

ECONOMÍA CIRCULAR EN GRANJAS PORCINAS: ESTUDIO ECONÓMICO DE CASO EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA, ARGENTINA

B. Susana Pena de Ladaga y Rita M. A. Marra

Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Cátedra de Administración Rural

E-mail: spena@agro.uba.ar / rmarra@agro.uba.ar

Recibido: 24/02/2023

Aceptado: 09/06/2023

RESUMEN

Intensificar un sistema ganadero de producción primaria aparece un incremento de residuos. Esto tiende a afectar la sostenibilidad del sistema productivo al generar efectos negativos sobre los recursos naturales. La economía circular (EC) ofrece una solución sostenible a estos problemas a través de la evolución desde la economía lineal (tomar-hacer-usar-desechar) hacia el enfoque circular (tomar-hacer-usar-reciclar) donde los desechos se transforman en productos reciclados utilizables. El objetivo del presente trabajo fue realizar un análisis económico –con consideraciones de riesgo– del costo de infraestructura junto con los gastos que requiere el proceso para la transformación de efluentes de la producción porcina mediante el sistema de tándem de lagunas de estabilización, tomando un caso real en la provincia de Córdoba donde el procesamiento es obligatorio. Como resultado, los residuos se convierten en enmienda orgánica para el cultivo de maíz con destino a la alimentación de los animales de la granja porcina, como opción de economía circular, en sustitución de la fertilización química. El procedimiento hace aportes en el suelo de gran importancia desde el punto de vista físico; más allá que el costo resulte mayor o menor, al ser legalmente obligatorio, fue interesante poder concluir que, si bien la inversión en infraestructura es onerosa, económicamente el procesamiento es factible en establecimientos de gran cantidad de madres.

Palabras clave: enmienda orgánica, efluentes, porcinos, economía circular.

CIRCULAR ECONOMY IN PIG FARMS: ECONOMIC CASE STUDY IN THE PROVINCE OF CÓRDOBA, ARGENTINA

ABSTRACT

Intensifying a primary production livestock system entails an increase in waste. This tends to affect the sustainability of the productive system by generating negative effects on natural resources. Circular economy (CE) offers a sustainable solution to these problems through the evolution from the linear economy (take-make-use-dispose) towards the circular approach (take-make-use-recycle) where waste is transformed into usable recycled products. The objective of this paper was to carry out an economic analysis –with risk considerations– of the cost of infrastructure and expenses required by the process for transformation of effluents from pig production through the tandem system of stabilization ponds, analyzing a real farm in the province of Córdoba where processing is bound by law. As a result, the residues are converted into organic amendment for the cultivation of corn destined to feed animals of the pig farm, as a CE option, instead of chemical fertilization. The procedure makes contributions to the soil of great importance from the physical point of view. Even though the cost is higher or lower, since it is mandatory law, it was interesting to be able to conclude that, although the investment in infrastructure is onerous, economically the processing is feasible in establishments with a large number of mothers.

Key words: organic amendment, effluents, pigs, circular economy.

INTRODUCCIÓN

El sector de granjas porcinas de Argentina atravesó en las dos últimas décadas cambios cuali y cuantitativos de importancia, destacándose el incremento de escala (establecimientos con mayor cantidad de madres) así como la intensificación de procesos. Es en el período 2003-2005 cuando se registra un incremento en la producción nacional, con descenso de importaciones y aumentos sostenidos del consumo interno (MAGyP, 2023). A medida que transcurrió el tiempo, muchos establecimientos con más de 100 madres pasaron al confinamiento de parte o de la totalidad de sus animales convirtiéndose en empresas tecnificadas de mayor eficiencia productiva. El crecimiento fue impulsado por el incremento en la demanda interna (influyendo también la externa) y fue acompañado por una fuerte incorporación de tecnología y consecuente aumento de productividad que aportó al sector una mejora sustancial en los índices de eficiencia (Brunori, 2013).

La producción de cerdos se desarrolla principalmente en la zona central de la Argentina, concentrando Córdoba el 23% de los "stocks" de animales del país (MAGyP, 2021). Esto se debe, en gran medida, a que la citada zona es el sitio con mayor disponibilidad de granos y accesos cercanos a los establecimientos de faena, acompañado por un alto consumo de carne porcina.

Uno de los principales problemas asociados a la intensificación de cualquier sistema ganadero de producción primaria es el incremento en la cantidad de residuos, donde el mayor componente resultan ser las excretas (heces, orina y agua de lavado). Estos residuos ganaderos (tanto sólidos como líquidos) pueden tener impactos que afectan la sostenibilidad del sistema productivo en su conjunto al determinar efectos negativos sobre los recursos naturales (Millares, 2011; Ciapparelli y García, 2015). Además, en áreas reducidas los residuos provenientes de la ganadería son la fuente principal de acumulación en el suelo y en el agua superficial y subterránea, de nutrientes, sustancias orgánicas, metales pesados, antibióticos y otras drogas veterinarias, emisiones de gases, así como de patógenos que pueden afectar la salud humana y animal (Pascale *et al.*, 2014).

La intensificación trajo aparejado el desafío para los productores de contar con un plan de gestión y bio-transformación de gran volumen de residuos. La economía circular (EC) ofrece una solución sostenible a estos problemas a través de la evolución desde la economía lineal (tomar-hacer-usar-desechar) hacia el enfoque circular (tomar-hacer-usar-reciclar) donde los desechos se

transforman en productos reciclados utilizables (An-drango Alobuela, 2022). En otras palabras, EC es el término general que busca minimizar el uso de materia prima virgen, trabajando sobre los principios de conservación de los bienes naturales, el aumento de la circularidad de los recursos y la reducción de efectos adversos sobre el sistema y el entorno (Sahu y Agrawal, 2021).

Los modelos comerciales de EC pretenden eliminar problemas de escasez de recursos y ayudar a crear valor para la empresa (Bag *et al.*, 2021). Si bien el objetivo se focaliza en el impacto ambiental, considerando los beneficios económicos que aseguren rentabilidad y ventajas tanto a corto como largo plazo (Lieder y Rashid, 2016), muchas veces no queda demasiado claro si las opciones disponibles son viables para el productor desde el punto de vista económico.

La normativa legal en la provincia de Córdoba se ha ido modificando, al punto de exigir al productor, para habilitar una granja porcina, la presentación de un "Plan de tratamiento y aplicación" a cargo de un Ingeniero Agrónomo que no genere efectos adversos sobre la calidad de los suelos, las aguas superficiales y subterráneas, y la salud humana. La habilitación incluye documentos con descripción de los estándares del proceso a emplear, así como también la presentación periódica de documentos respaldatorios respecto al correcto uso y tratamiento de los efluentes. Todos los procesos deben ser supervisados, además, por un profesional idóneo en el tema ambiental, responsable del cumplimiento de la normativa (Villalba, 2021). Las metodologías por aplicar son dependientes del tipo y volumen de desechos que surgen de cada actividad (García *et al.*, 2016). La elección del método de procesamiento, a su vez, debe estar basada en el análisis de las características del sistema de producción y en los objetivos planteados (Wang *et al.*, 2009).

El uso de efluentes porcinos como abono orgánico es hoy una práctica frecuente. Se trata de un manejo que podría suplir el uso de fertilizantes químicos debido a su aporte de nutrientes; al mismo tiempo la materia orgánica que se adiciona favorece la mejora de las condiciones físicas y biológicas del suelo (Sosa, 2019, 2020; Fleite, 2020, comunicación personal). Cabe destacar que previo a la aplicación de la enmienda orgánica en el lote deberían estimarse los requerimientos del cultivo a partir de los análisis de suelos correspondientes, lo cual no siempre se realiza (Maisonave *et al.*, 2017). El tratamiento de efluentes porcinos y el uso posterior como abono orgánico para aplicar en el cultivo de maíz

–cuyos granos constituyen parte sustancial del alimento de esos mismos animales–, al aportar beneficios al rendimiento de los cultivos como al suelo, cumpliría el objetivo de la economía circular (Figura 1).

El procedimiento para tratar los desechos puede realizarse mediante distintos sistemas, acorde a las características de la producción y el ambiente en que se encuentra la granja porcina. Uno de estos sistemas, que se analiza en el presente trabajo, se conoce como “sistema de tándem de lagunas de estabilización” y no debe confundirse éste con las lagunas donde simplemente se acumulan residuos, muy frecuentes en la zona, sobre

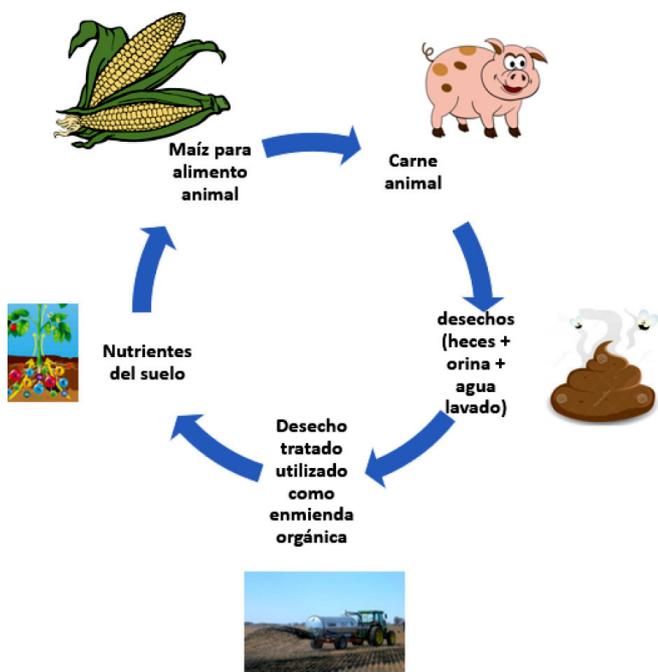


Figura 1. Economía circular para el acondicionamiento y uso de residuos en granja porcina.

todo en los pequeños productores con menos de 50 madres. El tándem lacunar opera como un reactor de grandes dimensiones excavado en la tierra en donde se producen procesos de remoción de contaminantes (compuestos orgánicos principalmente) y patógenos. Mediante la acción conjunta de algas y bacterias se logra la estabilización biológica presente en el desecho. La secuencia típica del proceso nombrado es de tres lagunas interconectadas, todas ellas convenientemente impermeabilizadas (Figura 2): (i) una anaeróbica, que vuelca hacia (ii) una facultativa, que a su vez vierte hacia (ii) otra aeróbica o de maduración.

En las lagunas no sólo se acumula líquido sobrenadante, sino que también los sólidos sedimentan y se van compactando, formando un lodo en el fondo. La frecuencia de limpieza prevista se debe ajustar en función de la altura que efectivamente alcancen los lodos dentro de la laguna. En la laguna anaeróbica se produce una alta degradación de sólidos, por intervención de un consorcio de bacterias. En la facultativa se logra la remoción de la DBO (demanda biológica de oxígeno) debido a la baja carga orgánica superficial (proveniente de la etapa anterior) que permite el desarrollo de una población algal activa. Acá tiene lugar una simbiosis entre algas y microorganismos: las algas generan el oxígeno requerido por las bacterias heterotróficas para remover la DBO soluble. La laguna aerobia o de maduración, contiene bacterias y algas en suspensión; la existencia de condiciones aerobias en toda su profundidad contribuye a la remoción de nitrógeno (N), fósforo (P) y patógenos (mecanismos gobernados por la actividad algal en sinergismo con la foto oxidación y la separación mecánica de huevos de helmintos).

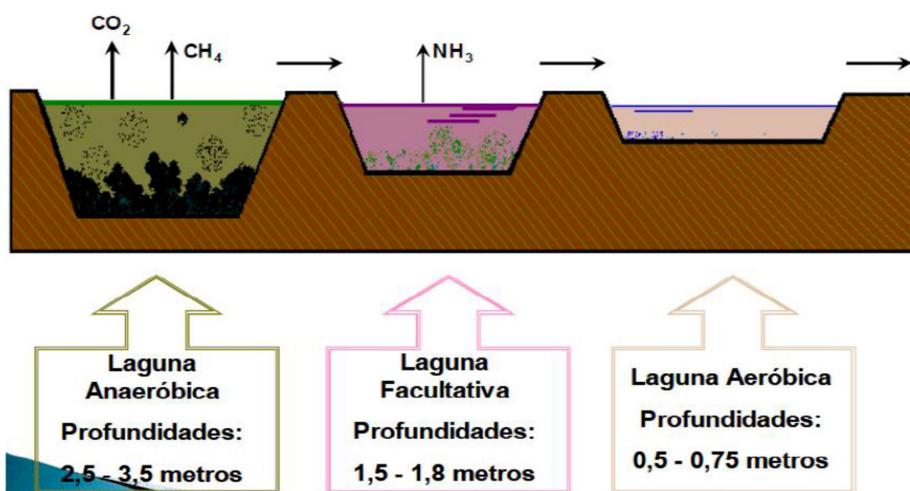


Figura 2. Tándem lacunar. Fuente: Braun (2013).

Según Millares (2011) los problemas ambientales que puedan derivarse del tratamiento y utilización de efluentes en una explotación porcina están más ligados al volumen generado y a su gestión posterior, que a características intrínsecas de los mismos. Los volúmenes de efluentes de las granjas porcinas son grandes, con un promedio de 26 l diarios por cerdo engordado debido principalmente a la gran cantidad de aguas de lavado utilizadas. El líquido proveniente de los galpones posee una concentración de sólidos entre 1,5% al 2,6% (Kvolek, 2018), es decir que presenta una importante dilución. La producción animal es ineficiente en la conversión a carne, por lo cual contiene gran proporción de nutrientes. En el caso específico de los cerdos, de cada gramo de proteína consumida tan solo el 33% es utilizado para la formación de tejido; el resto se elimina en forma de subproductos donde las formas químicas solubles de los macronutrientes N, P y potasio (K), provenientes de la hidrólisis de la proteína, generan elevadas cargas en las deyecciones líquidas como, por ejemplo, nitrógeno amoniacal (NH_4). El N no utilizado (67%) se elimina en heces (16%) y orina (51%). La mayor parte del N de la proteína está presente en forma de urea y el N de las heces (mayoritariamente amoniacal) comprende N indigestible en la dieta, N endógeno y N microbiano. De lo eliminado, un 35% se transforma en gaseoso y un 32% se incorpora al suelo (Brunori *et al.*, 2012; Brunori, 2013). El manejo de purines (*i.e.* mezcla de excrementos sólidos y líquidos del ganado, sumado a las aguas residuales provenientes del lavado de las instalaciones del criadero) intenta aprovechar ese alto porcentaje de nutrientes excretados. Para ello es necesario contar con un sistema de tratamiento y/o disposición. Se trata de una combinación de procesos cuyo objetivo es modificar las características del residuo para garantizar una disposición final sin riesgo de impacto ni en el medio ni en la salud humana (Peralta *et al.*, 2005).

Como la infraestructura que se requiere tiene un costo de consideración, el objetivo del presente trabajo fue realizar un análisis económico del costo de procesamiento, considerando la construcción de la infraestructura del tándem de lagunas, junto con los gastos del proceso para la transformación de los efluentes de la producción porcina, a través del sistema de procesamiento considerado adecuado en la zona. Así se produce la enmienda orgánica para utilizar en el cultivo de maíz cuyo destino es la alimentación de los animales de la granja porcina. Se trata de una opción de EC, en sustitución de la fertilización química. El estudio de caso se

realizó con la información real del sistema aplicado en un establecimiento ubicado en la localidad de Adelia María, departamento de Río Cuarto, provincia de Córdoba que cuenta con un criadero de ciclo completo de 1.000 madres, y una gran superficie cultivable, de la cual 1.100 ha se destinan a maíz. Si bien no resulta representativo de la provincia, fue importante el análisis dado que contaban con valiosa información técnica que brindaron desinteresadamente. Se consideró un buen punto de partida teniendo en cuenta la tendencia global al aumento en las escalas productivas.

METODOLOGÍA

La evaluación económica se llevó a cabo mediante el cálculo del valor actual neto (VAN) dado que involucra obras de infraestructura importantes, a la que se deben sumar los gastos del procesamiento (Price Gittinger, 1972; Pena de Ladaga y Berger, 2015; Sapag Chain y Sapag Chain, 2000). El VAN fue transformado en una anualidad (Frank, 1998) a fin de comparar esta última con el precio de la fertilización inorgánica, usual en la zona. La tasa de descuento empleada fue del 4% (coincidente con la tasa "Term SOFR" que desde el 01 de enero de 2022 reemplaza a la tasa Libor, usual tasa de interés de referencia). En el cálculo no se consideró el valor del terreno bajo el supuesto que la empresa cuenta con espacio propio para su desarrollo.

El sistema de procesamiento considerado fue el tándem de lagunas de estabilización, aconsejado por el INTA Marcos Juárez (Franco y Panichelli, 2013; Panichelli, 2019, comunicación personal; Panichelli, 2020). Para más detalles puede consultarse Pena de Ladaga *et al.* (2022). Debido a que los costos de infraestructura a realizar son elevados, se procedió a analizar cuáles eran los rubros de mayor peso. Resultaron ser la excavación para construir las lagunas y terraplenes necesarios y la geomembrana y su aplicación en las lagunas. Ambos presentaron precios muy variables (según la fuente) por lo que se optó por la modelización del VAN considerando estas dos variables como aleatorias, a través del uso del método de simulación Monte Carlo (Pena de Ladaga y Berger, 2006). Esta herramienta resulta de utilidad en situaciones donde el comportamiento de variables aleatorias entraña riesgo. Dado que la excavación es dependiente del tipo de suelo (según la posibilidad de encontrar tosca/piedra al realizar la tarea) el precio por unidad de volumen es muy variable, según indicaron los expertos. Sucede lo mismo con la geomembrana de polietileno de alta densidad de 1.000 micrones de espesor para

recubrir las excavaciones (incluido el sellado correspondiente de los rollos en que viene presentado). Ambas variables se modelizaron con distribuciones uniformes, que asignan igual probabilidad a todos los valores entre los parámetros mínimo y máximo con que se modelan. Los costos de planificación de obra, así como de control de ejecución, al ser porcentuales del total, también variaban en las iteraciones correspondientes a la simulación. Los gastos anuales se consideraron determinísticos. El software utilizado para simulación de las 10.000 iteraciones tomadas fue Risk Simulator, versión 18.0.0 (2022).

La duración del proyecto se consideró de 15 años (coincidente con la duración estimada de la membrana). Respecto al movimiento de tierra, como mejora extraordinaria, se optó por realizar el cálculo considerando, al final del período, el valor de recupero dado que la ley establece la obligatoriedad del manejo de residuos y sin ello no podría realizarse la actividad porcina. Todos los precios de los rubros cotizados en pesos fueron transformados a dólares oficiales considerando el valor de venta al cierre del mes de Julio 2021 según el Banco Nación ($101,75 \text{ \$ US\$}^{-1}$). La mayor parte de los rubros de gastos fue cotizada directamente en US\$ oficiales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se muestran los precios de movimiento de tierra (excavación) ($\text{US\$ m}^{-3}$) y de la geomembrana ($\text{US\$ m}^{-2}$). En base a la dispersión de valores de ambos rubros, estos fueron modelizados mediante una distribución uniforme, sugerida por la bibliografía (Vose, 2008). Para ello, se requiere el valor mínimo y el máximo cotizado en el mercado, asignando igual probabilidad a todo el rango de valores; en forma automática el software calcula la media.

En el Cuadro 2 pueden observarse los costos totales del movimiento de tierra ($\text{US\$ m}^{-3}$), de la geomembrana (correctamente sellada) ($\text{US\$ m}^{-2}$), así como el resto de los rubros que se deben tener en cuenta como infraestructura de acuerdo con la información proporcionada por el asesor ambiental del establecimiento (García,

2020, comunicación personal). Los costos de planificación y ejecución son proporcionales al costo, como ya se indicó; los restantes precios que figuran en el Cuadro 2 son promedios determinísticos.

En cuanto a gastos anuales necesarios para el proceso de tratamiento de los residuos, se incluyen en el rubro los productos para estabilizar y procesar el efluente, el asesoramiento técnico mensual, así como los análisis de laboratorio –obligatorios por normativa– (Cuadro 3). El monitoreo se realiza junto a la aplicación de floculantes para el mantenimiento de las fosas. Se trata de insumos biológicos que contienen microorganismos capaces de acelerar la descomposición de las excretas, disminuyendo olores (amoníaco y sulfuro) y generando una excreta menos sólida y más disgregable que facilita las tareas de limpieza (menos horas hombre en tareas de limpieza de fosas) y bombeo en las instalaciones. La colocación de estos productos microbiológicos se realiza una vez al mes; en función del caudal de efluente se aplican 50 kg al mes con un valor de 589,67 US\$. Seguido a ello, está el costo de los análisis de laboratorio periódicos para la caracterización física y química del residuo líquido antes y después del tratamiento. Para determinar el volumen a aplicar de enmienda se debe considerar la fertilidad natural del suelo (contenido de N total) que debe evaluarse al inicio de cada temporada de aplicación, a través de muestreo y análisis de suelo. Todos estos análisis son fundamentales para la proyección de la dosis agronómica y la correcta aplicación de la enmienda, tal como lo exige la legislación vigente. También hay tareas de mantenimiento: limpieza de las fosas y el mantenimiento de las lagunas. Seguido a ello se encuentran los gastos de mantenimiento del removeedor (Cuadro 4). La superficie de maíz proyectada para la aplicación de la enmienda en el establecimiento que se estudia fue de 1.100 ha; el tiempo de aplicación de la enmienda es de 2 h ha^{-1} , lo que arroja un resultado de 2.200 h anuales. El gasto de combustible se calculó en 8,22 $\text{US\$ ha}^{-1}$ y el salario del operario en 10,5 $\text{US\$ ha}^{-1}$.

El total general de gastos anuales (56.146 $\text{US\$ año}^{-1}$) es la suma de los gastos de funcionamiento de las lagunas

Cuadro 1. Precios modelados mediante distribución uniforme ($\text{US\$ unidad insumo}^{-1}$).

Tarea	Unidad	Mínimo	Máximo	Media
Excavación	m^3	3,5	10	6,75
Geomembrana	m^2	7	17	12

Cuadro 2. Inversiones totales para el sistema de lagunas de estabilización (US\$).

		Unidad	Precio ^{u-1}	Total
Movimiento de tierra	m ²	16.250,00	6,75	109.688
Geomembrana aplicada	m ³	10,210,00	12	122.520
Caño PVC 16 mm x 20 mm	m	20	15,95	319
Caudalímetros	Unidad	2	440	880
Bombas hidráulicas	Unidad	3	700	2.100
Hormigón	m ³	11	146	1,606
Mano de obra	Total			12.896
Planificación de obra				19.690
Control de ejecución de obra				27.081
Carro estercólero				43.000
Tractor	1			97.000
Renovador de estiércol	1			6,400
Asesoramiento	Anual			4,200
Total general				447.378

Cuadro 3. Gastos (en US\$) necesarios para el tratamiento de efluente en lagunas de estabilización.

Bacterias y floculantes (600 kg anuales)	7.076
Asesoramiento técnico + análisis de laboratorio	1.769
Tareas de limpieza y reparaciones	1.969
Reparación y mantenimiento del removedor de estiércol	300
Total de gastos de funcionamiento lagunas de estabilización	11.114

Cuadro 4. Gastos (en US\$) anuales relacionados con la aplicación de la enmienda.

Repuestos y reparación tractor	14.938
Repuestos y mantenimiento del carro estercolero	1.892
Combustible	9.041
Salario tractorista	18.473
Seguro	688
Total de gastos de mantenimiento de maquinaria para la aplicación de la enmienda	45.032

de estabilización (Cuadro 4) y los gastos de mantenimiento de la maquinaria para la aplicación de la enmienda. En el Cuadro 5 se detallan año a año los costos de la inversión anteriormente descrita considerando los valores promedio del movimiento de tierra e impermeabilización, y la suma de los gastos anuales. Se observa también el VAN del total de la inversión y la correspondiente anualidad determinística.

El cálculo del VAN, utilizando la simulación Monte Carlo y la anualidad, permitió detectar que los rangos entre los que fluctúan las cifras medias (diferencia entre máximo y mínimo) eran poco trascendentes, ya que presentaban diferencias pequeñas respecto a la situación promedio determinística. Esto se verificó en los valores de desvío standard y coeficiente de variación relativamente bajos (Cuadro 6).

El histograma y la curva acumulada del VAN total de la inversión se presenta en la Figura 3. Se observan en

intervalos de barras grises, la distribución de densidad de masa de las simulaciones. La distribución de frecuencia acumulada aparece en línea verde. En eje ordenadas (x) se visualiza el rango, en cifras negativas dado que se trata de costos; varía entre -1.114.251 y -914.251. En eje abscisas (y): izquierda valores de las frecuencias, eje derecha probabilidad acumulada (observe que termina en 1, es decir el 100% de la probabilidad acumulada).

En la Figura 4 se observa el gráfico de la anualidad, también en valores negativos, pero es interesante dado que se trata del valor correspondiente a un año. Si se contrasta el costo promedio de la anualidad (-94.656 US\$ en el año) (con la superficie de 1.100 ha que siembran con maíz para alimentar a las 1.000 madres y sus crías), el costo resulta de 86,05 US\$ ha⁻¹, cifra que incluye gastos de procesamiento y anualidad de la infraestructura. El fertilizante inorgánico (160 kg ha⁻¹ de

Cuadro 5. Inversión total (en US\$) del proyecto.

Año	US\$	US\$	Total anual
1	- 447.379	-	447.379
2	-	56.146	56.146
3	-	56.146	56.146
4	-	56.146	56.146
5	-	56.146	56.146
6	-	56.146	56.146
7	-	56.146	56.146
8	-	56.146	56.146
9	-	56.146	56.146
10	- 103.400	- 56.146	159.546
11	-	56.146	56.146
12	- 880	- 56.146	56.146
13	-	56.146	56.146
14	-	56.146	56.146
15	161.382	- 56.146	105.236
	VAN	-	1.052.425
	ANULIDAD	-	94.656,26

Cuadro 6. VAN aleatorio (US\$ totales) y valores de parámetros estadísticos.

Parámetro	VAN	Anualidad
Media	-1.052.425	-94.656
Desvío Estándar	-33.078	-2.975
Máximo	-1.141.040	-102.626
Mínimo	-941.040	-82.625
Coefficiente de variación	0,0318	-0,0318
Rango	-178.350	-13.976

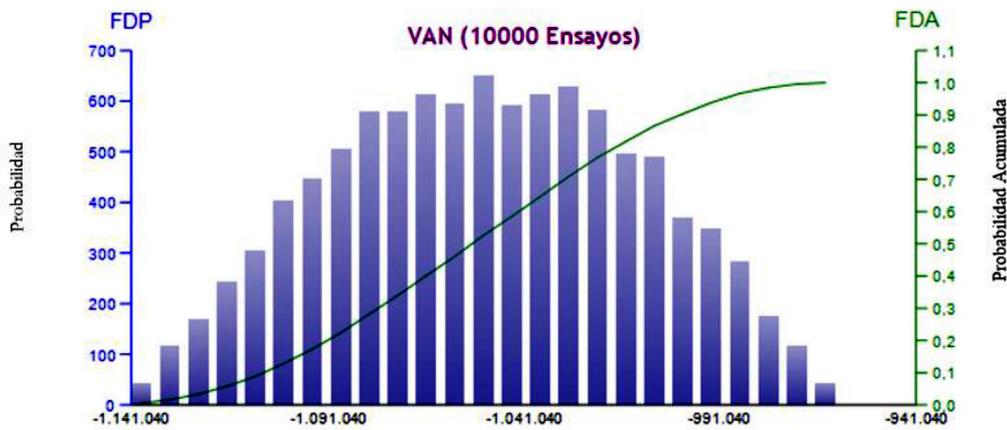


Figura 3. Histograma y curva acumulada del VAN total de la inversión (en US\$).

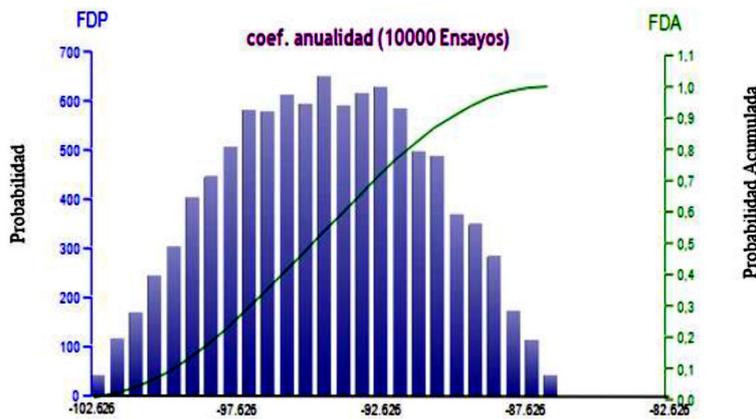


Figura 4. Anualidad (US\$ año⁻¹) en valores negativos.

urea a 69 US\$ ha⁻¹), más 70 kg de fosfato monoamónico a un valor de 36,40 US\$ y un costo de aplicación, de 6,5 US\$ ha⁻¹, hacen un total de 111,9 US\$ ha⁻¹. Por lo tanto, la enmienda orgánica es 25,85 US\$ ha⁻¹ más económica que la inorgánica, con lo cual a primera vista podría considerarse conveniente. El monto anual de ahorro por

fertilización asciende a 28.435 US\$, suma que solo cubre un 30% de la anualidad. En rigor, este cálculo supone que la enmienda tiene igual composición que el fertilizante inorgánico, lo cual es poco factible, máxime teniendo en cuenta que, la materia orgánica contiene variados micronutrientes, y el efecto sobre el suelo es

muy superior en cuanto a características físicas.

El tratamiento de residuos es obligatorio; por tanto, la opción debería complementarse con la comparación del costo por tonelada de residuo de retiro por parte de las empresas que los transforman, o del costo de optar por realizar algún acuerdo vecinal para utilizar el excedente en otros establecimientos, que son las opciones de manejo de residuos contempladas en la ley. Dado que no pudo obtenerse tal dato, se tuvo en cuenta el diferencial de rendimiento que representa el costo del fertilizante inorgánico. Teniendo en cuenta el precio del maíz de 132,67 US\$ t⁻¹ (promedio del período comprendido entre las campañas 2001/02 a 2021/22) los 25,85 US\$ ha⁻¹ diferenciales en el costo a nivel porcentual (considerando que la enmienda y el fertilizante inorgánico fueran iguales) sería de 0,19 t ha⁻¹ o 209 t totales en las 1.100 ha. Es decir que el fertilizante químico debería producir 1,9 qq ha⁻¹ más que la enmienda. Los rendimientos del establecimiento estudiado son muy superiores a los promedios de la zona (12 t ha⁻¹ vs los 5,75 t ha⁻¹ promedio en las campañas 2001/02 a 2021/22 en el partido de Río Cuarto). Futuras investigaciones deberían analizar si el uso de la enmienda desde hace varios años podría explicar, al menos en parte, los elevados rendimientos que se obtienen en el establecimiento bajo estudio.

La empresa logra solventar económicamente la práctica de tratamiento de efluentes, y, de hecho, lo lleva a cabo hace tiempo. Se están realizando ensayos comparativos de las opciones al momento. Los resultados del presente trabajo no pueden extrapolarse de modo "lineal" debido a que las dimensiones del establecimiento estudiado no resultan representativas de las dimensiones de granjas según datos recabados en la provincia de Córdoba. No obstante, el incremento de escala es una realidad, y tal vez es el motivo de la obligatoriedad de la ley. Ciertamente es que un número de madres menor haría que las lagunas fueran más chicas. Pero, el costo en infraestructura igual sería alto; y los costos relacionados con el asesoramiento y supervisión continua del especialista en el área ambiental serían más difíciles de soportar por productores de medianos a pequeños. También el costo de la flora microbiana necesaria para el funcionamiento del sistema de las lagunas es un factor de gran peso, por lo que en la zona predominan las lagunas de acumulación, donde el efluente se acumula, pero no es procesado.

En función de lo señalado en el último párrafo, sería importante analizar alternativas viables para los productores más representativos para la provincia de Córdoba, teniendo en cuenta la obligatoriedad de la norma. En otras actividades ganaderas intensivas tales como el "feed lot" y los tambos el problema también existe. Sería interesante profundizar la temática. En los tambos, por el bajo precio de la leche, los residuos pocas veces son tratados y, en general, terminan en las cunetas de los caminos, junto con la leche de descarte (De la Peña, 2022, comunicación personal).

CONCLUSIONES

La gestión de residuos de la producción porcina implica, desde el punto de vista técnico, considerar alternativas de manejos eficaces y económicamente viables, amigables para el ambiente y atractivas para el productor. El marco legal vigente en la provincia de Córdoba tiene en cuenta el tema de la economía circular. La hipótesis de partida llevaba a pensar que los costos de la práctica para conservar el ambiente serían desproporcionadamente elevados. El análisis mostró que el tratamiento de residuos para su uso como enmienda orgánica a través de lagunas estabilizadoras, si bien es oneroso, es una opción económicamente factible para establecimientos de la magnitud considerada. Cambios en los precios de los componentes principales de la infraestructura, estudiados con el método de simulación Monte Carlo, generaron variaciones que no afectaron mayormente el resultado económico. Quizás, si se trabajara con aleatorización de otras variables (kg de carne porcina, conversión de grano a carne u otras) la situación podría ser distinta; los promedios, rara vez se dan en la naturaleza. Para el caso de zonas secas, las opciones de procesamiento y uso son diferentes. La conversión de residuos a biocombustibles, o el retiro por parte de empresas dedicadas a la tarea, también son alternativas para estudio. Por último, debe mencionarse que los desfases entre valor de dólar oficial con las variadas opciones (dólar contado con liquidación, dólar turista, MEP, cable, soja, etc.) impactaron sobre los precios relativos desde que se realizó el trabajo (agosto de 2022); en general, los precios en dólares oficiales aumentaron, afectando en modo desigual los distintos rubros. Por tanto, las conclusiones serán variables también, acorde al momento en que se releven los precios.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrango Alobuela, M. S. (2022). *Industria 4.0 y economía circular: revisión de la literatura y recomendaciones para una industria sustentable en Ecuador* (Trabajo de Maestría). Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Central del Ecuador.
- Bag, S., Yadav, G., Dahmija, P. y Kumar Kataria, K. (2021). Key resources for industry 4.0 adoption and its effect on sustainable production and circular economy: an empirical study. *Journal of Cleaner Production*, 281, 125233. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125233>.
- Berger, A. M. y Pena de Ladaga, B. S. (2016). *Decisiones riesgosas en empresas agropecuarias. Simulación Monte Carlo como herramienta para el productor y el asesor*. Orientación Gráfica Editora, 122 p.
- Brunori, J. (2013). Producción de cerdos en Argentina. Situación. Oportunidades. Desafíos. https://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_produccion_de_cerdos_en_argentina_-_situacion_-_op.pdf
- Brunori, J., Rodríguez Fazzone, M. y Figueroa, M. (Eds.) et al. (2012). *Buenas prácticas pecuarias para la producción y comercialización porcina familiar*. Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca-FAO-INTA. <https://www.fao.org/3/i2094s/i2094s.pdf>
- Ciapparelli, I. C. y García, A. (2015). Use of manure to wheat production in an Argentinean Hapludoll Soil. *Journal of Pollution Effects & Control*, 3, 1. <https://doi.org/10.4172/2375-4397.1000131>.
- Franco, R. y Panichelli, D. (2013). *Conceptos básicos para definir estrategias de manejo de efluente porcino* (pp. 37). EEA Marcos Juárez. En: I Jornada Nacional de Gestión de Residuos Pecuarios INTA Rafaela. inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-7_inta_efluentes_porcinos.pdf
- García, A. R., Fleite, S. y Bereterbide, J. (2016). *Marco legal ambiental para el manejo de residuos en producciones animales intensivas*. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/112606?show=full>
- Kvolec, C. M. (2018). *Gestión ambiental pecuaria* (pp. 94). Orientación Gráfica Editora.
- Lieder, M. y Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, 115, 36-51. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042>.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca-MAGyP (2021). Estadísticas oficiales.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca-MAGyP (2023). Elaboración propia con información extractada de <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/porcinos/estadistica/>
- Maisonave, R., Millares, P. y Lamelas, K. (2017). *Buenas prácticas de manejo y utilización de efluentes porcinos*. Subsecretaría de Ganadería. Ministerio de Agroindustria. https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/prensa/folleto/digitales/contenido/Manual_Porcino.pdf
- Millares, P. (2011). Manejo de efluentes. Informe de actualización técnica N° 20. Fericesterdo. <https://docplayer.es/58776343-Manejo-de-efluentes-fericesterdo-2011-EEA-marcos-juarez.html>
- Panichelli, D. (2020). Jornada: Gestión de efluentes y residuos sólidos porcinos. Favorecer la economía circular para minimizar el impacto ambiental. Uso de lagunas de estabilización para tratamiento de efluentes porcinos. INTA Marcos Juárez. https://www.youtube.com/watch?v=y7YjflzHA&ab_channel=INTAMarcosJu%C3%A1rez
- Pascale Medina, C. (2014). *Suelos, producción agropecuaria y cambio climático avances en la Argentina*. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. 239 p.
- Pena de Ladaga, S. y Berger, A. (2006). *Toma de decisiones en el sector agropecuario: herramientas de investigación operativa aplicadas al agro* (pp. 308). Editorial Facultad de Agronomía.
- Pena de Ladaga, S., Marra, R. y Villalba, E. (2022). Tratamiento de efluentes porcinos para transformación en enmienda orgánica: un análisis económico con consideraciones de riesgo. 53° Reunión Anual de la Asociación Argentina de Economía Agraria, Universidad Nacional del Sur, 27 al 29 de octubre de 2022, Bahía Blanca, Argentina.
- Pena de Ladaga, S. y Berger, A. (2015). *Administración de la empresa agropecuaria: conceptos y criterios para el planeamiento*. Editorial Facultad de Agronomía. 248 p.
- Peralta, J. M., Araya, A. y Herrera, C. (2005). *Recomendaciones técnicas para la gestión ambiental en el manejo de purines de la explotación porcina* (pp. 206). Colección libros INIA N° 18. INIA.
- Price Gittinger, J. (1972). *Análisis económico de proyectos agrícolas* (pp. 241). Banco Mundial. Ed. Tecnos.
- Sahu, A. y Agrawal, S. (2021). Integrating Industry 4.0 and circular economy: a review. *Journal of Enterprise Information Management*, 35(3), 885-917. <https://doi.org/10.1108/JEIM-11-2020-0465>.
- Sapag Chain, N. y Sapag Chain, R. (2000). *Preparación y evaluación de proyectos* (pp. 439). 4ª ed. Mc Graw Hill Interamericana.
- Sosa, N. (2020). Ensayo de aplicación de efluentes porcinos en cultivo de maíz (Campaña 2017-2018). Informe. Convenio INTA-CAPPCOR.
- Sosa, N. (2019). *Aprovechamiento agronómico de efluentes porcinos y su valorización agronómica*. En: Actas del IX Congreso GITEP (Grupo de Intercambio Tecnológico de Explotaciones Porcinas). <http://www.gitep.com.ar/congreso-2019/charlas/Sosa-Aprovechamiento-agronomico-efluentes.pdf>
- Villalba, E. R. (2021). *Efluentes de producción porcina: evaluación económica del tratamiento para posible uso como enmienda orgánica en el cultivo de maíz* (Trabajo final para optar al título de Lic. en Economía y Administración Agrarias). Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Vose, D. (2008). *Risk Analysis. A quantitative guide* (pp. 734). 3ª ed. John Wiley & Sons, Ltd.