

Informe de evaluación del digestato anaerobio de algas como fertilizante.

Fecha: Noviembre 2021

Contenido

1. Introducción	3
2. Objetivo	4
3. Consideraciones sobre la fertilización	4
3.1. Fertilización y nutrientes	4
3.2. Comercialización de fertilizantes.....	6
4. Valorización del digestato	7
4.1. Características de los digestatos	8
4.1.1. Contenido en materia orgánica y nutrientes.....	8
4.1.2. Estabilidad (biodegradabilidad) y madurez (fitotoxicidad)	10
4.1.3. Nivel de higienización	10
4.1.4. Presencia de compuestos tóxicos e impurezas	10
5. Resultados experimentales.....	11
6. Conclusiones	13
7. Anexo 1: Metodología.....	14
7.1. Caracterización fisicoquímica	14
8. Bibliografía.....	15

1. Introducción

La digestión anaerobia permite la obtención de energía a partir de biomasa de diferente origen y de residuos, y con el proyecto VALORALGAE surge la posibilidad de que las algas de arribazón sean empleadas como fuente de generación biogás.

La digestión anaerobia es un proceso biológico que se da en ausencia de oxígeno a través de diferentes etapas en las que van interviniendo un grupo heterogéneo de microorganismos, los cuales transforman la fracción más degradable de la materia orgánica en biogás (compuesto formado en su gran mayoría por metano y dióxido de carbono, aunque también incluye otros gases en menor proporción como vapor de agua, sulfuro de hidrógeno, entre otros). Los compuestos de más difícil digestión van a conformar el digestato, que es la fracción líquida de salida del digestor.

A pesar de que el producto principal del proceso de digestión anaerobia es el biogás, tan importante como maximizar el rendimiento del biogás es obtener un digestato que tenga un valor potencial y que pueda ser aprovechable en el marco del sistema objeto de estudio. Hay que tener en cuenta que este subproducto es similar en volumen al ocupado por los residuos de partida, aunque también cabe destacar que presenta ventajas significativas.

El digestato tiene una composición homogénea, tanto más cuanto mayor sea el tiempo de retención dentro del reactor. Además, gracias a las transformaciones que suceden durante la digestión anaerobia, no presenta olor desagradable ni emite compuestos orgánicos volátiles. Por lo tanto, el proceso consigue una cierta estabilización de los residuos, evitando así uno de los impactos negativos más notable de éstos, como es la emisión de olores desagradables.

La naturaleza y composición química del residuo que entra en el digestor va a condicionar la composición cualitativa de la población bacteriana que va a estar presente en cada etapa y de las características del digestato obtenido.

En cuanto al valor agronómico del digestato, es importante destacar que el contenido en nutrientes (NPK) del sustrato se mantiene estable en el subproducto tras la digestión, ya que durante la digestión anaerobia no se produce pérdida del contenido en nitrógeno.

Cabe destacar que a la hora de determinar la calidad del digestato, además de tener en cuenta el incremento de la estabilidad del mismo, su contenido en nutrientes y materia orgánica, hay que tener presente que los materiales digeridos pueden contener productos tóxicos de naturaleza orgánica tales como, hidrocarburos aromáticos policíclicos, etc., así como otros contaminantes en forma de impurezas de tipo físico (arenas, plástico, , etc.); una correcta separación en origen de la materia prima empleada evita este tipo de impurezas.

En este contexto, el proyecto "VALORALGAE: Cerrando la cadena de valor en la acuicultura marina a través de la valorización energética de las algas de arribazón" persigue promover la **sostenibilidad del sector acuícola marítimo** a través de la implantación de un proceso innovador de **valorización de algas de arribazón** mediante su transformación en biocombustibles que posibiliten la obtención de energía renovable. Las opciones de valorización seleccionadas son: transformación en un combustible renovable gaseoso (biogás) a través de digestión anaerobia, y el aprovechamiento de las algas como combustible sólido (pellets). Ambos combustibles permitirán la generación de energía renovable de emisiones neutras. Adicionalmente, se estudiará la

viabilidad de aprovechar ese gas renovable y/o pellets como fuente de energía para lonjas, puertos o cofradías, cumpliendo así con la filosofía de economía circular dentro del sector acuícola marino.

2. Objetivo

El objetivo de este trabajo es analizar la composición fisicoquímica del digestato procedente de un reactor anaerobio y evaluar las posibilidades de uso como fertilizante.

3. Consideraciones sobre la fertilización

La forma más sencilla e inmediata de valorizar cualquier sustrato orgánico es su aplicación directa al suelo agrícola como fertilizante. Sin embargo, el uso inadecuado o aplicación de dosis excesivas puede suponer un riesgo de contaminación del ecosistema, incidiendo negativamente en el suelo, el agua y las plantas. De ahí que exista una legislación específica como el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes y también legislación adicional, para evitar riesgos medioambientales, como la contaminación por nitratos (Directiva 91/676/CE), por metales pesados (Directiva 86/278/CE), o patógenos (Reglamento CE 1774/2002 modificado por Reglamento CE 1069/2009). Las condiciones edáficas y la hidrología de las zonas condicionan el nivel de riesgo de contaminación, lo que ha llevado a establecer los denominados “Códigos de Buenas Prácticas Agrícolas” por las diferentes comunidades Autónomas.

Por lo tanto, existe la necesidad de un control de la calidad de los productos utilizados en la agricultura. La aplicación directa en suelos de los materiales digeridos procedentes de las plantas de biogás exige, por tanto, una evaluación de su contenido en nutrientes para el sistema suelo-planta y de la cantidad y tipo de materia orgánica que aportan.

3.1. Fertilización y nutrientes

El primer aspecto que hay que considerar en relación con la fertilización de los cultivos es la naturaleza y el suministro de los nutrientes de las plantas. Las plantas elaboran su biomasa usando agua, dióxido de carbono tomado del aire, energía solar y nutrientes extraídos del suelo y del agua; son consideradas los únicos productores netos de energía del sistema biológico, a excepción de algunos microorganismos. Para un óptimo crecimiento de la planta, los nutrientes deben ser solubles en el agua contenida en el suelo, en **cantidades adecuadas y equilibradas**, de acuerdo con el momento de demanda del cultivo.

Las plantas toman los nutrientes principalmente de:

- Las reservas naturales del suelo
- Fertilizantes orgánico e inorgánicos
- Nitrógeno atmosférico a través de la fijación biológica
- Depositiones aéreas de origen eólico y pluvial
- Irrigación, aguas subterráneas y sedimentación provocada por las escorrentías

Estas fuentes son utilizadas por los agricultores de acuerdo con la disponibilidad y posibilidad económica. La cantidad total de los nutrientes disponibles para un cultivo es un factor fundamental en la determinación del rendimiento final de la cosecha.

Los constituyentes masivos de las plantas son el oxígeno (O), carbono (C) e hidrógeno (H), los dos primeros son tomados del aire a través de la fotosíntesis y el oxígeno por la respiración celular; el agua proporciona H y O, además de tener múltiples papeles en la fisiología vegetal. El resto de elementos minerales, que representan el 7% del total, son absorbidos principalmente por las raíces de la solución del suelo (**Figura 1**).

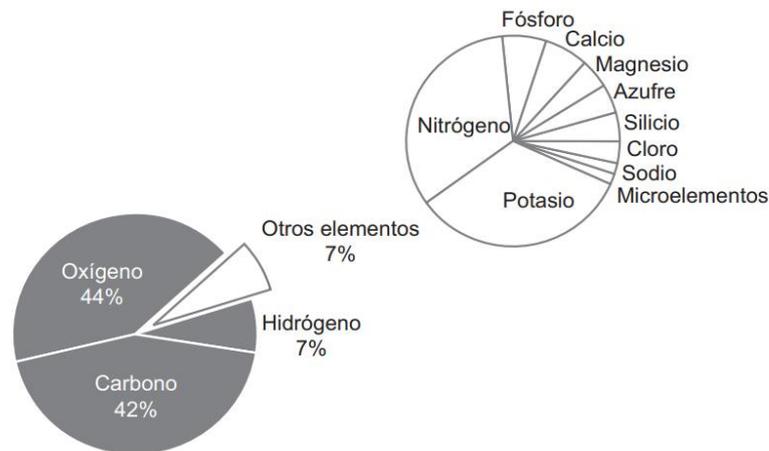


Figura 1. Composición elemental promedio de las plantas¹

Los nutrientes se pueden clasificar en dos grandes grupos, **macronutrientes**, que se necesitan en cantidades relativamente elevadas, y se pueden dividir a su vez, en dos grupos, los nutrientes principales (nitrógeno N, fósforo P y potasio K), y los nutrientes secundarios (calcio Ca, magnesio Mg y azufre S). En contraste con éstos se encuentran los **micronutrientes** que son requeridos sólo en cantidades ínfimas para el correcto crecimiento de las plantas.

Los nutrientes deberán ser agregados al suelo, en las cantidades que se estimen oportunas, si éste es deficitario en alguno de los elementos mencionados con anterioridad. Este aporte se hace a través de lo que se denomina fertilizante o abono, se trata de cualquier sustancia orgánica o inorgánica, natural o sintética, que proporcione a las plantas uno o varios de los elementos nutritivos indispensables para su desarrollo vegetativo normal. La necesidad de aportar fertilizantes surge del concepto de factor limitante o esencial para el desarrollo de las plantas, entendido como cualquier circunstancia (agua, luz, temperatura, nutrientes) que condiciona dicho desarrollo. Evidentemente, el C, H y O nunca deben ser limitantes, dado su origen. El resto de los elementos se incorporan a las plantas mediante la absorción radicular de las cantidades disueltas en el agua del suelo. Cosecha tras cosecha estos elementos son extraídos y pueden llegar a agotarse, por lo que hay que reponerlos directamente al suelo por adiciones convenientes (fertilización) o renunciar al cultivo (barbecho) durante el tiempo suficiente como para que los agentes atmosféricos y los microorganismos del suelo movilicen las reservas insolubles del terreno, descompongan los residuos de las cosechas anteriores (rastreros) y pasen los elementos nutrientes que poseen las formas solubles asimilables.

3.2. Comercialización de fertilizantes

La agricultura actual está orientada hacia la producción de alimentos de calidad, dentro de una adecuada preservación del medio ambiente y de los recursos naturales, mediante el empleo de fertilizantes. Para ello es necesario garantizar que los productos utilizados en la nutrición vegetal y en la mejora de las características del suelo cumplen con dos requisitos fundamentales: eficacia agronómica y ausencia de efectos perjudiciales para la salud y el medio ambiente.

La comercialización del digestato, o subproductos derivados del digestato obtenido en el proceso de digestión anaerobia de algas, podría ser una fuente de ingresos alternativa, que, además, encajaría dentro del concepto de agricultura sostenible. Sin embargo, esta idea de agricultura sostenible debe adecuarse a los procedimientos de comercialización de productos fertilizantes dentro de la Unión Europea, en cuanto a normativa legal se refiere.

Por este motivo se ha aprobado el Reglamento (UE) 2019/1009² por el que se establecen disposiciones relativas a la puesta a disposición en el mercado de los productos fertilizantes, con objeto de eliminar las barreras comerciales entre los estados miembros y permitir el intercambio y el uso de fertilizantes armonizados, sin obstáculos técnicos para el libre comercio. Así mismo, se considera una de las propuestas legislativas clave del plan de acción para la economía circular, basado en tres principios básicos: preservar y mejorar el capital natural controlando y equilibrando los flujos de recursos renovables; optimizar el uso de los recursos rotando productos, componentes y materiales con la máxima utilidad en todo momento; y fomentar la eficacia del sistema en relación al bienestar de la sociedad y la eliminación de externalidades (contaminación atmosférica, de las aguas y acústica o cambio climático) negativas.

Con este Reglamento pretende incentivar en la UE la producción de fertilizantes a partir de materias primas orgánicas o secundarias no importadas, como pueden ser los materiales derivados del digestato. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el procedimiento de homologación puede resultar muy largo.

El Reglamento 2019/1009 derogará a partir del 16 de julio de 2022 el Reglamento (CE) 2003/2003³, todavía vigente, y que es el que aborda el tema sobre los fertilizantes, teniendo en cuenta las limitaciones que éste presenta, en especial, con los abonos producidos a partir de materias orgánicas.

El Reglamento (CE) 2003/2003 es una disposición comunitaria que refunde, simplifica y actualiza toda la normativa existente en el Unión Europea sobre los fertilizantes minerales de uso más generalizado en la agricultura, fijando una serie de normas sobre su composición química, identificación, etiquetado o envasado, junto con una serie de anexos que hacen referencia a diversas cuestiones relacionadas con estos abonos: márgenes de tolerancia, métodos de toma de muestras y análisis, especificaciones sobre el nitrato amónico debido a su riesgo de explosión.

Para regular los aspectos indicados en este Reglamento, en España está en vigor el Real Decreto 506/2013⁴, sobre productos fertilizantes, que tiene por objetivo establecer la normativa básica en materia de productos fertilizantes y las normas necesarias de coordinación con las comunidades autónomas.

En base al artículo 5, del citado Real Decreto, los productos fertilizantes que pueden usarse como abonos o enmiendas en agricultura y jardinería deben pertenecer a alguno de los siguientes tipos:

- Grupo 1.– Abonos inorgánicos nacionales: abono obtenido mediante extracción o mediante procedimientos industriales de carácter físico o químico, cuyos nutrientes declarados se presentan en forma mineral. Por convenio, la cianamida cálcica, la urea y sus productos de condensación y asociación y los abonos minerales que contienen nutrientes quelados o complejados se clasifican como abonos inorgánicos.
- Grupo 2.– Abonos orgánicos: producto cuya función principal es aportar nutrientes para las plantas, los cuales proceden de materiales carbonados de origen animal o vegetal
- Grupo 3.– Abonos órgano–minerales: producto cuya función principal es aportar nutrientes para las plantas, los cuales son de origen orgánico y mineral, y se obtiene por mezcla o combinación química de abonos inorgánicos con materiales carbonados de origen animal o vegetal o abonos orgánicos
- Grupo 4.– Otros abonos y productos especiales: productos que aportan a otro material fertilizante, al suelo o a la planta, sustancias para favorecer y regular la absorción de los nutrientes o corregir determinadas anomalías de tipo fisiológico.
- Grupo 5.– Enmiendas calizas: enmienda que contiene calcio y/o magnesio, esencialmente en forma de óxido, hidróxido, carbonato o silicato, utilizada principalmente para mantener o aumentar el pH del suelo o para modificar sus propiedades físicas.
- Grupo 6.– Enmiendas orgánicas: enmienda procedente de materiales carbonados de origen vegetal o animal, utilizada fundamentalmente para mantener o aumentar el contenido en materia orgánica del suelo, mejorar sus propiedades físicas y mejorar también sus propiedades o actividad química o biológica.
- Grupo 7.– Otras enmiendas: enmiendas no incluidas en los párrafos anteriores, utilizadas fundamentalmente para mejorar las propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo

En el Anexo I del Real Decreto 506/2013 se especifican los productos fertilizantes existentes para cada uno de los 7 grupos generales, incluyendo información sobre la forma de obtención, componentes esenciales y contenido mínimo en nutrientes, entre otras cuestiones.

4. Valorización del digestato

En las instalaciones de digestión anaerobia se utiliza la biomasa como sustrato, que se transforma en biogás gracias a la acción de diversos microorganismos y se usa como fuente de energía. Lo que queda es un material del cual se ha extraído la energía en forma de metano, pero que todavía contiene todos los demás componentes presentes (Figura 2).

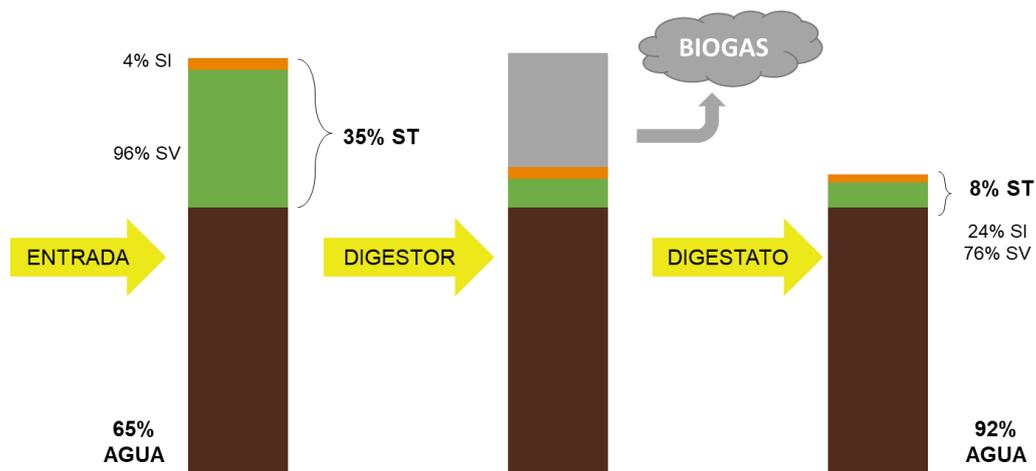


Figura 2. Reparto típico de componentes. ST (sólidos totales), SV (sólidos volátiles), SI (sólidos inertes)⁵

En gran medida, este digestato está estabilizado tras una digestión anaerobia y se puede utilizar como fertilizante de alta calidad o como aditivo para suelos en la agricultura, en mezclado de tierras, así como en la horticultura o el paisajismo.

Con la tasa de aplicación adecuada, los nutrientes contenidos en el sustrato, tales como nitrógeno, fósforo, potasio, azufre y otros micronutrientes cubrirán la demanda para el crecimiento de plantas. Los compuestos de carbono estables no degradados conducen además a la formación de humus y de estructura en el suelo, e incrementan así su fertilidad, funcionalidad, actividad microbiana, aireación y capacidad de almacenamiento de agua.

4.1. Características de los digestatos

Las características del digestato dependerán en gran medida del sustrato empleado en la digestión anaerobia. Además, existen diferentes composiciones dependiendo del tratamiento (separación, secado, etc.) al que se haya sometido el digestato. Por consiguiente, en una separación entre las fracciones líquida y sólida del digestato, es más probable que la fracción líquida contenga amonio (NH_4) y potasio (K_2O), mientras que la fracción sólida contenga fosfato (P_2O_5) y material orgánico

Desde el punto de vista de la valorización agrícola del digestato, las características químicas y biológicas que presentan un mayor interés y que por tanto define su calidad se presentan a continuación:

4.1.1. Contenido en materia orgánica y nutrientes

Atendiendo al sistema de digestión anaerobia empleado, los digestatos son líquidos, pero también se puede producir un material sólido en algunas instalaciones que disponen de sistemas de separación sólido-líquido.

El valor fertilizante más evidente que presentan los digestatos se debe a su presencia de nitrógeno amoniacal (NH_4), aunque también pueden ser destacables los contenidos de fósforo y potasio. Junto al contenido en elementos minerales, también cabe destacar

el contenido en materia orgánica que presentan los digestatos, lo que favorece su valorización.

En principio, los análisis demuestran que el digestato líquido genérico presenta a menudo un contenido en materia seca del 4-6 %, y que el 60-80 % del nitrógeno está presente como NH_4^+ directamente disponible gracias a la digestión anaerobia. Esto afecta al valor pH del digestato, que suele ser más elevado que el de la alimentación, lo cual incrementa el riesgo de pérdidas de amoníaco gaseoso. El amonio presente en el digestato puede ser considerado como nitrógeno mineral disponible. Este valor es de aproximadamente el 60 % para el digestato líquido.

La disponibilidad de nitrógeno depende directamente del contenido en NH_4^+ y de la proporción entre carbono y nitrógeno (relación C/N). Los fertilizantes con una relación C/N baja (purines, estiércol, digestato líquido) tienen una disponibilidad de nitrógeno mucho más rápida que los fertilizantes con una relación C/N alta (compost, estiércol, digestato sólido) tal como puede observarse en la Tabla 1, donde se recoge la composición genérica de diferentes formas de digestato.

Tabla 1. Composición genérica de un digestato⁶

Forma	ST (%)	NTK (kg/m ³)	NH_4^+ (kg/m ³)	P_2O_5 (kg/m ³)	K_2O (kg/m ³)
Digestato	6,5	5,1	3,2	2,3	5,5
Fracción líquida separada	5,7	4,9	3,1	2,3	5,4
Fracción sólida separada	24,3	5,8	2,7	5,0	5,8

El digestato también mantiene prácticamente los mismos valores totales de fósforo y potasio de la alimentación⁷.

En el caso de microelementos y metales pesados como cobre (Cu), zinc (Zn), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg) o plomo (Pb), tampoco se produce alteración significativa durante la digestión anaerobia⁸. El contenido de estos metales en las algas marinas como *Ulva lactuca* es muy variable, y va a depender de su localización y de posibles episodios de contaminación que se registre en la zona. Como ejemplo, se presenta la **Tabla 2** procedente de un estudio realizado en las rías de Muros, Arousa, Pontevedra y Vigo⁹.

Tabla 2. Concentración de metales (g/kg) en *Ulva*

Metal	Valor medio	Rango	Desviación
Al	175	2,14 - 872	145
Cu	7,84	2,18 - 20,6	3,80
Fe	365	38,6 - 2623	292
Mn	37,5	4,59 - 512	63,1
Ni	2,14	0,0 - 16,2	1,61
Zn	23,6	6,96 - 66,8	9,31

4.1.2. Estabilidad (biodegradabilidad) y madurez (fitotoxicidad)

La estabilidad microbiana está asociada a la presencia de compuestos fácilmente degradables, que provocan una rápida activación de las poblaciones microbianas, mientras que la madurez se refleja por la ausencia de efectos fitotóxicos.

Durante la digestión anaerobia, la fracción lábil de la materia orgánica, fácilmente disponible para los microorganismos, es degradada, lo que conlleva un incremento de la estabilidad del material digerido respecto al sustrato original de entrada. Así, se han referenciado reducciones en el contenido de materia orgánica de entre el 50 y el 70 % tras procesos de digestión anaerobia aplicada a diversos sustratos orgánicos.

4.1.3. Nivel de higienización

En el caso de tratamiento de subproductos animales no destinados al consumo humano (SANDACH), como pueden ser los estiércoles, subproductos animales, etc, ha de tenerse en cuenta la legislación pertinente (Real Decreto 1528/2012¹⁰), en la que se establecen unas condiciones de higienización durante el proceso (tiempo y temperatura) que se pueden alcanzar durante la digestión anaerobia termófila (55 °C), un compostaje adicional o un tratamiento térmico del sustrato (70 °C durante una hora).

En España, el Real Decreto 506/2013⁴ sobre productos fertilizantes especifica:

1. La materia prima transformada, lista para ser usada como ingrediente de abonos orgánicos de origen animal, debe ser sometida a un proceso de higienización que garantice que su carga microbiana no supera los valores máximos establecidos en el Reglamento (CE) N.º 1069/2009
2. En los productos fertilizantes de origen orgánico, se acreditará que no superan los siguientes niveles máximos de microorganismos:
 - *Salmonella*: Ausente en 25 g de producto elaborado
 - *Escherichia coli*: < 1000 número más probable (NMP) por gramo de producto elaborado

En el caso de la digestión anaerobia de algas, si se realiza codigestión, hay que tener en cuenta el origen de los posibles co-sustratos.

4.1.4. Presencia de compuestos tóxicos e impurezas

Existen criterios de concentración de metales pesados en productos destinados a un usos agrícola, que terminan su clase, y las limitaciones para su aplicación en el suelo como fertilizantes.

Los productos fertilizantes elaborados con materias primas de origen animal o vegetal no podrán superar el contenido de metales pesados indicado en la **Tabla 3**, según sea su clase A, B o C:

- Clase A: Productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna A.
- Clase B: Productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna B.

- Clase C: Productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna C.

Tabla 3. Concentración máxima de metales pesados en productos destinados a la agricultura

Metal pesado	Límites de concentración		
	Clase A	Clase B	Clase C
Cadmio	0,7	2	3
Cobre	70	300	400
Níquel	25	90	100
Plomo	45	150	200
Zinc	200	500	1.000
Mercurio	0,4	1,5	2,5
Cromo (total)	70	250	300
Cromo (VI) *	No detectable según método oficial	No detectable según método oficial	No detectable según método oficial

Sólidos: mg/kg de materia seca

Líquidos: mg/kg

11

5. Resultados experimentales

El digestato procedente del reactor anaerobio CSTR fue sometido a una serie de analíticas para determinar su composición según lo establecido en el Anexo 7.1.

Para la caracterización del digestato se han tenido en cuenta las muestras analizadas en el periodo final de la operación de cada uno de los ensayos mostrados en el informe de “*Estudio de operación y posibles limitaciones de la digestión en continuo de algas*”, como más representativas de una operación del reactor a largo plazo, siendo E1 el ensayo en monodigestión y E2 el ensayo en el fango espesado como cosustrato.

Los datos obtenidos para el digestato se reflejan en la Tabla 4, junto con los datos de la *Ulva* empleada como alimentación.

La concentración de sólidos ha sido expresada en unidades de porcentaje de sólidos totales (ST) y volátiles (SV) en base húmeda, también se ha determinado el ratio SV/ST y la humedad.

Tabla 4. Resultados del sustrato alimentado y el digestato.

Nombre	ST (%)	SV (%)	Ratio (SV/ST)	Humedad (%)
<i>Ulva lactuca</i>	9,4 ± 0,1	8,3 ± 0,1	0,89	90,8 ± 0,1
Digestato E1	6,9 ± 0,1	4,2 ± 0,1	0,61	93,1 ± 0,1
<i>Ulva lactuca</i> + fango espesado	5,7 ± 0,1	4,8 ± 0,1	0,83	94,3 ± 0,1
Digestato E2	3,0 ± 0,1	1,7 ± 0,1	0,57	97,0 ± 0,1

El ratio SV/ST cercano a la unidad indica un contenido muy bajo en compuestos inorgánicos. Este ratio se emplea como una aproximación al contenido en materia orgánica de la muestra y, por lo tanto, a una posible mayor biodegradabilidad por unidad de masa. En este caso, se observa que el ratio SV/ST de la alimentación presenta valores en torno a 0,85, mientras que en el digestato, el valor se encuentra próximo a 0,60. Esto es debido principalmente a la mineralización del sustrato alimentado, ya que durante el proceso de digestión anaerobia se produce la transformación del material volátil (SV) y se produce acumulación gradual de compuestos inertes en el interior del digestor.

Hay que tener en cuenta que el material volátil presente en el digestato se corresponde en una pequeña parte con sustrato alimentado que permanece sin degradar y el restante se corresponde con la masa de los microorganismos encargados de llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia, representados generalmente como $C_5H_7O_2N$.

El contenido de materia orgánica se estableció a partir de la determinación de la demanda química de oxígeno, (DQO), que determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo. Los datos de materia orgánica se muestran en la Tabla 5, acompañados del valor de carbono orgánico total (TOC), que es la cantidad de carbono unido a un compuesto orgánico.

Tabla 5. Resultados de materia orgánica y nutrientes.

Muestra	DQO total (gO ₂ /kg)	TOC (%)	NTK (gN/kg)	Ratio DQO/N	Fósforo (gP/kg)
<i>Ulva lactuca</i>	75,2 ± 2,3	47 ± 4	1,6 ± 0,2	47,0	0,09 ± 0,01
Digestato E1	50,6 ± 4,6	37 ± 3	2,1 ± 0,3	24,3	0,25 ± 0,04
<i>Ulva lactuca</i> + fango espesado	73,6 ± 7,6	26 ± 3	1,7 ± 0,2	43,0	0,34 ± 0,05
Digestato E2	26,6 ± 0,7	< 1,0 %	2,9 ± 0,3	9,1	0,29 ± 0,05

Puede observarse en la **Tabla 5** que los valores obtenidos con respecto al contenido de materia orgánica por unidad de masa son análogos a los de los sólidos volátiles de la Tabla 4, de forma que un mayor contenido de SV da lugar a contenidos de DQO y TOC más elevado, como es en el caso de los sustratos de entrada (*Ulva lactuca* o *Ulva lactuca* + fango espesado). Esta reducción del contenido de materia orgánica es consecuencia de su transformación en biogás.

En el caso de los nutrientes, se ha determinado la concentración de nitrógeno total Kjeldahl (NTK) y de fósforo total en la alimentación y en el digestato. En el caso del NTK del digestato, los valores en el digestato son mayores que en la alimentación, posiblemente debido al contenido nitrogenado de los microorganismos del inóculo inicial (cuya concentración no se determinó). Con respecto al fósforo, puede observarse que *Ulva lactuca* presenta un contenido bajo de fósforo, lo que podría causar una limitación de nutrientes, y con la adición del cosustrato hace que la alimentación durante el ensayo E2 éste sea mayor.

Finalmente, tras la finalización del ensayo E2 se realizó una caracterización del contenido en metales del digestato (sin deshidratar), que se muestra en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Resultados de análisis de metales.

Parámetro	Ulva lactuca + fango espesado	Digestato E2
Sodio (mg/kg)	7.779 ± 389	27.150 ± 1.357
Potasio (%)	0,8 ± 0,1	1,1 ± 0,2
Magnesio (%)	2,0 ± 0,4	2,7 ± 0,4
Calcio (%)	0,7 ± 0,1	1,7 ± 0,3
Hierro (mg/kg)	4.341 ± 695	9.631 ± 1.541
Cobre (mg/kg)	50 ± 12	121 ± 28
Zinc (mg/kg)	137 ± 29	652 ± 137
Níquel (mg/kg)	5 ± 1	15 ± 4

13

Teniendo en cuenta los valores mostrados en la **Tabla 3**, el digestato líquido será equivalente a un fertilizante de Clase B, ya que presenta valores de zinc y cobre que superan los límites para ser considerado de Clase A.

Sin embargo, esta clasificación puede variar, por ejemplo, en el caso de emplear una proporción diferente de algas + fango espesado podría ser posible alcanzar parámetros para cumplir como fertilizante de Clase A. O si se produce una deshidratación del digestato, para generar una fase líquida y una fase sólida, de forma que se produzca concentración de compuestos en alguna de las fases.

6. Conclusiones

A partir de la información consultada, y con los resultados obtenidos tras la realización de la caracterización físicoquímica se puede considerar que el digestato procedente de la valorización de las algas mantiene propiedades fertilizantes, ya que posee un contenido alto de materia orgánica, nitrógeno y fósforo (**Tabla 5**).

De cara a establecer el uso del digestato como fertilizante hay que tener en cuenta que presenta un contenido de agua superior al 93 % (**Tabla 4**), lo que puede dificultar su transporte.

El contenido en metales del digestato puede dar lugar a un fertilizante de Clase B.

7. Anexo 1: Metodología

7.1. Caracterización fisicoquímica

La caracterización fisicoquímica de los residuos, realizando triplicados para cada analítica, se llevó a cabo según la metodología que se expone a continuación.

- Humedad y contenido en sólidos totales (ST) y volátiles (SV) y sólidos en suspensión totales (SST) y volátiles (SSV). Se realizó la determinación por triplicado, según la metodología del “*Standard methods for the examination of water and wastewater*”¹¹
 - 2540 B Total Solids Dried at 103-105 °C
 - 2540 E Fixed and Volatile Solids Ignited at 550 °C
 - 2540 G Total, Fixed, and Volatile Solids in Solid and Semisolid Samples
- Contenido en materia orgánica (DQO). Se realizó la determinación en reflujo cerrado, según la metodología del “*Standard methods for the examination of water and wastewater*”
 - 5220 D. Closed Reflux, Colorimetric Method
- Nitrógeno Total Kjeldhal (NTK). Se define como la suma de amonio libre y compuestos orgánicos nitrogenados, se determinó mediante digestión de la muestra en medio ácido y en presencia de un catalizador. Realizado según la metodología del “*Standard methods for the examination of water and waste water*”
 - 4500-Norg NITROGEN (ORGANIC)
- Metales y TOC. Mediante técnica de plasma de acoplamiento inductivo (ICP)

8. Bibliografía

- ¹ FAO. (2002). *Los fertilizantes y su uso una guía de bolsillo para los oficiales de extensión*. Food & Agriculture Org..
- ² Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de junio de 2019 por el que se establecen disposiciones relativas a la puesta a disposición en el mercado de los productos fertilizantes UE y se modifican los Reglamentos (CE) nº 1069/2009 y (CE) nº 1107/2009 y se deroga el Reglamento (CE) nº 2003/2003
<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2019-81081>
- ³ Reglamento (CE) nº 2003/2003 del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de octubre de 2003 relativo a los abonos.
<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2003-81869>
- ⁴ Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes
https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2013-7540
- ⁵ European Biogas Association. Digestate factsheet: the value of organic fertilisers for Europe's economy, society and environment
- ⁶ Wilken, D., Rauh, S., Fruhner-Weiß, R., Strippel, F., Bontempo, G., Kramer, A., & Fürst, M. (2018). *Digestate as fertilizer*. Fachverband Biogas eV.
- ⁷ Tambone, F., Scaglia, B., D'Imporzano, G., Schievano, A., Orzi, V., Salati, S., & Adani, F. (2010). Assessing amendment and fertilizing properties of digestates from anaerobic digestion through a comparative study with digested sludge and compost. *Chemosphere*, 81(5), 577-583.
- ⁸ Makádi, M., Tomócsik, A., & Orosz, V. (2012). Digestate: a new nutrient source—review. *Biogas*, 14, 295-312.
- ⁹ Villares, R., Puente, X., & Carballeira, A. (2001). Ulva and Enteromorpha as indicators of heavy metal pollution. *Hydrobiologia*, 462(1), 221-232.
- ¹⁰ Real Decreto 1528/2012, de 8 de noviembre, por el que se establecen las normas aplicables a los subproductos animales y los productos derivados no destinados al consumo humano.
<https://www.boe.es/eli/es/rd/2012/11/08/1528>
- ¹¹ Federation, W. E., & APH Association. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. *American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA*.

 VALORALGAE



valoralgae.es