



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 99 (2):
31-40; 2022



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

Av. William Cross 3150
T4101XAC - Las Talitas.
Tucumán, Argentina.

Indicadores de estabilidad, madurez y calidad agrícola de un compost sucroalcoholero

Carolina Sotomayor*, Cecilia Esquivel**, Eugenio Quaia*, Marcelo Ruiz*, Hugo Rojas Quinteros* y Jessica Navarro Di Marco*

* Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, **CIT Santa Cruz CONICET - Universidad de la Patagonia Austral. EEAOC. Email: csotomayor@eeaoc.org.ar

RESUMEN

El compostaje es el proceso de descomposición biológica y aerobia de la materia orgánica en condiciones controladas de temperatura, humedad y aireación, seguida de una estabilización y maduración del producto final con una cierta calidad agrícola. La estabilidad es la tasa o grado de descomposición de la materia orgánica, y la madurez es la ausencia de fitotoxicidad en el producto final. La calidad agrícola se define una vez cumplimentados los pasos anteriores y pueden establecerse distintas exigencias según el mercado al que vaya destinado, pero siempre habrá requisitos mínimos a cumplir. Los objetivos de este trabajo fueron el análisis de la evolución de los parámetros que dominan las distintas etapas del proceso de compostaje y el establecimiento de los indicadores de estabilidad, madurez y calidad agrícola del compost sucroalcoholero obtenido. La mezcla a compostar estuvo compuesta con 70% de cachaza y 30% de ceniza en la pila testigo T. Se incorporó vinaza concentrada a razón de 20 kg/t de cachaza en la pila V20. Todos los componentes fueron integrados al inicio del proceso, replicándose cada tratamiento tres veces, en pilas de 2 m de ancho; 1,2 m de alto y 50 m de longitud. Se realizó el control y seguimiento de variables que afectan el proceso de producción: temperatura, humedad, pH y aireación; también las referidas a la composición de los sustratos empleados: materia orgánica, carbono, nitrógeno, fósforo, relación C/N y conductividad eléctrica. Se evaluaron los parámetros seleccionados para ser empleados como indicadores de estabilidad: color, olor, temperatura, pH, C/N; y de madurez: C/N y concentración de sales solubles. Finalmente se definió la calidad agrícola del compost teniendo en cuenta pH, conductividad eléctrica, materia orgánica total, carbono orgánico oxidable, nitrógeno total, fósforo total, potasio total, en el caso de la pila V20, y la relación C/N.

La formulación compuesta por la mezcla de 70% de cachaza y 30% de cenizas, regada o no con vinaza concentrada, ha cumplido con el proceso de compostaje. Esto queda demostrado por el descenso a temperatura ambiente de las pilas, el descenso de la humedad por debajo del 40%, el pH cercano a la neutralidad, la relación C/N cercana a 10, las variaciones del olor desagradable a agradable, el color más oscuro, la salinidad <4 dS/m. Y finalmente se define su calidad agrícola como óptima para ser empleado como abono orgánico, teniendo en cuenta los parámetros anteriores y los contenidos de materia orgánica, nitrógeno y fósforo total y potasio total para el compost proveniente de la pila V20.

Palabras clave: compostaje, cachaza, cenizas, vinaza.

ABSTRACT

Stability, maturity and agricultural quality indicators of a sugar-alcoholic compost

Composting is the process of biological and aerobic decomposition of organic matter under controlled conditions of temperature, moisture and aeration, followed by stabilization and maturation of the final product to a certain agricultural quality. Stability is the rate or degree of decomposition of organic matter and maturity is the absence of phytotoxicity in the final product. Agricultural quality is defined once the previous ones have been fulfilled and different requirements can be established according to the market to which it is destined, but there will always be minimum requirements to be fulfilled. The objectives of this work were the analysis of the evolution of the parameters that dominate the different stages of the composting process and the establishment of the indicators of stability, maturity and agricultural quality of the sucrose-alcohol compost obtained. The mixture was composed of 70% filter cake and 30% ash in a control pile, "T". Vinasse was incorporated - 20 kg of concentrated vinasse/ton of filter cake - pile "V20". All components

Fecha de
recepción:
16/09/2021

Fecha de
aceptación:
03/06/2022

were integrated at the beginning of the process, replicating each treatment three times. The dimensions of the piles were 2 m wide; 1.2 m high and 50 m long. The components were characterized and temperature, moisture, pH and aeration were controlled during the process. The variables affecting the production process were controlled and monitored: temperature, moisture, pH and aeration, as well as those related to the composition of the substrates used: organic matter, carbon, nitrogen, phosphorus, C/N ratio and electrical conductivity. The parameters selected to be used as stability indicators were evaluated: color, odor, temperature, pH, C/N, and maturity: C/N ratio and concentration of soluble salts. Finally, the agricultural quality of the compost was defined taking into account pH, electrical conductivity, total organic matter, oxidizable organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, in the case of the V20 pile, and the C/N ratio.

The formulation composed of a mixture of 70% of filter cake and 30% of ashes, and irrigated or not with concentrated vinasse, has complied with the composting process. This was demonstrated by the descent of the piles to air temperature, decrease of moisture below 40%, pH close to neutrality, C/N ratio close to 10, variations from unpleasant to pleasant odor, darker color, salinity <4 dS/m. And finally, defining its agricultural quality as optimal to be used as organic fertilizer, taking into account the above parameters and also the contents of organic matter, total nitrogen and phosphorus and total potassium -for the compost from the V20 pile-.

Key words: composting, filter cake, sugarcane ashes and vinasse.

■ INTRODUCCION

Uno de los temas más importantes que marca a la agroindustria de la caña de azúcar es el aprovechamiento y manejo eficiente de los residuos originados durante los procesos de producción de azúcar y alcohol (bagazo/cenizas, cachaza y vinaza). Estos materiales poseen un elevado potencial como fuentes de energía y/o nutrientes para los cultivos, ya que le aportan cantidades significativas de materia orgánica, nitrógeno, potasio y fósforo al sistema productivo.

El bagazo/ceniza es un residuo sólido, fibroso, que se obtiene de la extracción del jugo en el proceso de molienda de la caña, y resulta heterogéneo en cuanto a su composición granulométrica y estructural. Aunque su uso más frecuente es como combustible en las calderas de los ingenios y en la producción de papel, se utiliza también en algunos casos en mezclas destinadas al compostaje.

El material particulado, generado durante la quema del bagazo en las calderas de la industria sucro-alcoholera, es separado de los humos de combustión por medio de lavadores de gases. Este producto forma las cenizas de lavado de gases. En estos sistemas lavadores una contracorriente de agua retiene las partículas de ceniza y las conduce hasta filtros y/o sedimentadores, donde los elementos insolubles son separados del agua, permitiendo que esta última sea reutilizada en diferentes etapas del proceso industrial.

Los volúmenes producidos oscilan entre 2,5% y 4,5% de la caña molida, siendo esto función de la eficiencia de la caldera y del lavador de gases, del contenido de materias extrañas del bagazo y del uso de combustibles alternativos (gas y fuel-oil, entre otros).

Según Arias-Cedeño *et al.* (2021), el principal y mayoritario componente de la ceniza es el óxido de silicio, seguido en proporción comparativamente pequeña

por compuestos de potasio (K), fósforo (P), aluminio (Al), calcio (Ca), magnesio (Mg) y microelementos como hierro (Fe) y zinc (Zn).

La cachaza o torta de filtro es el residuo sólido que se obtiene en el proceso de clarificación de los jugos a razón de 30 – 50 kg/t de caña molida. Físicamente es un residuo esponjoso, amorfo y de color oscuro a negro, que absorbe grandes cantidades de agua. Generalmente contiene una importante cantidad de materia orgánica (40%) (Zerega, 1993; citado por Basanta *et al.*, 2007).

Generalmente es rica en fósforo, calcio, nitrógeno y pobre en potasio. Esto se debe a que, en algunas fábricas, se tratan con fosfato los jugos para clarificarlos más rápidamente, y a la alta solubilidad de este elemento. El contenido de calcio varía con las cantidades de cal empleadas durante la clarificación del jugo. Los altos contenidos de nitrógeno se deben a la enorme cantidad de materia orgánica que presenta. Los bajos contenidos de potasio que exhibe la cachaza es por la gran solubilidad de este elemento, lo cual le permite irse en los jugos hasta que es separado con la melaza y vinaza (Zerega Mendez, 2017).

La vinaza es el efluente que proviene de la elaboración de alcohol a partir de melazas o jugos de caña de azúcar o mosto mixto, en una relación promedio de 13 litros de vinaza por cada litro de alcohol producido a partir de melaza. Su composición química va a depender del mosto empleado en la fermentación, pero predomina el agua (90%) y elevados contenidos de materia orgánica y sales minerales (principalmente de potasio). Estas características le confieren un elevado poder contaminante si es volcada en los cursos de agua, ya que la elevada demanda de oxígeno necesaria para estabilizar química y biológicamente sus compuestos puede eliminar completamente la flora y fauna acuática aerobia.

En los últimos años ha mejorado el procesamien-

to de la vinaza mediante la incorporación del proceso de concentración (eliminación del agua constituyente), reduciendo en un 70% el volumen de esta en comparación con el original. La vinaza así concentrada es utilizada en parte para el proceso de compostaje; y en parte para uso directo en algunos suelos como aporte nutricional de potasio (Ruiz y Budeguer, 2018).

Una buena práctica de manejo sustentable de estos residuos debería satisfacer tanto los requerimientos del cultivo como los de la industria y el medio ambiente. En este sentido la elaboración de compost a partir de la mezcla de cenizas, cachaza y vinaza constituye una muy buena práctica de manejo y aprovechamiento a tener en cuenta, ya que mediante un proceso biológico y controlado es posible obtener un producto estable y de alto valor comercial y nutricional.

El compostaje se define como un proceso biológico, oxidativo y controlado de conversión y valorización de los sustratos orgánicos (subproductos de la biomasa, desechos orgánicos de diversos orígenes), que da lugar a un producto estabilizado e higiénico, similar a un suelo y rico en compuestos húmicos.

Se debe diferenciar entre el compostaje, proceso controlado, de aquellos procesos naturales “no controlados” que suelen desembocar en anaerobiosis y que no llegan a cumplir con las fases correspondientes, las cuales son: Fase I de descomposición mesófila ($T < 45^{\circ}\text{C}$); Fase II de descomposición termófila ($T > 45^{\circ}\text{C}$) y Fase III de descomposición mesófila (T° ambiente), de enfriamiento y maduración, produciendo materiales de baja calidad (Sotomayor *et al.*, 2019). Según Mazzarino *et al.* (2012), el compostaje es considerado un excelente método para aprovechar en la agricultura barros, lodos y residuos de distintos orígenes y calidades, y el más recomendado a nivel mundial.

En la actualidad aún existe confusión respecto del uso de términos como compostaje, compost, estabilidad, madurez y calidad. Compostaje es el proceso de descomposición biológica y aerobia de la materia orgánica en condiciones controladas de temperatura, humedad y aireación, seguida por una estabilización y maduración del producto final -compost- (Iglesias Jiménez, 2014). Los términos estabilidad y madurez se usan muchas veces de manera indistinta, a pesar de que se refieren a aspectos diferentes, esto puede deberse a que para su evaluación se utilizan parámetros similares (Mazzarino *et al.*, 2012).

De acuerdo con Iannotti *et al.* (1993), se entiende como estabilidad la tasa o grado de descomposición de la materia orgánica que puede expresarse como una función de la actividad microbiológica, y se determina generalmente por medidas respirométricas – consumo de O_2 o desprendimiento de CO_2 - o por la liberación de calor como resultado de la actividad de los microorganismos. El mismo autor define también el grado de madurez como un sinónimo de la ausencia de fitotoxicidad en el producto final, asociada la misma a compuestos como amonio (NH_4), ácidos orgánicos, y concentración de metales pesados y de sales solubles, entre otros. Por lo tanto, la madurez de un compost tiene una relación directa con el crecimiento y desarrollo vegetal, y puede determinarse simplemente mediante la respuesta de plantas testigo.

La calidad del producto se define una vez cumplimentados los requisitos de estabilidad y madurez (Ma-

zzarino *et al.*, 2012). Según García Céspedes *et al.* (2014), dentro de los niveles de calidad deben o pueden establecerse distintas exigencias según el mercado al que vaya destinado; pero siempre habrá unos mínimos a cumplir para cualquier aplicación. Es necesario definir una calidad general del compost y además establecer parámetros diferenciados para usos diversos.

Es extensa la lista de posibles parámetros para establecer los indicadores de estabilidad, madurez y calidad de un compost, y el empleo de algunos pocos de ellos puede ser suficiente. Lo importante es saber identificar y seleccionar aquellos que sean adecuadamente representativos, y fáciles de medir e interpretar.

Los indicadores de estabilidad incluyen, dentro de los más sencillos, el cambio de color – del original a oscuro-, cambios en el olor – de desagradable a tierra mojada-, y descenso de la temperatura de la pila a temperatura ambiente; y dentro de los más precisos, la producción de dióxido de carbono (CO_2), biomasa microbiana y grado de humificación (Torti *et al.*, 2019). Los de madurez incluyen estudios directos e indirectos de fitotoxicidad. Dentro de los directos se destacan ensayos con plantas – índice de germinación-; y dentro de los indirectos, la medición de compuestos fitotóxicos –amonio, fenoles, ácidos grasos y elevada concentración de sales solubles- (Torti *et al.*, 2019).

Así también se hace necesario el control tanto del proceso de producción como del producto final y es de suma importancia para asegurar una óptima calidad, por lo que debe realizarse el seguimiento y análisis de una serie de variables. Son estas las que afectan el proceso, según Jeris and Regan (1973) citados por Bueno Marquez *et al.* (2008): temperatura, humedad, pH y aireación, que deben ser medidas y en caso de ser necesario, ser adecuadas para que los valores estén en los intervalos correctos en cada fase. Los valores o intervalos óptimos se hallan influenciados por las condiciones ambientales, el tipo de residuo a tratar y el sistema de compostaje elegido; y las condiciones referidas a la naturaleza de los sustratos empleados, tales como materia orgánica, carbono, nitrógeno, fósforo, relación C/N y conductividad eléctrica, entre otras, según Madejón *et al.* (2001).

Variables que afectan al proceso de compostaje

Temperatura

Es el parámetro que mejor indica la evolución del proceso. El incremento de la temperatura en la primera parte del compostaje indica la presencia de materiales muy degradables y adecuadas condiciones de trabajo que demuestran el correcto desarrollo del proceso (Barrera Gomez, 2006). Cada grupo de microorganismos que interviene en las distintas fases tiene su rango óptimo de temperatura para actuar y degradar la materia orgánica, 15°C - 40°C para los microorganismos mesófilos y 40°C - 70°C para los termófilos, según Suler and Finstein (1977), citados por Bueno Marquez *et al.* (2008).

Archer *et al.* (2009) consideran que el compostaje se ha completado cuando las temperaturas internas han descendido por debajo de aproximadamente 43°C , y permanecen así incluso cuando el compost se airea y se mantiene en condiciones óptimas de humedad.

Humedad

Los autores Bueno Marquez *et al.* (2008) y Gordillo y Chavez (2010) concuerdan en que la presencia de agua es imprescindible para el desarrollo de los microorganismos, ya que es el medio de transporte de las sustancias solubles que sirven de alimento para las células y de los productos de desechos de las reacciones. El contenido de humedad ideal para el compostaje debe ser un equilibrio entre la humedad y el oxígeno adecuados para que los microorganismos funcionen. El rango de humedad considerado óptimo para el compostaje es del 45% – 60% de agua en peso de material de base (FAO, 2013). Si es menor al 45%, disminuye la actividad microbiana sin dar tiempo a que se completen las fases de degradación y originando un producto biológicamente inestable. Si es demasiado alta (>60%), el agua saturará los poros e interferirá en la oxigenación del material. El contenido de humedad suele disminuir a lo largo del periodo de compostaje y, dependiendo del clima, puede ser necesario o no añadir agua (USDA, 2000). El rango ideal para un compost maduro es entre un 30% – 40 % para la FAO (2013).

pH

Para la FAO (2013), el pH del compostaje depende de los materiales de origen y varía a lo largo del proceso (4,5 a 8,5). En la primera fase se acidifica por la formación de ácidos orgánicos. En la fase termófila, debido a la conversión del amonio en amoníaco, el pH sube y se alcaliniza el medio. Finalmente se estabiliza en valores cercanos al neutro.

El pH tiene una influencia directa en el compostaje debido a su acción sobre la dinámica de los procesos microbianos (Bueno Marquez *et al.*, 2008). La mayor actividad bacteriana se produce a pH 6,0 - 7,5, mientras que la mayor actividad fúngica ocurre a pH 5,5 - 8,0 (FAO, 2013). Al final del proceso de compostaje, el pH suele estabilizarse entre 7,5 y 8,0, independientemente del pH inicial (USDA, 2000).

Aireación

Para el correcto desarrollo del compostaje es necesario asegurar la presencia de oxígeno, ya que los microorganismos que en él intervienen son aerobios (Gordillo y Chavez, 2010).

Según la FAO (2013), la saturación de oxígeno en el medio debe encontrarse entre el 5% – 15%. Una aireación insuficiente (<5%) puede provocar una sustitución de los microorganismos aerobios por anaerobios, con el consiguiente retardo en la descomposición, la aparición de sulfuro de hidrógeno y la producción de malos olores (Bidlingmaier, 1996). Por otra parte, un exceso de aireación (>15%) provocaría el enfriamiento de la masa y una alta desecación, con la consiguiente reducción de la actividad metabólica de los microorganismos (Zhu, 2006).

Nutrientes y relación C/N

Entre los elementos que componen el sustrato orgánico se destacan el C, el N y el P, macronutrientes fundamentales para el desarrollo microbiano. Tanto el car-

bono como el nitrógeno son esenciales: el carbono como fuente de energía y el nitrógeno como sustrato para la síntesis de proteínas y otros componentes celulares (Archer *et al.*, 2009).

Según Bueno Marquez *et al.* (2008), el fósforo desempeña un papel fundamental en la formación de compuestos celulares ricos en energía y es necesario para el metabolismo microbiano.

Se comprueba que, en general, entre el inicio y el final de la incubación se produce un aumento de las concentraciones de los distintos nutrientes, debido a la pérdida de materia orgánica de la masa a compostar, concuerdan Díaz *et al.* (2004) y Michel *et al.* (2004).

Una mezcla equilibrada de los materiales de partida para obtener una relación C/N adecuada es importante. Labrador (2001) plantea que la relación C/N es un indicador de la velocidad que va a llevar el proceso y del estado de evolución del mismo. Archer *et al.* (2009) afirman que una relación C/N inicial de 30/1 es recomendada para un proceso eficiente. Si la relación C/N es < 20/1, se evidencia un exceso de nitrógeno que puede ser expulsado como gas amoníaco, produciéndose problemas de olor y pérdida del mismo. Si hay demasiado carbono y la relación es C/N es > 40/1, este se convierte en limitante y la tasa de compostaje disminuirá. Como una gran parte del carbono se libera continuamente, la mayor parte del nitrógeno se recicla. La relación C/N disminuye a lo largo del periodo de compostaje. Para la FAO (2003), una relación C/N ideal para un compost maduro es 10:1 – 15:1.

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) de un compost está determinada por la naturaleza y composición del sustrato empleado, fundamentalmente por su concentración de sales (Sánchez-Monedero *et al.*, 2001). Tiende generalmente a aumentar durante el proceso de compostaje debido a la mineralización de la materia orgánica y luego acontece un descenso de la misma, que puede deberse a fenómenos de lixiviación en la masa provocados por una humectación excesiva de la misma. Para Barbaro *et al.* (2019), un compost de residuo de porcino presenta una CE de 5,55 dS/m; uno de ave de corral, 2,66 dS/m; y uno de bagazo de caña de azúcar, 0,33 dS/m.

Existen experiencias a nivel local donde el proceso no ha tenido un seguimiento controlado en el tiempo, y no llegaron a cumplir con las distintas etapas que lo caracterizan. Se obtuvieron así mezclas que no satisfacen los requisitos de estabilidad, madurez y calidad agrícola deseados, por lo que su empleo como enmienda o abono orgánico se ve limitado. Es por esta razón que ha sido de suma importancia poner en marcha desde la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes (EEAOC) una experiencia que permitiera demostrar la factibilidad de llevar adelante el proceso de compostaje como una alternativa de manejo sustentable de los residuos sucroalcoholeros.

Desde la Sección Suelos y Nutrición Vegetal y el Área de Medio Ambiente, en conjunto con el ingenio Leales, se ha trabajado en el marco del Proyecto Biorrefinería Sustentable, basado en un modelo escalable, con el fin de lograr el aprovechamiento integral de la caña de azúcar y que incluye el azúcar, el alcohol y el aprovechamiento

de los residuos que de su producción derivan – cachaza, ceniza, vinaza – mediante el proceso de compostaje.

El trabajo tuvo los siguientes objetivos:

- Determinar la factibilidad de llevar adelante el proceso de compostaje.
- Analizar la evolución de los parámetros que dominan las etapas del proceso de compostaje: temperatura, humedad, aireación, pH, materia orgánica total, carbono orgánico total, nitrógeno total, conductividad eléctrica y relación C/N.
- Analizar y definir los indicadores de estabilidad, madurez y calidad agrícola del producto final obtenido.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Formulación y armado de las pilas

El trabajo se realizó como parte del proyecto Bio-Refinería Sustentable Leales para la elaboración de productos, alimentos y compost a partir de derivados de la caña de azúcar. Se desarrolló en la planta de compostaje perteneciente al ingenio Leales ubicado en la localidad La Encantada, departamento Leales, provincia de Tucumán, República Argentina.

Se trabajó con una formulación en la mezcla con 70% de cachaza y 30% de ceniza, diferenciándose por un lado la pila testigo “T” y la que incorporó en la mezcla vinaza concentrada a 28°Brix -20 kg de vinaza concentrada/t de cachaza-, la pila “V20”. Todos los componentes de la mezcla fueron integrados al inicio del proceso, incluida la vinaza en el tratamiento correspondiente, y se mantuvo la humedad entre un 50% - 60%, sin que se viera afectado el proceso. Cada pila se replicó tres veces y tuvieron 2 m de ancho, 1,2 m de alto y 50 m de longitud. Las pilas correspondientes a V20 fueron armadas 30 días posteriores a las pilas T por una razón de logística y correcto manejo de las materias primas empleadas y el control de las pilas.

Previo a su armado se analizaron muestras de cada uno de los componentes -cachaza, ceniza y vinaza concentrada-, tomando importancia la reacción química (pH) y conductividad eléctrica medidas en el extracto de saturación, materia orgánica total por calcinación, carbono orgánico oxidable por Walkey-Black, nitrógeno total por Kjeldhal, fósforo total por colorimetría, potasio total por fotometría de llama, la humedad por gravimetría, y la relación C/N fue calculada.

Seguimiento de las variables que afectan el proceso

A fin de evaluar el proceso se hizo el seguimiento de los parámetros que dominan y condicionan cada una de las etapas del compostaje, temperatura (medida *in situ* con termómetro específico para compost), humedad por gravimetría (medida en estufa a 105°C) y pH en extracto de saturación. La aireación se controló con volteo y riego según la humedad y temperatura registradas. Se analizaron, además, materia orgánica total (calcinación), carbono orgánico oxidable (Walkey-Black), nitrógeno total (kjeldhal), conductividad eléctrica (extracto de saturación) y relación C/N determinada a partir de su cálculo con los datos anteriores.

Los muestreos se realizaron mediante la toma de tres submuestras de tres puntos diferentes a lo largo de cada pila, las cuales constituyeron luego una mezcla compuesta.

Estabilidad, madurez y calidad del producto final

Para dar por finalizado el proceso se seleccionaron una serie de parámetros considerados adecuados y fáciles de medir para la experiencia planteada, y de esta manera ser empleados como indicadores de estabilidad, madurez y calidad agrícola.

Entre los de estabilidad, los más sencillos de medir fueron la reducción de la temperatura de la pila a temperatura ambiente, la variación del color y la variación del olor, pH y la relación C/N.

Como indicadores de madurez se consideraron la relación C/N y la concentración de sales solubles, por tratarse de un producto en el cual intervienen como componentes de las mezclas las cenizas y la vinaza, las cuales se caracterizan por una elevada conductividad eléctrica.

Finalmente se definieron los indicadores de la calidad agrícola del compost, teniendo en cuenta los valores de referencia establecidos por la FAO (2013): conductividad eléctrica, pH, materia orgánica total, carbono orgánico oxidable, nitrógeno total, fósforo total, potasio total – en el caso de la pila V20- y la relación C/N.

Se tomaron muestras a cada pila con sus respectivas repeticiones y fueron analizadas en los laboratorios de la Sección Suelos y Nutrición Vegetal y del Área de Medio Ambiente de la EAAOC.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización inicial de cachaza, cenizas y vinaza

A partir de los resultados del análisis de la muestra de cachaza empleada en la mezcla, la misma se caracterizó por su elevado contenido de carbono orgánico, de materia orgánica, de fósforo total y nitrógeno total, no así de potasio total que fue bajo, su pH se encontraba cercano a la neutralidad, y sus contenidos de sales solubles fueron bajos. El porcentaje de humedad con el cual derivó del proceso fue elevado.

La vinaza concentrada – 28° Brix -, que solo fue empleada para el tratamiento V20, se caracterizó por su elevado contenido de carbono orgánico total y materia orgánica total, contenido medio de nitrógeno total y elevado de potasio total, y reacción química fuertemente ácida. Los contenidos de sales solubles fueron muy elevados, por lo que su empleo en la mezcla se realizó considerando que no se viera afectada la mezcla (Tabla 1).

De las cenizas se destaca su bajo contenido de materia orgánica total y carbono orgánico total, también los bajos contenidos de nutrientes como P y K, baja humedad, pH fuertemente alcalino y contenido salino elevado.

Partir de una mezcla equilibrada que permita tener una relación C/N es importante. Una mezcla bien formulada en la fase inicial debe tener un balance C/N de

Tabla 1. Caracterización inicial de cada componente de la mezcla.

	pH	Salinidad (dS/m)	COT (%)	MOT (%)	P total (%)	K total (%)	N total (%)	Rel C/N	Humedad (%)
Cachaza	6,9	1,7	35,1	60,5	1,2	0,4	1,5	23,4	59,7
Ceniza	8,9	5,3	7,8	14	0,2	0,3	25,5
Vinaza	5,1	46,7	46,7	80,4	...	3,3	1,7	27,8	Concentración 28°Bx

25/1 a 40/1, incluso hasta 50/1, situación que se ha dado en la mezcla de cachaza, cenizas y vinaza de este trabajo.

Variables que afectaron al proceso

• **Temperatura**

El proceso inició con una temperatura promedio de 65°C para el tratamiento T y 60°C para el tratamiento V20, debido probablemente a que los componentes de la mezcla emergen de la producción de azúcar y alcohol con temperaturas superiores a 50°C. Así también el aumento de la temperatura, al inicio del proceso, pudo deberse a que al contener la mezcla restos de sacarosa fácilmente asequible para la actividad metabólica microbiana, sea esta la que genere el incremento. Cuando los microorganismos respiran, la temperatura en la pila de compost se incrementa; y cuanto mayor sea la diversidad biológica de los materiales, más rápido será el aumento (Bohorquez Marquez *et al.*, 2014). Hacia el final del compostaje disminuyó hacia temperatura ambiente que alcanzó en promedio 27°C para el tratamiento T y 29,6°C para el tratamiento V20, lo cual indica, según Archer *et al.* (2009), que el proceso se completó (Figura 1).

• **Humedad**

Este parámetro se mantuvo desde el inicio dentro de los rangos indicados para un óptimo avance del proceso, 45% – 60%. Las pilas T y V20 se iniciaron con una humedad promedio del 58% y 55%, respectivamente, llegando hacia el final del proceso con un promedio

del 35,4% y 40%, respectivamente. Siendo ambos rangos de humedad los de referencia recomendados por la FAO (2013) (Figura 2).

• **pH**

Este parámetro, que tiene influencia en el compostaje por su acción sobre la dinámica de los procesos microbianos, manifestó variaciones marcadas en los valores, como se espera que ocurra durante el normal transcurso del proceso, iniciándose con valores desde muy fuertemente ácidos, y alcanzando luego el rango de la alcalinidad hasta llegar finalmente a valores cercanos a la neutralidad (FAO, 2013; Bueno Marquez *et al.*, 2008) (Figura 3). El comportamiento del pH en ambos tratamientos fue similar. Este parámetro también fue empleado como un indicador de estabilidad del producto final.

• **Materia orgánica total (MOT)**

Durante el proceso de compostaje se redujo la materia orgánica, siendo esto el normal avance del proceso de mineralización y coincidiendo con lo que señalan Bueno Marquez (2008) y la FAO (2013). Así quedó demostrado en ambos tratamientos, donde la reducción fue de un 70% a un 25% en el tratamiento T; y de un 55% a un 32% en V20 (Figura 4).

• **Relación C/N**

A lo largo del proceso, como consecuencia de la degradación de la materia orgánica se redujo también

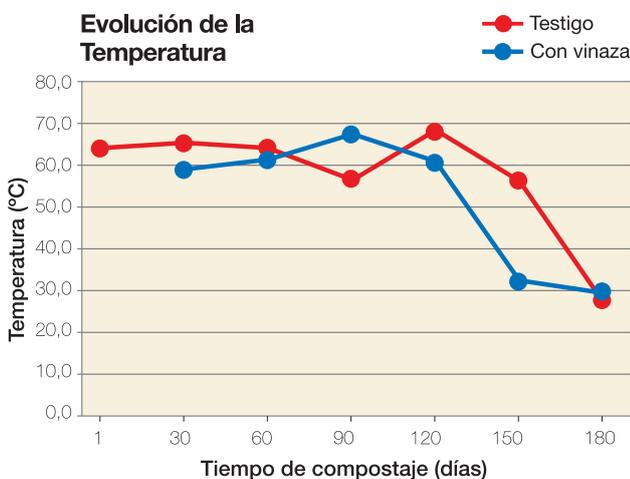


Figura 1. Evolución de la temperatura durante el proceso de compostaje.

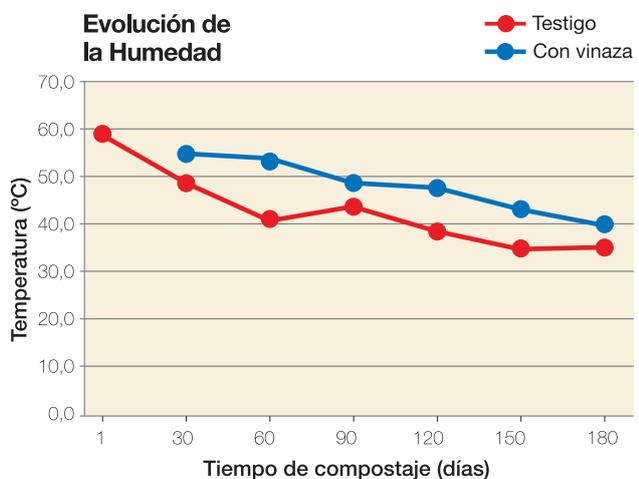


Figura 2. Evolución de la humedad durante el proceso de compostaje.

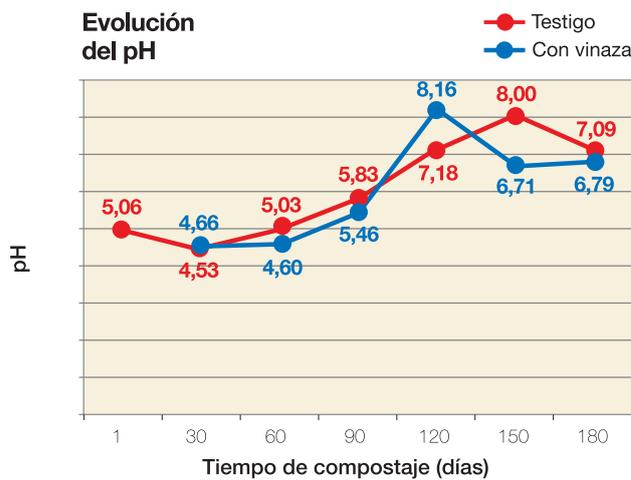


Figura 3. Evolución del pH durante el proceso de compostaje.

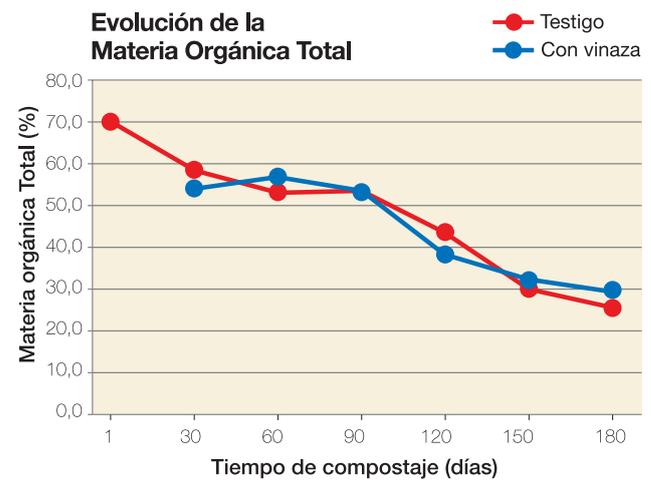


Figura 4. Evolución de la materia orgánica total durante el proceso de compostaje.

el CO y hubo un incremento en la concentración de N en ambos tratamientos. La relación C/N disminuye a lo largo del periodo de compostaje. La mezcla inició con una relación C/N cercana a 25 –dentro del rango óptimo- y finalizó con una relación próxima a 10 en ambas formulaciones, recomendada esta última para un compost sucroalcoholero estabilizado y maduro (Figura 5). Según FAO (2013), una relación C/N ideal para un compost maduro es 10:1 – 15:1.

• Conductividad eléctrica

En ambos tratamientos se puede observar una marcada reducción de la conductividad eléctrica, alcanzando valores finales de 2,43 dS/m y 3,72 dS/m para las pilas T y las pilas V20, respectivamente, valor que se encuentra por debajo del límite de restricción de empleo que establece SENASA, Resolución-264- 2011 (4 dS/m), y que en el caso de la pila V20 no se vio afectada por la cantidad de vinaza incorporada en la mezcla (Figura 6).

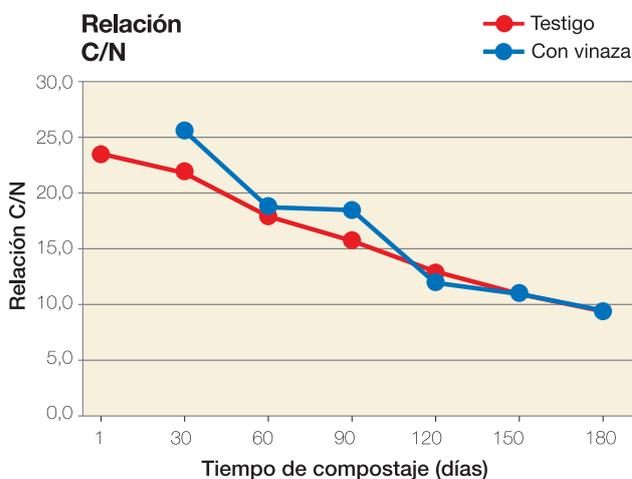


Figura 5. Evolución de la relación C/N durante el proceso de compostaje.

Estabilidad, madurez y calidad del producto final

En ambos tratamientos, tanto el T como el V20, los indicadores de estabilidad seleccionados, olor y color, sencillos de evaluar sensorialmente, demostraron marcados cambios. El olor pasó de desagradable a olor a tierra húmeda y fresca; y el color viró del original de la mezcla a una gama más oscura. También el descenso a temperatura ambiente de las mezclas marcó el cese de la actividad microbiana. El pH con valores dentro del rango considerado neutro indicó que el producto final se estabilizó, coincidiendo lo establecido por la FAO (2013) y el marco normativo para la producción, registro y aplicación de compost nacional (2019).

La concentración de sales solubles, como indicador de madurez seleccionado, alcanzó valores, en ambos tratamientos, que no llegaron a ser críticos para el empleo del producto en el suelo (4 dS/m), según normas establecidas por el SENASA (2011).

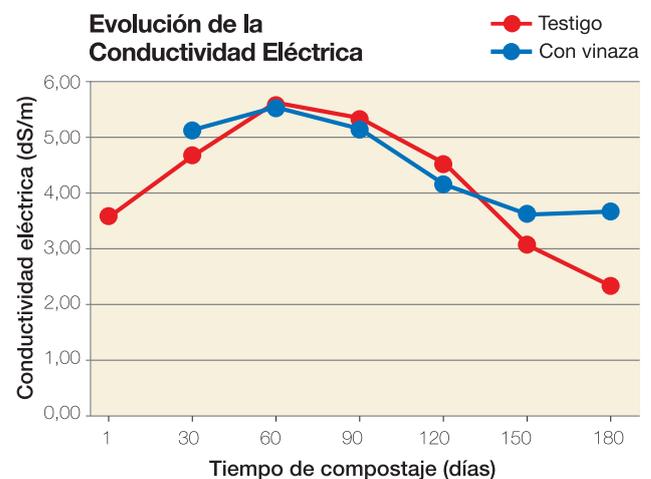


Figura 6. Evolución de la conductividad eléctrica durante el proceso de compostaje.

La relación C/N se empleó tanto como parámetro de seguimiento del compostaje como así también para definir la estabilidad, madurez y calidad agrícola del compost. Los valores iniciales y su comportamiento a lo largo del tiempo en el que se llevó adelante el proceso permitieron marcar el rumbo del mismo, encontrándose finalmente dentro del rango óptimo permitido por la FAO.

Los resultados obtenidos del análisis del producto final permiten caracterizar su calidad agrícola con un pH cercano a la neutralidad, una conductividad eléctrica que no llega a valores críticos (aun proviniendo de residuos sucroalcoholeros como la vinaza), contenidos de materia orgánica, nitrógeno y fósforo totales y potasio – para el compost proveniente de la pila V20- dentro de los rangos considerados aceptables para la FAO, como así también una óptima relación C/N en ambos productos

provenientes de las pilas T y V20 (Tabla 2).

De acuerdo a la calidad obtenida, ambos productos podrían ser empleados como abono orgánico en el cultivo de caña de azúcar, aportando materia orgánica, fósforo y nitrógeno al suelo, siendo estos últimos considerados nutrientes esenciales para el normal crecimiento y desarrollo del cultivo. Según Sotomayor *et al.* (2019), el empleo de 10 y 20 t/ha de un compost sucroalcoholero, en un suelo cultivado con caña de azúcar, provocó el aumento del fósforo disponible del mismo desde 70 ppm que contenía inicialmente a 113 y 151 ppm para la dosis de 10 y 20 t/ha, respectivamente. Se obtuvo también en dicha experiencia un incremento en el rendimiento cultural del cultivo (t/ha de caña de azúcar) de un 13% a favor de la dosis más alta empleada.

Tabla 2. Caracterización química del compost obtenido.

	pH	CE (dS/m)	MOT (%)	CO (%)	NT (%)	PT (%)	KT (%)	C/N
Compost T	7,09	2,43	25,5	14,16	1,48	1,1	...	9,6
Compost V20	6,71	3,72	32,21	17,90	1,89	1	0,45	9,5

CONCLUSIONES

En este trabajo ha quedado plasmado que a partir de la formulación compuesta por la mezcla de 70% de cachaza y 30% de cenizas, y que recibió o no riego con vinaza concentrada, se ha cumplido con el proceso de compostaje propiamente dicho. Esto se confirma a partir del seguimiento de los parámetros de importancia que lo caracterizan (T°, H%, pH, C/N).

Los indicadores de estabilidad, madurez y calidad agrícola seleccionados han sido de utilidad y han permitido calificarlo dentro del rango óptimo de un material estable, maduro y con una calidad agrícola que lo posiciona como apto para ser empleado como abono o enmienda orgánica, según lo establecido por la FAO y la normativa argentina: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-1-2019-318692>.

Queda demostrado que el compostaje es una buena práctica de manejo integrado de los residuos provenientes de la agroindustria de la caña de azúcar, reduciendo con esta alternativa el impacto ambiental que se produciría si cada uno de estos fuera empleado por separado.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Archer, C. H.; G. K. Evanylo and J. W. Pease. 2009.** On – Farm Composting: A Guide to Principles, Planning and Operations [En línea] Disponible en: <http://hdl.handle.net/10919/48077>
- Arias-Cedeño, Q.; R. López-Sánchez; L. R. Sainz-Rosales; M. V. Verdecia-Casanova & B. Eichler-Löbermann. 2021.** Potencial fertilizante de cenizas de bagazo de caña de azúcar de industrias azucareras. *Revista Cubana de Química* 33(3): 452 – 466. [En línea] Disponible en <https://link.gale.com/apps/doc/A689119230/IFME?u=anon~914c8c85&sid=bookmark-IFME&id=a2dcadf4>
- Barbaro, L.; M. Karlanian; P. Rizzo y N. Riera. 2019.** Caracterización de diferentes compost para uso como componentes de sustratos. *Chilean J. Agric. Anim. Sci., ex Agro-Ciencia* 35 (2):126 – 136.
- Barrera Gomez, R. 2006.** El proceso de compostaje. En: *Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso. Memoria de tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona. Capítulo 1, pp. 11-31.*
- Basanta, R.; M. A. García Delgado; J. E. Cervantes Martínez; H. Mata Vázquez & G. Bustos Vázquez. 2007.** Sostenibilidad del reciclaje de residuos de la agroindustria azucarera: una revisión. *Ciencia y Tecnología Alimentaria* 5 (4): 293-305. [En línea] Disponible en <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/11358120709487704>
- Bidlingmaier, W. 1996.** Odour Emissions from Composting Plants. In: de Bertoldi M., Sequi P., Lemmes B., Papi T. (eds) *The Science of Composting*. Springer, Dordrecht. [En línea] Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-94-009-1569-5_8
- Bohórquez, A., Puentes, Y. J., and Menjivar, J. C. 2014.** Quality evaluation of compost produced from agro-industrial byproducts of sugar cane. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 15(1): 73-81.
- Bueno Márquez, P.; M. J. Díaz Blanco y F. Cabrera Capitán. 2008.** Factores que afectan al proceso de Compostaje. En: *El proceso de Compostaje*, pp. 93–109. [En línea] Disponible en <http://hdl.handle.net/10261/20837>
- Díaz, M. J.; L. Jiménez; F. Cabrera y M. De Bertoldi. 2004.** Using a second order polynomials model to determine the optimum vinasse/grape marc ratio for in vessel composting. *Compost Science & Utilization* 12 (3): 273-279. [En línea] Disponible en <https://doi.org/10.1080/1065657X.2004.10702192>
- García Cespedes, D. I.; L. A. Lima Cazorla; L. Ruiz Gutiérrez y P. A. Calderón Peñalver. 2014.** Métodos y parámetros para determinar la madurez en el compost a nivel de fincas. *Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente* 14 (26). ISSN- 1683-8904.
- Gordillo, F. y E. Chávez. 2010.** Evaluación comparativa de la calidad del compost producido a partir de diferentes combinaciones de desechos agroindustriales azucareros. [En línea] Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/31487/D-65999.pdf?isAllowed=y&sequence=-1>.
- Iannotti, D. A.; B. L. T. Pang; D. L. Toth; H. M. Keener Elwell and H. A. J. Hoitink. 1993.** A Quantitative Respirometric Method for Monitoring Compost Stability. *Compost Science & Utilization* 1 (3): 52 – 65.
- Iglesias Jimenez, E. 2014.** Métodos y parámetros para evaluar la madurez del compost. En *Aspectos físicos – químicos, bioquímicos y microbiológicos del proceso de compostaje. Evaluación de la calidad. Material de estudio del Master universitario en gestión, tratamiento y valorización de residuos orgánicos. Universidad de Salamanca. [En línea] Disponible en: https://digital.csic.es/bitstream/10261/92881/1/3%202%20Unidad%20tematica%204.pdf*.
- Jeris, J. S. and R. W. Regan. 1973.** Controlling Environmental Parameters for Optimun Composting. Part II. *Compost Sci.* 14: 8-15.
- Labrador, J. 2001.** La materia orgánica en los sistemas agrícolas. Manejo y utilización. En *hojas divulgadoras N°3/93 del Ministerio de agricultura, pesca y alimentación de Madrid. ISBN: 84-341- 0801-1. [En línea] Disponible en: https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1993_03.pdf*
- Madejón, E.; M. J. Díaz; R. López and F. Cabrera. 2001.** Co-composting of sugarbeet vinasse: Influence of the organic matter nature of the bulking agents used. *Bioresource Technology* 76 (3): 275 - 278.
- Mazzarino, M. J.; P. Satti y L. Roselli. 2012.** Indicadores de estabilidad, madurez y calidad de compost. En: M.J. Mazzarino y P. Satti (eds.). *Compostaje en la Argentina Experiencias de Producción, Calidad y Uso. UNRN- Orientación Grafica Editora, Buenos Aires, Argentina, pp. 13-28.*
- Michel, F. C.; J. A. Pecchia and J. Rigot. 2004.** Mass and nutrient losses during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw. *Compost Science and Utilization* 12 (4): 323-334. [En línea] Disponible en: <https://doi.org/10.1080/1065657X.2004.10702201>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2013.** Parámetros de control durante el compostaje. En: Pilar Román, María M. Martínez y Alberto Pantoja (autores). *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina, pp. 25-31*
- Resolución-264-2011-SENASA - Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria. [En línea] Disponible en: http://www.senasa.gob.ar/**
- Ruiz, C. y S. Budeguer. 2018.** Caminos de la biomasa (4ª nota). *Avance Agroindustrial* 39 (3): 10-13.
- Sánchez Monedero, M. A., Roig, A., Paredes, C., and Bernal, M. P. 2001.** Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresource technology* 78(3): 301-308.
- Sotomayor, C; C. Esquivel; M. E. Garnica; H. Rojas Quinteros; M. Ruiz; G. A. Sanzano; E. Quaia; D. Paz y M. Abregú. 2019.** Manejo sustentable de residuos de la caña de azúcar. Elaboración y empleo de compost en suelos cañeros. *Avance Agroindustrial* 40 (4): 14-19.
- Suler, D. J. and Finstein, M. S. 1977.** Effect of tempe-

perature, aeration, and moisture on CO₂ formation in bench-scale, continuously thermophilic composting of solid waste. *Applied and Environmental Microbiology*, 33 (2): 345-350.

Torti, M. J.; M. Butti y V. Fain Binda. 2019. Evolución de los indicadores de madurez y estabilidad biológica en compost de residuos de incubación. *Revista de Tecnología Agropecuaria – RTA 10* (39): 73-75.

Zerega, M. L. 1993. Manejo y uso agronómico de la cachaza en suelos cañameleros. *Caña de azúcar*, 11(2), 71-92.

Zerega Mendez. 2017. Algunas experiencias en la utilización de los residuos industriales sulfato de calcio o fosfoyeso, azufre, cachaza y vinaza en la recuperación de suelos con énfasis en Venezuela. [En línea] Disponible en <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/algunas-experiencias-utilizacion-resi->

[duos-t41648.htm](https://www.engormix.com/agricultura/articulos/algunas-experiencias-utilizacion-resi-duos-t41648.htm)

Zhu, N. 2006. Composting of high moisture content swine manure with corncob in a pilot-scale aerated static bin system. *Bioresource Technology* 97 (15): 1870 – 1875.

Resolución-264-2011-SENASA- Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria. 2011. [En línea]. Disponible en <https://www.senasa.gob.ar> (consultado 13 de junio 2022; verificado 06 diciembre 2022).

Resolución conjunta 1/2019 Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria y Secretaria de Control y Monitoreo Ambiental. Compost, marco normativo para la producción, registro y aplicación de compost. 2019. [En línea]. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar> (Consultado 17 de febrero 2022; verificado 06 de diciembre 2022).