº 3, pp. 563-576, 2021.
- [89] V. V. Obreja, «On the performance of supercapacitors with electrodes based on carbon nanotubes and carbon activated material—A review,» *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 40, nº 7, pp. 2596-2605, 2008.
- [90] I. R. L. M. Lima Machado, H. M. Falcão Mendes, G. E. Silveira Alves y R. Resende Faleiros, «Nanotubos de carbono: potencial de uso em medicina veterinária,» *Cienc.Rural*, vol. 44, nº 10, pp. 1823-1829, 2014.

- [91] J.-H. Lee y S.-J. Park, «Recent advances in preparations and applications of carbon aerogels: A review,» *Carbon*, vol. 163, pp. 1-18, 2020.
- [92] M. Enterría y J. Figueiredo, «Nanostructured mesoporous carbons: Tuning texture and surface chemistry,» *Carbon*, vol. 108, pp. 79-102, 2016.
- [93] J. Zou, J. Liu, A. S. Karakoti, A. Kumar, D. Joung, Q. Li, S. I. Khondaker, S. Seal y L. Zhai, «Ultralight Multiwalled Carbon Nanotube Aerogel,» *ACS Nano*, vol. 4, nº 12, p. 7293–7302, 2010.
- [94] R. Scaffaro, A. Maio, F. Lopresti, D. Giallombardo, L. Botta, M. L. Bondì y S. Agnello, «Synthesis and self-assembly of a PEGylated-graphene aerogel,» *Composites Science and Technology*, vol. 128, pp. 193-200, 2016.
- [95] T. Kar, M. Casales-Díaz, S. Valdez Rodríguez y M. K. Kesarla, «Electrochemical charge storage performance of in-situ etched carbonized ZIF-8 aerogels,» *Materials Letters*, vol. 336, 2023.
- [96] Y. J. Lee, J. C. Jung, S. Park, J. G. Seo, S.-H. Baeck, J. R. Yoon, J. Yi y I. K. Song, «Preparation and characterization of metal-doped carbon aerogel for supercapacitor,» *Current Applied Physics*, vol. 10, nº 3, pp. 947-951, 2010.
- [97] R. Sharma y K. K. Kar, «Characteristics of Carbon Nanofibers,» de *Handbook of Nanocomposite Supercapacitor Materials I*, Springer, 2020, p. 215–245.

- [98] K. Wang, Y. Wang, Y. Wang, E. Hosono y H. Zhou, «Mesoporous Carbon Nanofibers for Supercapacitor Application,» *J. Phys. Chem. C*, vol. 113, nº 3, p. 1093–1097, 2009.
- [99] C.-C. Lai y C.-T. Lo, «Preparation of Nanostructural Carbon Nanofibers and Their Electrochemical Performance for Supercapacitors,» *Electrochimica Acta*, vol. 183, p. 2015, 2015.
- [100] M. Inagaki, Y. Yang y F. Kang, «Carbon Nanofibers Prepared via Electrospinning,» *Advanced Materials*, vol. 24, nº 19, pp. 2547-2566, 2012.
- [101] D. Yadav, F. Amini y A. Ehrmann, «Recent advances in carbon nanofibers and their applications – A review,» *European Polymer*, vol. 138, 2020.
- [102] F. Lai, Y.-E. Miao, L. Zuo, H. Lu, Y. Huang y T. Liu, «Biomass-Derived Nitrogen-Doped Carbon Nanofiber Network: A Facile Template for Decoration of Ultrathin Nickel-Cobalt Layered Double Hydroxide Nanosheets as High-Performance Asymmetric Supercapacitor Electrode,» *Small*, vol. 12, nº 24, pp. 3235-3244, 2016.
- [103] K. S. Novoselov, A. Geim y A. A. Firsov, «Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films,» *Science*, vol. 306, nº 5696, pp. 666-669, 2004.
- [104] M. J. Allen, V. C. Tung y R. B. Kaner, «Honeycomb Carbon: A Review of Graphene,» *Chemical Reviews*, vol. 110, nº 1, pp. 132-145, 2010.

- [105] H. Wu, Y. Zhang, L. Cheng, L. Zheng, Y. Li, W. Yuan y X. Yuan, «Graphene based architectures for electrochemical capacitors,» *Energy Storage Materials*, vol. 5, pp. 8-32, 2016.
- [106] R. Kumar, S. Sahoo, E. Joanni, R. K. Singh, W. K. Tan, K. K. Kar y A. Matsuda, «Recent progress in the synthesis of graphene and derived materials for next generation electrodes of high performance lithium ion batteries,» *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 75, 2019.
- [107] R. Kumar, S. Sahoo, E. Joanni, R. K. Singh, K. Maegawa, W. K. Tan, G. Kawamura, K. K. Kar y A. Matsuda, «Heteroatom doped graphene engineering for energy storage and conversion,» *Materials Today*, vol. 39, pp. 47-65, 2020.
- [108] S. Eigler y A. Hirsch, «Chemistry with Graphene and Graphene Oxide—Challenges for Synthetic Chemists,» *Angewandte Chemie*, vol. 53, nº 30, pp. 7720-7738, 2014.
- [109] J. Chen, B. Yao, C. Li y G. Shi, «An improved Hummers method for eco-friendly synthesis of graphene oxide,» *Carbon*, vol. 64, pp. 225-229, 2013.
- [110] V. Subramanian, C. Luo, A. M. Stephan, K. S. Nahm, S. Thomas y B. Wei, «Supercapacitors from Activated Carbon Derived from Banana Fibers,» *Physical Chemistry C*, vol. 111, nº 20, p. 7527–7531, 2007.
- [111] D. R. Lobato-Peralta, A. Ayala-Cortés, A. Longoria, D. E. Pacheco-Catalán, P. U. Okoye, H. I. Villafán-Vidales, C. A. Arancibia-Bulnes y A. K. C.-G. , «Activated

- carbons obtained by environmentally friendly activation using solar energy for their use in neutral electrolyte supercapacitors,» *Energy Storage*, vol. 52, 2022.
- [112] A. M. Abioye y F. N. Ani, «Recent development in the production of activated carbon electrodes from agricultural waste biomass for supercapacitors: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 1282-1293, 2015.
- [113] L. Wei y G. Yushin, «Nanostructured activated carbons from natural precursors for electrical double layer capacitors,» *Nano Energy*, vol. 1, nº 4, pp. 552-565, 2012.
- [114] M. Sevilla y R. Mokaya, «Energy storage applications of activated carbons: supercapacitors and hydrogen storage,» *Energy & Environmental Science*, vol. 7, pp. 1250-1280, 2014.
- [115] R. Azargohar y A. Dalai, «Steam and KOH activation of biochar: Experimental and modeling studies,» *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 110, pp. 413-421, 2008.
- [116] M. A. Yarmo, M. W. M. Hisham y W. N. R. W. Isahak, «Highly Porous Carbon Materials from Biomass by Chemical and Carbonization Method: A Comparison Study,» *Journal of Chemistry*, 2012.
- [117] B. K. Saikia, S. M. Benoy, M. Bora, J. Tamuly, M. Pandey y D. Bhattacharya, «A brief review on supercapacitor energy storage devices and utilization of natural carbon resources as their electrode materials,» *Fuel*, vol. 282, 2020.

- [118] P. M. Shanmuga, P. Divya y R. Rajalakshmi, «A review status on characterization and electrochemical behaviour of biomass derived carbon materials for energy storage supercapacitors,» *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, vol. 16, 2020.
- [119] P. Bajpai, «Structure of Lignocellulosic Biomass,» de *Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuel Production*, Singapore, Springer, 2016, p. 7–12.
- [120] J. Orfão, . F. Antunes y J. Figueiredo, «Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials—three independent reactions model,» *Fuel*, vol. 78, nº 3, pp. 349-358, 1999.
- [121] C. I. Contescu, S. P. Adhikari, N. C. Gallego, N. D. Evans y B. E. Biss, «Activated Carbons Derived from High-Temperature Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass,» *C*, vol. 4, nº 51, 2018.
- [122] Suhas, P. Carrott y M. R. Carrott, «Lignin – from natural adsorbent to activated carbon: A review,» *Bioresource Technology*, vol. 98, nº 12, pp. 2301-2312, 2007.
- [123] J. Li, K. Han y S. Li , «Porous carbons from *Sargassum muticum* prepared by H₃PO₄ and KOH activation for supercapacitors,» *Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 29, p. 8480–8491, 2018.
- [124] J. P. Stratford, T. R. Hutchings y F. A. de Leij, «Intrinsic activation: The relationship between biomass inorganic content and porosity formation during pyrolysis,» *Bioresource Technology*, vol. 159, pp. 104-111, 2014.

- [125] K. Anastasakis, A. Ross y J. Jones, «Pyrolysis behaviour of the main carbohydrates of brown macro-algae,» *Fuel*, vol. 90, nº 2, pp. 598-607, 2011.
- [126] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, «¿Sabes qué es el sargazo?,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/sabes-que-es-el-sargazo?idiom=es>.
- [127] G. P. B. Marquez, W. J. E. Santiañez, G. C. Trono Jr, S. R. B. de la Rama, H. Takeuchi y T. Hasegawa, «Chapter 16 - Seaweeds: a sustainable fuel source,» de *Seaweed Sustainability: Food and Non-Food Applications*, Academic Press, 2015, pp. 421-458.
- [128] M. García-Sánchez, C. Graham, E. Vera, E. Escalante-Mancera, L. Álvarez-Filip y B. I. van Tussenbroek, «Temporal changes in the composition and biomass of beached pelagic Sargassum species in the Mexican Caribbean,» *Aquatic Botany*, vol. 167, 2020.
- [129] M. N. Sissini, M. B. Barbosa de Barros Barreto, M. T. Menezes Széchy y M. Bouças de Lucena, «The floating Sargassum (Phaeophyceae) of the South Atlantic Ocean – likely scenarios,» *Phycologia*, vol. 56, nº 3, pp. 321-328, 2017.
- [130] D. Laffoley y e. al., «The protection and management of the Sargasso Sea: The golden floating rainforest of the Atlantic Ocean. Summary Science and Supporting Evidence Case,» de *Sargasso Sea Alliance*, 2011, p. 44.

- [131] B. Witherington, S. Hiram y R. Hardy, «Young sea turtles of the pelagic Sargassum-dominated drift community: habitat use, population density, and threats,» *Mar Ecol Prog Ser*, vol. 463, pp. 1-22, 2012.
- [132] T. L. Casazza y S. W. Ross, «Fishes associated with pelagic Sargassum and open water lacking Sargassum in the Gulf Stream off North Carolina,» *Fishery Bulletin*, vol. 106, nº 4, pp. 348-363, 2008.
- [133] K. Sudhakar, R. Mamat, M. Samykano , W. Azmi, W. Ishak y T. Yusaf, «An overview of marine macroalgae as bioresource,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 165-179, 2018.
- [134] D. Moreira y J. C. Pires, «Atmospheric CO2 capture by algae: Negative carbon dioxide emission path,» *Bioresource Technology*, vol. 215, pp. 371-379, 2016.
- [135] Wiki Incar, «Algas: antecedentes biológicos,» Wiki Incar, [En línea]. Available: <https://wikincar.cl/produccion-y-tecnicas-de-cultivo/>.
- [136] S. Campos León, Á. Tresierra Aguilar, E. Alvitez Izquierdo, S. Alfaro Mudarra y J. Mego Reategui, Catálogo de macroalgas marinas de la región la libertad, Instituto del Mar del Perú (IMARPE), 2009.
- [137] M. T. Cesário , M. M. R. da Fonseca , M. M. Marques y C. M. de Almeida M. , «Marine algal carbohydrates as carbon sources for the production of biochemicals and biomaterials,» *Biotechnology Advances*, vol. 36, nº 3, p. Biotechnology Advances, 2018.

- [138] C. Dawczynski, R. Schubert y G. Jahreis, «Amino acids, fatty acids, and dietary fibre in edible seaweed products,» *Food Chemistry*, vol. 103, nº 3, pp. 891-899, 2007.
- [139] J. Sadhukhan, S. Gadkari, E. Martinez-Hernandez, K. S. Ng, M. Shemfe, E. Torres-Garcia y J. Lynch, «Novel macroalgae (seaweed) biorefinery systems for integrated chemical, protein, salt, nutrient and mineral extractions and environmental protection by green synthesis and life cycle sustainability assessments,» *Green Chemistry*, vol. 21, nº 10, pp. 2635-2655, 2019.
- [140] J. L. Godínez-Ortega, J. V. Cuatlán-Cortés, J. M. López-Bautista y B. I. van Tussenbroek, «A Natural History of Floating Sargassum Species (Sargasso) from Mexico,» de *Natural History and Ecology of Mexico and Central America*, 2021.
- [141] E. M. Johns, R. Lumpkin, N. F. Putman, R. H. Smith, F. E. Muller-Karger, D. T. Rueda-Roa, C. Hu, M. Wang, M. T. Brooks, L. J. Gramer y F. E. Werner, «The establishment of a pelagic Sargassum population in the tropical Atlantic: Biological consequences of a basin-scale long distance dispersal event,» *Progress in Oceanography*, vol. 182, 2020.
- [142] J. Gower , E. Young y S. King, «Satellite images suggest a new Sargassum source region in 2011,» *Remote Sensing Letters*, vol. 4, nº 8, pp. 764-773, 2013.
- [143] M. Wang, C. Hu, G. Mitchum, B. Lapointe y J. P. Montoya, «The great Atlantic Sargassum belt,» *Science*, vol. 365, nº 6448, pp. 83-87, 2019.

- [144] L. Adet, G. N. Nsofor, K. O. Ogunjobi y B. Camara, «Knowledge of Climate Change and the Perception of Nigeria's Coastal Communities on the Occurrence of *Sargassum natans* and *Sargassum fluitans*,» *Open Access Library*, vol. 4, 2017.
- [145] C. A. Oviatt, K. Huizenga, C. S. Rogers y W. J. Miller, «What nutrient sources support anomalous growth and the recent sargassum mass stranding on Caribbean beaches? A review,» *Marine Pollution Bulletin*, vol. 145, pp. 517-525, 2019.
- [146] R. E. Rodríguez-Martínez, B. van Tussenbroek y E. Jordán-Dahlgren, «Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe Mexicano,» de *Florecimientos Algales Nocivos en México*, Ensenada, 2016, pp. 352-365.
- [147] B. I. van Tussenbroek, H. A. Hernández Arana, R. E. Rodríguez-Martínez, J. Espinoza-Avalos, H. M. Canizales-Flores, C. E. González-Godoy, M. G. Barba-Santos, A. Vega-Zepeda y L. Collado-Vides, «Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities,» *Marine Pollution Bulletin*, vol. 122, nº 1-2, pp. 272-281, 2017.
- [148] D. Resiere, R. Valentino, R. Nevière, R. Banydeen, P. Gueye y J. Florentin, «*Sargassum* seaweed on Caribbean islands: an international public health concern,» *Correspondence*, vol. 392, 2018.
- [149] Y. Yu, C. Wang, X. Guo y J. P. Chen, «Modification of carbon derived from *Sargassum* sp. by lanthanum for enhanced adsorption of fluoride,» *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 441, pp. 113-120, 2015.

- [150] K. K. Kar, Handbook of nanocomposite supercapacitor materials II, vol. 302, Springer International Publishing, 2020.
- [151] Y. Wang, Y. Song y Y. Xia, «Electrochemical capacitors: mechanism, materials, systems, characterization and applications,» *Chemical Society Reviews*, vol. 45, nº 21, pp. 5925-5950, 2016.
- [152] L. Wei, M. Sevilla, A. B. Fuertes, R. Mokaya y G. Yushin, «Hydrothermal Carbonization of Abundant Renewable Natural Organic Chemicals for High-Performance Supercapacitor Electrodes,» *Advanced Energy Materials*, vol. 1, nº 3, pp. 356-361, 2011.
- [153] B.-A. Me, O. Munteshari, J. Lau, B. Dunn y L. Pilon, «Physical Interpretations of Nyquist Plots for EDLC Electrodes and Devices,» *Physical Chemistry C*, vol. 122, nº 1, p. 194–206, 2018.
- [154] J. Huang, Z. Li, B. Y. Liaw y J. Zhang, «Graphical analysis of electrochemical impedance spectroscopy data in Bode and Nyquist representations,» *Journal of Power Sources*, vol. 309, pp. 82-98, 2016.
- [155] M. Rajesh, R. Manikandan, S. Park, B. C. Kim, W.-J. Cho, K. H. Yu y C. J. Raj, «Pinecone biomass-derived activated carbon: the potential electrode material for the development of symmetric and asymmetric supercapacitors,» *International Journal of Energy Research*, vol. 44, nº 11, pp. 8591-8605, 2020.

- [156] Y. Zhang, S. Liu, X. Zheng, X. Wang, Y. Xu, H. Tang, F. Kang, Q.-H. Yang y J. Luo, «Biomass Organs Control the Porosity of Their Pyrolyzed Carbon,» *Advanced Functional Materials*, vol. 27, nº 3, 2016.
- [157] X. Jia, F. Guo, Y. Zhan, H. Zhou, X. Jiang y L. Qian, «Synthesis of porous carbon materials with mesoporous channels from Sargassum as electrode materials for supercapacitors,» *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 873, 2020.
- [158] J. Niu, R. Shao, J. Liang, M. Dou, Z. Li, Y. Huang y F. Wang, «Biomass-derived mesopore-dominant porous carbons with large specific surface area and high defect density as high performance electrode materials for Li-ion batteries and supercapacitors,» *Nano Energy*, vol. 36, pp. 322-330, 2017.
- [159] H. Peng, K. Li, T. Wang, J. Wang, J. Wang, R. Zhu, D. Sun y S. Wang, «Preparation of hierarchical mesoporous CaCO₃ by a facile binary solvent approach as anticancer drug carrier for etoposide,» *Nanoscale Research Letters*, vol. 8, nº 321, 2013.
- [160] A. Ferreira Novais, A. P. Pereira Lima, A. R. da Silva Santos, R. R. Ribeiro Bezerra, F. C. de Lima Ferreira y D. do Nascimento Souza, «Caracterização estrutural e morfológica de compostos químicos para produção vítrea,» *Scientia Plena*, vol. 15, nº 7, 2019.
- [161] M. M. Mailafiya, K. Abubakar, A. Danmaigoro, S. M. Chiroma, E. B. A. Rahim, M. A. M. Moklas y Z. A. B. Zakaria, «Cockle Shell-Derived Calcium Carbonate

- (Aragonite) Nanoparticles: A Dynamite to Nanomedicine,» *Applied Sciences* , vol. 9, n° 14, 2019.
- [162] C.-S. Yang, Y. S. Jang y H. K. Jeong, «Bamboo-based activated carbon for supercapacitor applications,» *Current Applied Physics*, vol. 14, n° 12, pp. 1616-1620, 2014.
- [163] A. B. D. Nandiyanto, R. Oktiani y R. Ragadhita, «How to read and interpret FTIR spectroscopy of organic material,» *Indonesian Journal of Science & Technology*, vol. 4, n° 1, 2019.
- [164] J. Coates, «Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach,» de *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, Chichester, R.A. Meyers, 200, p. 10815–10837.
- [165] M. Karnan, K. Subramani, N. Sudhan, N. Ilayaraja y M. Sathish, «Aloe vera Derived Activated High-Surface-Area Carbon for Flexible and High-Energy Supercapacitors,» *American Chemical Society*, vol. 8, n° 51, p. 35191–35202, 2016.
- [166] S. Godavarthi, K. Mohan Kumar, E. Vázquez Vélez, A. Hernandez-Eligio, M. Mahendhiran , N. Hernandez-Como, M. Aleman y L. Martinez Gomez, «Nitrogen doped carbon dots derived from Sargassum fluitans as fluorophore for DNA detection,» *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 172, pp. 36-41, 2017.

- [167] S. I. Kuriyavar, R. Vetrivel, S. G. Hegde, A. V. Ramaswamy, D. Chakrabarty y S. Mahapatra, *Journal of Materials Chemistry*, vol. 10, pp. 1835-1840, 2000.
- [168] F. Manoli y E. Dalas, «Spontaneous precipitation of calcium carbonate in the presence of ethanol, isopropanol and diethylene glycol,» *Journal of Crystal Growth*, vol. 218, pp. 359-364, 2000.
- [169] E. Dalas y P. G. Koutsoukos, «The crystallization of vaterite on cholesterol,» *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 127, nº 1, pp. 273-280, 1989.
- [170] H. J. Zheng, . A. M. Yu y C. A. Ma, «Effect of Pore Characteristics on Electrochemical Capacitance of Activated Carbons,» *Russian Journal of Electrochemistry*, vol. 48, nº 12, p. 1179–1186, 2012.
- [171] J. Yang y K. Qiu, «Development of high surface area mesoporous activated carbons from herb residues,» *Chemical Engineering Journal*, vol. 167, nº 1, pp. 148-154, 2011.
- [172] S. Li, X. Tan, H. Li, Y. Gao, Q. Wang, G. Li y M. Guo , «Investigation on pore structure regulation of activated carbon derived from sargassum and its application in supercapacitor,» *scientific reports*, vol. 12, 2022.
- [173] E. Raymundo-Piñero, M. Cadek y F. Béguin, «Tuning Carbon Materials for Supercapacitors by Direct Pyrolysis of Seaweeds,» *Advanced Functional Materials*, vol. 19, nº 7, pp. 1032-1039, 2009.

- [174] P. Hao, Z. Zhao, J. Tian, H. Li, Y. Sang, G. Yu, H. Cai, H. Liu, C. P. Wong y A. Umar, «Hierarchical porous carbon aerogel derived from bagasse for high performance supercapacitor electrode,» *Nanoscale*, vol. 6, nº 20, pp. 12120-12129, 2014.
- [175] G. Ma, D. Guo, K. Sun, H. Peng, Q. Yang, X. Zhou, X. Zhao y Z. Lei, «Cotton-based porous activated carbon with a large specific surface area as an electrode material for high-performance supercapacitors,» *RSC Advances*, vol. 5, nº 79, pp. 64704-64710, 2015.
- [176] F. Guo, Y. Zhan, X. Jia, H. Zhou, S. Liang y L. Qian, «Fabrication of nitrogen-doped hierarchical porous carbons from Sargassum as advanced electrode materials for supercapacitors,» *New Journal of Chemistry*, vol. 45, nº 34, pp. 15514-15524, 2021.
- [177] F. Jiménez, F. Mondragón y D. López, «Caracterización RAMAN de carbonizados de carbón,» *Ingeniería y Competitividad*, vol. 14, nº 2, pp. 111-118, 2012.
- [178] T. Kar, . M. Casales-Díaz, S. Valdez Rodríguez y M. K. Kesarla, «Electrochemical charge storage performance of in-situ etched carbonized ZIF-8 aerogels,» *Materials Letters*, vol. 336, p. 133847, 2023.
- [179] L. D. Mateos Luque y J. R. Ruiz, «Análisis de pigmentos por espectroscopia Raman de la villa romana de El Ruedo,» *ANTIQUITAS*, nº 27, pp. 69-83, 2015.

- [180] Y. Chen, X. Xu, R. Ma, S. Sun, J. Lin, J. Luo y H. Huang, «Preparation of hierarchical porous carbon by pyrolyzing sargassum under microwave: The internal connection between structure-oriented regulation and performance optimization of supercapacitors,» *Journal of Energy Storage*, vol. 53, p. 105190, 2022.
- [181] Z. Zhou y X.-F. Wu, «Graphene-beaded carbon nanofibers for use in supercapacitor electrodes: Synthesis and electrochemical characterization,» *Journal of Power Sources*, vol. 222, pp. 410-416, 2013.
- [182] C. Portet, Z. Yang, Y. Korenblit, Y. Gogotsi, R. Gogotsi y G. Yushin, «Electrical Double-Layer Capacitance of Zeolite-Templated Carbon in Organic Electrolyte,» *Electrochemical Society*, vol. 156, 2009.
- [183] M.-J. Pintor, C. Jean-Marius, V. Jeanne-Rose, P.-L. Taberna, P. Simon, J. Gamby, R. Gadiou y S. Gaspard, «Preparation of activated carbon from *Turbinaria turbinata* seaweeds and its use as supercapacitor electrode materials,» *Comptes Rendus Chimie*, vol. 16, n° 1, pp. 73-79, 2013.
- [184] K. Jurewicz, S. Delpeux, V. Bertagna, F. Béguin y E. Frackowiak , «Supercapacitors from nanotubes/polypyrrole composites,» *Chemical Physics Letters*, vol. 347, pp. 36-40, 2001.
- [185] H. Feng, H. Hu, H. Dong, Y. Xiao, Y. Cai, B. Lei, Y. Liu y M. Zheng, «Hierarchical structured carbon derived from bagasse wastes: A simple and efficient synthesis

- route and its improved electrochemical properties for high-performance supercapacitors,» *Journal of Power Sources*, vol. 302, pp. 164-173, 2016.
- [186] E. Elanthamilan, S. J. Jennifer y S.-F. Wang, «Sustainable development of porous activated carbon from *Sargassum wightii* seaweed for electrode material in symmetric supercapacitors,» *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 927, p. 116994, 2022.
- [187] E. Elanthamilan, S. J. Jennifer, S.-F. Wang y J. P. Merlin, «Effective conversion of *Cassia fistula* dry fruits biomass into porous activated carbon for supercapacitors,» *Materials Chemistry and Physics*, vol. 286, p. 126188, 2022.
- [188] P. Navalpotro, M. Anderson, R. Marcilla y J. Palma , «Insights into the energy storage mechanism of hybrid supercapacitors with redox electrolytes by Electrochemical Impedance Spectroscopy,» *Electrochimica Acta*, vol. 263, pp. 110-117, 2018.
- [189] W. Zhang, N. Lin, D. Liu, J. Xu, J. Sha, J. Yin, X. Tan, H. Yang, . H. Lu y H. Lin, «Direct carbonization of rice husk to prepare porous carbon for supercapacitor applications,» *Energy*, vol. 128, pp. 618-625, 2017.
- [190] Y. Xiao, C. Long, M.-T. Zheng, H.-W. Dong, B.-F. Lei, H.-R. Zhang y Y.-L. Liu, «High-capacity porous carbons prepared by KOH activation of activated carbon for supercapacitors,» *Chinese Chemical Letters*, vol. 25, nº 6, pp. 865-868, 2014.

- [191] X. Zhu, S. Yu, K. Xu, Y. Zhang, L. Zhang, G. Lou, Y. Wu, E. Zhu, . H. Chen, . Z. Shen, B. Bao y S. Fu, «Sustainable activated carbons from dead ginkgo leaves for supercapacitor electrode active materials,» *Chemical Engineering Science*, vol. 181, pp. 36-45, 2018.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT
SGI certificado en la norma ISO 9001:2015 e ISO 21001:2018

FORMA T4
NOMBRAMIENTO COMITÉ REVISOR

Cuernavaca, Mor., a 2 de octubre de 2023

DR. DANIEL MORALES GUZMÁN
DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ
DR. MOHAN KUMAR KESARLA
DR. JOSÉ ALFREDO ARIZA ESPINOZA
MTRA. DANIELA CORDOVA OCAMPO
P R E S E N T E

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** de la TESIS titulada:

“Carbón derivado de sargazo para almacenamiento de carga”

Dirigida por el **DR. MOHAN KUMAR KESARLA**

Que presenta (el) o (la) **C. CECILIA GONZALEZ ESCOBAR**, del programa educativo de la **LICENCIATURA en INGENIERÍA QUÍMICA**

A T E N T A M E N T E
Por una humanidad culta

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA

Se anexa firma electrónica

D I C T A M E N

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA DE LA FCQeI
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTÁMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

VOTO	NOMBRE
Aprobatorio	DR. DANIEL MORALES GUZMÁN
Aprobatorio	DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ
Aprobatorio	DR. MOHAN KUMAR KESARLA
Aprobatorio	DR. JOSÉ ALFREDO ARIZA ESPINOZA
Aprobatorio	MTRA. DANIELA CORDOVA OCAMPO

Se anexan firmas electrónicas de cada revisor, en las cuales se incluye la fecha y hora que se ha emitido el voto aprobatorio.

VALH/fmg

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209,
Tel. (777) 329 7000, Ext. 7039, fcqei@uaem.mx





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2023-10-03 00:00:18 | Firmante

DUvdUvR4DEbQjGBJicThDA9QJFfYvGiwWkO8uKiToA8dYxTFoJwwAHVO9vfum2mOf4dHvGEJWwGtRL1M/QeIAeYP8mv7uPYV+Uy/fuZmFmehNHtnAI4minUgTyU0eswMM
VEP9N0xv25o0/ELFapmx5BKcldpGugW0m4Va11vxZN/pM6aYgyP7BjGbeZhfXaoeN6woKXxVsmGeUtdBtBkMr5rhMux39EEARrEp2eRVC5mmuuXE9SD0Kvn5BoJF3tG6Xh3
1ufH00bedjnXwSIDJSGBIhIBLnE9hi65tFDK1k2euZWsv1boIMRte1Cqyc5O9RI8+sUOeaTY7C0NaRQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[ckmWiZr0B](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/Zg4xolhFMFpRNI9gOc2nwZtDTNTaoQjj>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ROBERTO FLORES VELAZQUEZ | Fecha:2023-10-13 13:01:15 | Firmante

AEPbiAEnwthPnTxldTbBMr4dXm7SRg2lvYQOfMK1TnjDWhiN6as7YcE4CnswoRDNRLowRXI8eTXj+9oR4KR9zDsw3rpbqa470ldJUBjygtf11ouNN8c23jpuaXjzkiVmVPz0yeviv7lTICr3/9L3u4dPJx3oXxaUP5P1GK2EGhwk/T+aB5L4yVGdvPGtHNKx1zUWQc+GIAMFaFg9inhq5K3LEPB+KcMMk+0YXSOO2z0CP8SKppHWhHU3y91KfDZ/h5w3aTp8CUZ+VzGnXDPjNcevjxpub336PR5S+SSSqKldBCCXyu7U7VnNtGlExYLwqym4URMJZ2QmE55sEMg==

MOHAN KUMAR KESARLA . | Fecha:2023-10-13 14:24:18 | Firmante

SpRHSDtasvUcgAJfYAOctqbFDuU4aTuiBb3xUnCr8Z25w8GdCvEHmDUAEZg5Wli6A6iX2mMOgKni5M2cX6up3VabngQ2e6X6TTPteooOYXHF13L5nkqeAajU3n/eq1qimT6/q6V1Qe6fXQmsJueKxLWojVHaf6twRacJMDjrtzgWZNDdUooRt+XrqqYbIDTihc95bxVGDJiDd/qBRLBkXvxY8qyz0vASE62MS1nIYDOXj/91vcImmD/KSDX5qL/YPnvirPFMZ6GSmCtG3NgxKxLzNhi3CiyprvYLSGY0gDarcEhQTaadiMpel9rITFCW4I06eSq40Tsygf+QtGQ==

DANIELA CORDOVA OCAMPO | Fecha:2023-10-18 12:09:32 | Firmante

OOIxJHIG0VeyP+mMi3OscI/3/AGSVclze87ePLMkHSU4VWJmph+Kqh7BJPkkb/6aXZfDWzD6TEqLGnup1n6Z+C6bTU8I78126rESYUCnprL1Tru/LaCDHyEutxkdGhuOSJk75nTMyVjxdl25jjiQlJUBFthf7HTm1QNZpAKeU0bIYihi4XlnaCtazRy8iGETf5JRUiyy0/gpkLW9ut+gAd3SXouhjrXqQLNykYowag1MdAEBnJA4LoUNPS+INA7BF1luw2PUT8P9VhzET2UfWGDuxitRgJDPWdCQUJVLXoe6MqWg+J1xxIEUNPL43bLcza7NM7yQMQCPTspyAoGRA==

DANIEL MORALES GUZMAN | Fecha:2023-10-19 18:30:27 | Firmante

TuWgHKd+trX/fo4OJb1LzrA2UYj2wYxP7aVyCa59Abacr+V/jxf6s5xBny9FtFQppliBqFnW7izalldc5uETZM6tb7dy/SVf4w+PWPflhaw66sLZEUj8nJSiZN4WreglBolqnlDvrROvA/HUq9r9MZ56g1/jymeTm/8iYrPjd9dqv9GF9PshxGqP+O91utbZRDlqn4lKtof/JRK7rtpp7nwpq3MvLE9+cfjs5X8oi7X31RzKck8wPhqdTjgYd1LAqO2tCD4y/gYDTvzHpUEw3jcw/LopdsAFkVfWf/s8khuqt4Y0SwVd0TIp8CfhUWnDrUEr9PInRJEKvNg==

JOSE ALFREDO ARIZA ESPINOZA | Fecha:2023-10-24 14:00:22 | Firmante

oS0UmEHJkc2tN9Z49H48Yfp7SeVOP4ItcVJvMaxWd7T67SXvAvElv9mydyoSm6hKEEYBT2WBUaf7L1ol3H2T1PjPQdX46uTFNu8velc1G5x8+ew3ZQCcz293qeCzfpFP5W/eUjdw8gllN/R0FWvGKFTI7kt6zPu9KiZzAwdU+I+fyToUDHPdp6evZZ10azlrip8uQUPUW78lkmplqpxrlBuz7VpB2UU9caThGZWAoXJWp53qAejl+dTD3g21uJFgiocfxkquqmzjR8CBA S8tucoxW+fZCNZ3Aaa61AYkolpk0uQ88ZH7u0kSHDaum9nytRn+ULQH2gAM07R8f5/Q==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



c5T8enAZI

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/hD2eJ1vPX8itlqW4Q181ZIDcUnRYVNOi>

