



EDITORIAL
NAVEGANTE



RESIDUOS ORGÁNICOS IMPERMEABILIZADOS PARA LA OBTENCIÓN DE COMPOST

Kelsy Pamela Gallardo Minaya



Kelsy Pamela Gallardo Minaya

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5665-4378>

RESIDUOS ORGÁNICOS IMPERMEABILIZADOS PARA LA OBTENCIÓN DE COMPOST

Kelsy Pamela Gallardo Minaya



EDITORIAL
NAVEGANTE

Todas nuestras publicaciones son sometidas a revisión doble-ciego de pares externos (*Peer Review Double Blinded*).

Esta publicación cuenta con licencia Creative Commons Reconocimiento - NoComercial - SinObraDerivada 3.0 Unported License.



ISBN: 978-628-7736-45-0

© Kelsy Pamela Gallardo Minaya

2024

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15843604>

©Editorial Navegante

www.editorialnavegante.com

Queda prohibida la reproducción bajo cualquier modalidad de toda o una parte de esta obra sin autorización expresa del titular de los derechos.

Diseño de carátula y composición: Editorial Navegante

Edición electrónica: Editorial Navegante

Editado en Colombia/ *Published in Colombia*

RESIDUOS ORGÁNICOS IMPERMEABILIZADOS PARA LA OBTENCIÓN DE COMPOST

Kelsy Pamela Gallardo Minaya



EDITORIAL
NAVEGANTE

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE FIGURAS.....	10
INTRODUCCIÓN.....	12

CAPÍTULO I

MATERIA ORGÁNICA.....	13
1.1. Nociones elementales.	13
1.2. Propiedades de la materia orgánica	15
1.3. Constitución y origen de la materia orgánica edáfica	17

CAPÍTULO II

COMPOST	21
2.1. ¿Qué es el compost?.....	21
2.2. Proceso de formación del compost	24
2.3. Abonos	31

2.4. Calidad del compost.....	31
-------------------------------	----

CAPÍTULO III

GEOMEMBRANA E IMPERMEABILIZACIÓN	35
--	----

3.1. Geomembrana: aspectos generales	35
--	----

3.2. Proceso de impermeabilización	38
--	----

3.3. Impermeabilización en geomembrana	38
--	----

CAPÍTULO IV

IMPORTANCIA DE LA ELABORACIÓN DE COMPOST PARA EL AMBIENTE.....	41
--	----

4.1. Objetivos	41
----------------------	----

4.1.1. Objetivo general	41
-------------------------------	----

4.1.2. Objetivos específicos	42
------------------------------------	----

4.2. Variables.....	42
---------------------	----

4.2.1. Variable dependiente	42
-----------------------------------	----

4.2.2. Variable independiente	43
-------------------------------------	----

4.3. Hipótesis	43
----------------------	----

4.3.1. Hipótesis principal.....	43
---------------------------------	----

4.3.2. Hipótesis secundarias.....	44
-----------------------------------	----

4.4. Tipo y diseño de investigación	44
---	----

4.5. Población, muestra y muestreo	45
--	----

4.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	45
--	----

4.7. Observación.....	46
4.8. Instrumento: Fichas de observación	46
4.9. Instrumento: Libreta de campo	46
4.10. Validación y confiabilidad del instrumento	46
4.11. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	47
4.12. Análisis descriptivo	48
4.12.1. Características de los resultados	55
4.12.2. Composición fisicoquímica del producto.....	56
4.13. Discusión de resultados.....	58
4.13.1. Características físicas y químicas del compost	70
4.13.2. Conductividad.....	72
4.13.3. Comparación de resultados de NPK con varias fuentes de materia orgánica	79
4.13.4. Resultado de compost en días Vs. Obtención de compost en diferentes minas.....	80
4.14. Conclusiones y recomendaciones	82
4.14.1. Conclusiones Fundamentales	82
4.14.2. Recomendaciones Estratégicas y Operativas	85
4.14.3. Reflexión sobre la Sostenibilidad del Compostaje.....	87

CAPÍTULO IV

REFLEXIONES FINALES	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Residuos compostables y no compostables.....	25
Tabla 2 Acondicionamiento, compostaje y elaboración del compost	29
Tabla 3 Diferenciación de compostaje realizado con geomembrana y sin geomembrana	37
Tabla 4 El pH por muestra de compost	50
Tabla 5 Resultado de macronutrientes de compost en Corire.....	66
Tabla 6 Porcentaje de humedad final de compost	41
Tabla 7 Fuentes de materia orgánica.....	70
Tabla 8 Referencia de minas que realizan compostaje	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Proceso general de descomposición	25
Figura 2 Diagrama del proceso de descomposición.....	29
Figura 3 Obtención de compost.	30
Figura 4 Conductividad.....	51
Figura 5 pH.....	52
Figura 6 Porcentaje de humedad	52
Figura 7 Conductividad.....	53
Figura 8 pH.....	54
Figura 9 Porcentaje de humedad	54
Figura 10 pH Evolución del compost - Días.....	59
Figura 11 pH Evolución del compost – Días.....	60
Figura 12 Evolución del compost – Días.....	60
Figura 13 Comparación de temperatura y pH en el tiempo en que se adquirió el compost.....	61
Figura 14 Comparación del pH Neutro y el pH obtenido en las diferentes comunidades	62
Figura 15 Proceso de maduración del compost de Corire.....	63
Figura 16 La evolución de pH durante el proceso de maduración	63

Figura 17 Proceso de maduración de compost en Agani.....	64
Figura 18 De la evolución de la temperatura en el compostaje – Corire	64
Figura 19 La evolución de la temperatura en el compostaje – Chucapaca	65
Figura 20 La evolución de la temperatura en el compostaje – Agani	65
Figura 21 Fases del proceso de compostaje en Corire.	67
Figura 22 Fases de proceso de compostaje en Chucapaca	67
Figura 23 Fases del proceso de compostaje en Agani	68
Figura 24 Comparación de días de compost - Tesis realizada en Ecuador y Perú.....	69
Figura 25 Porcentaje de humedad. Fuente: Elaboración propia.....	72
Figura 26 Conductividad.....	73
Figura 27 Análisis de compost	74
Figura 28 Análisis de estiércol de alpaca – Resultado fisicoquímico – 29 de octubre	74
Figura 29 Resultados de macronutrientes y micronutrientes – 20 de julio de 2012.....	75
Figura 30 Porcentaje de fósforo.....	76
Figura 31 Porcentaje de potasio	76
Figura 32 Porcentaje de calcio	77
Figura 33 Porcentaje de magnesio	77
Figura 34 Porcentaje de manganeso	78
Figura 35 Comparación de compost de diferentes orígenes.....	80
Figura 36 Alturas m.s.n.m. en diferentes minas	81
Figura 37 Días de producción de compost en diferentes minas	82

INTRODUCCIÓN

La agricultura moderna se enfrenta a una disyuntiva crítica: la imperiosa necesidad de maximizar los rendimientos ha consolidado una profunda subordinación a insumos de síntesis, un ciclo de fertilización que menoscaba la resiliencia de los sistemas productivos. Frente a este paradigma, la presente obra académica postula una intervención biotecnológica específica, orientada a validar un protocolo para la generación acelerada de una enmienda orgánica estabilizada. El objetivo es obtener un material de alto valor nutricional —particularmente en su perfil NPK—, concebido como un vector estratégico para dismantelar la dependencia de agroquímicos.

Dicha tensión en la esfera agroalimentaria constituye el síntoma de una disfunción de mayor alcance, arraigada en la saturación histórica de la matriz terrestre como receptáculo de los subproductos de la actividad humana. La presión antrópica, que abarca desde los efluentes industriales hasta los remanentes domésticos, ha desbordado la capacidad de asimilación de los sustratos edáficos, evidenciando la urgencia de reconfigurar los ciclos de materia mediante soluciones tecnológicas sostenibles.

CAPÍTULO I

MATERIA ORGÁNICA

1.1. Nociones elementales

La fertilidad de un sustrato edáfico, entendida como su capacidad para sostener el desarrollo vegetal, está gobernada por un complejo entramado de factores endógenos y exógenos. La intervención humana, apalancada en la ciencia y la tecnología, ha buscado históricamente modular estos procesos naturales, con resultados que oscilan entre el beneficio productivo y el riesgo ecológico a largo plazo. El imperativo, por tanto, reside en alinear dichos avances con un paradigma de sostenibilidad integral.

Un concepto central en esta dinámica es la materia orgánica, la cual se define como un heterogéneo conjunto de sustancias derivadas del catabolismo de restos biogénicos (Gallardo, 2021). Su naturaleza es eminentemente transitoria; se encuentra en un estado de transformación perpetua mediado por una multiplicidad de procesos bioquímicos, lo que impide atribuirle una estabilidad cualitativa o cuantitativa definida en el tiempo.

Esta fracción, aunque representa un porcentaje minoritario de la masa total del suelo —generalmente entre el 1% y el 6% del horizonte A, con una concentración que disminuye en profundidad—, es unánimemente reconocida como uno de los indicadores más fiables de la salud edáfica (Ghisolfi, 2011).

La descomposición de la biomasa animal y vegetal por la acción microbiana da origen a este componente vital. La trayectoria evolutiva de los suelos es un registro de milenios de acumulación, pero la intensificación de la actividad antrópica ha exacerbado la deposición de residuos, comprometiendo gravemente la matriz terrestre (Gallardo, 2013). Este fenómeno, catalizado a partir de la revolución industrial, ha generado un desequilibrio sistémico que demanda un manejo y control riguroso de los subproductos de nuestra civilización para salvaguardar la integridad de los ecosistemas. La relación cultural del ser humano con su entorno natural impone una responsabilidad de protección, pues de su resiliencia depende la subsistencia de todas las formas de vida.

La materia orgánica ejerce su influencia a través de dos procesos antagónicos y complementarios: la humificación y la mineralización. La humificación es el complejo proceso de síntesis que conduce a la acumulación de compuestos estables, mientras que la mineralización implica su destrucción para liberar nutrientes que son, en última instancia, absorbidos por las plantas. El producto resultante de la humificación es el humus, que evoluciona desde una fase joven o "lábil" —una forma aún no fijada a las partículas minerales y de intensa actividad microbiana, considerada clave para la fertilidad inmediata (Julca et al., 2006)— hacia una forma estable que constituye la reserva orgánica total del suelo.

Desde el punto de vista físico, la importancia del humus es monumental. Su capacidad para formar agregados al unirse con las arcillas confiere una estabilidad estructural al suelo, creando el "complejo de cambio". Esta macroestructura optimiza la infiltración y retención de agua, disminuye la susceptibilidad a la erosión y facilita un adecuado intercambio gaseoso.

En términos químicos, su acción es igualmente crucial: eleva la capacidad de intercambio catiónico, funciona como una reserva de nutrientes para la vida vegetal y provee una notable capacidad de amortiguación (tampón). Biológicamente, es el sustento energético para una multitud de microorganismos y estimula el crecimiento de la cubierta vegetal, fomentando un sistema ecológico equilibrado (Julca et al., 2006).

Por estas razones, la presencia de materia orgánica es un prerrequisito para la productividad agropecuaria. Los suelos que carecen de ella son inherentemente pobres, con características físicas inadecuadas que limitan el desarrollo de los cultivos. Este déficit a menudo conduce a la fertilización artificial, una solución que, si no se gestiona de manera sostenible, puede comprometer la calidad del producto final y la integridad del medio ambiente. La búsqueda de alternativas, como las que ofrece la agricultura orgánica, se convierte así en una estrategia fundamental para empresas y productores que aspiran a conciliar la rentabilidad económica con la custodia ambiental (Julca et al., 2006).

1.2. Propiedades de la materia orgánica

El papel de la materia orgánica como factor determinante de la productividad agrícola se manifiesta a través de un conjunto de propiedades interdependientes que reconfiguran fundamentalmente la matriz del suelo. Su influencia es tan profunda que su ausencia o escasez define a los sustratos pobres, aquellos que carecen de las condiciones intrínsecas para el desarrollo óptimo de los cultivos (Gallardo, 2021).

De este modo, la fracción orgánica no es meramente un componente más, sino un indicador maestro de la calidad edáfica, cuya dinámica y distribución son sensibles tanto a factores naturales —como la textura y las condiciones climáticas— como a la modulación impuesta por las prácticas agronómicas (Ghisolfi, 2011).

Desde una perspectiva física, su impacto más notable reside en la ingeniería de la estructura del suelo. Las sustancias húmicas, como detalla Gallardo (2013), despliegan un extraordinario poder aglomerante. Al interactuar con las partículas minerales, inducen la formación de flóculos y agregados estables, dando lugar a una arquitectura grumosa.

Esta configuración se caracteriza por una elevada porosidad, consecuencia directa de la cual es una permeabilidad optimizada. Dicha estructura no solo disminuye la densidad aparente del suelo (con valores de 1.1 a 1.5 g/cm³ frente a los 2.65 g/cm³ de la fase inorgánica), sino que también amplía el rango de humedad en el cual el sustrato se mantiene friable, es decir, con la consistencia ideal para el laboreo sin manifestar plasticidad.

Paralelamente, esta reconfiguración arquitectónica confiere una robusta protección contra los procesos erosivos. La cubierta de detritos vegetales y animales sobre la superficie actúa como una primera barrera, mientras el poder cohesivo del humus estabiliza las partículas elementales subyacentes, dificultando su arrastre por agentes hídricos y eólicos. Esta capacidad de gestión hídrica se ve reforzada por una notable aptitud para la retención de agua, facilitando el asentamiento de la vegetación.

Asimismo, la materia orgánica funciona como un escudo contra la contaminación química, ya que su estructura porosa y su reactividad le permiten absorber y retener plaguicidas, impidiendo su percolación hacia los acuíferos. Incluso su influencia sobre la temperatura es significativa, pues la tonalidad oscura que imparte al suelo incrementa la absorción de radiación térmica.

En el plano químico y fisicoquímico, la funcionalidad del componente orgánico es igualmente multifacética. Su naturaleza coloidal, derivada del tamaño y la carga eléctrica de sus partículas, le permite hincharse, contraerse y regular el estado de dispersión o floculación del sistema. Esta reactividad la posiciona como una fase en constante interacción con la solución del suelo y las rizosferas de las plantas. Quizás su atributo más

celebrado sea su elevada capacidad de cambio catiónico, que llega a ser entre tres y cinco veces superior a la de las arcillas. Esta característica la convierte en una reserva excepcional de nutrientes, fijando iones en posiciones de intercambio débil y previniendo así su lixiviación. Finalmente, su carácter intrínsecamente ácido —resultado de la liberación de compuestos orgánicos durante su descomposición— le permite actuar como un agente de alteración, capaz de disolver y meteorizar los minerales primarios del suelo, liberando elementos que de otro modo permanecerían inaccesibles (Labrador, 2002).

1.3. Constitución y origen de la materia orgánica edáfica

La constitución de la materia orgánica edáfica, si bien se refiere conceptualmente a la fase inerte de los residuos biogénicos, en la práctica analítica engloba también a la comunidad de microorganismos vivos, dada la imposibilidad metodológica de su separación del material ya transformado. Este componente representa un conglomerado de sustancias de alta complejidad, originadas a partir de restos vegetales y organismos, que se encuentran en un perpetuo estado de flujo entre la síntesis y la transformación. Por esta razón, su estabilidad cualitativa es inherentemente precaria a corto y largo plazo. Aunque su presencia cuantitativa es modesta en comparación con la fracción mineral —rara vez superando el 3%—, su rol en la evolución y las propiedades funcionales de los suelos es de una importancia capital. El sustrato para este formidable motor biogeoquímico se origina en la biomasa senescente. Los restos vegetales que se depositan sobre el perfil y las raíces que mueren en su interior inician un itinerario de descomposición que comienza con transformaciones físicas y químicas preliminares, seguidas por un catabolismo biológico profundo. Este ciclo de restitución de materia orgánica hacia la tierra agrícola es el pilar del mantenimiento de la fertilidad.

Históricamente, la comprensión de este ciclo fue eclipsada por la teoría de la nutrición mineral de Liebig, la cual, al reducir la alimentación de las plantas a una tríada de macronutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio), subestimó la función crítica de los oligoelementos y de la microbiota del suelo. Esta perspectiva simplificada catalizó el auge de la industria de fertilizantes químicos y el consiguiente declive de la aplicación de abonos orgánicos.

No obstante, el avance de la edafología moderna ha refutado esta visión reduccionista, confirmando que el crecimiento vegetal es un proceso sistémico que depende de una vasta gama de elementos químicos, hormonas y vitaminas. Lejos de ser un mero soporte físico inerte, la tierra fértil se revela como un laboratorio biológico de enorme complejidad, un sistema vivo donde cuatro componentes —la matriz mineral, la materia orgánica con su abundancia de seres vivos, el aire y el agua— se encuentran íntimamente ligados, originando un medio ideal que favorece el desarrollo de los cultivos mediante la mejora sinérgica de sus propiedades físicas y químicas.

El proceso de transformación de los aportes orgánicos se desarrolla en etapas secuenciales. Primero, una **transformación química inicial** ocurre incluso antes de que los restos vegetales caigan al suelo; las hojas son colonizadas por microorganismos en la propia planta, lo que induce alteraciones en su composición y estructura, con una pérdida de sustancias orgánicas y elementos minerales como P, N, K y Na. A esto le sigue una fase de **acumulación y destrucción mecánica**, donde la hojarasca, ramas y tallos son fragmentados y mezclados con la fracción mineral por la acción de la fauna edáfica, preparando el material para la etapa subsiguiente.

Finalmente, se desata una profunda **alteración química**, durante la cual los materiales orgánicos pierden con celeridad su arquitectura celular y se transmutan en un material amorfo, de coloración progresivamente más oscura y con una constitución química y física radicalmente distinta de

la original. Estos restos se desintegran y difuminan hasta su integración total en la fracción mineral del suelo. La acción de los microorganismos edáficos es el catalizador de esta metamorfosis: convierten los residuos orgánicos, a través de procesos de polimerización, en el humus propiamente dicho, una sustancia amorfa, coloidal, de alto peso molecular (10,000 - 50,000 Da), con carga negativa y carácter ácido. Este metabolismo microbiano, que utiliza el carbono como fuente de energía y el nitrógeno para su protoplasma, es el que gobierna los dos procesos centrales: la **humificación**, que acumula materia orgánica, y la **mineralización**, que la destruye liberando nutrientes inorgánicos asimilables (NH_4 , NH_3 , CO_2 , H_2O). La velocidad y predominancia de uno u otro proceso dependerán de la naturaleza de los restos (su relación C/N) y de las condiciones del medio, aunque ambos coexisten siempre en un equilibrio dinámico.

CAPÍTULO II

COMPOST

2.1. ¿Qué es el compost?

El compostaje se define como un proceso de biotransformación deliberada, cuya enunciación técnica precisa es "la descomposición biológica aeróbica de residuos orgánicos en condiciones controladas". Este procedimiento tiene como finalidad la transmutación de materiales considerados residuales en un producto estabilizado y de alto valor agronómico, que actúa no solo como fertilizante sino también como bioestimulante (Moreno et al., 2014). La base de esta metamorfosis reside en la valorización de una vasta gama de subproductos de origen biológico, tanto de procedencia animal como vegetal, abarcando desde desechos domésticos generados en la preparación de alimentos hasta los detritos de jardinería como hojarasca y podas (Altamirano y Cabrera, 2006), convirtiéndolos en un abono orgánico benéfico para el medio.

La fuerza motriz de esta transformación es una compleja comunidad microbiana que opera como un consorcio biológico. Dicha comunidad, conformada por microorganismos procedentes de las materias primas iniciales y por aquellos que colonizan la pila desde el entorno, constituye el conjunto de agentes biológicos encargados del proceso. La dinámica de esta biotransformación es secuencial: el perfil microbiano se modifica en cada etapa en función de la eficacia y la capacidad de supervivencia de los distintos grupos, lo que a su vez está dictado por la disponibilidad de nutrientes y el grado de tolerancia a las altas temperaturas. Moreno et al. (2014) señalan que al principio predominan grupos bacterianos capaces de metabolizar los compuestos más lábiles, mientras que en las fases de maduración la actividad se desplaza hacia hongos y actinomicetos, especializados en la degradación de sustratos más complejos. La temperatura, por ende, funciona como el principal árbitro que determina la población específica que prevalece.

Un fenómeno de gran relevancia derivado de esta actividad biológica es la supresividad del compost. Esta capacidad de inhibir enfermedades vegetales, aunque puede ser potenciada indirectamente por las propiedades fisicoquímicas del material, se origina fundamentalmente en la presencia de esta diversa comunidad microbiana. La aplicación de compost en campo puede ejercer un efecto supresor (o, en ocasiones, nulo, pero rara vez potenciador de fitopatologías) gracias a un gran número de bacterias, hongos y actinomicetos que operan mediante mecanismos antagónicos (Moreno et al., 2014). Al igual que ocurre en los suelos supresivos naturales, estos fenómenos pueden ser de naturaleza general, específica o una combinación de ambas, ofreciendo una alternativa viable a la dependencia de plaguicidas químicos.

La búsqueda de este tipo de tecnologías limpias no es un hecho aislado; responde a la presión sistémica que ejerce la actividad antrópica sobre la resiliencia de los ecosistemas, cuya degradación puede alcanzar umbrales de irreversibilidad (Almendros et al., 1984). La necesidad de combatir plagas y enfermedades vegetales devastadoras ha sido un factor clave que

ha favorecido el interés en la investigación y comercialización de estos bioproductos. El objetivo último de la agricultura sostenible ha sido, precisamente, la reducción progresiva del uso de fertilizantes y pesticidas de síntesis química, una meta para la cual el compostaje se postula como una herramienta estratégica (Moreno et al., 2014).

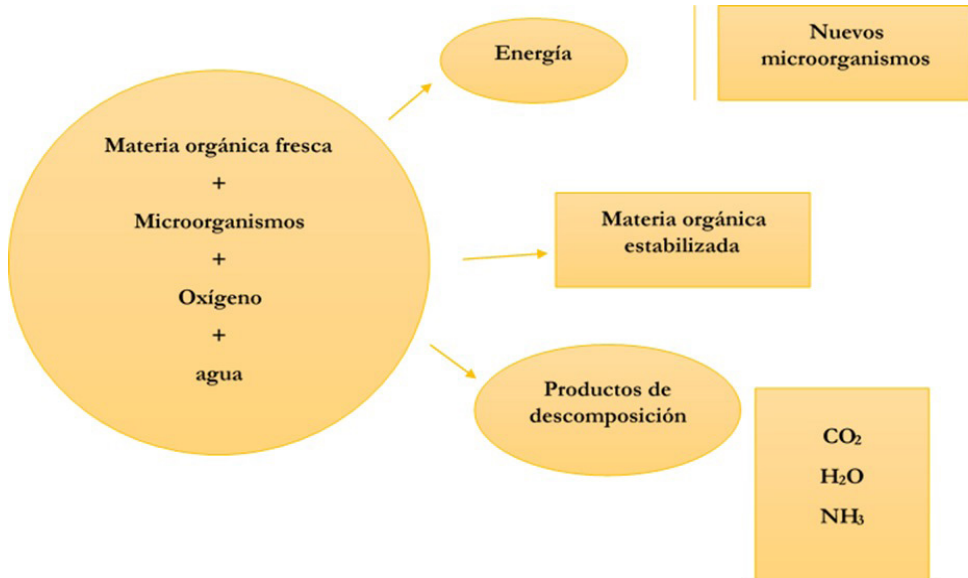
Este proceso busca emular y optimizar los ciclos de un suelo naturalmente fértil, donde los organismos edáficos liberan nutrientes inorgánicos a un ritmo suficiente para el desarrollo vegetal. Las exigencias de la microbiota del suelo en términos de energía, nutrientes, agua y temperatura son, de hecho, notablemente similares a las de las plantas cultivadas (Julca et al., 2006). El compostaje, por tanto, se presenta como una solución para potenciar la tierra y su capacidad productiva frente a la aplicación de insumos químicos que, a menudo, dañan las propiedades edáficas preexistentes, una tensión exacerbada por la exigencia de abastecer al mundo en un contexto de crisis recurrentes (Julca et al. 2006).

La evolución del compostaje es un proceso que se puede monitorizar a través de sus cambios organolépticos. Los residuos frescos, con sus colores y olores característicos, se tornan progresivamente en un material oscuro. La transformación de los aromas es notoria, y la aparición de un olor a tierra indica que el producto ha alcanzado su madurez. La ausencia de una aireación adecuada puede generar la producción de amoníaco, una señal de desviación hacia rutas anaeróbicas (Altamirano y Cabrera, 2006). En la actualidad, este método de tratamiento de desechos sólidos —que puede incluir enmiendas como estiércol y cal— está siendo repotenciado por la biotecnología, posicionándose como una alternativa de solución tanto para la mitigación de la contaminación como en el plano económico a través del reciclaje orgánico.

2.2. Proceso de formación del compost

El proceso de formación del compost se fundamenta en una sucesión de fases termodinámicas y biológicas, cuya cinética y resultado final dependen de una gestión controlada. La trayectoria de esta biotransformación se divide canónicamente en dos etapas principales: una primera **fase activa**, dominada por reacciones de degradación exotérmicas, donde la materia orgánica sirve como sustrato de carbono y energía para una intensa actividad microbiana que eleva la temperatura, descomponiendo rápidamente los compuestos lábiles y asegurando la estabilización inicial del material. A esta le sucede una segunda **fase de maduración**, que se inicia cuando el suministro de materia orgánica fácilmente asimilable se vuelve un factor limitante, caracterizándose por un proceso más lento de mineralización y humificación que conduce al producto final.

La velocidad con la que se completa este ciclo está supeditada a un conjunto de factores físicos y químicos interdependientes. La temperatura emerge como uno de los parámetros más críticos, pero su evolución está intrínsecamente ligada a otras variables como las características físicas de los ingredientes —notablemente el tamaño de las partículas y su contenido de humedad—, así como al diseño del sistema (tamaño y forma de la pila), que afecta directamente la aireación y la capacidad del sistema para retener o disipar el calor. La intervención humana es lo que distingue el compostaje de la descomposición natural; mientras que esta última puede generar olores bajo condiciones favorables si no se mantiene la aerobiosis, el compostaje es un proceso administrado que busca optimizar estas variables.

Figura 1 Proceso general de descomposición

Históricamente, la técnica del compostaje evolucionó desde prácticas empíricas, como el simple apilamiento de residuos domésticos, excrementos animales y restos de cosecha, hacia un método con bases científicas. Un punto de inflexión clave fueron las experiencias del inglés Albert Howard en la India a principios del siglo XX, cuyo éxito residió en la fusión del conocimiento científico con las tradiciones campesinas para fermentar mezclas de desechos vegetales y deyecciones animales en condiciones de humedad controlada. Hoy, esta técnica ha ganado una renovada importancia, especialmente en sectores como la minería, donde la gestión responsable de los residuos orgánicos generados en las comunidades anfitrionas es un imperativo ambiental y social, demostrando que con la materia prima y la técnica correctas se puede obtener un producto de calidad en un tiempo optimizado y con un impacto positivo.

El compostaje que se practica en la actualidad es un proceso fundamentalmente aerobio, dependiente de la presencia de oxígeno, el cual se suministra mediante volteos o una construcción de pila que permita la difusión de aire hacia el centro. Este método combina fases de temperatura mode-

rada o mesofílicas (15-45° C) con fases de alta temperatura o termofílicas (45-70° C) para lograr la reducción y transformación de los residuos en un producto estable y valorizable. La falta de oxígeno desvía el proceso a rutas anaeróbicas, generando olores ofensivos y provocando la muerte por asfixia de los microorganismos aerobios, lo que inicia la putrefacción de los residuos. Una vez que los compuestos más lábiles son agotados, la temperatura desciende y el material adquiere su textura granulosa y oscura característica.

La ejecución exitosa del compostaje se rige por varios principios. El principio **biológico** concibe la pila como un ecosistema donde bacterias, hongos, protozoos, miriópodos e insectos actúan en una sucesión ecológica. El principio de los **materiales** se centra en el balance de carbono (fuente de energía) y nitrógeno (para la síntesis proteica). El de la **superficie** establece que una mayor área de contacto acelera la descomposición. El **volumen** debe ser suficiente para retener calor pero no excesivo como para impedir la aireación. La **humedad y la aireación** son cruciales para la actividad microbiana, mientras que el **tiempo y la temperatura** están directamente correlacionados: una pila más caliente, producto de una buena gestión, se procesa más rápido. Para asegurar la calidad del producto final, es imperativo controlar la composición de los insumos, evitando la presencia de sustancias indeseables y garantizando una mezcla homogénea que equilibre la relación N/C y distribuya uniformemente la humedad y el oxígeno.

Tabla 1 Residuos compostables y no compostables

COMPOSTABLES	NO COMPOSTABLES
Restos de frutas y verduras	Artículos de piel
Pañales y compensas	Restos de cerámicas.
Huesos	Restos de bricolaje
Aserrín	Polvo de barrer
Residuos de infusiones y café	Papel de aluminio
Cáscara de huevos, frutos secos	Cenizas y colillas de tabaco
Restos de carne y pescado	Tetrabrik
Restos de plantas y jardines	Plásticos
	Latas, chapas, metales
	Tapones de corcho

La secuencia detallada del proceso, según Sakurai (2000), puede dividirse en cuatro periodos definidos por la evolución térmica. Comienza con una fase **Mesofílica**, donde la actividad metabólica de los microorganismos eleva la temperatura y la producción de ácidos orgánicos reduce el pH. Al alcanzar los 40° C, se inicia la fase **Termofílica**, donde los microorganismos termófilos transforman el nitrógeno en amoníaco, alcalinizando el medio. Al superar los 60° C, los hongos termófilos descomponen la celulosa; posteriormente, al descender de 40° C, los mesófilos reinician su actividad y el pH vuelve a descender ligeramente. Le sigue la **Maduración**, un periodo a temperatura ambiente donde ocurren reacciones de condensación y polimerización del humus.

Finalmente, la **Estabilización** oxida las moléculas complejas restantes, produciendo la esterilización del material por calor y eliminando patógenos. La intervención humana se limita a proveer las condiciones idóneas para que esta sucesión biológica ocurra con máxima eficacia.

Proteínas, aminoácidos, lípidos, carbohidratos, etc.

=

Materia orgánica + O₂ + nutrientes (estiércol de alpaca) + microorganismos

→ COMPOST + CO₂ + H₂O + NH₃

La implementación de estas técnicas puede variar en tecnificación, desde sistemas **artesanales** sin equipamiento mecánico, hasta **semi-industriales e industriales** con diversos grados de automatización. Asimismo, se distinguen dos métodos principales: el **natural**, basado en pilas estáticas con volteos periódicos que dura de tres a cuatro meses, y el **acelerado**, que emplea reactores o aireación forzada para reducir el proceso a dos o tres meses. El grado de maduración se determina por el aspecto del producto: color oscuro, olor a tierra y humedad controlada, que según Kiely (1999) no debe superar el 40% para uso agrícola. El pH inicial más bajo favorece la retención de amoníaco.

La importancia del compostaje trasciende la mera gestión de residuos, convirtiéndose en un nexo entre los sistemas urbanos y rurales. Permite disminuir la contaminación, aumentar la producción de viveros, incrementar la oferta de abonos, fomentar la conciencia ambiental, mejorar la disponibilidad de nitrógeno, aumentar la capacidad de crecimiento vegetal, contribuir a la formación de humus permanente y reducir el uso de fertilizantes químicos, mejorando suelos agrícolas y erosionados.

Tabla 2 Acondicionamiento, compostaje y elaboración del compost

ACONDICIONAMIENTO	COMPOSTAJE	ELABORACIÓN
Recuperación de materia prima	Picar	Limpiar
Pesado	Separar partes extrañas	Tamizar
Separado	Mezclar	Envasar
Descarga	Airear	Producto final o terminado
Limpieza manual	Humedecer	

Figura 2 Diagrama del proceso de descomposición

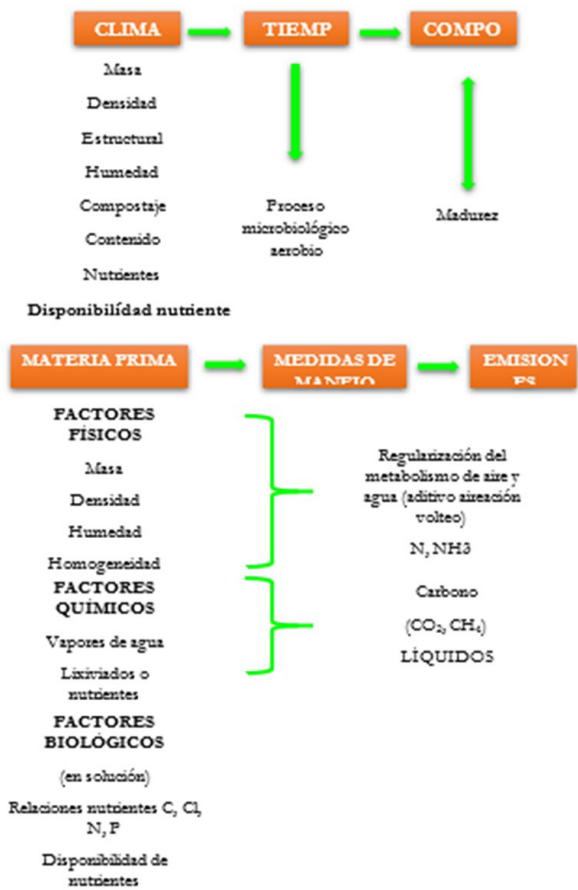
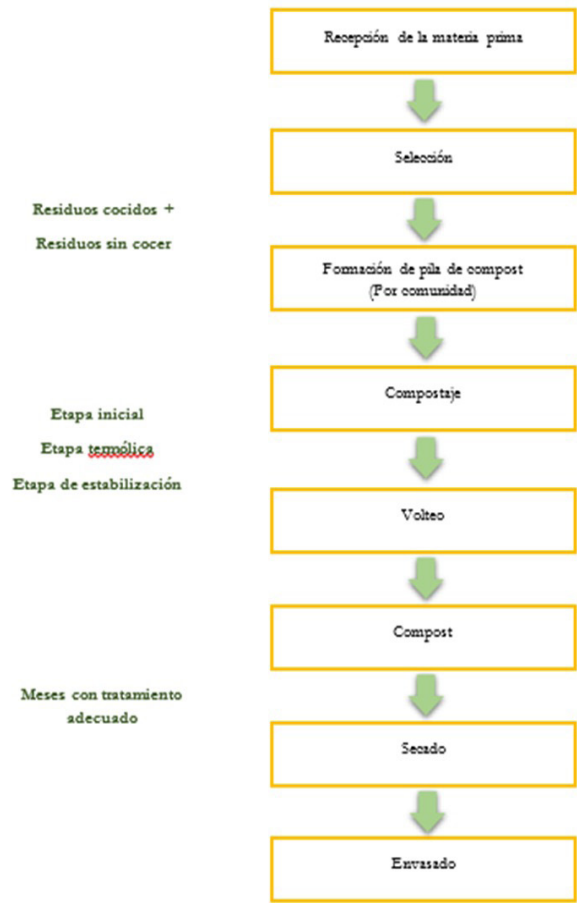


Figura 3 Obtención de compost.



Nota: Flujograma del compost. Fuente: Gallardo (2013)

La composición química final del compost, aunque intrínsecamente variable por su origen natural, suele presentar rangos característicos: 65-70% de materia orgánica, 40-45% de humedad, una relación C/N de 10-11, un pH entre 6.8 y 7.2, y un contenido significativo de macro y micronutrientes. La selección de las etapas y técnicas específicas de elaboración dependerá en última instancia de los objetivos de mercado, la cantidad de material disponible y la naturaleza del sustrato a procesar.

2.3. Abonos

La gestión de la fertilidad edáfica se articula en torno a dos paradigmas de enmienda fundamentalmente distintos: el de base químico-sintética y el de naturaleza orgánica. El primero abarca un arsenal de formulaciones diseñadas para una nutrición vegetal directa y específica, que incluye desde los fertilizantes minerales convencionales y las tecnologías de liberación lenta, hasta las aplicaciones foliares y los correctores de carencias nutricionales.

En contraposición, el paradigma orgánico se fundamenta en la aplicación de un espectro de materiales biogénicos que buscan una mejora integral del sustrato. Dentro de esta categoría se encuentran los estiércoles de diversa procedencia (guano, gallinaza, palomina), el compost estabilizado, la turba y los extractos húmicos, entre otros insumos (Salazar et al., 2003).

Esta proliferación y especialización de abonos responde a una presión constante en el sector agrícola por intensificar la productividad y optimizar la calidad de las cosechas. Sin embargo, dicha tendencia frecuentemente deriva en una gestión subóptima de los recursos naturales —notablemente el agua y los propios nutrientes—, lo que a su vez incrementa el balance energético global de las actividades productivas.

2.4. Calidad del compost

La calidad de un compost se define por su capacidad para actuar como una enmienda orgánica multifuncional, resultado de un proceso biológico aerobio que, bajo condiciones controladas y en ausencia de la matriz edáfica, transforma sustratos como excrementos animales y residuos urbanos en un material estabilizado. Este abono resultante optimiza la estructura del suelo, facilitando así la absorción de agua y nutrientes por parte de la vegetación (Gallardo, 2013). En esencia, el compostaje es

un proceso biotecnológico que convierte la materia orgánica en humus gracias a la actividad de un consorcio de organismos —principalmente bacterias, hongos, levaduras y actinomicetos— que se desarrollan espontáneamente. El producto final es un material enriquecido con sustancias humificables, sales minerales y una microbiota beneficiosa, elementos que conjuntamente mejoran la estructura del suelo y promueven la vitalidad de las plantas (Gallardo, 2013).

La conversión de residuos orgánicos en compost se ha consolidado como una técnica de amplia aplicabilidad y fácil implementación, permitiendo un tratamiento racional, económico y seguro de diversos materiales para su aprovechamiento en agricultura y jardinería. Los beneficios derivados de su aplicación son numerosos y sistémicos:

- **Optimización de la estructura edáfica:** Al promover la estabilización de los agregados, el compost modifica la arquitectura porosa del suelo. Esto favorece un movimiento equilibrado de agua y aire a través del perfil, al tiempo que facilita la penetración y el desarrollo del sistema radicular.
- **Mejora de la retención hídrica:** La aplicación de compost puede llegar a duplicar la capacidad del suelo para retener humedad. Esta mayor reserva hídrica contribuye a que las plantas desarrollen una mayor tolerancia y resistencia frente a periodos de sequía.
- **Incremento de la reserva de nutrientes:** El compost eleva la capacidad del suelo para retener cationes, liberando de forma progresiva un amplio espectro de elementos esenciales para el crecimiento vegetal, tales como nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, calcio, boro y hierro.
- **Fomento de la actividad biológica:** La adición de esta enmienda acrecienta y favorece la proliferación de los organismos del suelo. Esta biota participa en una multitud de procesos que confieren sa-

lud al ecosistema edáfico y facilitan un crecimiento adecuado de la vegetación.

- **Inducción de resistencia en las plantas:** La mejora general de las condiciones del suelo y la nutrición vegetal fortalece la capacidad de las plantas para resistir el ataque de plagas y enfermedades a las que están continuamente expuestas.
- **Aumento del rendimiento y la calidad de las cosechas:** Como consecuencia directa de los beneficios anteriores, se observan mejoras significativas en el rendimiento de los cultivos, lo que a su vez se traduce en un incremento de la calidad intrínseca de los productos cosechados.
- **Protección contra estreses abióticos:** La capacidad del compost para retener humedad y mejorar la ventilación del suelo no solo aumenta la fertilidad general, sino que también protege a las plantas contra daños por heladas.

CAPÍTULO III

GEOMEMBRANA E IMPERMEABILIZACIÓN

3.1. Geomembrana: aspectos generales

La eficacia de los sistemas de contención en la ingeniería ambiental y en diversas aplicaciones industriales depende críticamente de la capacidad para gestionar y mitigar el flujo no controlado de fluidos y gases. En este contexto, las barreras geosintéticas emergen como una solución tecnológica fundamental, cuya función principal es ofrecer una impermeabilidad excepcional. Estos revestimientos poliméricos se diseñan para confinar lixiviados, gases potencialmente peligrosos y para impedir la infiltración de agentes externos, constituyendo un componente esencial en la seguridad operativa.

Estructuralmente, las geomembranas son láminas poliméricas flexibles cuya impermeabilidad, si bien muy superior, es relativa en comparación con la de ciertos textiles o matrices de suelo. Su rol es determinante en el recubrimiento de rellenos, donde la interacción entre los residuos confinados y el terreno circundante representa una vulnerabilidad que debe ser

neutralizada; un punto que Gallardo (2013) identifica como crítico.

Por ello, su implementación en las superficies inferior y superior de los depósitos es una práctica estandarizada. La arquitectura molecular del polímero de base, obtenido mediante la polimerización del etileno, dicta sus atributos de rendimiento. Se distinguen principalmente dos configuraciones: los polímeros de estructura ramificada (LDPE), producidos a alta presión, y aquellos de configuración lineal (HDPE), sintetizados a baja presión.

Las divergencias en el grado de ramificación molecular, el peso molecular y la densidad definen las características finales del material. El polietileno de alta densidad (HDPE) es preferido por su robustez, cuya durabilidad se ve potenciada mediante la incorporación de aditivos específicos. Se formula típicamente con una base de resina virgen (97.5 %) a la que se añaden antioxidantes y absorbentes de radiación ultravioleta, como el negro de carbono (2.5 %), para inhibir la degradación oxidativa y la fotodegradación.

Conforme a Gallardo (2013), esta composición se traduce en un conjunto de características constitutivas clave. Primero, su **mínima conductividad hidráulica** asegura la contención de lixiviados y gases como el metano, a la vez que previene la intrusión de aguas pluviales. Segundo, la adición de negro de carbono le confiere una notable **resistencia a la radiación UV**, y la ausencia de plastificantes elimina el riesgo de volatilización de sus componentes.

Tercero, el **factor reflectivo**, presente en geomembranas de HDPE tanto blancas como negras, permite mitigar temperaturas extremas sobre el revestimiento y facilita la inspección visual. A estas propiedades se suman parámetros físicos como el **espesor**, medido en milímetros (mm) o milésimas de pulgada (mil), y la **gravedad específica**, que según la calidad de fabricación oscila para asegurar que las láminas no floten.

La aplicación de estas barreras redefine por completo el proceso de compostaje, estableciendo un entorno controlado que contrasta marcadamente con las metodologías al aire libre. Las ventajas de un sistema confinado frente a uno expuesto a la intemperie se resumen en la **Tabla 3**.

Tabla 3 Diferenciación de compostaje realizado con geomembrana y sin geomembrana

Compostaje con geomembrana	Compostaje sin geomembrana
La concentración de nutrientes es mayor con el diseño realizado para el proceso	En el proceso de compostaje al aire libre, la evolución es lenta y no permite la liberación brusca del calor (el mismo se disipa y la temperatura no sube).
La acción del viento y el mezclado facilita la degradación en el compost.	No existen organismos termófilos en suelos.
Mayor diversidad de materiales compostados.	La velocidad de los cambios es muy diferente (30 – 60 a más en el compost, y por las inclemencias del clima no se cumple con el objetivo).

Un sistema que emplea geomembranas no solo protege la biomasa de la acción directa del viento, sino que aprovecha el movimiento del aire para facilitar el mezclado y acelerar la degradación. Esto permite albergar una mayor diversidad de materiales y, crucialmente, alcanzar una concentración de nutrientes significativamente más elevada. Por el contrario, el compostaje a la intemperie se caracteriza por una evolución lenta, donde la disipación constante de calor impide alcanzar las fases termófilas necesarias para una descomposición eficiente, un proceso supeditado a las inclemencias climáticas que comprometen la consecución de los objetivos en plazos y calidades predecibles.

3.2. Proceso de impermeabilización

La consecución de un rendimiento óptimo en proyectos que involucran contención está intrínsecamente ligada a una ejecución rigurosa y controlada del proceso de instalación. Según subraya Chancasanampa (2013), una aplicación correcta es la condición sine qua non para que el sistema de impermeabilización maximice su eficacia y contribuya de manera efectiva a los objetivos del proyecto.

En esencia, las geomembranas actúan como una barrera de separación de alta eficiencia frente a la migración de sólidos y líquidos. El diseño de estos recubrimientos geosintéticos les permite aislar fluidos y partículas en un amplio espectro de aplicaciones, desde el revestimiento de canales y lagunas hasta la prolongación de la vida útil de tanques de almacenamiento y la implementación de sistemas de control de la erosión.

Precisamente en el confinamiento de rellenos, esta función alcanza su máxima criticidad. Las láminas poliméricas, si bien flexibles, están diseñadas como materiales de muy baja permeabilidad para prevenir la interacción y el lixiviado entre los residuos y el terreno subyacente (Chancasanampa, 2013). La selección del material de fabricación es, por tanto, un factor determinante. Cada tipo de polímero posee un conjunto de atributos distintivos que repercuten directamente en los procedimientos de instalación, la durabilidad esperada del sistema y su rendimiento a largo plazo.

3.3. Impermeabilización en geomembrana

La protección de la matriz edáfica y los recursos hídricos subterráneos frente a la infiltración de agentes potencialmente nocivos representa un imperativo central en la ingeniería civil y ambiental contemporánea. Para este fin, se despliegan soluciones de estanqueidad de alta ingeniería, entre las que destacan los sistemas de geomembranas por su versatilidad y eficacia. El propósito fundamental de estos revestimientos poliméricos

trasciende la simple impermeabilización para constituir un sistema de aislamiento hidráulico y geoquímico, diseñado para confinar de manera segura elementos tanto en fase líquida como sólida. Esta capacidad de contención previene la percolación no controlada de sustancias, un factor que define la viabilidad y seguridad de innumerables proyectos. La implementación de esta tecnología es, por tanto, crucial en contextos donde la integridad del subsuelo no puede verse comprometida. Su campo de aplicación se ha expandido para abarcar un espectro diverso y crítico de sectores, pudiendo categorizarse en función de su objetivo primario:

- **Protección Ambiental y Gestión de Residuos:** Quizás su uso más reconocido se encuentra en la construcción de rellenos sanitarios, donde actúan como barrera primaria y secundaria para contener lixiviados. De igual manera, son indispensables en la impermeabilización de depósitos de lodos industriales, lagunas de oxidación y otras instalaciones destinadas al tratamiento o disposición final de efluentes que, de otro modo, representarían un riesgo ecológico significativo.
- **Optimización de Recursos y Actividades Productivas:** En el ámbito de la ingeniería hidráulica, las geomembranas garantizan la estanqueidad de embalses, reservorios y canales de conducción, minimizando pérdidas y maximizando la eficiencia hídrica. Asimismo, en el sector de la acuicultura, permiten la creación de estanques para piscicultura con un control preciso sobre el volumen y la calidad del agua. La industria minera, por su parte, depende de estos sistemas para el revestimiento seguro de pozas de lixiviación, plataformas de apilamiento y otras infraestructuras de proceso que manejan soluciones químicas agresivas.
- **Infraestructura y Contención Secundaria:** Su aplicación se extiende al recubrimiento de tanques y depósitos de almacenamiento como medida de protección, asegurando una contención secundaria robusta en caso de fallos en el contenedor primario.

Dada la criticidad de estas funciones, donde un fallo en el sistema de barrera puede desencadenar consecuencias medioambientales, económicas y de seguridad de gran magnitud, la transición de un rollo de material inerte a un sistema de contención funcional y hermético depende, de manera ineludible, de la pericia y el rigor técnico del personal instalador. La elección del polímero adecuado, la preparación del sustrato y, sobre todo, la ejecución de las soldaduras y anclajes, son etapas que no admiten improvisación. Por consiguiente, la intervención de equipos especialistas con certificación y experiencia probada no constituye una mera recomendación, sino un prerrequisito ineludible para garantizar la integridad estructural y la eficacia a largo plazo del sistema de impermeabilización.

CAPÍTULO IV

IMPORTANCIA DE LA ELABORACIÓN DE COMPOST PARA EL AMBIENTE

4.1. Objetivos

4.1.1. Objetivo general

El propósito central de esta investigación es elucidar y cuantificar la influencia que ejercen tanto la implementación de una barrera geosintética (geomembrana) como el diseño específico de los módulos de compostaje sobre la cinética del proceso y las características finales del producto obtenido. Se busca evaluar de manera sistemática la eficacia de este sistema de ingeniería controlada en la biotransformación de residuos urbanos domésticos degradables, estableciendo una correlación directa entre las variables de diseño y los resultados de la estabilización orgánica.

4.1.2. Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general, se ha desglosado la investigación en las siguientes metas operativas:

- **Caracterizar exhaustivamente el perfil fisicoquímico y biológico del compost** generado bajo un sistema de impermeabilización con geomembrana, diferenciando los resultados a partir de sustratos de residuos domésticos con y sin tratamiento térmico previo (cocidos y no cocidos).
- **Ejecutar un análisis comparativo de las propiedades de la enmienda orgánica** producida en tres comunidades distintas, todas ellas operando con una técnica y diseño modular idénticos, pero situadas a diferentes altitudes sobre el nivel del mar, con el fin de aislar el efecto de esta variable geográfica.
- **Establecer el diferencial de enriquecimiento nutricional** del compost final, cuantificando las discrepancias en los niveles de Nitrógeno, Fósforo y Potasio (NPK) entre el producto obtenido en cada comunidad y los perfiles de los suelos naturales autóctonos, para así validar su potencial como mejorador de suelos.

4.2. Variables

4.2.1. Variable dependiente

El foco de observación y medición en este estudio recae sobre las propiedades del compost resultante, entendido como el producto final de los cambios inducidos por las variables independientes. Esta variable dependiente es de naturaleza multifactorial y se cuantifica a través de un conjunto de parámetros críticos, que incluyen: la calidad agronómica del humus (determinada por su composición fisicoquímica), el tiempo de maduración requerido para alcanzar la estabilidad, el perfil nutricional (con-

centraciones de N, P, K), el pH, la conductividad eléctrica y la estructura física final de la enmienda orgánica.

4.2.2. Variable independiente

El andamiaje experimental se articula en torno a la manipulación y control de un conjunto de factores causales. La variable independiente primaria es la **intervención tecnológica**, definida por la presencia de un sistema de impermeabilización con geomembrana y un diseño modular específico. De manera secundaria, la **altitud geográfica** (expresada en m.s.n.m.) de cada comunidad opera como una segunda variable independiente clave, cuyo impacto sobre la cinética del proceso y las características del producto final es un condicionante determinante que este estudio busca aislar y analizar.

4.3. Hipótesis

4.3.1. Hipótesis principal

La hipótesis central de esta investigación postula que la interacción entre la altitud geográfica y la implementación de un sistema de compostaje tecnificado —caracterizado por módulos de diseño estandarizado e impermeabilizados con geomembrana— genera diferencias estadísticamente significativas tanto en las características cualitativas del compost como en la eficiencia temporal del proceso. Se anticipa que las condiciones controladas del sistema modular modularán los efectos de la altitud, resultando en perfiles de producto y cinéticas de descomposición discernibles entre las comunidades estudiadas.

4.3.2 Hipótesis secundarias

Para dar soporte a la conjetura principal, se formulan las siguientes hipótesis subordinadas:

- Se presume que el estado de pre-tratamiento de los residuos sólidos domésticos (cocidos versus no cocidos) incide de manera significativa en la cinética de obtención del compost dentro del proyecto Canteras de Hallazgo, manifestándose en una variación medible del tiempo requerido para alcanzar la fase de maduración.
- Se conjetura que la enmienda orgánica producida mediante el protocolo experimental presentará una calidad agronómica superior a la de los suelos nativos de las zonas en estudio, validando su idoneidad para ser utilizada en los programas de forestación implementados en dichas comunidades..

4.4. Tipo y diseño de investigación

Esta indagación se clasifica como una **investigación de naturaleza aplicada**, en tanto que su orientación fundamental es generar una tecnología y un protocolo metodológico que ofrezcan una solución tangible y científicamente fundamentada al problema de la valorización de residuos sólidos orgánicos, específicamente en el contexto de un proyecto minero en fase de exploración.

El andamiaje del estudio se erige sobre un **diseño experimental de carácter comparativo**. Dicho diseño permitirá determinar y contrastar sistemáticamente las semejanzas y diferencias en las características físico-químicas del compost y, de manera crucial, en la reducción del tiempo necesario para su obtención. Se evaluará la función catalizadora que cumple la geomembrana al crear un entorno de proceso controlado, aislando la biomasa de los residuos generados por el proyecto de exploración y optimizando su transformación biológica.

4.5. Población, muestra y muestreo

El universo de estudio se enmarca geográficamente en la Región de Moquegua, Provincia de Sánchez Cerro, Distrito de Ichuña, focalizándose en las comunidades de Corire, Chucapaca y Agani.

La población objeto de análisis estuvo constituida por la totalidad del flujo de residuos sólidos orgánicos (RSO) generados por las operaciones del proyecto de exploración minera en el área de influencia de las mencionadas comunidades. La muestra de trabajo, por su parte, se conformó a partir de subconjuntos de estos RSO, extraídos de las distintas comunidades para alimentar los módulos de compostaje.

Se implementó una estrategia de muestreo de tipo probabilístico, garantizando que cada fracción de residuo orgánico generado tuviese una oportunidad equipotencial de ser seleccionada como integrante de la muestra. Este enfoque asegura la representatividad del material de partida. La recolección se efectuó en múltiples puntos de alimentación de las composteras, permitiendo la conformación de muestras compuestas que reflejan de manera fidedigna la variabilidad del sustrato inicial. Finalmente, las muestras del producto de compostaje generado en las tres comunidades fueron debidamente codificadas y remitidas para su análisis fisicoquímico al laboratorio especializado de Corplab.

4.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La arquitectura metodológica de este estudio se fundamentó en la recolección de datos primarios y secundarios, para lo cual se empleó una triangulación de técnicas e instrumentos que permitieron construir un robusto marco teórico y empírico.

4.7. Observación

Se empleó la observación sistemática como técnica principal para la recolección de datos in situ a lo largo de todo el ciclo de compostaje. Este método permitió registrar de manera continua y detallada la evolución del proceso, capturando datos cuantitativos y cualitativos sobre la calidad aparente del compost (color, textura, olor) y las condiciones operativas de los módulos.

4.8. Instrumento: Fichas de observación

Para sistematizar el registro de información y asegurar la comparabilidad de los datos entre las diferentes unidades de observación, se diseñaron y utilizaron fichas de observación. Estas matrices de registro estructuradas se dividieron en dos categorías funcionales: fichas de localización (para el registro bibliográfico y de fuentes secundarias) y fichas de documentación e investigación (para la transcripción de datos textuales, resúmenes analíticos y comentarios críticos), garantizando una captura de información homogénea y rigurosa.

4.9. Instrumento: Libreta de campo

Como complemento a los instrumentos estructurados, se utilizó la libreta de campo para el registro de anotaciones no estructuradas. Este instrumento fue fundamental para documentar la respuesta fenomenológica del compost a las intervenciones (ej. volteos), así como para registrar reflexiones del equipo investigador y cualquier evento o variable no contemplada inicialmente que pudiera tener incidencia en el proceso.

4.10. Validación y confiabilidad del instrumento

La robustez de los hallazgos de esta investigación se sustenta en un protocolo diseñado para asegurar la validez y confiabilidad de los datos. La confiabilidad instrumental se alcanzó mediante la aplicación consis-

tente y disciplinada de las técnicas de observación y registro a lo largo de todo el ciclo experimental. La validación del proceso se fundamentó en el monitoreo constante y riguroso de cada etapa del proyecto de compostaje, desde la selección del sustrato hasta la obtención del producto final. Se siguieron pautas metodológicas preestablecidas para la producción de un compost de alta calidad, eligiendo las comunidades de Corire, Chucapaca y Agani como escenarios para el desarrollo controlado del proyecto. La combinación de la observación sistemática, el seguimiento detallado de los parámetros de proceso y la aplicación de técnicas beneficiosas demostradas en la literatura permitió generar un cuerpo de datos fiable y pertinente para la consecución de los objetivos planteados.

4.11. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

El andamiaje metodológico para el procesamiento y análisis de datos se fundamentó en un protocolo operativo riguroso, diseñado para asegurar la validez de los resultados y la replicabilidad del proceso. La estrategia central consistió en crear un entorno de compostaje controlado que permitiera modular las variables clave y optimizar la biotransformación de la materia orgánica. Para ello, se emplearon unidades de compostaje o módulos-biorreactores, cuya función principal fue garantizar la homogeneidad de la masa en tratamiento.

Un componente crítico del diseño fue la implementación de una cubierta protectora, la cual cumplía una doble función de mitigación de variables exógenas. Por un lado, se neutralizó el efecto de la radiación solar directa, cuya incidencia inhibe la actividad microbiana termofílica y puede comprometer la viabilidad de las poblaciones descomponedoras que convierten los sustratos orgánicos en compuestos minerales asimilables. Por otro lado, la cubierta previno la infiltración de precipitaciones pluviales, evitando así la saturación hídrica de la biomasa, una condición que desplaza el oxígeno, induce la anaerobiosis y disminuye drásticamente la cinética de la descomposición.

Este control técnico sobre los factores abióticos fue esencial para mejorar tanto las condiciones del proceso de elaboración como la calidad intrínseca del compost final. El diseño de los módulos se adaptó a los requerimientos climáticos específicos de las comunidades experimentales, con el objetivo de acelerar el ciclo de producción. El diseño experimental contempló un sistema modular que consistía en cuatro pozas por unidad, operando en un ciclo secuencial donde cada etapa de reposo se extendió por 15 días. Se implementó un régimen de volteos periódicos, utilizando herramientas de trabajo manuales, el cual se mantuvo hasta que los perfiles de temperatura dentro de las pozas se estabilizaron, indicando la transición de la fase termofílica a la etapa de maduración mesofílica.

Una vez alcanzada la estabilidad, la enmienda orgánica resultante fue sometida a un proceso de clasificación granulométrica mediante tamizado con una malla de 1/4 de pulgada. Esta etapa permitió obtener fracciones de compost con diferentes tamaños de partícula para su posterior análisis. El material retenido en el tamiz, correspondiente a fracciones orgánicas no desintegradas en su totalidad, no fue descartado; por el contrario, se reincorporó al ciclo como inóculo microbiológico para lotes subsiguientes, aprovechando su carga microbiana ya adaptada.

La secuencia operativa completa, desde la recepción de la materia prima hasta la obtención del producto final, se adhirió al flujograma esquematizado en la Figura 3. Tras la conclusión del proceso de compostaje, el material fue sometido a una batería de análisis de laboratorio que permitieron validar su calidad y confirmar su idoneidad para cumplir con el propósito agronómico para el cual fue diseñado el proyecto.

4.12. Análisis descriptivo

El marco interpretativo de esta investigación se sitúa en la confluencia de dos vectores definitorios de la realidad peruana: su profundo legado en la actividad minera y el imperativo contemporáneo de una gestión ambientalmente rigurosa. El extraordinario potencial geológico del país,

que lo consagra como un actor protagónico en la producción global de una diversidad de metales —incluyendo oro, plata y cobre, entre otros—, se fundamenta en una excepcional dotación de recursos naturales. La materialización de dicho potencial, no obstante, depende de la existencia de un ecosistema de políticas públicas y condiciones económicas estables. Paralelamente, la arquitectura jurídica nacional ha evolucionado para incorporar instrumentos de protección y remediación, como los planes de cierre de minas. Estos mecanismos persiguen el principio de la restauración ecológica, cuyo fin es restituir las áreas intervenidas a una condición funcional equivalente o superior a la preexistente. Dicha meta se alcanza a través de programas de reforestación y revegetación, concebidos para reintegrar el paisaje y neutralizar potenciales impactos socioambientales.

Es precisamente en este contexto que la empresa Canteras del Hallazgo SAC, una operación conjunta de Cía. de Minas Buenaventura y Minera Gold Fields, diseñó y ejecutó un plan de manejo de forestación en su etapa exploratoria. En concordancia con su política de responsabilidad social y ambiental, surgió la necesidad estratégica de impulsar un proyecto piloto para la elaboración de una enmienda orgánica de alta calidad, cuyo proceso no repercutiera en costos para las comunidades aledañas. La iniciativa se articuló mediante la capacitación técnica de los comuneros y la valorización de los residuos orgánicos autogenerados, dando origen a un proceso de compostaje innovador, diseñado para optimizar la cinética de descomposición y prescindir del uso de cal como agente alcalinizante.

El sistema de tratamiento implementado se fundamentó en los principios de la física, la biología y la bioquímica, configurando una intervención de biotecnología aplicada. El proceso fue dirigido bajo un régimen aeróbico de descomposición y estabilización biológica, operando en condiciones controladas que permitieron el desarrollo sostenido de temperaturas termofílicas, alcanzando picos de hasta 60°C. Esta fase de higienización, producto de la intensa actividad metabólica, garantizó la obtención de un producto final estable, inocuo y rico en compuestos húmicos, apto para su utilización en suelos sin riesgos significativos.

El análisis inferencial de los datos se realizó mediante la prueba T de Student para muestras independientes, la cual se aplicó para contrastar los promedios y desviaciones estándar de los parámetros clave entre las tres comunidades. Resulta notable que el análisis de los perfiles térmicos reveló la ausencia de diferencias estadísticamente significativas en los valores registrados en las tres ubicaciones. Las mediciones mostraron que las temperaturas máximas se alcanzaron entre los días 39 y 40 del proceso, con picos de 59.1°C, 60.5°C y 58.9°C. Este hallazgo subraya la eficacia del diseño modular y la impermeabilización con geomembrana para crear un microclima de proceso homogéneo, capaz de mitigar el efecto de la variable altitudinal. La evolución térmica siguió la curva clásica, con un ascenso hasta un máximo de 60.5°C, seguido de un descenso gradual hasta estabilizarse en el rango de la temperatura ambiental del clima frígido local (13 a 15°C) al momento de la cosecha. Esta dinámica fue posible gracias a la protección del sistema, que facilitó la sucesión de consorcios microbianos (criófilos, mesófilos, termófilos), y la fase de altas temperaturas funcionó como un eficaz mecanismo de higienización.

De manera concurrente, el pH fue un parámetro monitoreado de forma continua. A diferencia de otros estudios que emplean enmiendas de cal, en esta investigación el pH exhibió una notable estabilidad, promediando un valor general de 7.6. Esta tendencia se confirma al examinar los datos específicos para cada comunidad, tal como se detalla en la **Tabla 4**.

Tabla 4 El pH por muestra de compost

Muestra	pH
Proceso de compost promedio - Corire	7.6
Proceso de compost promedio – Chucapaca	7.7
Proceso de compost promedio - Agani	7.7

La observación de la evolución del pH desde el día 1 hasta el día 75 demostró una variación mínima en las tres comunidades, manteniéndose en un rango cercano a la neutralidad, condición considerada óptima para la calidad agronómica del compost.

La viabilidad de cualquier iniciativa de restauración ecológica en las zonas de estudio está condicionada por la calidad del sustrato. La combinación de un clima frígido y suelos nativos con baja fertilidad natural impone una severa limitación para el establecimiento de vegetación. Para cuantificar este punto de partida, se analizaron las propiedades de los suelos de las tres comunidades. La caracterización de estas condiciones de base, en términos de su conductividad eléctrica, pH y contenido de humedad, se presenta en las **Figuras 4, 5 y 6**.

Figura 4 Conductividad

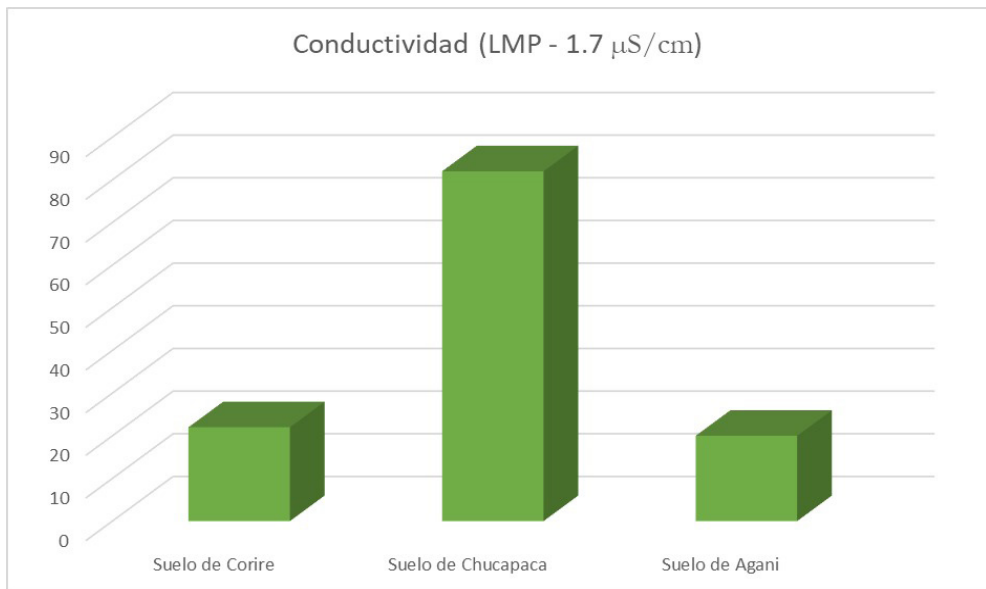


Figura 5 pH

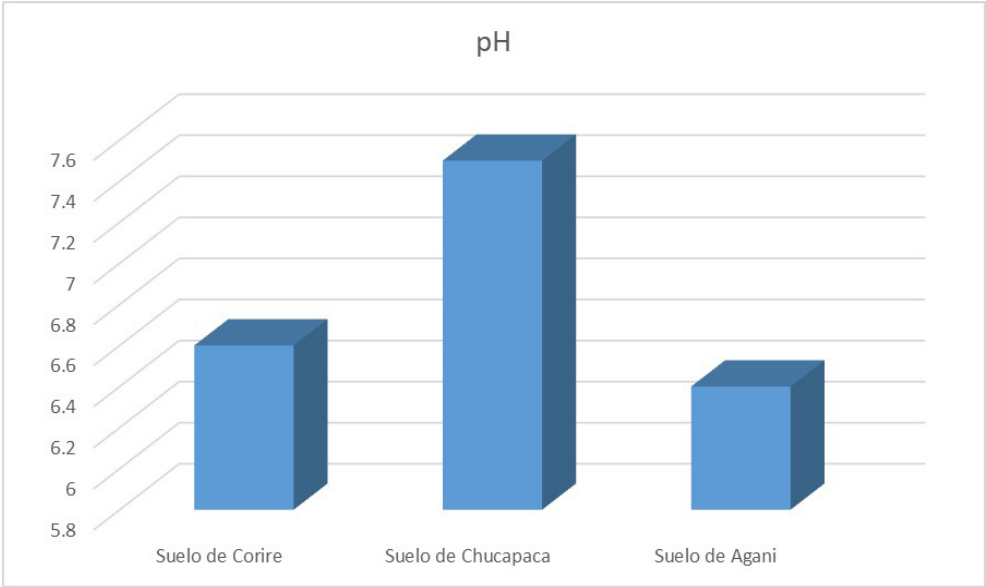
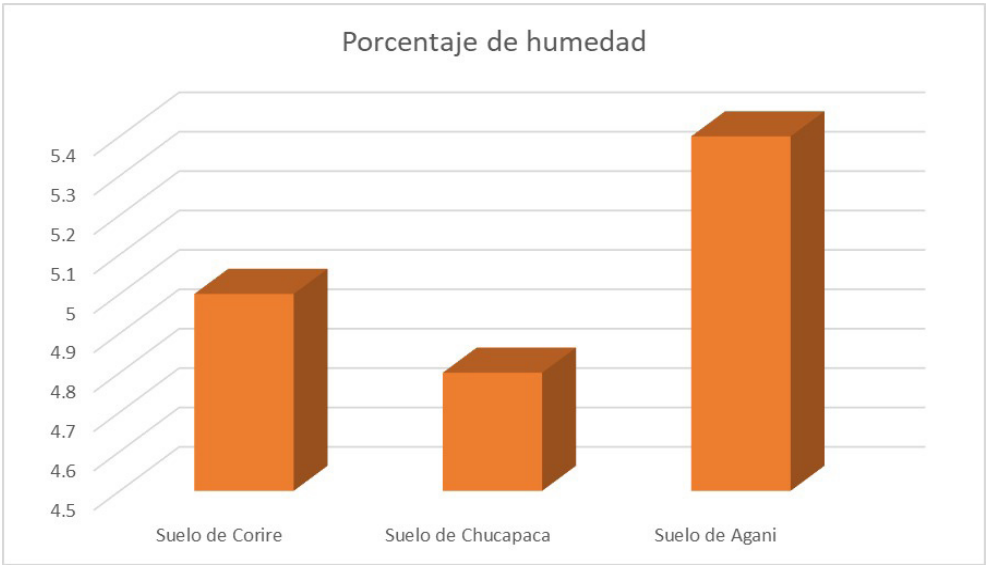


Figura 6 Porcentaje de humedad



Frente a este escenario de base, el producto final del proceso de compostaje demostró una mejora sustancial en todos los parámetros evaluados. El análisis del compost acabado revela un perfil fisicoquímico enriquecido, evidenciando el éxito de la biotransformación. Los resultados finales de conductividad, pH y porcentaje de humedad del compost se detallan en las **Figuras 7, 8 y 9**.

Figura 7 Conductividad

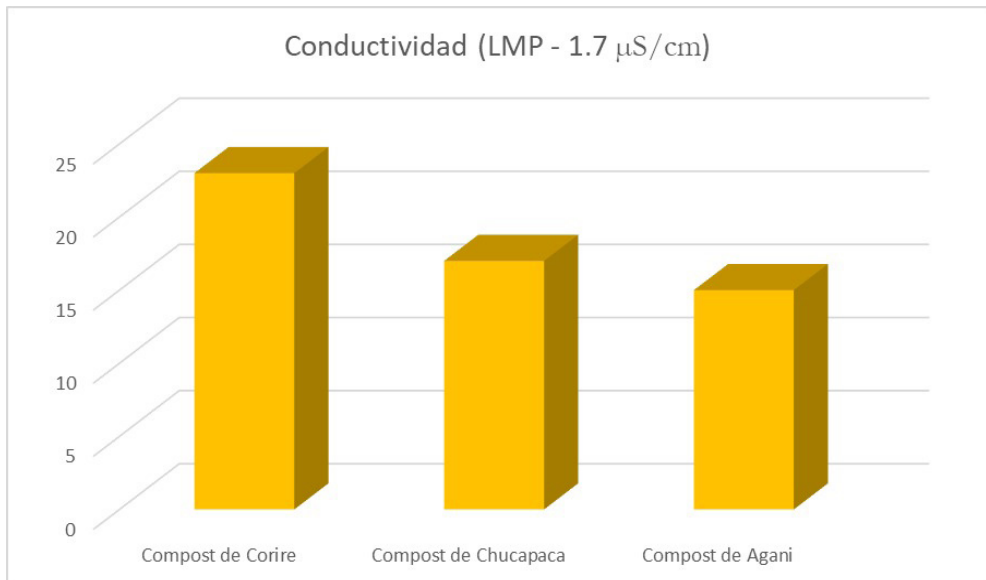


Figura 8 pH

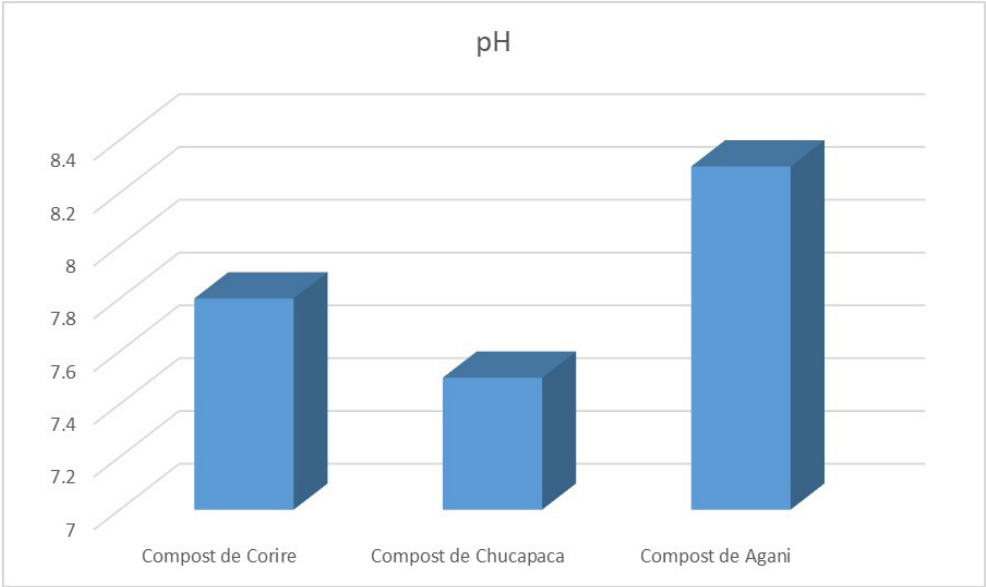
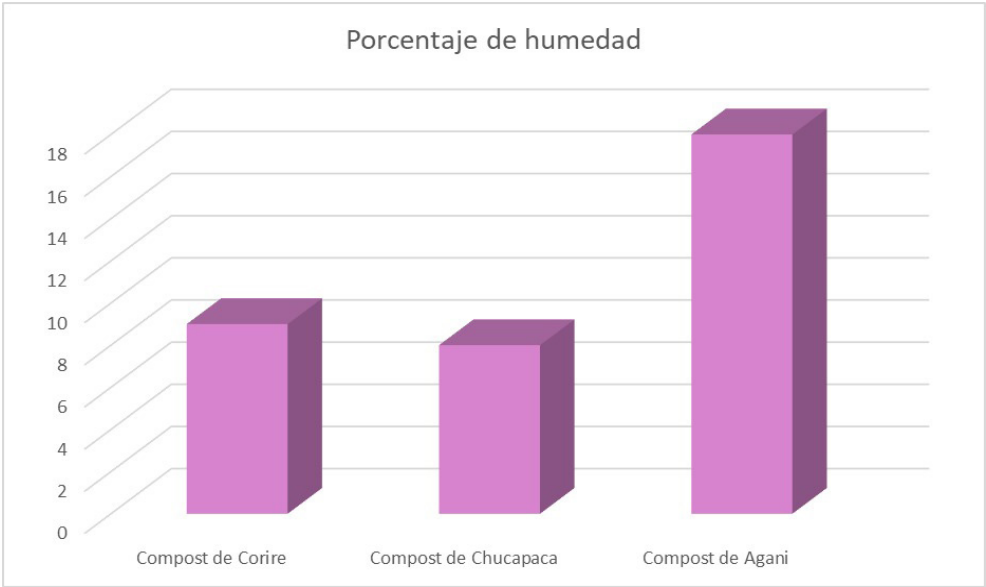


Figura 9 Porcentaje de humedad



El contraste entre ambas series de figuras demuestra de manera inequívoca que la calidad del compost producido en los módulos experimentales se encuentra dentro de un rango agronómicamente favorable y es significativamente superior a la de los suelos autóctonos. Este resultado valida su aplicabilidad inmediata en actividades de cultivo o en proyectos de revegetación en el ámbito minero. Se ha demostrado empíricamente que, mediante la aplicación de una técnica correcta y un cuidado riguroso en cada fase del proceso, es factible obtener una enmienda orgánica de alta calidad en un marco temporal reducido, superando las limitaciones impuestas por la altitud. La valorización de un residuo orgánico, a menudo gestionado como un pasivo ambiental, se ha transformado así en un activo estratégico para el proyecto.

4.12.1. Características de los resultados

La evaluación del compost resultante se abordó desde una perspectiva dual: el análisis del balance de masa y el control de las emisiones odoríferas. En el balance de materia, la distinción entre **residuos sólidos fijos** —representativos de la fracción inerte o inorgánica— y **sólidos volátiles** —indicativos de la materia orgánica carbonácea— es fundamental para cuantificar la eficiencia de la biotransformación.

Desde el punto de vista del rendimiento, el proceso demostró una notable eficacia. Partiendo de una masa inicial de 315 kg de residuos orgánicos, a los que se incorporó una enmienda de estiércol de alpaca, se obtuvo un rendimiento de compostaje del **45.8%**. Esto se traduce en una producción de **144 kg de abono orgánico estabilizado en un ciclo de tan solo 75 días**. El balance de masa, que se inició con el acopio de 315 kg de residuos y 15 kg de estiércol, confirma la rentabilidad del método, ya que no solo se gestiona un residuo, sino que se le confiere un valor agregado tangible, transformándolo de un pasivo ambiental a un activo agronómico.

Un segundo pilar del análisis fue la **gestión de olores**, un indicador crítico de la correcta operatividad del proceso de compostaje. La génesis de compuestos odoríferos se atribuye a la volatilización de moléculas orgánicas de bajo peso molecular, como los metil sulfuros. La mitigación de estas emisiones depende directamente de mantener condiciones aeróbicas estrictas. Cuando el proceso deriva hacia la anaerobiosis por falta de oxígeno, la fermentación se intensifica, generando no solo emanaciones malolientes, sino también gases potencialmente peligrosos y un producto final que carece de la estabilidad requerida. La putrefacción anaeróbica, además de ser más lenta, resulta en un humus de calidad inferior.

Para contrarrestar esta deriva, se implementó un sistema de control que garantizaba una circulación adecuada de aire y un nivel de humedad óptimo. El monitoreo detallado de los módulos, junto con un régimen de volteos frecuentes y programados, fue crucial para mantener la aerobiosis. Esta estrategia resultó tan efectiva que las emanaciones odoríferas, inicialmente presentes, disminuyeron progresivamente hasta volverse imperceptibles en la fase final del proceso, demostrando el éxito del control operativo.

4.12.2. Composición fisicoquímica del producto

La estructura fisicoquímica de los sustratos de partida influye de manera determinante en la asimilación de minerales por parte de los consorcios microbianos y, por ende, en la composición del producto final. En este estudio, se ejerció un control riguroso sobre la **humedad** y la **ventilación**, factores que se mantuvieron en un equilibrio que evitó tanto la desecación como la saturación hídrica de la biomasa. Se logró mantener una humedad promedio del 45% durante la fase activa, considerada ideal para la actividad microbiana. No obstante, al finalizar el proceso, los valores de humedad del compost maduro en las tres comunidades fueron:

- **Corire:** 9.4 %
- **Chucapaca:** 8.4 %
- **Agani:** 18.7 %

La eficacia de este método aeróbico controlado permitió optimizar significativamente el tiempo de compostaje, que varió en función de la metodología y el rigor del control en cada locación. Mientras que procesos de compostaje convencionales en condiciones climáticas adversas pueden requerir un mínimo de seis meses, este protocolo demostró ser capaz de entregar un producto de alta calidad en un ciclo mucho más breve.

Desde una perspectiva microbiológica, el compostaje es un proceso dinámico impulsado por una sucesión ecológica de una amplia gama de bacterias y hongos. A lo largo del ciclo, emergen formas microbianas con diferentes tolerancias a la temperatura, adaptándose a las condiciones cambiantes del ambiente. La primera etapa está dominada por **bacterias** y **hongos mesófilos**. A medida que la temperatura asciende y supera los 40°C, la actividad es liderada por **bacterias** y **hongos termófilos**, junto con los primeros **actinomicetos**. Una vez que la temperatura excede los 70°C, la actividad microbiana cesa temporalmente, pero al descender nuevamente, se reactivan las poblaciones mesófilas y se detecta la actividad de organismos de mayor complejidad como **protozoos** y **miriápodos**.

Esta dinámica ecológica tiene una distribución espacial dentro de la pila: las bacterias se encuentran dispersas por toda la masa, mientras que los hongos y actinomicetos tienden a colonizar la zona superficial (entre 5 y 15 cm), confiriéndole un característico aspecto grisáceo.

El producto final del proceso exhibió las propiedades organolépticas de un compost maduro y de alta calidad: un olor terroso y agradable, un color marrón oscuro y una textura suelta y friable. En esta etapa, los materiales de partida ya no son distinguibles, y el compost presenta una humedad

aproximada del 40% y una temperatura estabilizada en torno a los 20°C, indicando su completa estabilización y aptitud para el uso agrícola.

4.13. Discusión de resultados

La discusión de los hallazgos de esta investigación se articula en torno a la validación de la hipótesis principal: que un sistema de compostaje tecnificado puede modular y optimizar la biotransformación de residuos orgánicos, superando las limitaciones impuestas por variables ambientales como la altitud. El análisis de los datos revela un control exitoso sobre los parámetros fisicoquímicos clave, una notable aceleración de la cinética del proceso y la obtención de un producto final con un perfil agronómico de alto valor.

Uno de los logros más significativos del protocolo experimental fue la estabilización del potencial de hidrógeno (pH) en un rango agronómicamente óptimo. A diferencia de los métodos convencionales que recurren a la adición de cal para corregir la acidez inicial, esta investigación se basó exclusivamente en el uso de estiércol de alpaca como enmienda nitrogenada, cuyo pH natural de 7.26 proporcionó un punto de partida cercano a la neutralidad. Esta decisión metodológica fue deliberada para evitar la alcalinidad excesiva que puede inhibir la actividad microbiana y secuestrar ciertos micronutrientes. El control riguroso ejercido por los operadores a lo largo de todo el ciclo aseguró que el pH se mantuviera dentro de un corredor estrecho, culminando en valores finales ligeramente alcalinos para el compost:

- **Compost de Corire:** 7.81
- **Compost de Chucapaca:** 7.49
- **Compost de Agani:** 8.3

Estos valores contrastan con las condiciones de los suelos nativos de las zonas de reforestación, que presentan una ligera acidez, como se determinó en los análisis de base:

- **Suelo de Corire:** 6.6
- **Suelo de Chucapaca:** 7.47
- **Suelo de Agani:** 6.43

La ligera alcalinidad del compost obtenido no representa un problema, sino una ventaja estratégica. La diferencia de pH entre el producto y el suelo nativo permite una dosificación precisa de la enmienda para neutralizar la acidez existente y mejorar la disponibilidad de nutrientes en la rizosfera. La estabilidad del pH no fue un evento puntual, sino una tendencia sostenida, como se evidencia en las curvas de evolución para cada comunidad (Figuras 10, 11 y 12), las cuales exhiben una trayectoria notablemente congruente a pesar de las diferencias de altitud.

Figura 10 pH Evolución del compost - Días

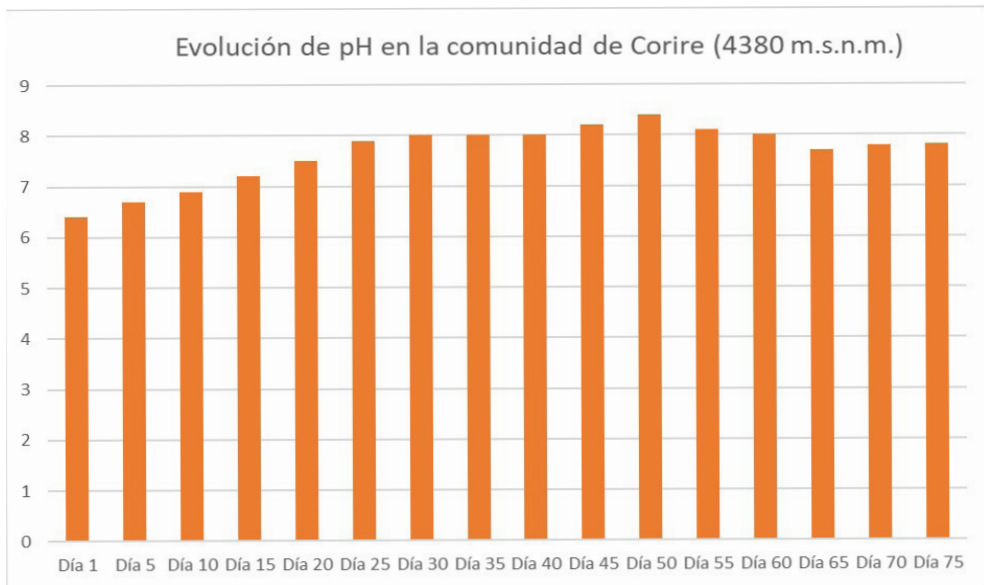


Figura 11 pH Evolución del compost – Días

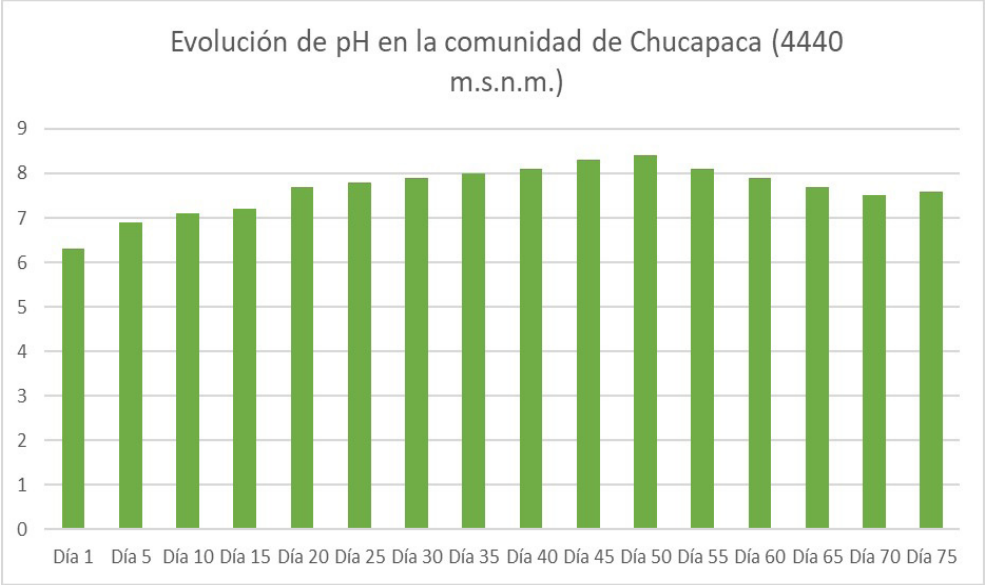
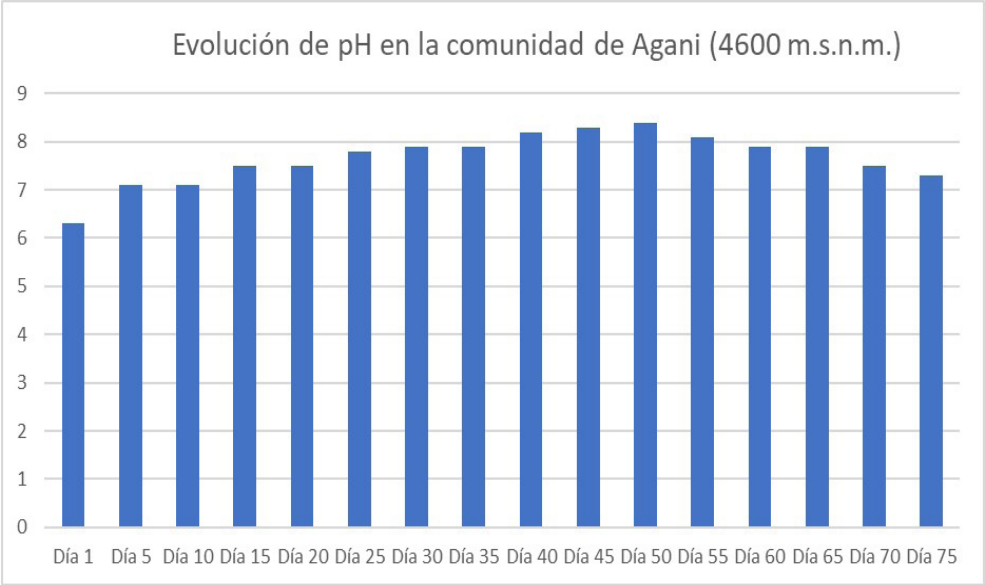
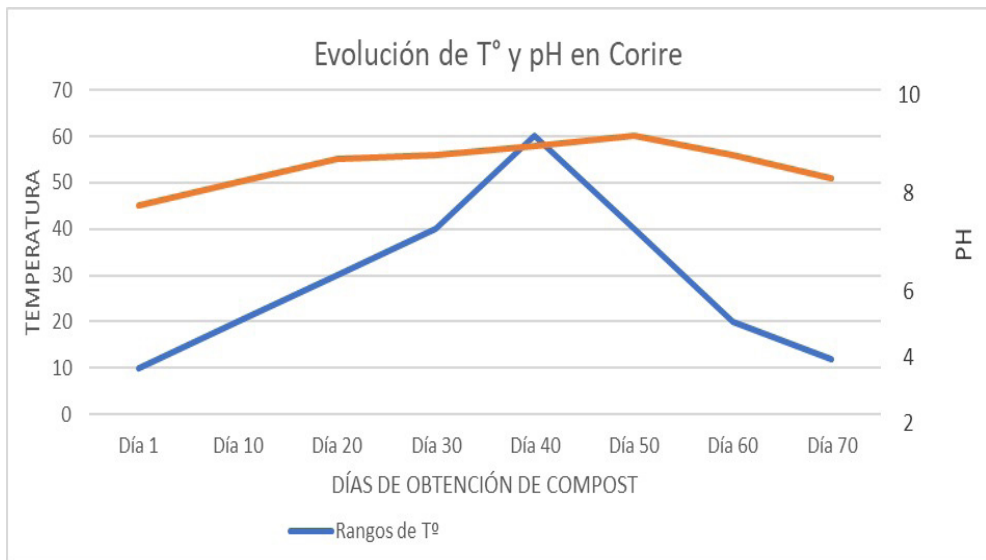


Figura 12 Evolución del compost – Días



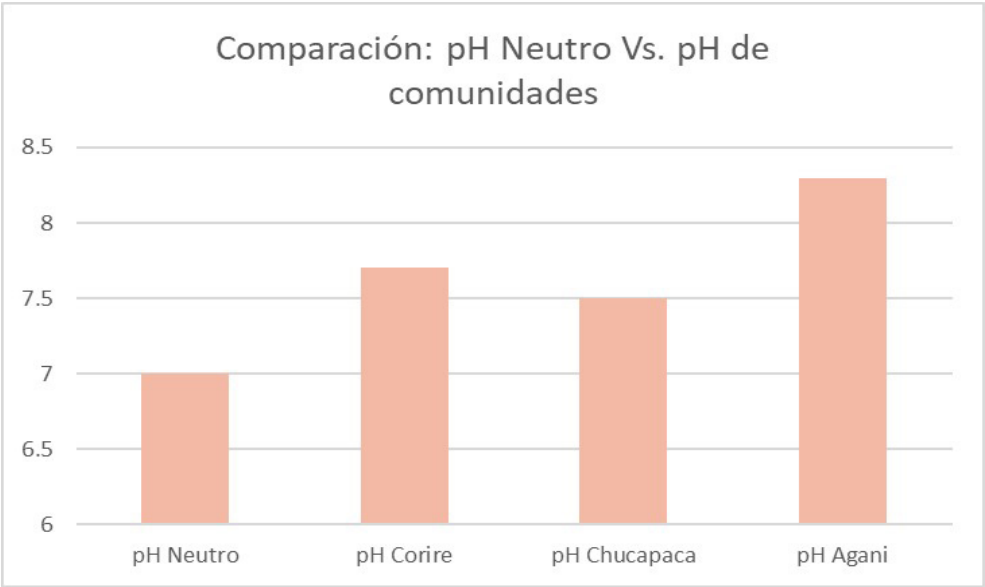
Este hallazgo se ve reforzado al analizar la interacción entre el pH y la temperatura, los dos motores del proceso. Se postuló que no existiría una influencia significativa de la altitud sobre estas variables debido al efecto aislante y homogeneizador de la técnica modular. Los datos confirman esta conjetura. La **Figura 13** ilustra la relación inversa y predecible entre temperatura y pH para el sitio de Corire, un patrón que se replicó en las otras comunidades.

Figura 13 Comparación de temperatura y pH en el tiempo en que se adquirió el compost



La comparación del pH del compost con el pH neutro ideal y el de los suelos nativos, como se esquematiza en la **Figura 14**, refuerza visualmente el potencial del producto como agente mejorador de suelos.

Figura 14 Comparación del pH Neutro y el pH obtenido en las diferentes comunidades



El análisis de la maduración, representado en las **Figuras 15, 16 y 17**, y la evolución de la temperatura, detallada en las **Figuras 18, 19 y 20**, demuestra que el método aplicado indujo una dinámica de proceso casi idéntica en las tres comunidades. La técnica de diseño de los módulos y la impermeabilización con geomembrana crearon un entorno controlado tan eficiente que la influencia de la altitud y las condiciones climáticas externas fue efectivamente neutralizada. La similitud en los perfiles térmicos es una prueba contundente de la robustez del método. En todas las ubicaciones, se observa la misma secuencia de fases del proceso, desde el calentamiento inicial hasta la estabilización final, confirmando que no existe una diferencia significativa entre las variables (temperatura, tiempo) y los resultados obtenidos.

Figura 15 Proceso de maduración del compost de Corire

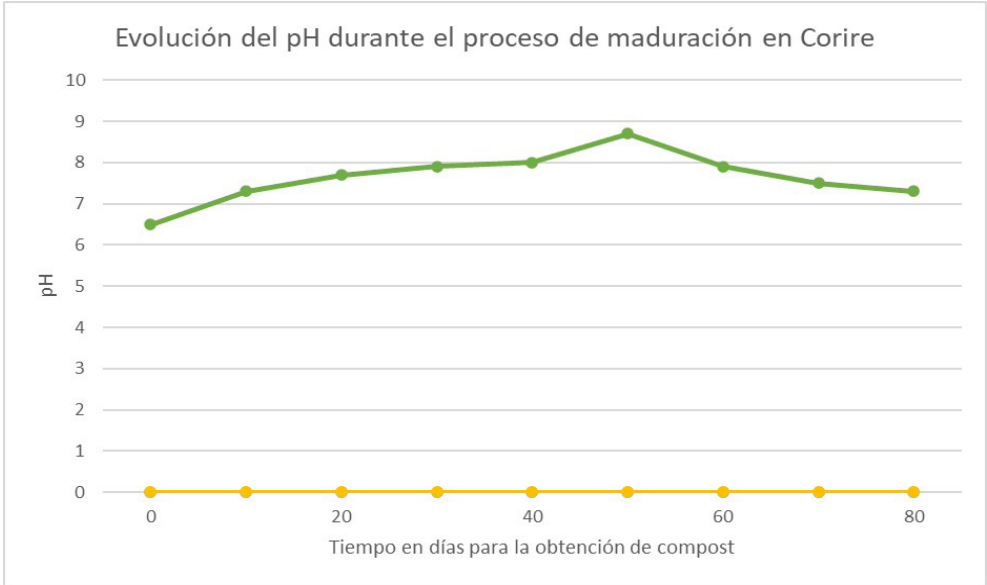


Figura 16 La evolución de pH durante el proceso de maduración

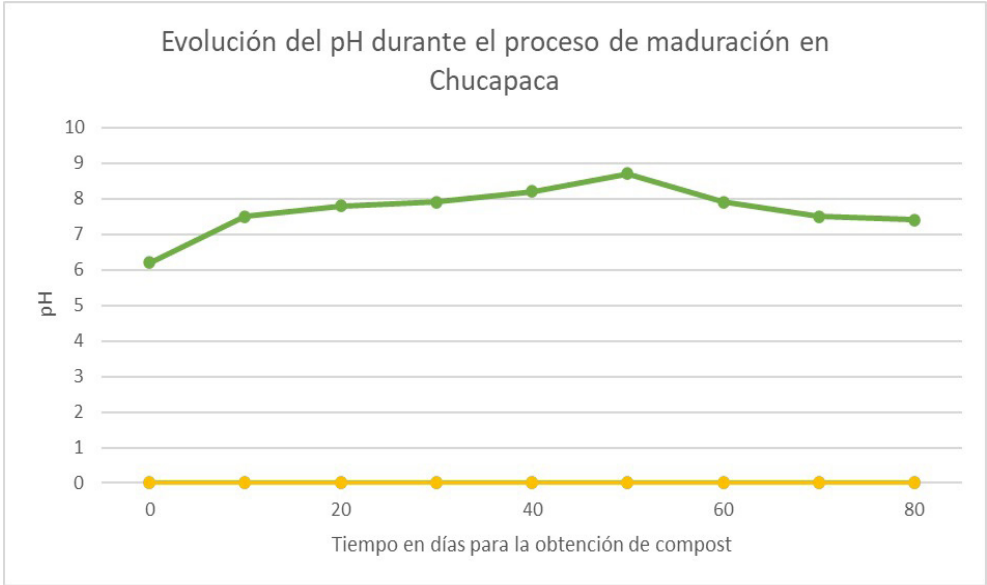


Figura 17 Proceso de maduración de compost en Agani

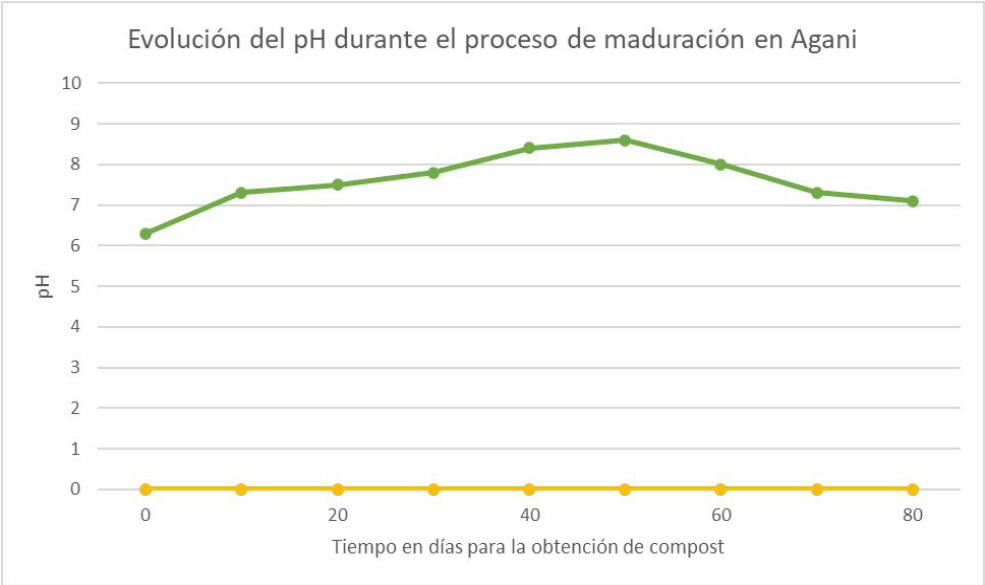


Figura 18 De la evolución de la temperatura en el compostaje – Corire

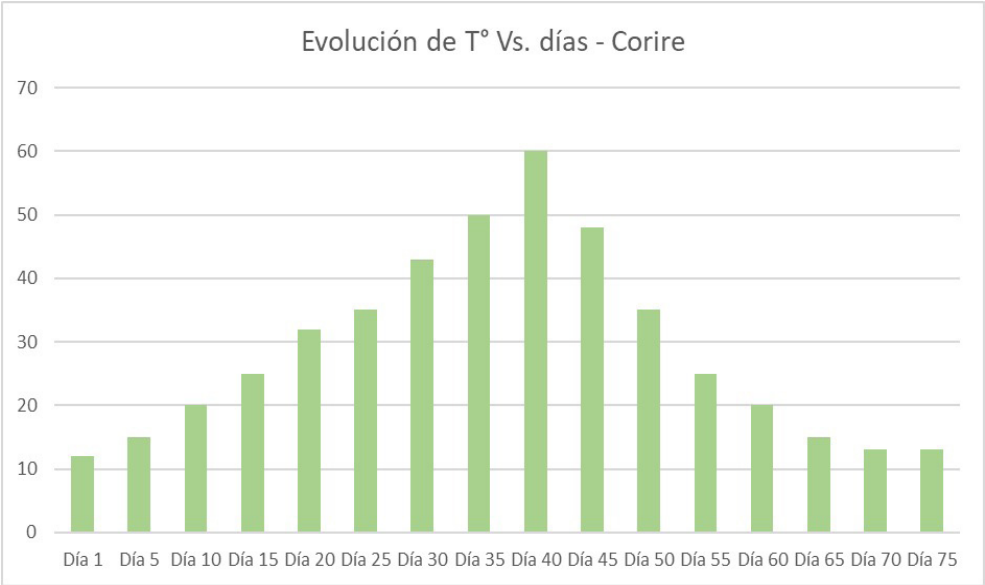


Figura 19 La evolución de la temperatura en el compostaje – Chucapaca

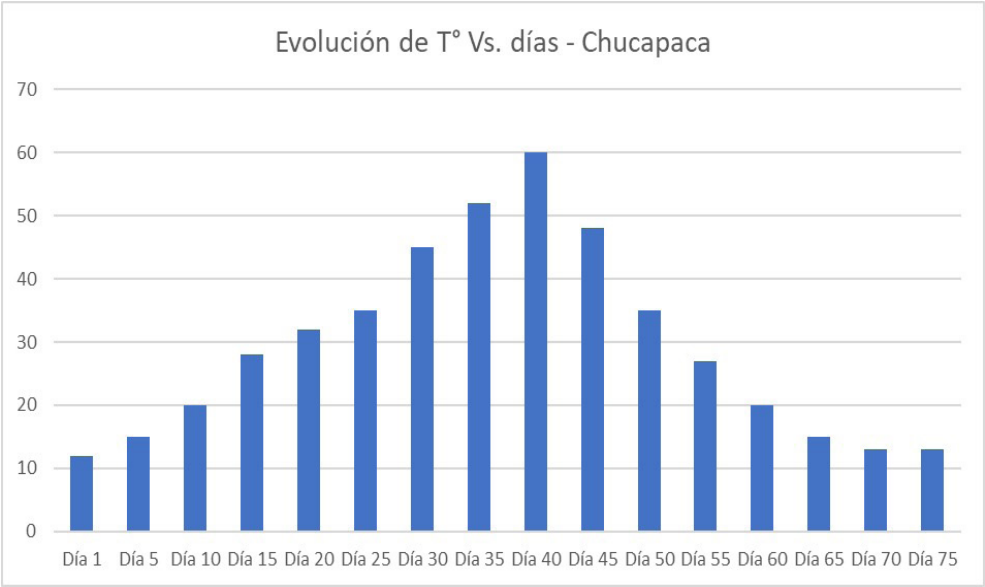
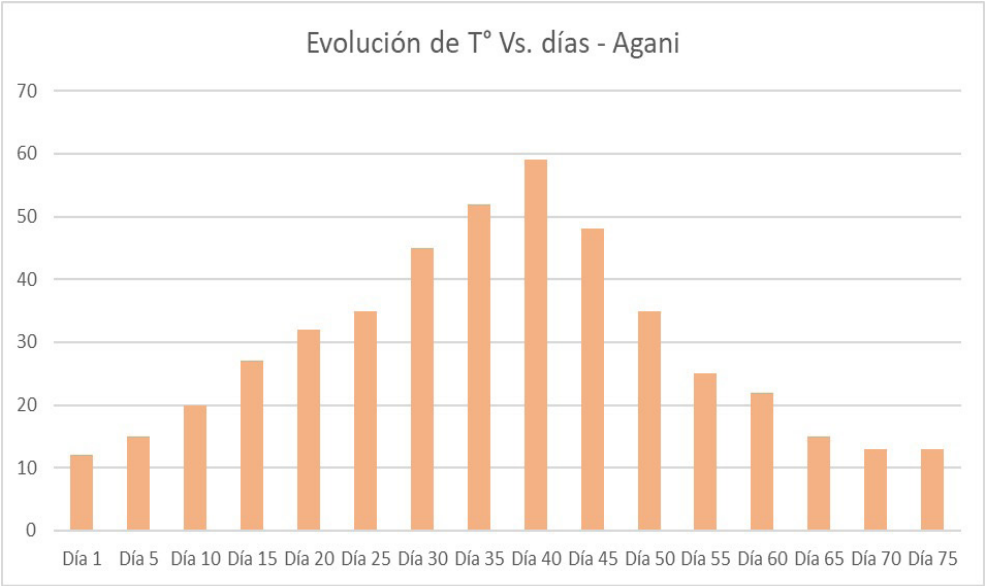


Figura 20 La evolución de la temperatura en el compostaje – Agani



Las curvas de evolución térmica, que alcanzan una fase de meseta a partir del día 75, indican que el compost ha llegado a un estado de estabilidad. Desde una perspectiva agronómica, la calidad de este producto se cuantifica a través de su contenido de macronutrientes. La **Tabla 5** presenta el perfil de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) del compost de cada comunidad.

Tabla 5 El pH por muestra de compost

Elementos / resultados de módulos por comunidad	N	P	K
Corire	2.6	7.5	1.7
Chucapaca	1.8	5.4	1.4
Agani	1.3	8.6	1.9

Fuente: Elaboración propia

Los resultados son notables, especialmente en los niveles de Fósforo y Potasio, elementos cruciales para el desarrollo radicular, la floración y la resistencia de las plantas al estrés abiótico. Estos valores confirman que el producto obtenido no es simplemente materia orgánica estabilizada, sino una enmienda nutricionalmente enriquecida. La evolución del proceso, desde las materias primas hasta el producto final, se puede visualizar claramente a través de las fases de compostaje que se ilustran en las **Figuras 21, 22 y 23**. Estas gráficas muestran la clara delineación de la fase mesofílica, el pico termofílico (esencial para la higienización) y la fase de enfriamiento y maduración, una firma inequívoca de un proceso de compostaje exitoso y eficiente.

Figura 21 Fases del proceso de compostaje en Corire.

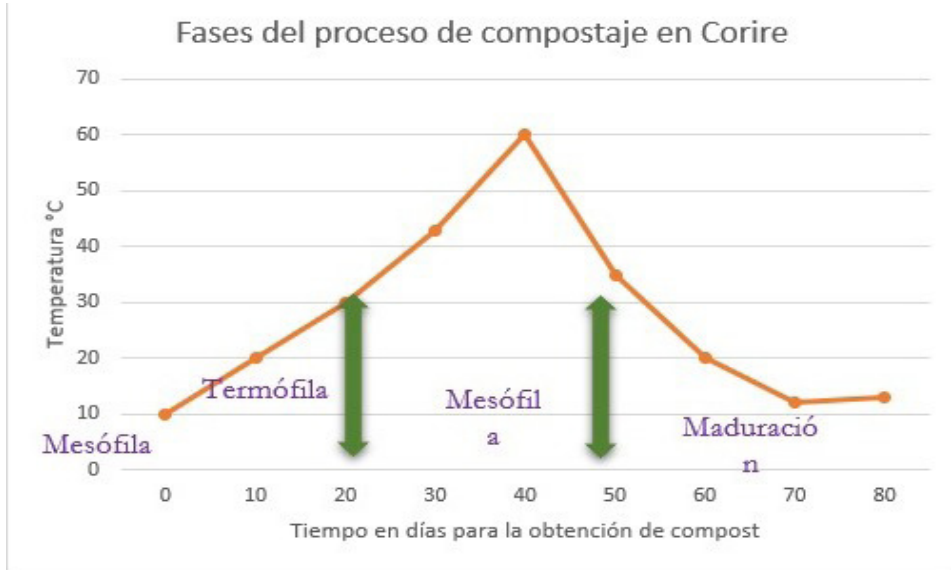


Figura 22 Fases de proceso de compostaje en Chucapaca

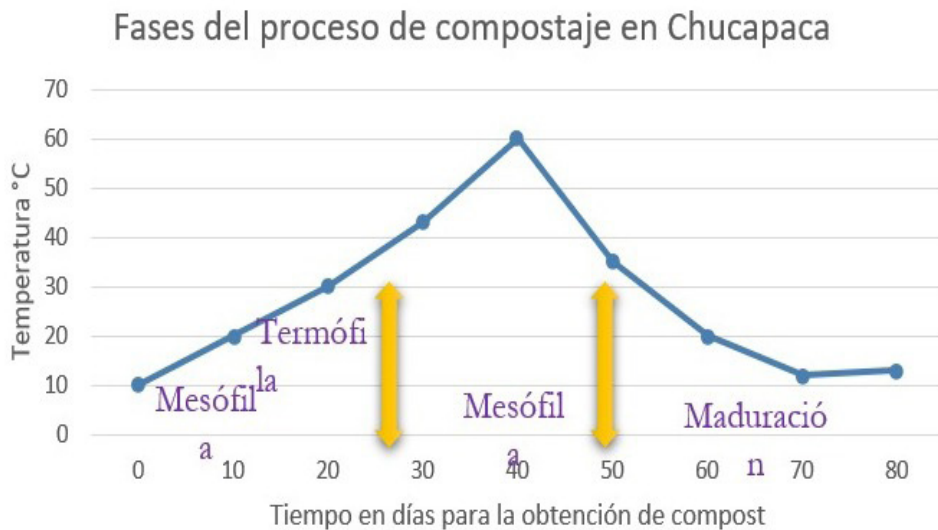
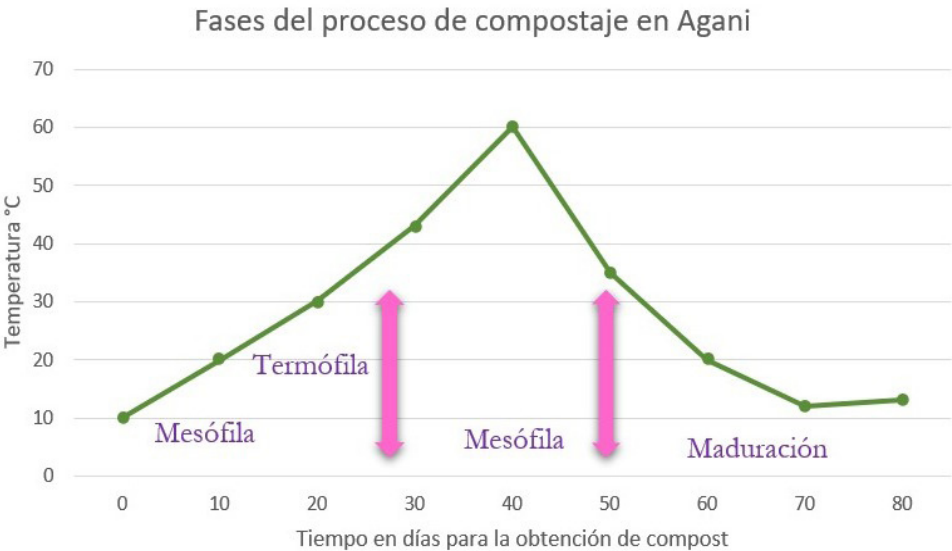
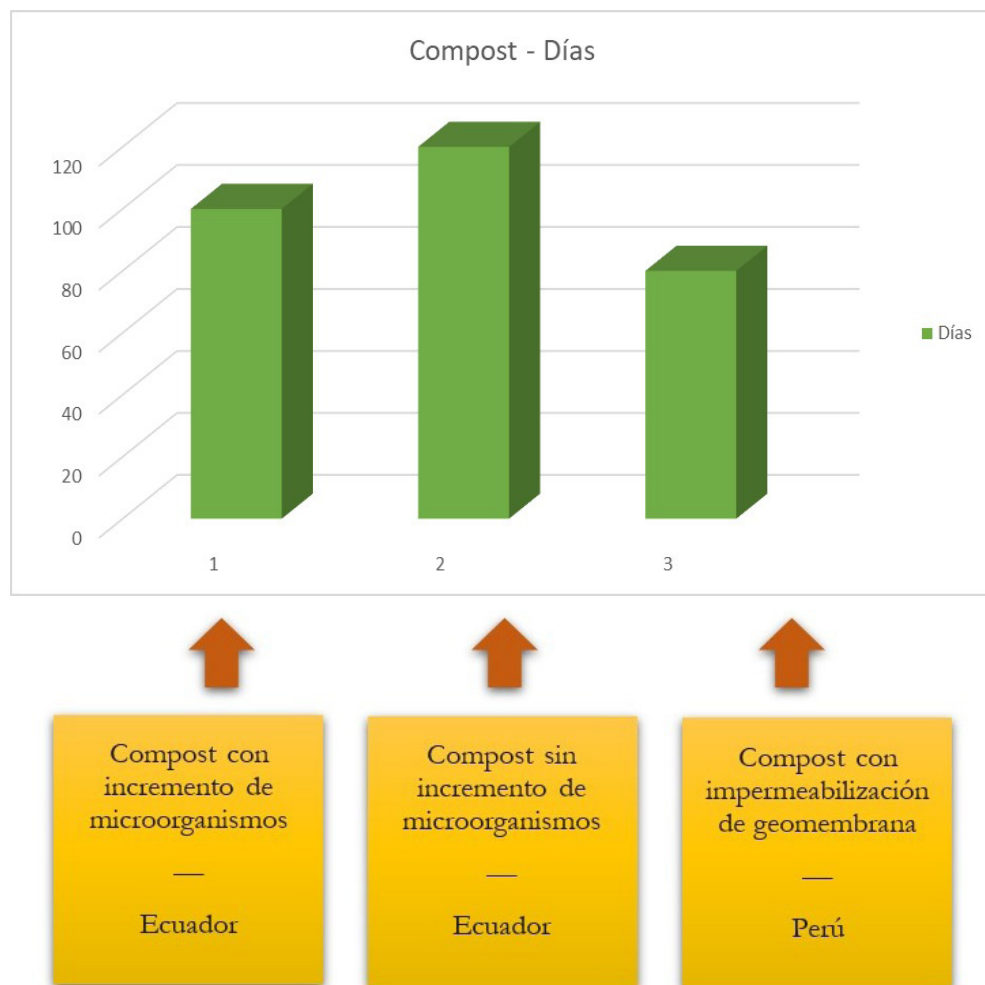


Figura 23 Fases del proceso de compostaje en Agani



Finalmente, para contextualizar la eficiencia cinética del protocolo CDH, se realizó una comparación con un estudio de referencia (tesis de la Universidad Técnica de Ambato, Ecuador) que utilizó microorganismos para acelerar la transformación. Como se puede observar en la **Figura 24**, el método de esta investigación, sin la adición de inóculos externos, logró un compost de alta calidad con un notable perfil de NPK en solo 75 días. Este tiempo es significativamente menor que los 90 días reportados en la tesis de referencia para un proceso con microorganismos acelerantes y drásticamente inferior a los 120 días para un proceso sin ellos. Esta reducción de 2-6 semanas en el ciclo de producción no es trivial; representa una ventaja económica y operativa sustancial, permitiendo un mayor rendimiento y una disponibilidad más rápida del producto final.

Figura 24 Comparación de días de compost - Tesis realizada en Ecuador y Perú.



En conclusión, la discusión de los resultados valida de manera contundente la eficacia del sistema de compostaje diseñado. La integración de módulos con impermeabilización por geomembrana no solo garantiza la obtención de un producto final de alta calidad y agrónomicamente superior a los suelos nativos, sino que también optimiza la cinética del proceso a un nivel que supera a otras metodologías tecnificadas, demostrando ser una solución viable, eficiente y robusta para la valorización de residuos orgánicos en contextos desafiantes.

4.13.1. Características físicas y químicas del compost

La arquitectura fisicoquímica de los materiales de partida es un factor determinante que gobierna la eficiencia de la asimilación mineral por parte de los consorcios microbianos. Dentro de este marco, el control riguroso de la humedad y la ventilación se erige como un pilar metodológico. Durante la fase activa del proceso, se mantuvo un contenido de humedad en torno a un máximo del 45%, un valor que optimiza la actividad metabólica sin llegar a la saturación. Como resultado de este manejo controlado, el producto final exhibió un perfil de humedad que se detalla en la **Tabla 6**.

Tabla 6 Porcentaje de humedad final de compost

Comunidades y/o módulos	Porcentaje de humedad final de compost
Corire	9.4
Chucapaca	8.4
Agani	18.7

Fuente: Elaboración propia

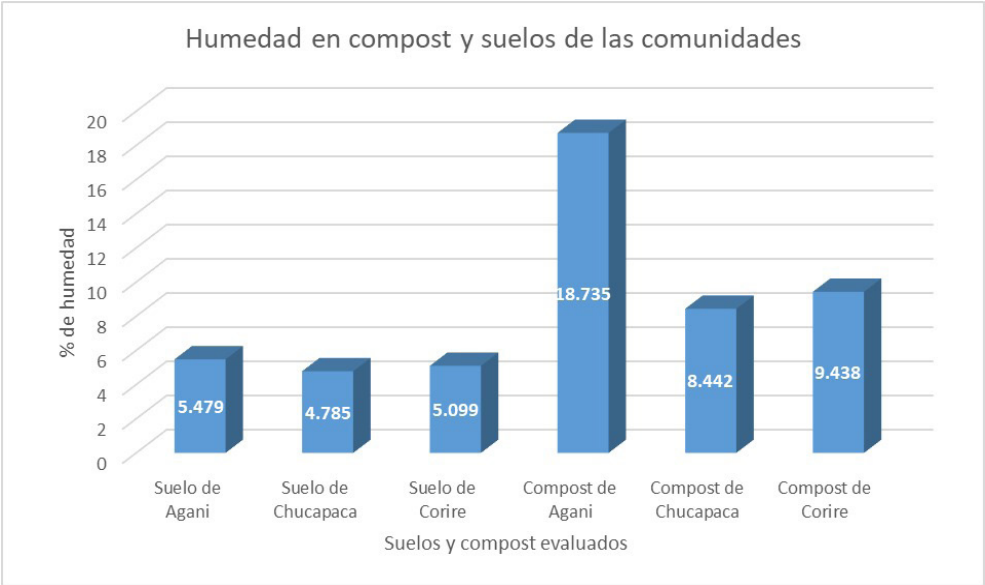
Estos valores de humedad final, particularmente bajos, son indicativos de un compost altamente estabilizado y maduro. Es crucial recordar que el corredor óptimo de humedad para una fermentación aeróbica eficiente se sitúa entre el 30% y el 70%. Desviaciones por encima de este rango conducen a la oclusión de los poros intersticiales, desplazando el oxígeno y provocando una transición indeseada hacia la anaerobiosis. Por el contrario, una humedad insuficiente inhibe drásticamente la actividad microbiana. El producto final obtenido en este estudio, con su coloración marrón oscura, aroma terroso, textura friable y una humedad y temperatura ambientalmente estables, cumple con todos los criterios organolépticos de una enmienda de alta calidad. El éxito en la mitigación de olores es una prueba adicional de la predominancia de las vías aeróbicas de descompo-

sición.

La cinética del proceso de compostaje, si bien influenciada por factores externos, está fundamentalmente dirigida por una compleja sucesión ecológica microbiana. El compostaje es un proceso dinámico en el que, a lo largo del tiempo, diferentes grupos de microorganismos resistentes a variaciones térmicas se vuelven dominantes. Inicialmente, bacterias y hongos mesófilos lideran la descomposición. Con el aumento de la temperatura por encima de los 40°C, la actividad es protagonizada por bacterias y hongos termófilos, así como por actinomicetos, los cuales son responsables de la higienización del sustrato. Superados los 70°C, la actividad microbiana se reduce, pero al descender la temperatura, las poblaciones mesófilas se reactivan, acompañadas por organismos más complejos como protozoos y miriápodos que contribuyen a la humificación. Esta compleja red microbiana se distribuye espacialmente, con las bacterias dispersas por toda la masa y los hongos y actinomicetos concentrados en la capa superficial (5-15 cm), otorgándole un aspecto grisáceo característico.

Aunque se implementó un control riguroso, se observó que la humedad en la comunidad de Agani fue considerablemente mayor en comparación con Corire y Chucapaca, como se puede visualizar en la **Figura 25**.

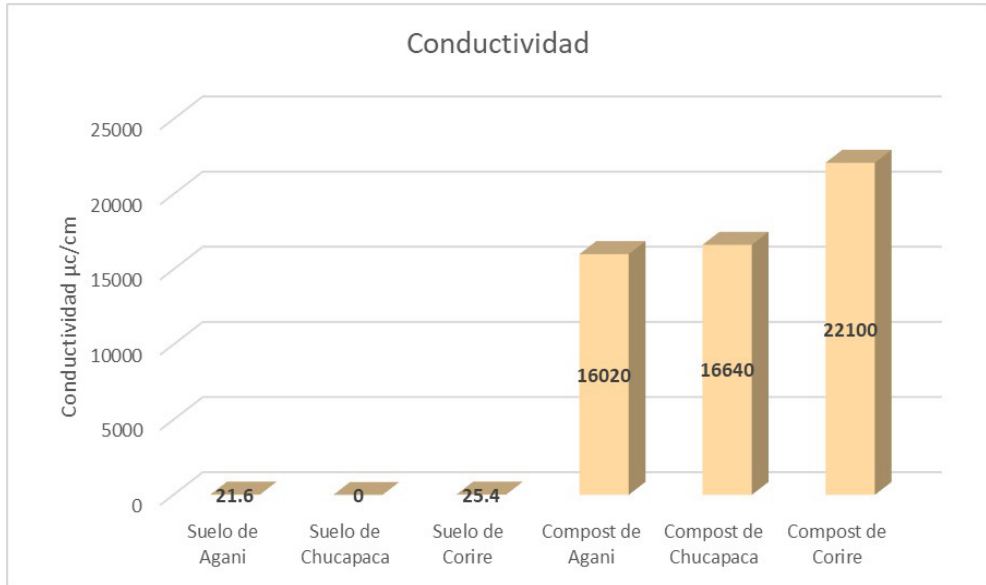
Figura 25 Porcentaje de humedad. Fuente: Elaboración propia



Esta elevada humedad en Agani resultó en una disminución de la transferencia de oxígeno, limitando la demanda metabólica y, por consiguiente, la actividad microbiana aeróbica. Esta condición pudo haber favorecido episodios localizados de anaerobiosis, con el consiguiente riesgo de generación de olores, lixiviados y una fluctuación indeseada de nutrientes y pH. Este hallazgo subraya la sensibilidad del proceso a la variable humedad y la necesidad de un monitoreo y ajuste aún más precisos en futuras implementaciones, aunque el sistema finalmente logró estabilizarse.

4.13.2 Conductividad

La conductividad eléctrica (CE) es un indicador indirecto de la concentración de sales solubles en la matriz del compost, y su evolución a lo largo del proceso ofrece una ventana a la dinámica de mineralización. Como se aprecia en la Figura 26, la CE sigue una trayectoria predecible, análoga a la del pH.

Figura 26 Conductividad

Inicialmente, se observa un descenso en la CE, atribuible al consumo de sales por parte de la biomasa microbiana en su fase de crecimiento exponencial. Posteriormente, a medida que las poblaciones microbianas mueren y se degradan, se liberan sales y otros compuestos iónicos al medio, lo que provoca una recuperación y un eventual aumento del valor de CE en la fase de maduración. Esta curva en "V" es característica de un proceso de compostaje saludable. El análisis comparativo de la composición final del compost con la del estiércol de alpaca original (Figuras 27 y 28) revela una transformación profunda y un enriquecimiento relativo de ciertos elementos.

Figura 27 *Análisis de compost*

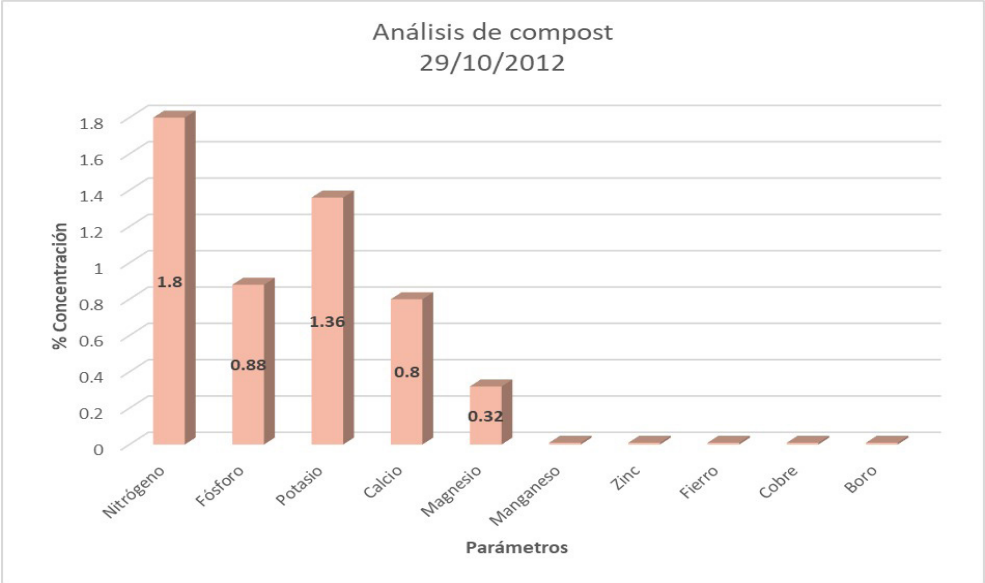
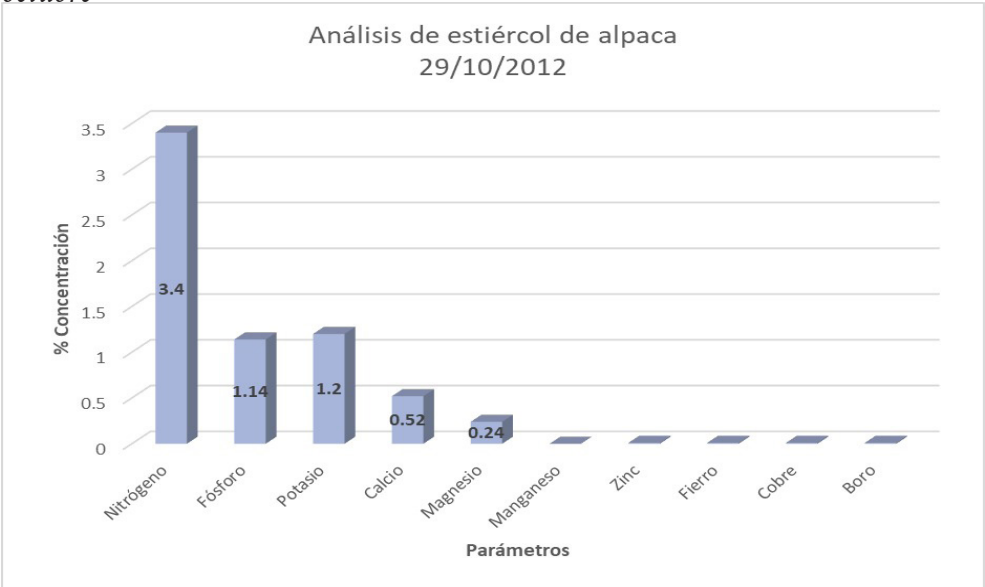


Figura 28 *Análisis de estiércol de alpaca – Resultado fisicoquímico – 29 de octubre*



Para contextualizar el valor agronómico del producto, se compararon sus niveles de macronutrientes y micronutrientes con estándares nacionales e internacionales. El análisis del nitrógeno (Figura 29) muestra que el compost de Chucapaca y Corire supera los valores de referencia, mientras que el de Agani se alinea con el estándar internacional, superando en todos los casos al de España.

Figura 29 Resultados de macronutrientes y micronutrientes – 20 de julio de 2012

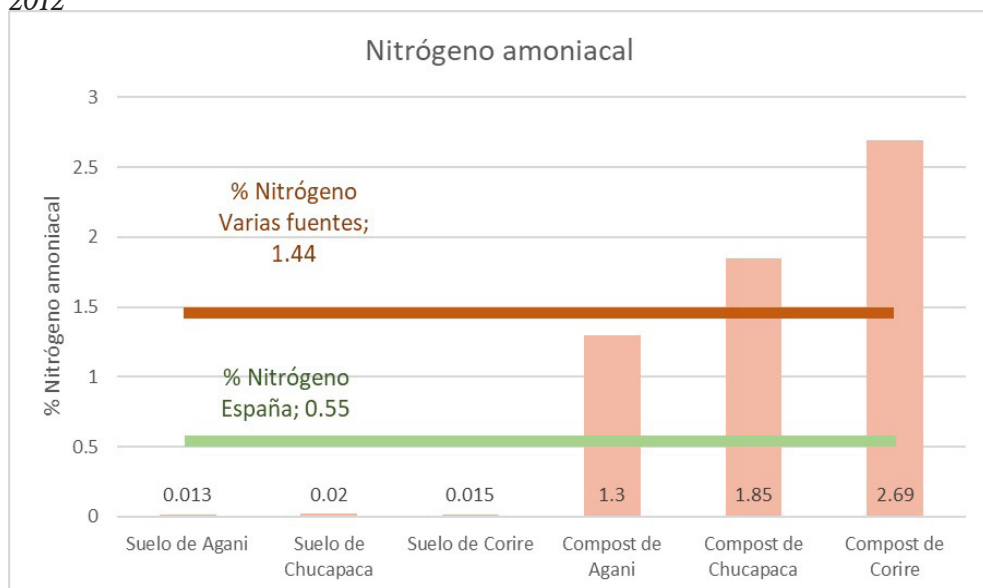


Figura 30 Porcentaje de fósforo

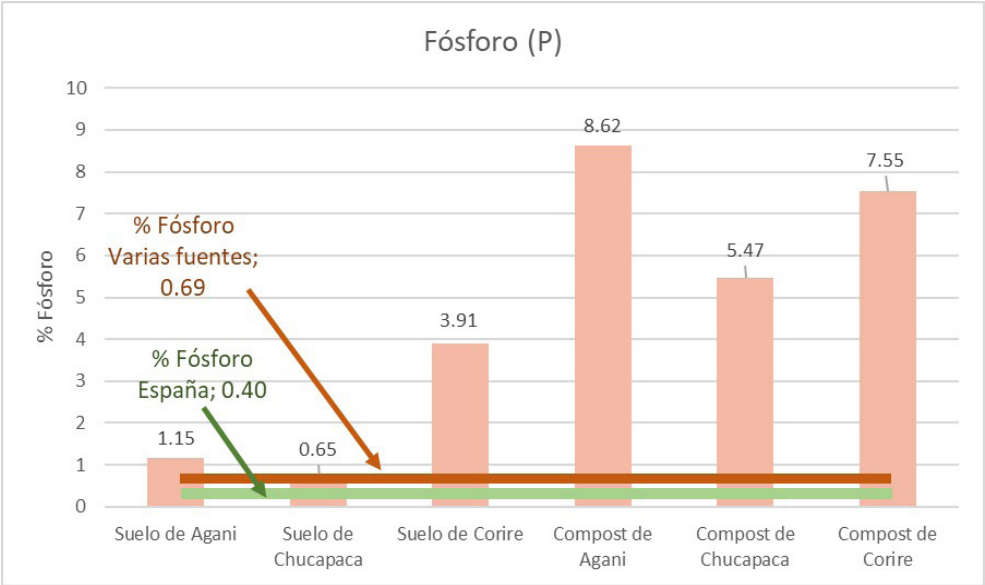


Figura 31 Porcentaje de potasio

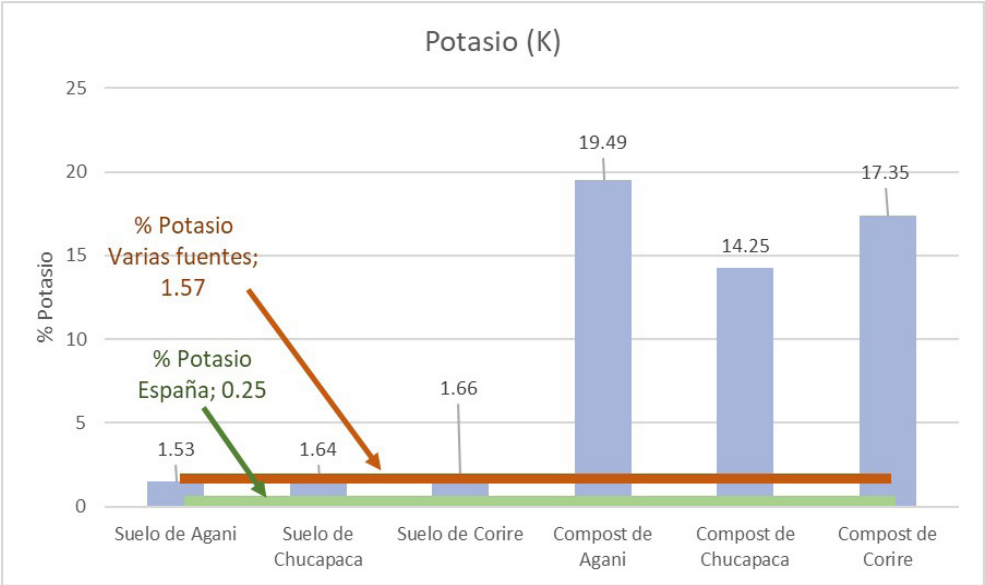


Figura 32 Porcentaje de calcio

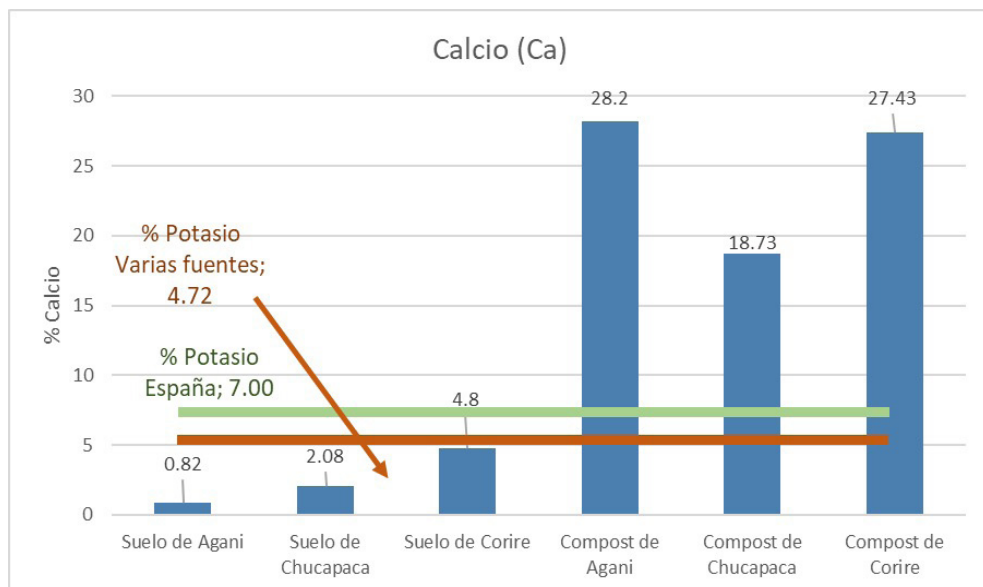


Figura 33 Porcentaje de magnesio

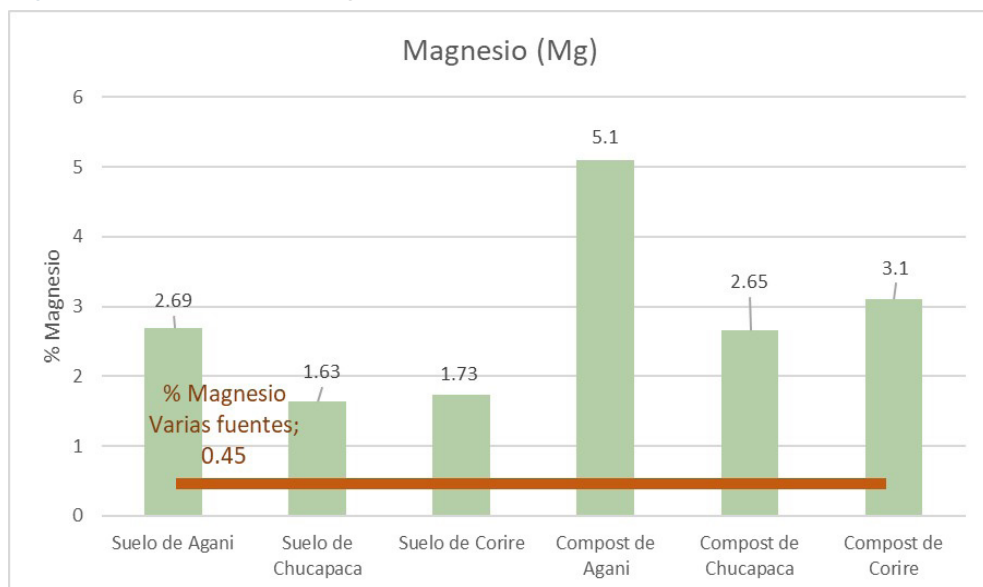
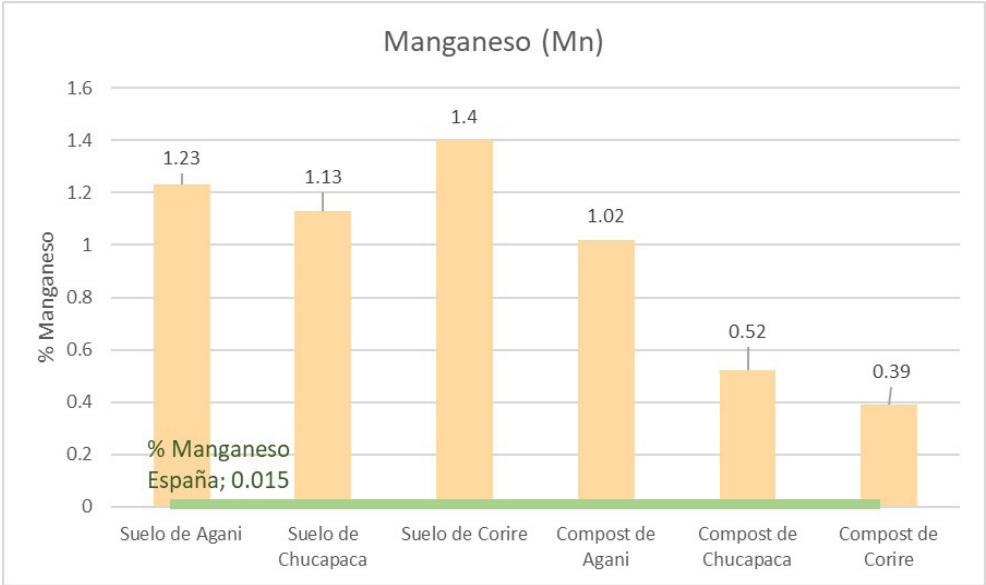


Figura 34 Porcentaje de manganeso



De manera similar, el análisis del fósforo y el potasio (Figuras 30 y 31) revela una concentración significativamente superior a la de las fuentes de referencia, posicionando al producto como una excelente fuente de estos nutrientes esenciales. Esta tendencia de enriquecimiento se mantiene para el calcio (Figura 32), el magnesio (Figura 33) y el manganeso (Figura 34). En todos los casos, el compost generado exhibe una calidad nutricional superior, validando su potencial para la remediación de suelos pobres. Es importante considerar que el entorno del proyecto, con una fuerte presencia de ganadería, constituye un factor relevante que se alinea con la política de "buen vecino" y responsabilidad social del proyecto minero, lo que demanda un manejo aún más cuidadoso de los residuos para generar un impacto positivo.

4.13.3. Comparación de resultados de NPK con varias fuentes de materia orgánica

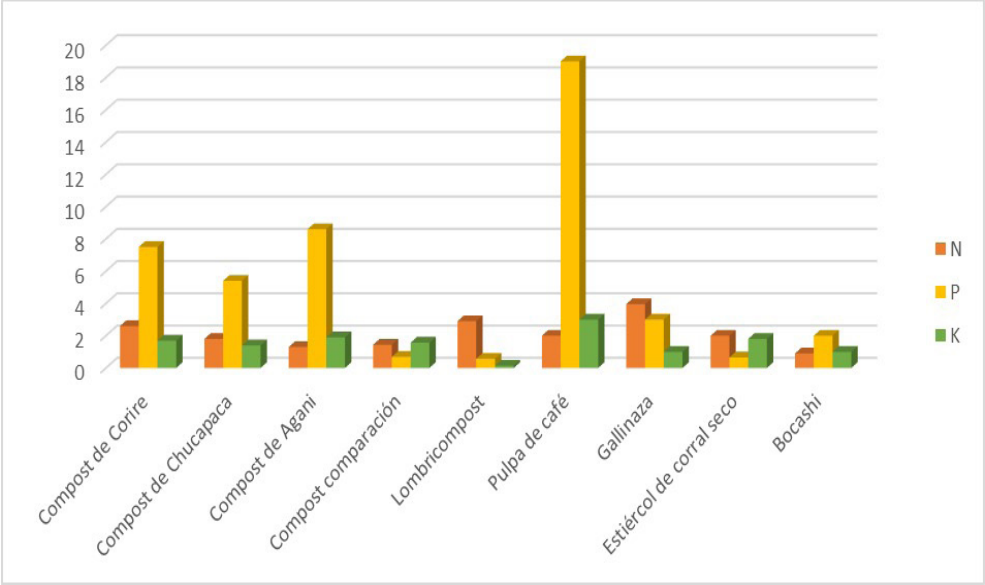
El uso de enmiendas orgánicas es una práctica ancestral, intrínsecamente ligada a la fertilidad de los sistemas agrícolas (Lapadre y Ruiz, 1999). En el paradigma de la agricultura sostenible, la gestión del ciclo de nutrientes es un pilar fundamental para el éxito de los sistemas productivos alternativos, ya que permite minimizar pérdidas y maximizar la eficiencia en el uso de los recursos (King, 1990). En este sentido, los abonos orgánicos como el compost constituyen una estrategia formidable. Autores como Kimitoshi Sakurai (2000) han señalado que la combinación de abonos orgánicos y minerales no solo incrementa los rendimientos, sino que mejora el valor biológico de los cultivos. Para validar la competitividad del producto obtenido, se realizó una comparación de su perfil NPK con otras fuentes orgánicas comúnmente utilizadas, como se detalla en la **Tabla 7** y se visualiza en la **Figura 35**.

Tabla 7 Fuentes de materia orgánica

Compost de diferentes orígenes	N	P	K
Compost de Corire	2.6	7.5	1.7
Compost de Chucapaca	1.8	5.4	1.4
Compost comparación	1.44	0.69	1.57
Lombricompost	2.9	0.57	0.14
Pulpa de café	2	19	3
Gallinaza	3.96	3	1
Estiércol de corral seco	2	0.65	1.8
Bocashi	0.9	2	1
Agani	1.3	8.6	1.9

Fuente: Elaboración propia, resultados obtenidos en la investigación.

Figura 35 Comparación de compost de diferentes orígenes



El análisis revela que el compost logrado en 75 días bajo este protocolo no solo es competitivo, sino que en varios aspectos supera en calidad a fuentes como el lombricompost (en P y K) o el estiércol de corral seco. Destaca especialmente el alto contenido de Fósforo, un mineral clave para la supervivencia y establecimiento de las plantas de queñua en el proyecto CDH.

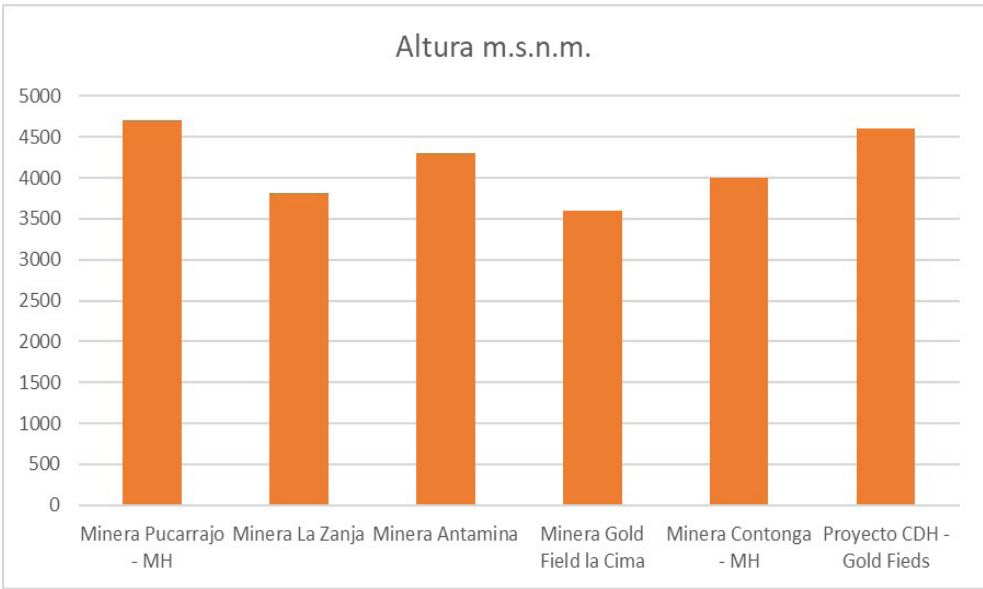
4.13.4. Resultado de compost en días Vs. Obtención de compost en diferentes minas

Finalmente, se evaluó la eficiencia temporal del proceso en comparación con otros proyectos de compostaje llevados a cabo en el sector minero peruano (Tabla 8 y Figura 36).

Tabla 8 Referencia de minas que realizan compostaje

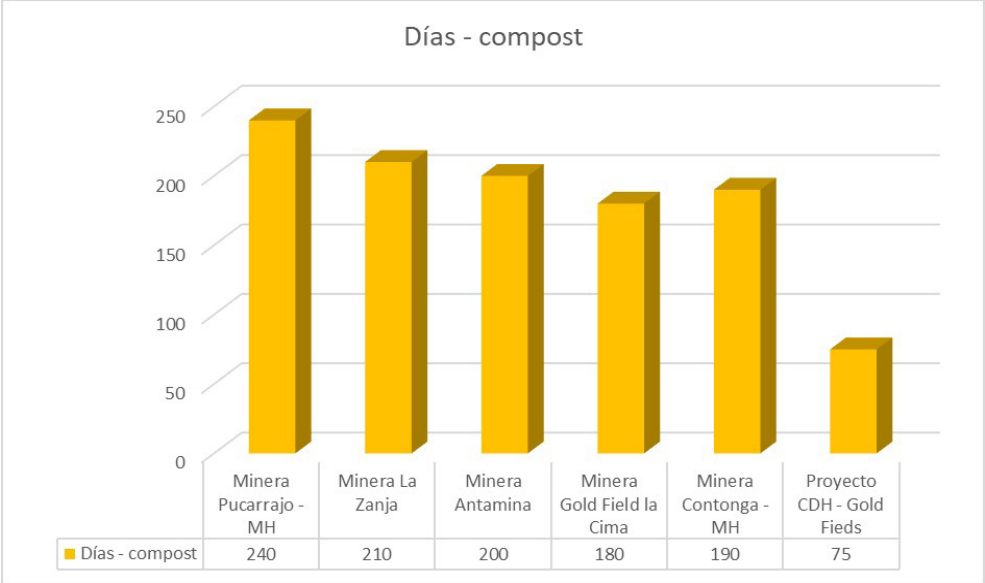
Empresas mineras de referencia	Altura msnm
Minera Pucarrajo – MH	4700
Minera La Zanja	3811
Minera Antamina	4300
Minera Gold Field La Cima	3600
Minera Contonga - MH	4000
Proyecto CDH - Gold	4600

Figura 36 Alturas m.s.n.m. en diferentes minas



La comparativa, ilustrada en la Figura 37, es contundente. Mientras que el período de producción de compost en la mayoría de las minas de referencia oscila entre 150 y 210 días, el proyecto CDH logró un producto final en tan solo 75 días.

Figura 37 Días de producción de compost en diferentes minas



Esta drástica reducción del ciclo productivo se atribuye directamente a la eficiencia del diseño modular y al manejo técnico del proceso. Cabe resaltar que, según datos de profesionales del sector, un 99% de los proyectos mineros que realizan compostaje utilizan cal para controlar olores, lo que incrementa los costos y puede afectar la calidad final del producto. La metodología CDH, al prescindir de la cal y optimizar el proceso aeróbico, no solo reduce costos, sino que mejora la calidad y acelera la producción, posicionándose como una alternativa tecnológica superior y más sostenible.

4.14. Conclusiones y recomendaciones

4.14.1. Conclusiones Fundamentales

- 1. **Validación de una Solución Tecnológica Eficiente:** Se concluye que la metodología de compostaje desarrollada en este estudio, basada en un diseño modular y control manual, representa una solución tecnológica robusta, higiénicamente segura y económicamente viable para la valorización de residuos orgánicos en el sector minero

y otros contextos industriales. La investigación ha demostrado de manera inequívoca que es factible obtener un producto agronómicamente superior —un compost estabilizado y rico en nutrientes— capaz de rehabilitar suelos degradados y potenciar su fertilidad.

2. **Superioridad del Sistema de Ingeniería Controlada:** Las características del compost obtenido son directamente atribuibles a la infraestructura empleada. El uso de módulos con revestimiento de geomembrana y cubiertas de protección superó consistentemente los resultados reportados en la literatura para métodos convencionales. Este sistema de ingeniería controlada fue el factor determinante para optimizar la cinética del proceso, asegurar la calidad del producto y validar la hipótesis de que un diseño técnico superior puede mitigar las variables ambientales adversas.
3. **Optimización Cinética y Eficiencia Temporal:** El método experimental, que integró la impermeabilización con geomembrana en las tres comunidades, demostró ser la estrategia más apropiada y eficiente en comparación con otras metodologías. El resultado fue la obtención de un compost de alta calidad en un ciclo de tan solo 75 días, estableciendo un nuevo punto de referencia en eficiencia temporal para operaciones de compostaje en contextos de exploración minera a gran altitud.
4. **Rol Crítico de la Geomembrana en el Control del Proceso:** La función de la geomembrana como barrera impermeable fue fundamental para el éxito del proyecto. Al prevenir la percolación de lixiviados, se contuvieron los nutrientes dentro del sistema y se evitó la contaminación del subsuelo. Más importante aún, se mantuvo un equilibrio hídrico óptimo que favoreció el desarrollo de consorcios microbianos aeróbicos, creando las condiciones idóneas para una descomposición rápida y completa.

5. **Diseño Estratégico para la Eficiencia Energética y de Recursos:** El diseño de los módulos —que combinó una estructura de madera impermeabilizada con cubiertas transparentes— fue estratégicamente concebido para funcionar como un colector solar pasivo. Esta configuración permitió capturar y retener el calor generado por la actividad metabólica y la radiación solar, acelerando la descomposición sin necesidad de energía externa. Adicionalmente, este microclima interno redujo la evaporación, minimizando la necesidad de riego y optimizando el uso del agua.
6. **Refutación de la Necesidad de Enmiendas Alcalinas:** Este estudio concluye de manera contundente que el uso de cal, una práctica extendida en la industria minera para el control de olores, es contraproducente para la obtención de un compost de alta calidad agronómica. La adición de cal eleva drásticamente el pH, creando un ambiente alcalino que resulta tóxico para muchas poblaciones bacterianas esenciales, lo que retarda la descomposición (prolongando el proceso a más de 200 días) y genera un producto final con una composición química inadecuada para la forestación. Se constató que la industria recurre a esta práctica como un paliativo para el control de olores, direccionando el producto final a usos de bajo valor como la cobertura de desmonteras, en lugar de a la restauración ecológica.
7. **Eficacia del Control Aeróbico sobre el Control Químico de Olores:** La técnica experimental demostró que un control riguroso de la oxigenación, facilitado por un diseño modular que permite volteos programados y eficientes, es una estrategia superior para la mitigación de olores. Asegurar condiciones aeróbicas constantes no solo previene la formación de compuestos volátiles malolientes asociados a la anaerobiosis, sino que también favorece procesos bioquímicos clave como la nitrificación, enriqueciendo el valor nutricional

del compost.

8. **Impacto Validado en Proyectos de Restauración y Seguridad Alimentaria:** La calidad superior del compost fue validada empíricamente en dos proyectos piloto. Primero, en un programa de forestación con 1.000 plántones de *Polylepis* (queñua), donde se observó un crecimiento excepcional (de 15 cm a casi un metro en dos años) y una tasa de mortalidad de apenas el 5%, en zonas donde previamente no existía vegetación arbórea. Segundo, en un huerto piloto a 4.600 m.s.n.m., donde se logró el cultivo exitoso de hortalizas utilizando exclusivamente el compost como enmienda. Ambos casos demuestran el potencial del producto para generar microclimas, restaurar ecosistemas y contribuir a la seguridad alimentaria en comunidades de alta montaña.
9. **Externalidades Positivas: Impacto Social y Co-beneficios Ambientales:** El proyecto trascendió el ámbito técnico para generar un impacto social y ambiental positivo. La transferencia de la técnica a las comunidades, que replicaron el procedimiento en sus propios caseríos, funcionó como un poderoso ejemplo de responsabilidad ambiental y social corporativa, fortaleciendo la interrelación entre la empresa y la comunidad. La distribución del compost para el mantenimiento de bofedales y áreas de pastoreo consolidó la percepción de que la gestión adecuada de residuos puede generar beneficios directos y tangibles para la población.

4.14.2. Recomendaciones Estratégicas y Operativas

1. **Adopción Institucional de la Metodología:** Se recomienda a las autoridades municipales, como las de Ichuña, y a otras entidades gestoras de residuos, que consideren la adopción de esta técnica de compostaje controlado como una política pública para la gestión de residuos domésticos. Este método previene la contaminación de cuerpos de agua y suelos asociada a la disposición en botaderos,

transformando un problema ambiental en una oportunidad de desarrollo local.

2. **Clasificación Rigurosa en la Fuente:** Para garantizar la calidad del compost y la eficiencia del proceso, es imperativo implementar un sistema riguroso de clasificación de residuos en la fuente. La separación adecuada de los materiales orgánicos degradables de los inertes y no compostables es el primer paso crítico para evitar la contaminación del producto final y la ralentización del ciclo.
3. **Monitoreo y Control de la Humedad:** Se subraya la necesidad de un monitoreo constante del contenido de humedad como variable crítica del proceso. Se recomienda la implementación de métodos de campo sencillos y replicables, como el "test de la mano", para realizar ajustes de riego en tiempo real y mantener el sustrato dentro del rango óptimo, utilizando cubiertas para protegerlo de la lluvia.
4. **Diversificación de Insumos para la Optimización Nutricional:** Para maximizar la calidad del compost, se aconseja diversificar la mezcla de insumos, combinando materiales de origen vegetal (ricos en carbono) con enmiendas de origen animal como el estiércol (ricas en nitrógeno). Esta práctica equilibra la relación C/N, un factor clave que gobierna la velocidad y la eficiencia de la descomposición.
5. **Difusión y Capacitación Continua:** Se recomienda establecer un programa de difusión y capacitación continua en las comunidades aledañas al proyecto. El objetivo es transferir el conocimiento técnico para que las familias puedan replicar el proceso a pequeña escala, minimizando la generación de residuos y produciendo su propio abono natural. Esto reduce la dependencia de fertilizantes químicos, cuya aplicación incorrecta puede llevar a la degradación del suelo y a la contaminación por agroquímicos.

- 6. Rechazo Explícito del Uso de Cal en Compostaje para Forestación:** Se recomienda enfáticamente que cualquier proyecto de compostaje cuyo producto final esté destinado a la restauración ecológica o a la agricultura proscriba el uso de cal como aditivo. La evidencia demuestra que esta práctica, aunque útil para la estabilización de lodos o el control de olores en vertederos, es perjudicial para la calidad agronómica del compost.

4.14.3. Recomendaciones Estratégicas y Operativas

En un planeta donde un tercio de los suelos sufre de acidificación, a menudo exacerbada por una agricultura intensiva dependiente de fertilizantes amoniacales (Cruz et al., 2020), la gestión adecuada de los residuos orgánicos mediante el compostaje emerge como una estrategia fundamental. Este proceso no solo reduce la dependencia de insumos químicos, sino que recupera la fertilidad del suelo y mejora su capacidad de retención de agua. El compostaje es, en esencia, uno de los procedimientos de reciclaje más antiguos, descrito ya hace dos milenios por el agrónomo romano Columela (Gallardo, 2021). Su vigencia actual se debe a que encarna los principios de la sostenibilidad ecológica y económica: cierra el ciclo biológico de los nutrientes, secuestra carbono en el suelo, evita la emisión de metano de los vertederos, reduce costos de disposición y, finalmente, crea un producto de alto valor que mejora la base de nuestra seguridad alimentaria.

CAPÍTULO V

REFLEXIONES FINALES

En la trayectoria evolutiva de los paisajes terrestres, la matriz edáfica emerge no como un sustrato inerte, sino como un palimpsesto dinámico, un registro histórico que documenta la interacción milenaria entre los ciclos geológicos, la biósfera y, de manera creciente, la impronta de la actividad humana. Es en esta delgada y vital epidermis del planeta donde la humanidad ha depositado, a menudo de forma indiscriminada, los subproductos de su civilización, generando una presión antrópica que ha degradado progresivamente este capital natural esencial. La presente investigación se ha adentrado en este escenario de vulnerabilidad para explorar una vía de restauración, demostrando que es posible, mediante la aplicación de la ingeniería de procesos, revertir el paradigma del residuo como pasivo para transformarlo en un activo estratégico para la rehabilitación de ecosistemas.

El eje central de esta transformación reside en la gestión inteligente del componente más vital y a la vez más frágil del suelo: la materia orgánica. Esta no debe ser concebida como un mero agregado de detritos, sino

como el reservorio dinámico de carbono y el motor bioquímico que gobierna la fertilidad del suelo. Proveniente de la incesante descomposición de biomasa, la materia orgánica es un complejo de sustancias en perpetua transformación que confiere al suelo sus propiedades más valiosas. Su manifestación más estable, el humus, funciona como un arquitecto edáfico: su poder aglomerante crea una estructura granular porosa, optimizando el balance hídrico-gaseoso, incrementando la capacidad de intercambio catiónico y protegiendo las partículas minerales elementales contra las fuerzas de la erosión hídrica y eólica. Un suelo desprovisto de este componente biogénico es, en esencia, un sistema empobrecido, estructuralmente inestable e incapaz de sostener una vida vegetal próspera. Esta realidad ha forzado históricamente la dependencia de fertilizantes sintéticos, una solución que, si bien efectiva a corto plazo, a menudo externaliza costos ambientales y compromete la sostenibilidad a largo plazo.

La biotecnología del compostaje emerge, entonces, como una respuesta racional y estratégica a esta doble problemática de la gestión de residuos y la degradación del suelo. Se define como un proceso de descomposición aeróbica deliberadamente controlado, una forma de ingeniería ecológica que acelera y optimiza los ciclos naturales de la materia. A diferencia de la mineralización que ocurre en la naturaleza, el compostaje permite dirigir la transformación de una amalgama diversa de residuos orgánicos —desde restos de cocina hasta enmiendas de origen animal— en un producto final homogéneo, higienizado y de alto valor agronómico: un bioestimulante y fertilizante rico en humus. El abandono de paradigmas reduccionistas como la teoría de Liebig, que limitaban la nutrición vegetal a N, P y K, ha permitido revalorizar el papel integral de los oligoelementos y, fundamentalmente, de la comunidad microbiana que el compost reintroduce en el ecosistema edáfico.

No obstante, la eficiencia de este proceso biotecnológico está intrínsecamente supeditada a las condiciones del entorno. Factores abióticos como la temperatura, la humedad y la radiación solar pueden afectar adversamente la actividad de los consorcios microbianos. Es en esta interfaz don-

de la innovación tecnológica, específicamente el uso de geomembranas, se revela como un factor disruptivo. La implementación de estas láminas poliméricas de bajísima permeabilidad transforma una pila de compostaje en un biorreactor controlado. Al aislar el sistema de variables estocásticas externas, como precipitaciones imprevistas o una insolación excesiva, y al prevenir la lixiviación de nutrientes y la pérdida de humedad por evaporación, la geomembrana garantiza un entorno de proceso estable y óptimo. Funciona, por tanto, como una barrera de ingeniería que permite mantener las condiciones aeróbicas, maximizar la retención de calor metabólico y, en última instancia, acelerar drásticamente la cinética de la descomposición.

Este estudio ha demostrado que la sinergia entre una correcta gestión de los residuos orgánicos y la aplicación de esta tecnología de contención constituye un modelo de solución integral. La elaboración del compost se convierte en un nexo funcional que conecta los sistemas espaciales urbanos o industriales, generadores de residuos, con los sistemas rurales o áreas degradadas, demandantes de fertilidad. Se establece así un paradigma de economía circular donde se disminuyen los niveles de contaminación al desviar los residuos de los vertederos, se produce una enmienda orgánica de calidad superior y se mejora la resiliencia de los suelos. El éxito de este enfoque depende de una metodología rigurosa: desde la selección y mezcla de los sustratos hasta el monitoreo constante de los parámetros del proceso. El compostaje, lejos de ser una simple técnica, es una ciencia aplicada cuyo resultado final es un testimonio de la eficacia con la que se ha gestionado su compleja dinámica biológica, un proceso que culmina en la creación de un capital edáfico renovado, listo para catalizar nuevos ciclos de vida.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almendros, G., Polo, A., Ibañez, J. J. y Lobo, M. C. (1984). Contribución al estudio de la influencia de los incendios forestales en las características de la materia orgánica del suelo. *Rev. Ecol. Sol.*, 21(1), 7-20.

Altamirano Flores, M., Cabrera Carranza, C. (2006). Estudio comparativo para la elaboración de compost por técnica manual. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 9(17), 75-84.

<https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/697/550>

Ansorena Miner, J. (2016). *El compost de biorresiduos. Normativa, calidad y aplicaciones*. Ediciones Mundi-Prensa.

Chancasanampa Pacheco, R. (2013). Diseño y aplicación de geotextiles y geomembranas en plantas de tratamiento de aguas residuales [Tesis, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/245>

Cruz Macías, W. O., Rodríguez Larramendi, L. A., Salas Marina, M. Á., Hernández García, V., Campos Saldaña, R. A., Chávez Hernández, M. H. y Gordillo Curiel, A. (2020). Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en la acidez de suelos cultivados con maíz en dos regiones de Chiapas, México. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 475-480.

<https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v38n3/2395-8030-tl-38-03-475.pdf>

Gallardo Minaya, K. P. (2013). Obtención de compost a partir de residuos orgánicos impermeabilizados con geomembrana [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/1222>

Julca Otiniano, A., Meneses Florián, L., Blas Sevillano, R. y Bello Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia*, 24(1), 49-61.

https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292006000100009

Kiely, G. (1999). *Ingeniería ambiental*. Mcgraw Hill Editorial.

Moreno, J., Moral, R., García Morales, J. L., Pascual, J. A. y Bernal, M. P. (Eds.). (2014). *De residuo a recurso. El camino hacia la sostenibilidad*. Ediciones Mundi-Prensa.

Gallardo Minaya, K. P. (2021). Elaboración del compostaje a nivel sostenible de proyectos mineros en fase de exploración [Tesis, Universidad Continental].

https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10544/1/IV_FIN_107_TSP_Gallardo_Minaya_2021.pdf

- Ghisolfi, E. (2011). *Contenidos de materia orgánica. Relación con la fertilidad del suelo en siembra directa*. Eduvim.
- Labrador Moreno, J. (2002) *La materia orgánica en los agrosistemas*. Mundi-prensa Libros.
- Mustin, M. (1993). *Le compost: Gestion de la matière organique*. Cocagne.
- Sakurai, K. (2000). *Método sencillo del análisis de residuos sólidos*. Cepis / OPS.
- Salazar Sosa, E., Fortis Hernández, M., Vázquez Alarcón, A., Vázquez Vázquez, C. (Eds.). (2003). *Abonos orgánicos y plasticultura*. Facultad de Agricultura y Zootecnia de la UJED, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C.



EDITORIAL
NAVEGANTE