

Aplicación de la tecnología de las Pacas Biodigestoras para el tratamiento ecológico de los residuos orgánicos de la Universidad de Antioquia.



Resumen

El Campus Principal de la Universidad de Antioquia produce diariamente un gran volumen de residuos orgánicos, entre residuos de alimentos y vegetales, los cuales se disponen temporalmente y se tratan en el centro de acopio de residuos de la misma sede; allí una fracción del material orgánico es compostada y el resto es apilado y acumulado en bolsas, como en el caso de la hojarasca. Debido a que en la actualidad la cantidad de material orgánico que se produce supera la capacidad de carga de la planta de compostaje, una gran fracción del material está siendo apilado sin un tratamiento adecuado, convirtiéndose en una fuente de contaminación y proliferación de plagas, que se traduce en un potencial impacto negativo en el ecosistema.

Ante ello, la presente investigación evaluó la aplicación de la tecnología de las Pacas Biodigestoras para el tratamiento ecológico de los residuos orgánicos producidos en la Universidad, en aras de analizar un método alternativo y complementario que permita hacer una gestión integral de los residuos. En efecto, se realizó un montaje de cuatro pacas biodigestoras en la zona verde entre los bloques 20 y 21; a tres de ellas se les monitoreo los parámetros fisicoquímicos que intervienen en el proceso de descomposición, mediante el registro día por medio de los cambios y las variaciones en el tiempo de la temperatura, humedad, pH y altura. Además, se evaluó la calidad y el grado de madurez del abono orgánico obtenido de una de las pacas luego de seis meses de descomposición, a través de la aplicación de dos métodos, el cuantitativo para analizar los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y fitotóxicos y el cualitativo para obtener el análisis cromatográfico en papel circular. En la cuarta paca se llevo a cabo un experimento de huerta con el cual se logró corroborar que mientras se digiere un metro cúbico de residuos orgánicos se obtiene un metro cuadrado de suelo productivo, lo que garantiza que la aplicación de las pacas no solo ofrece ventajas frente a la gestión de los residuos, sino también aportes a la agricultura, silvicultura y a procesos de autonomía y soberanía alimentaria.

Los resultados obtenidos confirman la viabilidad ambiental de las Pacas Biodigestoras en términos de reciclar y aprovechar los residuos orgánicos generados en la Universidad. Una paca, alcanza a digerir entre 500 y 600 kg de residuos orgánicos, ocupando un metro cuadrado de suelo. El proceso de descomposición en las pacas depende directamente de las condiciones ambientales y del microclima circundante que afectan los cambios de la temperatura, la humedad y el pH, los

cuales son factores determinantes para analizar el proceso de digestión, ya que influyen en el tiempo de descomposición y varían durante la fermentación de los compuestos orgánicos. Durante la fermentación se producen ácidos orgánicos (ácido acético) y alcoholes que cumplen con una función desinfectante y saneadora de los residuos orgánicos, lo que convierte a la tecnología de la Paca Biodigestora en un sistema apropiado para eliminar organismos patógenos y fitotóxicos. Finalmente, el abono orgánico que se obtiene es característico por ser un sustrato de buena calidad, que su aprovechamiento puede beneficiar las características físicas, químicas y biológicas de los suelos y según el análisis de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y fitotóxicos cumple con los límites permisibles y aceptables por la NTC 5167, 2004.

Palabras clave: Materia orgánica, manejo y aprovechamiento de residuos orgánicos, degradación biológica, pacas digestoras, reciclaje, abono orgánico, biotecnología, tratamiento ecológico.



Tabla de contenido

1. Introducción.....	7
2. Objetivos.....	10
2.1. Objetivo General.....	10
2.2. Objetivos Específicos.....	10
3. Planteamiento del problema.....	11
4. Marco contextual.....	15
5. Marco teórico.....	18
5.1. El ciclo de los residuos orgánicos en la Universidad.....	18
5.2. De dónde surge la idea de las Pacas Biodigestoras.....	23
5.3. Las Pacas Biodigestoras y los ejes misionales de la Universidad.....	25
5.4. La materia orgánica: Un recurso o un residuo.....	27
5.5. Digestión de la materia orgánica.....	30
5.5.1. La biodigestión en la paca.....	31
5.6. Factores ambientales que influyen en la descomposición.....	34
5.6.1. Contenido de humedad.....	34
5.6.2. Variación de la temperatura.....	35
5.6.3. Variación del pH.....	36
5.6.4. Naturaleza del sustrato.....	36
5.6.5. Aireación.....	37
5.6.6. Tiempo.....	37
5.7. El abono orgánico de las Pacas Biodigestoras.....	38
5.7.1. Evaluación de la calidad del abono orgánico.....	39
5.7.1.1. Análisis cualitativo: cromatografía.....	39
5.7.1.2. Análisis cuantitativo:.....	42
A. Parámetros fisicoquímicos.....	42
B. Parámetros microbiológicos.....	45
C. Parámetros fitotóxicos.....	47
6. Metodología.....	48
6.1. Cuánto se genera y cuánto se composta en la Universidad.....	48
6.2. Pacas Biodigestoras: el método alternativo.....	49
6.3. Construcción de las Pacas Biodigestoras.....	52
6.4. Parametrización fisicoquímica de las Pacas Biodigestoras.....	59
6.5. El experimento de la huerta sobre la Paca Biodigestora.....	62
6.6. Cromatografía del abono orgánico de la Paca Biodigestora.....	63
6.6.1. Práctica de campo.....	64
6.6.2. Práctica de laboratorio.....	68

6.7.	Análisis fisicoquímico, microbiológico y fitotóxico del abono.....	73
7.	Resultados y análisis	74
7.1.	Lo que se genera y lo que se composta en la Universidad	74
7.2.	Cantidad de materia orgánica fresca que procesa la Paca Biodigestora.....	76
7.3.	Parámetros fisicoquímicos monitoreados	78
7.3.1.	Densidad.....	78
7.3.2.	Cambios en la altura	79
7.3.3.	Variaciones en la temperatura	80
7.3.4.	Variaciones en la humedad.....	86
7.3.5.	Variaciones del pH.....	91
7.4.	Observaciones sobre la Paca Huerta	93
7.5.	Análisis cualitativo de la calidad del abono orgánico: por cromatografía	96
7.6.	Análisis cuantitativo de la calidad del abono orgánico	99
7.6.1.	Parámetros fisicoquímicos	99
7.6.2.	Parámetros microbiológicos	102
7.6.3.	Parámetros fitotóxicos	103
8.	Conclusiones.....	104
9.	Referencias Bibliográficas	107
10.	Anexos.....	112
10.1.	Anexo 1	112
10.2.	Anexo 2	119

Lista de gráficas

Gráfica 1.	Variación en la altura de las pacas durante el tiempo de digestión.	80
Gráfica 2.	Variación de la temperatura en la Paca Organismos en el Punto 1.....	81
Gráfica 3.	Variación de la temperatura en la Paca Sucesiones en el Punto 1.....	82
Gráfica 4.	Variación de la temperatura en la Paca Parametrización en el Punto 1. ...	82
Gráfica 5.	Variación de la temperatura en la Paca Organismos en el Punto 2.....	83
Gráfica 6.	Variación de la temperatura en la Paca Sucesiones en el Punto 2.....	83
Gráfica 7.	Variación de la temperatura en la Paca Parametrización en el Punto 2. ...	84
Gráfica 8.	Variación de la temperatura en la Paca Organismos en el Punto 3.....	85
Gráfica 9.	Variación de la temperatura en la Paca Sucesiones en el Punto 3.....	85
Gráfica 10.	Variación de la temperatura en la Paca Parametrización en el Punto 3.	86
Gráfica 11.	Variación de la humedad en la Paca Organismos en el Punto 1.	87
Gráfica 12.	Variación de la humedad en la Paca Sucesiones en el Punto 1.	87
Gráfica 13.	Variación de la humedad en la Paca Parametrización en el Punto 1.	88
Gráfica 14.	Variación de la humedad en la Paca Organismos en el Punto 2.	89
Gráfica 15.	Variación de la humedad en la Paca Sucesiones en el Punto 2.	89
Gráfica 16.	Variación de la humedad en la Paca Parametrización en el Punto 2.	89
Gráfica 17.	Variación de la humedad en la Paca Organismos en el Punto 3.	90
Gráfica 18.	Variación de la humedad en la Paca Sucesiones en el Punto 3.	91

Gráfica 19. Variación de la humedad en la Paca Parametrización en el Punto 3.	91
Gráfica 20. Variación del pH en la Paca Organismos.	92
Gráfica 21. Variación del pH en la Paca Sucesiones.	92
Gráfica 22. Variación del en la Paca Parametrización.	93

Lista de tablas

Tabla 1. Requisitos de calidad para productos utilizados como abonos orgánicos. ...	42
Tabla 2. Producción y disposición histórica de los residuos sólidos.	74
Tabla 3. Producción y disposición de los residuos sólidos en el año 2015.	75
Tabla 4. Producción y disposición de los residuos sólidos diarios.	76
Tabla 5. Cantidad de materia orgánica fresca empacada.	76
Tabla 6. Relación con la cantidad de residuos orgánicos que procesa la Paca.	77
Tabla 7. Parámetros fisicoquímicos de la muestra de abono orgánico.	99
Tabla 8. Tamaño de las partículas de la muestra de abono orgánico.	101
Tabla 9. Contenido de macro y micronutrientes.	101
Tabla 10. Recuento de microorganismos en la muestra de abono orgánico.	102
Tabla 11. Prueba de germinación.	103
Tabla 12. Actividad respirométrica de la muestra de abono orgánico.	103

Lista de imágenes

Imagen 1. Ubicación Centro de acopio de residuos de la Universidad de Antioquia. ...	13
Imagen 2. Ubicación del campus principal de Universidad de Antioquia.	15
Imagen 3. Mapa límites geográficos de la Universidad de Antioquia.	16
Imagen 4. Imagen Satelital del campus principal de la Universidad de Antioquia. ...	17
Imagen 5. Punto Ecológico de la Universidad de Antioquia. ...	19
Imagen 6. Centro de acopio de los residuos de la Universidad de Antioquia.	20
Imagen 7. Centro de acopio de residuos de la Universidad.	21
Imagen 8. Áreas del centro de acopio para el proceso de compostaje.	21
Imagen 9. Características de la terminación de los dientes de un cromatograma.	40
Imagen 10. Patrón de colores para análisis cromatográfico.	41
Imagen 11. Evolución radial de los análisis cromatográfico.	41
Imagen 12. Ubicación de las Pacas Biodigestoras en la Universidad de Antioquia. ...	49
Imagen 13. Moldes guía para ensamblar las Pacas Biodigestoras.	50
Imagen 14. Proceso de recolección de los residuos orgánicos a empacar.	51
Imagen 15. Construcción de la paca, ubicación de las chamizas.	53
Imagen 16. Construcción de la paca, inclusión capa de hojarasca.	54
Imagen 17. Construcción de la paca, inclusión capa de residuos de cocina.	55
Imagen 18. Construcción de la paca, nueva capa de hojarasca.	55
Imagen 19. Construcción de la paca, ubicación de amarres.	56
Imagen 20. Construcción de la paca, proceso de ensamblaje.	58
Imagen 21. Pacas Biodigestoras de un metro cúbico.	59
Imagen 22. Balanza digital y tara de plástico para el pesaje del material orgánico. ...	59
Imagen 23. Puntos delimitados para la medición de las variables.	60

Imagen 24. Instrumentos de medición directa para compost.	61
Imagen 25. Paca huerta urbana con ultima capa de abono orgánico.	62
Imagen 26. Germinados de plántulas de cilantro.	63
Imagen 27. Plántulas trasplantadas.	63
Imagen 28. Paca organismos, lugar de extracción de la muestra.	64
Imagen 29. Proceso de obtención de la muestra de abono.	65
Imagen 30. Rotulación de la muestra de abono orgánico.	66
Imagen 31. Proceso de secado de la muestra de abono orgánico.	66
Imagen 32. Tamizado de la muestra de abono orgánico seco.	67
Imagen 33. Molienda de la muestra de abono orgánico seco.	67
Imagen 34. Beakers con las submuestras de 5 g del abono orgánico pulverizado. ...	68
Imagen 35. Disolución de la muestra de abono orgánico.	69
Imagen 36. Agitación de la disolución del abono orgánico y la solución de sosa.	69
Imagen 37. Preparación del papel filtro circular.	70
Imagen 38. Impregnación del papel filtro.	71
Imagen 39. Corrida final de la muestra de abono orgánico en papel filtro N° 1288. ...	72
Imagen 40. Proceso de secado y revelado de los cromas.	73
Imagen 41. Distribución de 12 pacas en una misma área.	78
Imagen 42. Desnivel en la Paca Organismos.	79
Imagen 43. Plantas de amaranto marchitas y borra de café entre las plantas.	94
Imagen 44. Desarrollo de las plantas en la Paca Huerta.	95
Imagen 45. Cromas en papel filtro de N° 1288.	96
Imagen 46. Cromas en papel filtro de N° 292.	96
Imagen 47. Identificación de las zonas en el cromograma del filtro N° 1288.	97
Imagen 48. Identificación de las zonas en el cromograma del filtro N° 292.	97
Imagen 49. Organismos observados en la Paca Biodigestora.	113
Imagen 50. Proceso de sucesión ecológica documentada en la paca.	115
Imagen 51. Puntos de medición sobre la paca del grupo parametrización.	116
Imagen 52. Instrumentos de medida utilizados por el grupo parametrización.	116
Imagen 53. Proceso de siembra sobre la Paca Huerta.	118
Imagen 54. Plano de la Universidad de Antioquia con Pacas Biodigestoras.	119

1. Introducción

En la naturaleza la vida se torna en ciclos, activados por la energía que proviene del Sol, los cuales fluyen a través del suelo, la atmósfera y el agua; se conjugan y descomponen haciendo parte de la biosfera terrestre y de los organismos que la integran. Cada fase del ciclo es esencial, en los bosques, por ejemplo, las hojas de las plantas absorben la energía del Sol para activar la fotosíntesis mediante la cual transforman el dióxido de carbono de la atmósfera en oxígeno y biomasa, esta última se esparce en las hojas, las ramas, tallos y raíces, al igual que el agua y los nutrientes que las raíces toman del suelo. Las plantas inician el ciclo de la energía en los ecosistemas, pero la vida de las hojas cesa al caer al suelo, acumulándose allí junto con algunos frutos y semillas, heces y animales muertos. Todos juntos forman la materia orgánica, la cual es el alimento para macro y microorganismos, una fuente de energía que propicia la capacidad de reproducción, su metabolismo y crecimiento; algunos son los encargados de descomponer y transformar este material, integrándolo de nuevo en los suelos como elementos sintetizados disponibles y asimilables por las plantas, otros son los encargados de controlar la reproducción de los descomponedores, depredándolos y manteniendo regulada la disponibilidad de materia orgánica en el manto superior de la Tierra.

En la naturaleza, la materia orgánica no es un residuo ni un desperdicio, al contrario, representa un recurso esencial y una fuente alternativa de energía para mantener el ciclo de la vida. La materia orgánica es reciclada en los suelos, mediante la actividad biológica de organismos sintetizadores, luego es reincorporada por las plantas en forma de nutrientes y minerales por medio de las raíces que los absorben y allí se transforman de nuevo en alimento para los organismos heterótrofos que dependen de esta dinámica natural para obtener la energía necesaria y cumplir con su proceso vital.

En los ecosistemas urbanos, no es tan evidente el recorrido cíclico de la materia orgánica, por un lado los organismos productores como las plantas, árboles y pastos generan una fracción que no siempre es utilizada por los organismos consumidores, además como la mayor parte de la masa estructural de la ciudad es abiótica, integrada por edificaciones, suelo pavimentado y jardines asfaltados; esta situación impide que la materia vegetal pueda descomponerse naturalmente en el suelo que perece, por ello es necesario recolectarla y disponerla en lugares adaptados, donde se inducen procesos controlados con factores ambientalmente regulados para que se genere una descomposición, obteniendo finalmente un sustrato ecológicamente estable; material que cumple con las características apropiadas para ser utilizado como abono y de esta forma retornar a los suelos del ecosistema urbano.

Por otro lado, una gran fracción de la materia orgánica en las ciudades es generada en el proceso de alimentación del ser humano, la especie dominante del ecosistema

urbano, el cual obtiene los alimentos del ecosistema agrícola, los procesa, consume y produce residuos, estos últimos representan ocasionalmente una gran problemática pues su ciclo comúnmente termina en los rellenos sanitarios donde se descomponen junto con un sin número de residuos sólidos y el material resultante no es apropiado ni ecológicamente estable para reincorporarlo en los suelos, pues en su composición ya están incluidos otros elementos como metales pesados y compuestos tóxicos que pueden afectar la vida de otros organismos y del suelo mismo.

La Universidad de Antioquia es un subsistema del ecosistema urbano y no alejado de las dinámicas de generación de residuos del sistema que lo contiene, por tanto requiere hacer un manejo de la gran cantidad de materia orgánica que produce la vegetación y la población universitaria en el proceso de alimentación. Una función recicladora se incluye dentro del ecosistema universitario, pues evitando enviar los residuos orgánicos al relleno sanitario se hace un tratamiento en la fuente que permite reincorporar la materia orgánica en las zonas verdes y jardines de la Universidad. El proceso de reciclaje es llevado a cabo en el centro de acopio de residuos y planta de compostaje, lugar que cuenta con la infraestructura adecuada para disponer, tratar y aprovechar los residuos orgánicos que se generan. Aun cuando la Universidad aúne sus esfuerzos para procesar estos residuos y minimizar los impactos ambientales en el ecosistema urbano, la planta de tratamiento no alcanza a digerir la gran cantidad de residuos que allí se generan diariamente y algunas cantidades, especialmente de hojarasca, son necesarias acumular, apilar y conservar mientras el tiempo permite evacuar y transformar la materia orgánica en un sustrato aprovechable.

Aunque las acciones se forjen con buenas intenciones, es necesario reflexionar en cómo se están manejando los residuos orgánicos en el momento, qué capacidad tiene la planta de compostaje de tratar y cuánto ha aumentado la población universitaria y de manera proporcional cuánto ha aumentado la cantidad de residuos orgánicos que se están generando y así poder definir qué otros métodos son necesarios implementar para hacer más eficiente en términos socioeconómicos y ambientales, el proceso de reciclaje de la materia orgánica en la fuente.

En este sentido, la presente investigación propone un método alternativo para digerir los residuos orgánicos que se generan en la Universidad de Antioquia, un método que brinda beneficios ecosistémicos, reduce la contaminación y los impactos negativos asociados a la descomposición de los residuos orgánicos, no incluye reformas en la infraestructura ni arduas jornadas de trabajo o monitoreo, permite evacuar y reciclar totalmente la materia orgánica que se produce, se acopla al ecosistema de manera natural sin causar fuertes perturbaciones y protege la salud pública.

Ante ello, se evalúa el uso de las Pacas Biodigestoras como un método alternativo para la descomposición de los residuos orgánicos, el cual funciona en armonía con las leyes de la naturaleza y está basado en un proceso de digestión anaeróbica donde el mecanismo de operación es a través de la fermentación en estado sólido, en el cual se descontaminan y sanean los residuos y se evita la contaminación del ambiente. De esta manera, se buscó comprender y demostrar cómo el funcionamiento de las Pacas Biodigestoras puede servir para hacer un tratamiento ecológico y complementario de los residuos orgánicos que son generados en el campus principal de la Universidad de Antioquia.

Para cumplir el objetivo de la investigación y lograr consolidar y demostrar la viabilidad ambiental de las Pacas Biodigestoras como un proceso de tratamiento de los residuos in situ y autónomo, el cual integra la gestión, reducción y reciclaje de los residuos orgánicos, le apuesta al uso de la biotecnología y los tratamientos saludables, fue necesario comprender desde la parametrización fisicoquímica de las Pacas Biodigestoras, cómo es el funcionamiento y el proceso de digestión de los residuos, cuál es la cantidad de residuos orgánicos que procesa, en qué tiempo y cuánta es la cantidad de materia orgánica que produce, preguntas que se esclarecerán más adelante.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Evaluar la tecnología de las Pacas Biodigestoras en el proceso de digestión de los residuos orgánicos de la Universidad de Antioquia.

2.2. Objetivos Específicos

Conocer la cantidad de residuos orgánicos que se generan en el Campus Universitario y la capacidad de compostación de la Planta de Tratamiento de Residuos de la Universidad de Antioquia.

Cuantificar la cantidad de residuos orgánicos que procesa la Paca Biodigestora en relación con la cantidad de residuos orgánicos que se generan en la Universidad de Antioquia y qué cantidad de espacio se debería usar para procesarlos.

Determinar los parámetros fisicoquímicos que intervienen en el proceso de descomposición de los residuos orgánicos de la Universidad de Antioquia mediante la tecnología de las Pacas Biodigestoras.

Consolidar y demostrar la viabilidad ambiental de las Pacas Biodigestoras para aprovechar y reciclar los residuos orgánicos generados por la comunidad universitaria de la Universidad de Antioquia.

3. Planteamiento del problema

La materia orgánica transformada o no, es uno de los bienes más preciados pues es ella la que garantiza que se conserven y reintegren los nutrientes en los suelos y brinda a los organismos de este ecosistema el alimento necesario para desarrollar su metabolismo, crecimiento y reproducción. La carencia de materia orgánica afecta no solo la estructura sino también la fertilidad de los suelos, puesto que reintegrarla brinda tanto beneficios ecosistémicos como la posibilidad de evacuar la cantidad inmensurable de material orgánico que generan las actividades humanas en su diario vivir.

La generación de material orgánico se ha convertido entonces en una problemática que traza grandes retos en las comunidades humanas, especialmente en los ecosistemas urbanos, primero porque no hacer nada al respecto desataría una indiferencia convirtiendo un recurso en residuo, enviando la materia prima a los rellenos sanitarios evitando cualquier aprovechamiento y generando acumulación e impactos negativos en el ambiente de otras localidades; segundo, hacer algo pero de manera incompleta o no correctamente, causaría problemáticas ambientales y de salud pública en el lugar de tratamiento sea por generación de malos olores, proliferación de plagas y vectores, afectaciones en el suelo, el agua y la atmósfera; tercero, realizar una intervención correcta teniendo en cuenta los factores del entorno, las leyes de la naturaleza y las limitaciones humanas posibilitaría entonces generar una solución holística de la problemática y brindar una alternativa que no solo pueda beneficiar al ecosistema sino también a la salud de las personas.

Qué hacer con la materia orgánica ha sido una pregunta que ha acompañado por mucho tiempo la historia de la humanidad, en especial a aquellas comunidades que comenzaron a asentarse en pequeñas urbes y el crecimiento de la población no solo demandó más territorio, sino que incrementó la generación de residuos en el proceso de alimentación. Incontables alternativas se han aplicado para lograr su disminución o al menos no tener que convivir con ella ya que por referirse a materia orgánica y debido a su disposición incontrolada ha sido asociada a la pudrición y por ende a la generación de malos olores y vectores. Quemarla, apilarla o enterrarla son entre otras algunas de las alternativas que se optan para manejar la materia orgánica, que siendo altamente perjudiciales para el ecosistema por la contaminación que causan, solo representan una solución sintomática ante la generación de residuos orgánicos de las comunidades humanas.

Actualmente, una de las formas menos apropiadas para deshacerse de la materia orgánica es arrojándola a los cestos de basura y enviándola a los rellenos sanitarios; se conoce que allí sufren un proceso de descomposición en medio de todo tipo de residuos sólidos generando gases tóxicos, lixiviados y dejando como producto

suelos contaminados, además de un sustrato que al ser utilizado sin previa estabilización puede convertirse en un pasivo ambiental, el cual requerirá de mucha energía y tiempo para poder ser aprovechado en la naturaleza. Por otro lado, separar los restos orgánicos de los demás residuos sólidos y compostarlos, ha sido uno de los métodos más aplicados en la actualidad, que no siendo el más eficiente en tiempo y espacio ha permitido de alguna forma reciclar el material orgánico y convertirlo en un sustrato estable y adecuado que puede ser retornado a los suelos para restituir la actividad biológica y mejorar su fertilidad.

Cuando el material orgánico es dispuesto incorrectamente o se somete a un tratamiento incompleto, sufre un proceso de descomposición que pone en riesgo la salud del ambiente y la calidad de vida de las personas. El mal manejo está asociado a la producción de malos olores y gases tóxicos, la proliferación de plagas y la contaminación de los recursos naturales. En la actualidad, una serie de métodos para el tratamiento y estabilización de la materia orgánica se han popularizado y se tienen aprobados con gran aceptación, aunque la evidencia muestra que algunos de ellos no logran ser completamente saludables, eficientes y amigables con el planeta Tierra, pues los impactos negativos que causan en el ambiente debido a su mala gestión o control resultan ser altamente perjudiciales, en términos del manejo dado y no del proceso per se.

Sin duda alguna, la disposición, el tratamiento y el aprovechamiento de la materia orgánica, es aún una problemática que no se ha logrado solucionar y que siendo estudiada por amplias ramas del conocimiento científico y tradicional se ha podido vislumbrar la gran importancia que tiene para conservar la productividad y la actividad biológica de los suelos. Las urbes son entonces como un agujero negro de la materia orgánica pues saliendo de los campos en forma de alimento se transforma en las ciudades en nutrimentos y energía para el ser humano y desaparece de la naturaleza, pues a ella nunca retorna como nutriente, sino como problema que no solo le conlleva tiempo y energía a los ecosistemas para solucionar, sino que también desata afectaciones secundarias a la biodiversidad de fauna y flora, la calidad de los recursos hídricos, los suelos y la atmósfera.

Con la intención de encontrar una solución integral al problema de la generación de residuos orgánicos y su manejo anacrónico se empezó a estudiar y aplicar en la ciudad de Medellín y sus corregimientos un método alternativo para la disposición, tratamiento y aprovechamiento de todo tipo de excedentes biodegradables, en manos del tecnólogo forestal Guillermo Silva el cual ha impulsado con ahínco el método que el mismo nombra "Pacas Digestoras Silva". Y que describen como un recurso tecnológico y ecológico que permite transformar el material biodegradable mediante la acción de organismos descomponedores en un sustrato estable que puede ser aprovechado como abono orgánico. Además, es un recurso limpio, sano y amable para proteger la salud de la comunidad y su ambiente (Silva, 2012).

Reconociendo los beneficios de las Pacas Digestoras Silva y sus ventajas en el manejo ecológico de los residuos orgánicos, desde el año 2013 luego de que Guillermo Silva diera a conocer al Grupo de Investigación *Aliados con el Planeta* dicho método, se puso en práctica en la Universidad de Antioquia esta tecnología, con el objetivo de ofrecer y aplicar un proceso alternativo y complementario para la digestión de los residuos orgánicos, el cual actúa conforme a las leyes de la naturaleza, se desarrolla sin generar perturbaciones en el entorno y protege la salud de las personas. La aplicación se llevó a cabo por medio del proyecto llamado Pacas Biodigestoras, debido a que es menester considerar que lo que se crea con cada paca, no solo representa una estrategia para evacuar los residuos orgánicos que son generados por la comunidad, sino que se ensambla un micro-ecosistema donde una infinidad de interacciones físicas, químicas y biológicas reciclan de manera natural la materia orgánica dejando como producto un sustrato rico en nutrientes.

Aunque la Universidad de Antioquia cuenta desde el año 2004 con un centro de acopio de los residuos (ver imagen 1.), donde se incluye una zona de compostaje en la cual se hace un manejo de los residuos orgánicos mediante la separación, disposición, tratamiento y aprovechamiento; las altas cantidades que se generan actualmente, supera la capacidad de carga de los birreactores para la transformación y el espacio para la disposición, lo que conlleva a que se deban apilar y también, acumular en bolsas los residuos orgánicos, en especial la hojarasca recolectada de los árboles y la poda de los jardines y zonas verdes, esta situación no solo genera afectaciones en el paisaje, sino la presencia de malos olores y la proliferación de plagas pues un manejo incompleto o incorrecto de la materia orgánica como se mencionó al principio, estará asociada siempre en tanto haya presencia de oxígeno, a la pudrición y la generación de impactos negativos en el ambiente.



Imagen 1. Ubicación Centro de acopio de residuos de la Universidad de Antioquia. Tomada de Google Earth.

Por consiguiente, con el objetivo último de consolidar y demostrar la viabilidad ambiental de las Pacas Biodigestoras para aprovechar y reciclar los residuos orgánicos que se generan en la Universidad de Antioquia, esta investigación busca evaluar la mencionada biotecnología en el proceso de digestión de los residuos orgánicos y determinar mediante el análisis de los parámetros fisicoquímicos cómo es el proceso de descomposición, qué cantidad de residuos orgánicos se logran digerir, qué cantidad de espacio se utiliza, qué cantidad de abono orgánico se puede aprovechar y así poder responder a la pregunta de cómo el uso de las Pacas Biodigestoras puede optimizar y complementar el manejo integral de los residuos en el campus universitario.



4. Marco contextual

La fase experimental de la presente investigación se llevó a cabo en el Campus principal de la Universidad de Antioquia (Ciudad Universitaria), el cual está ubicado según el Sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge en la región biogeografía bosque húmedo Premontano (bh-PM) adjudicándole las características de un ecosistema apto para el desarrollo de biodiversidad faunística y florística y un espacio propicio para el asentamiento y tránsito de especies. Estas características permiten la integración del territorio forestal de la Universidad dentro de redes ecológicas o corredores biológicos conformado por ecosistemas estratégicos y cinturones vegetales dentro del territorio municipal, los cuales posibilitan el desplazamiento, refugio, alimentación y protección de especies animales (entre aves, mamíferos y reptiles), la conformación de nichos ecológicos y el sostenimiento de la biodiversidad.



Imagen 2. Ubicación del campus principal de Universidad de Antioquia en Medellín, Colombia. Tomada de Google Earth.

Geográficamente, el campus universitario está ubicado en la ciudad de Medellín, capital del municipio de Antioquia, tal como muestra la imagen 2. Se localiza concretamente entre el paralelo 6°16' 3.07" de latitud Norte y el meridiano 75°34' 8.41" de longitud Oeste de Greenwich, el cual se encuentra en el costado occidental del Río Aburrá, gran afluente que atraviesa la subregión del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Aunque la Universidad esté rodeada de un extenso territorio urbano, como se observa en la imagen 3., representa una arteria pulmonar que brinda beneficios ecosistémicos a la ciudad, favoreciendo su oxigenación y regulación del clima por las capturas de dióxido de carbono que realizan los árboles que allí se albergan.



Imagen 3. Mapa límites geográficos del campus principal de la Universidad de Antioquia. Tomada de Google Earth.

El campus principal de la Universidad de Antioquia cuenta con un área total de 237.498 m² (ver imagen 4.), la cual está integrada por áreas con zonas construidas (156.594 m²) y áreas con zonas verdes (80.904 m²). La primera, alberga edificaciones académicas y administrativas, vías peatonal y vehicular, unidades deportivas, Museo Universitario, Biblioteca Central, Teatro Camilo Torres, plazoletas, esculturas y porterías; y la segunda incluye las zonas con árboles o jardines, los cuales aportan gran cantidad de materia orgánica vegetal entre hojarasca, chamizos, poda de pasto y plantas de jardines.



**Imagen 4. Imagen Satelital del campus principal de la Universidad de Antioquia.
Tomada de Google Earth.**

Este gran compendio universitario representa un servicio ecosistémico para el contexto urbano, invaluable, en términos del bienestar humano y del sostenimiento de la biodiversidad. Además de significar para quienes lo habitan, el espacio propicio para crecer como personas, formarse como profesionales y construir en sociedad; condición que implica conservar, proteger y asegurar que futuras generaciones puedan aprovechar y disfrutar este espacio en las mismas condiciones como las generaciones presentes lo han logrado hacer. En consecuencia, es menester promulgar e incentivar la idea de construir un ecosistema universitario sostenible y ecológico para garantizar el desarrollo de un ambiente saludable y habitable.

5. Marco teórico

5.1. El ciclo de los residuos orgánicos en la Universidad

El ecosistema universitario, al igual que los demás ecosistemas de la naturaleza, está conformado por componentes biológicos u organismos vivos (suelo, animales, vegetales y microorganismos) y la materia orgánica que representan la biocenosis del ecosistema. También, está constituido por los componentes inertes (atmósfera, agua, infraestructura, materia inorgánica y energía) que a su vez comprenden el biotopo, el ambiente de vida o espacio vital con el que interactúan las comunidades biológicas.

Un ecosistema, más que una unidad espacial concreta, es un nivel de organización, constituido por especies biológicas y componentes inertes interrelacionados, en el que se establecen intercambios de materia (ciclos) y de energía (flujos) (Mancha, 2016). En este sentido, la universidad un ecosistema en sí mismo, no es más que un subsistema del ecosistema urbano, que a su vez es un subsistema del ecosistema municipal, departamental, nacional y continental, todos integrados dentro de la Ecosfera, el gran ecosistema que alberga la vida en el planeta Tierra. Cada ecosistema en particular, representa una gran complejidad de interacciones, dónde su equilibrio requiere la producción continua de entradas y salidas de materia y energía.

La materia y la energía circulan en un ecosistema mediante la interacción de cambios físicos y bioquímicos, que definidos por las cadenas tróficas y alimenticias van de un organismo a otro perpetuando el ciclo de la vida. En un ecosistema la materia no sale en el mismo estado en el que ingresa, pues ya dentro el sistema y dando garantía de la ley de la conservación de la materia, esta es transformada por el uso y el aprovechamiento, generando luego productos que pueden ser, bien un residuo o un recurso.

En este sentido, en el ecosistema universitario las entradas de materia orgánica, en específico, están determinadas por las comunidades biológicas que lo integran. Por un lado, los seres humanos en su dinámica de vida requieren la ingesta de alimentos cocinados o no, como fuente de energía. Alimentos que provienen de la actividad y producción de los ecosistemas agrícolas y luego en las cafeterías son transformados y ofertados para ser ingeridos por las comunidad universitaria. Del proceso de transformación quedan residuos orgánicos (biodegradables)¹, los cuales deben ser estratégicamente separados de otros residuos sólidos (no biodegradables)² para

¹ **Residuos biodegradables:** Son aquellos residuos que pueden ser degradados biológicamente por la acción de microorganismos, además de tener la facultad de integrarse fácilmente en el ambiente.

² **Residuos no biodegradables:** Son aquellos residuos que no pueden ser degradados biológicamente y se acumulan en el ambiente debido a que requieren cientos de años para integrarse de nuevo a la naturaleza.

continuar su ciclo y ser usado de nuevo como fuente de energía para algunos organismos. Por otro lado, la comunidad vegetal desarrollada en las zonas verdes de la Universidad, también son causa de otra entrada de materia orgánica y debido a la generación de espacios estéticamente apropiados, la materia que cumple su ciclo de vida en la planta y finalmente cae al suelo es recolectada para luego ser transformada, de manera controlada, en un compuesto biológicamente estable y un sustrato rico en nutrientes.

En este sentido, el ciclo de los residuos orgánicos dentro de la ciudad universitaria comienza en las zonas verdes en forma de hojarasca, chamizos, poda de plantas y césped; y en las cafeterías como restos de frutas, verduras, cascara, semillas, sobras y alimentos cocinados. El resto de la comunidad universitaria que tiene como necesidad disponer correctamente el residuo orgánico que genera, aún no ejerce su responsabilidad activamente debido a que los puntos ecológicos (ver imagen 5.), los cuales son canecas o cestos de basura dispuestos para la separación de los residuos, no cuentan con un espacio apto para hacer una separación oportuna. Tal situación genera que una fracción de los residuos orgánicos que se producen dentro del ecosistema universitario no es reciclada dentro del sistema, sino que como residuos ordinarios son llevados al Relleno Sanitario la Pradera³, donde se realiza la disposición final. Lo que significa, en términos de conservación, que hay una pérdida de materia la cual está entrando a la Universidad pero no está siendo aprovechada dentro del ecosistema mismo como un recurso, sino que es tratada como un residuo que ya no tiene utilidad.



Imagen 5. Punto Ecológico de la Universidad de Antioquia.

Recipiente blanco para el vidrio; recipiente verde para ordinarios no reciclables y recipiente azul para plásticos.

³ El Relleno Sanitario La Pradera, es el lugar de disposición final de los residuos sólidos del Municipio de Medellín, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y algunas localidades vecinas. Por medio del cual se realiza un manejo integrado de residuos sólidos intermunicipal.

Luego de que los residuos orgánicos son debidamente separados y recolectados, son transportados, por los operarios y el personal que realiza los servicios de recolección interno, al centro de acopio de los residuos de la Universidad, por medio de contenedores de basura, para su disposición temporal y adecuado tratamiento.



Imagen 6. Centro de acopio y disposición temporal de los residuos de la Universidad de Antioquia.

El centro de acopio y disposición temporal de los residuos conocido como Curvita de Rodas, es un lugar en la Universidad de Antioquia ubicado en el extremo noroccidental del campus universitario (ver imagen 6. y 7.), el cual fue construido desde el año 2004 para llevar a cabo la disposición temporal de los residuos, la separación en la fuente y el compostaje de la materia orgánica generada en la universidad.



Imagen 7. Centro de acopio y disposición temporal de residuos de la Universidad.

El centro de acopio cuenta con un zona de compostaje, donde se tienen 4 bioreactores (ver imagen 8.a.) en los cuales se disponen los residuos orgánicos para su biodegradación controlada, una picadora (ver imagen 8.b.) y un área para la acumulación y disposición del material transformado (compost) (ver imagen 8.c.) y el material sin transformar (hojarasca) (ver imagen 8.d.).



a. Bioreactores



b. Máquina picadora



c. Pilas del material transformado



d. Pilas del material sin transformar

Imagen 8. Áreas del centro de acopio para el proceso de compostaje.

Luego de que los residuos orgánicos llegan al centro de acopio, una fracción es apilada y la otra es molida. La fracción que se apila se deja descomponer naturalmente sin aplicar un debido monitoreo y por ende este proceso de descomposición tarda más tiempo y presenta mayores factores de riesgo por contaminación en el entorno circundante. Tal estrategia es utilizada debido a que el espacio disponible en los bioreactores no alcanza a almacenar la cantidad de materia orgánica que se genera diariamente. Por otro lado, los residuos de las cafeterías junto con algunas porciones de hojarasca, son nuevamente seleccionados para extraer cualquier otro material inorgánico y así poderse moler en la picadora. El material molido se dispone en los bioreactores y se inocula con bacterias descomponedoras para propiciar y acelerar la degradación del material, mediante el proceso que se conoce como compostaje.

El compostaje, se refiere a un método de tratamiento de los residuos orgánicos que funciona mediante una digestión aeróbica, el cual debe contener porciones adecuadas de oxígeno para que se garantice la reproducción y el metabolismo de los microorganismos descomponedores. Es por ello, que el material en los bioreactores debe ser volteado periódicamente, para ofrecer y garantizar las condiciones óptimas de oxigenación, humedad, pH y temperatura. Al cabo de unos cuatro meses, el material es sacado de los bioreactores y ya transformado es de nuevo apilado.

En el proceso de transformación, por medio del compostaje de la materia orgánica, resultan tres productos en estado sólido, líquido y gaseoso. El sólido se refiere al abono orgánico o compost, sustrato transformado que es aplicado e incluido de nuevo en el ciclo de vida de los suelos de la ciudad universitaria y sus otras sedes. El líquido resulta en forma de lixiviado, el cual es el producto de la deshidratación de la materia orgánica en descomposición, una disolución de nutrientes que desafortunadamente en la Universidad no se aprovechan y se vierte como residuos por el sistema de alcantarillado público. Finalmente, el gaseoso es una fracción que se extingue y esparce en la atmósfera en forma de dióxido de carbono, vapor de agua y metano.

De esta manera se ha vislumbrado cómo el ciclo de la materia orgánica en el ecosistema universitario comprende un manejo integrado de los residuos orgánicos, que en función del valioso recurso que representan, se trata y usan como materia prima, se reciclan para aprovecharse y generar un acondicionador de las zonas verdes, una fuente de nutrientes para los suelos y alimento para las plantas, lo cual se traduce en un dinámico ciclo de vida.

5.2. De dónde surge la idea de las Pacas Biodigestoras

El origen de las ideas, junto a la pregunta: de dónde surgen las ideas, ha sido causa de muchos estudios científicos que tratan de descubrir los misterios del cerebro.

Según el diccionario de la Real Academia Española, la palabra idea contiene las siguientes acepciones: primero y más obvio de los actos del entendimiento, que se limita al simple conocimiento de algo; imagen o representación que del objeto percibido queda en la mente; conocimiento puro, racional, debido a las naturales condiciones del entendimiento humano; plan y disposición que se ordena en la imaginación para la formación de una obra; intención de hacer algo; concepto, opinión o juicio formado de alguien o algo; ingenio para disponer, inventar y trazar una cosa.

Lo único cierto ante tales acepciones es que todos los seres humanos tienen la capacidad de concebir una idea, ya sea que se obtenga por generación espontánea o por la búsqueda perenne e incesante, siempre existirá la intención de encontrarla o descubrirla. ¡Tengo una idea! Puede ser una expresión muy normal en el diario vivir, pues hay un banco de ideas que salen constantemente ante la estimulación de los sentidos, pero cuando la búsqueda es ardua, tener una idea podrá causar una gran explosión de endorfina y serotonina, un despliegue de emociones que al igual que a Arquímedes de Siracusa permita exclamar ¡Eureka!⁴

Las ideas son motivadas y estimuladas por un problema, una necesidad o una situación particular. Tan simple como comerse un banano y pensar: ¿qué hacer con la cáscara?, pero tan complejo como incitar a la idea de: ¿qué hacer con los residuos orgánicos de una comunidad?, ¿cómo reciclar la materia orgánica? y ¿cómo producir abono orgánico?

En el año 2013, el grupo de Investigación *Aliados con el Planeta*, habló por primera vez en la Universidad de Antioquia de pacas, una idea del tecnólogo forestal Guillermo Silva que el mismo nombra: Pacas Digestoras Silva. Cuenta Guillermo que tal idea surgió de la necesidad de tratar y manejar los residuos orgánicos del sector industrial, en el cual se disponía de poco espacio en comparación con las grandes cantidades que se generaban. Con tal condicionante, comienza a ensamblar y perfeccionar la idea de disponer los residuos sin necesidad de ser apilados y a favor de esto descubre que con la compactación se reduce gran cantidad de espacio e imitando una paca de heno, terminó formando una paca de restos orgánicos.

⁴ La historia cuenta que después de una perseverante búsqueda, Arquímedes exclamo esta palabra tras descubrir que el volumen de agua que asciende es igual al volumen del cuerpo sumergido. Esto le llevó a la solución del problema de medir el volumen de cuerpos irregulares y le permitió saber si la corona del rey Hierón II estaba hecha de oro puro al calcular su densidad a partir de la masa ya conocida. Este hallazgo lo habría realizado mientras se encontraba sumergido en la bañera y tal fue su alegría que salió corriendo a las calles de Siracusa desnudo gritando ¡Eureka! ('¡Lo he descubierto!'). (Milhaud, 2011)

Hoy en día, las Pacas Digestoras Silva, han inspirado estudios de investigación en las áreas de salud pública e ingeniería ambiental, en búsqueda de una técnica de descomposición de residuos forestales y heces de establo en el Centro Educativo Conquistadores de Medellín (Ardila & Cano, 2011), una aplicación para el tratamiento sano de hojarasca y residuos orgánicos para restaurar las zonas verdes en la ciudadela central de la Universidad de Antioquia (Arteaga & Castaño, 2015) y en comparación con el compostaje, se incluyó en la evaluación de dos sistemas de degradación biológica en zona rural del corregimiento San Antonio de Prado (Posada, 2015).

Las pacas son un proceso biotecnológico que puede solucionar el problema de los residuos orgánicos a nivel mundial; la experiencia y la investigación brindarán al proceso de las pacas una acreditación como método económicamente viable y ecológicamente eficiente.

Aún así, Guillermo habla de su dificultad para posicionar dicho proceso dentro de las prácticas establecidas para el manejo de los residuos orgánicos en la ciudad, pues lastimosamente una idea neonata en ocasiones no tiene adjudicada la certeza y la viabilidad científica que la haga ser una opción que se reconozca y se utilice continuamente para el tratamiento, disposición y aprovechamiento de los residuos orgánicos. De igual forma, las ideas se convierten en acciones y evolucionan en intenciones y por medio de la divulgación y la capacitación se podrá lograr que las pacas sean una alternativa para la digestión de los residuos orgánicos generados en instituciones, municipios, unidades residenciales y demás áreas urbanas y rurales, donde estos sean un problema ambiental.

En este sentido, la sumatoria de acciones, en los pequeños entornos donde se aplique y socialice el método de las Pacas Digestoras Silva, pondrá a disposición de la humanidad alternativas para la degradación biológica y ecológica de la materia orgánica, mediante opciones que como una biocenosis, imiten procesos de la naturaleza para resolver problemas de origen antrópico.

Tales acciones se han visto aplicadas en lugares como el Colegio Conquistadores de Aguas Frías en Medellín, el Liceo Santa Elena, la Escuela de Piedra Gorda de Santa Elena, la Asociación de Tierreros de Santa Elena, el Vivero de Corantioquia en Piedras Blancas, el Aula Ambiental Libélula en Sabaneta, la Ecohuerta del Barrio Belén en Medellín, la Granja Agroecológica Tuancí en Montelibano-Córdoba, la Planta de beneficio de cerdos: Frigo Porcinos en Bello-Antioquia, el Aula Cerro Asomadera en Medellín, la Granja Agroecológica Cómbita en Boyacá, la Mina Cerro Matoso (Proyecto en estudio) en Montelibano-Córdoba (Arteaga & Castaño, 2015), una finca familiar en Angostura-Antioquia, el Parque Norte de Medellín, una finca en zona rural del corregimiento San Antonio de Prado de Medellín, la Universidad de Antioquia y la Universidad Nacional Sede Medellín.

No hay apuro ni premura en el tiempo, cuando tanto ideas como acciones se suman en intenciones que permitan convivir en un ambiente sano, donde el cuidado por los recursos naturales y la protección de la salud de las personas sea un pilar, junto con la construcción de “oportunidades de educación ambiental participativa, integración de la comunidad y empleo digno” tal como afirma Guillermo Silva, lo cual es una de las bondades que directamente se tejen cuando una paca es ensamblada.

5.3. Las Pacas Biodigestoras y los ejes misionales de la Universidad

La Universidad de Antioquia influye en la sociedad a través de sus tres ejes misionales: Investigación, Docencia y Extensión. La Investigación y la Docencia se construyen desde el fluir de la vida académica y se tejen como pilares junto con la Extensión para promover el buen vivir y la transformación de la vida en sociedad.

En las aulas se propician experiencias educativas que se inspiran en la vocación y el compromiso con las comunidades a través de una voz de esperanza que pregona una sociedad diferente, sensible y consciente. Una invitación a asumir responsabilidades y compromisos como especie y a plantear caminos diferentes pensados en términos de la investigación, ya que necesitamos otras formas de convivir en armonía con la Naturaleza.

En este sentido, se incentivan desde la docencia estrategias de enseñanza que acercan a los estudiantes al conocimiento científico, debido a que por medio del aprender haciendo se verifican y desaprenden costumbres o hábitos, se validan procesos y se transforman metodologías, las cuales permiten forjar seres íntegros que no solo evolucionen en conocimiento y entendimiento, sino también como personas críticas y propositivas. Además, se brinda la posibilidad, desde el inicio de la carrera profesional, de identificar situaciones problema, analizar la incertidumbre y proponer posibles soluciones que se construyan desde el pensamiento sistémico incluyendo una visión holística y compleja.

Paralelo al desarrollo de la presente investigación, se planteó con el apoyo de la ingeniera sanitaria y docente de la Escuela Ambiental de la Facultad de Ingeniería, Beatriz Wills, el Proyecto de Aula: Pacas Biodigestoras 2015-2 como una estrategia evaluativa del curso Introducción a la Ingeniería Sanitaria y un proceso que permitió vislumbrar como el método de las pacas abarca no solo la solución de problemas ambientales sino también el desarrollo de herramientas pedagógicas y educativas direccionadas hacia el aprender por medio de la experimentación.

De este modo, el proyecto pretendió introducir a los estudiantes en su que hacer como ingenieros sanitarios y acercarlos a problemáticas que desde su profesión deberán afrontar como es la Gestión Integral de los Residuos, una temática de pocas certezas que aún implica se le dediquen estudios e investigaciones, pues la humanidad no ha logrado darle una solución apropiada de manera que su manejo

cause la menor cantidad de perturbaciones en los ecosistemas, en especial la gran fracción que representa los residuos orgánicos, que por sus características pueden convertirse en un factor de riesgo.

La metodología usada para implementar el Proyecto de Aula fue mediante el trabajo en grupos, una estrategia que pone a prueba la cooperación en el trabajo colectivo. Se propusieron cuatro grupos, cada uno con un objeto de estudio diferente y los estudiantes pudieron elegir el tema de su preferencia, inscribiéndose voluntariamente en alguno de los equipos que estaban coordinados, cada uno por dos estudiantes, ya avanzados en las carreras de ingeniería ambiental e ingeniería sanitaria e integrantes del Grupo de Investigación *Aliados con el Planeta*.

Los temas de trabajo y objetivos a resolver estaban directamente relacionados con la función y caracterización de las pacas biodigestoras, desarrollando desde su proceso de ensamblaje y durante su proceso de digestión, un monitoreo guiado por la construcción de una bitácora en la cual se debía consignar las tareas llevadas a cabo, las preguntas, cuestionamientos o dificultades generadas, los análisis, las deducciones, los procesos, datos o hallazgos obtenidos y un registro fotográfico con el que se pudiera documentar todo lo observado.

Cada grupo según su temática, desarrolló una metodología de investigación, gestionó sus fuentes de apoyo y asesorías:

Grupo Organismos, objetivos: observar, identificar y documentar la aparición en el tiempo de los macro y mesoorganismos y caracterizarlos según su función en descomponedores y depredadores, durante la actividad de descomposición de los residuos orgánicos compactados.

Grupo Sucesiones Ecológicas, objetivos: observar, identificar, clasificar y documentar la aparición natural o colonización de las especies de flora, registrando su tiempo de aparición y permanencia.

Grupo Parametrización Físicoquímica, objetivos: documentar, medir y monitorear las variaciones de la temperatura y la altura de la paca durante el tiempo de descomposición de los residuos orgánicos.

Grupo Huerta Urbana, objetivos: planear y desarrollar una siembra de vegetales sobre la paca, corroborar que es posible relacionarse de manera diferente con los residuos, documentar y observar la capacidad de adaptación de las plantas y las semillas en el abono de las Pacas Biodigestoras.

Los estudiantes recibieron orientación y acompañamiento desde la razón de ser y la forma de ensamblar la Paca Biodigestora, igualmente para el monitoreo; al final del proceso, se realizó una socialización donde ellos expusieron los datos obtenidos y el análisis de dichos resultados según la temática investigada, al igual que su opinión y

observaciones de la experiencia de investigación llevada a cabo, tal documentación se expone en el Anexo 1.

5.4. La materia orgánica: Un recurso o un residuo

La materia orgánica se encuentra clasificada en el gran conjunto de materiales biodegradables de procedencia biológica, esto significa que son elementos cuya generación fue labrada por la naturaleza y del mismo modo su transformación es causada por la acción de un sinnúmero de organismos que se han desarrollado y adaptado para encargarse de la descomposición.

Todo ser vivo es generador de materia orgánica, los cambios bioquímicos que se producen constantemente en las células de un organismo generan productos, por ello la materia orgánica está compuesta generalmente de restos vegetales y animales, estos a su vez están constituidos por celulosa, carbohidratos, lignina y proteínas; complejas moléculas químicas formadas por enlaces de carbono con elementos como el nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, fósforo entre otros elementos, en su estado natural.

La materia orgánica según su estado puede clasificarse en no transformada, semitransformada o transformada. La primera comprende la biomasa vegetal, animal y microbiana en estado fresco, la segunda, está conformada por restos orgánicos en proceso de transformación o descomposición y la tercera se refiere a la estabilización y maduración del material, donde ya ha sufrido los cambios bioquímicos necesarios para poder ser asimilada de nuevo por las plantas.

Para analizar la materia orgánica a la luz del reconocimiento como recurso o residuo, primero será necesario esclarecer etimológicamente a que se refieren tales concepciones.

Según la Real Academia Española (RAE) un recurso es una fuente o suministro del cual se produce un beneficio, son aquellos elementos que pueden ser utilizados para satisfacer las necesidades de alguna sociedad, muy acorde con lo que plantea la biología y la ecología, donde un recurso es la fuente de materia o energía mediante la cual un organismo vivo puede satisfacer sus necesidades.

En el caso de residuo, que es definido por la RAE como la parte o porción que queda de un todo, o aquello que resulta de la descomposición o destrucción de algo y también el material que queda como inservible después de haber realizado un trabajo u operación.

Desde la normatividad colombiana, se ha establecido una igualdad entre los términos residuo y desecho para efectos de facilitar el control de la gestión y su manejo. (MAVDT, 2008). Los cuales son definidos como cualquier objeto, material,

sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, o de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final. Los residuos sólidos se dividen en aprovechables y no aprovechables. Igualmente se consideran como residuos sólidos aquellos provenientes del barrido y la limpieza de áreas y vías públicas, corte de césped y poda de árboles (Decreto 1713, 2002 y Decreto 838, 2005).

Ante esta dualidad de términos, la caracterización de la materia orgánica como residuo o recurso, dependerá intrínsecamente de la utilidad o el beneficio que ésta pueda presentar, no solo para el ser humano sino también para los ecosistemas. Claramente, considerarla un residuo estará ligado a que se piense en un material que resulta como producto de un proceso, pero que no necesariamente queda inservible o sin valor. El problema está, según lo visto en las distintas definiciones, en que este término es propiamente subjetivo y quien decide si un determinado objeto sigue siendo útil o no es su propietario (MAVDT, 2007).

Cuando se mira desde el concepto de recurso, se da por entendido que es un elemento que ya tuvo un proceso biológico inicial, pero que en su nuevo estado puede ser aprovechado y utilizado para generar un beneficio o satisfacer una necesidad. En este sentido, la normativa tiene una aproximación a la idea de recurso y mediante la reclasificación de los residuos considera como un Residuo Sólido Aprovechable a cualquier material, objeto, sustancia o elemento que no tiene valor de uso directo o indirecto para quien lo genere, pero que es susceptible de incorporación a un proceso productivo (Decreto 1713, 2002). Aunque en esta concepción no queda esclarecida la importancia para los ciclos biológicos, le da la posibilidad al material de volver a ser utilizado.

Así mismo, los residuos aprovechables pueden clasificarse de distintas maneras; la más genérica incluye los Residuos Biodegradables u Orgánicos. Dentro de este tipo de residuos se encuentran aquellos que pueden ser transformados por microorganismos como bacterias, hongos y otros agentes biológicos. Se incluyen restos vegetales, frutas, residuos de comidas, verduras, restos de podas y residuos de jardinería. También están incluidos los Residuos Reciclables, que son aquellos tipos de residuos que después de haber sido utilizados pueden ser la materia prima o parte de ésta para la fabricación de nuevos elementos (Decreto 1713, 2002 y Decreto 4741, 2005)

En cuanto a los residuos de origen orgánico según su naturaleza y/o características físicas pueden clasificarse en (Jaramillo & Zapata, 2008):

Residuos de alimentos: principalmente son restos de alimento que provienen de fuentes como restaurantes, comedores comunitarios, hogares y diferentes lugares de expendio de alimentos.

Estiércol: provenientes de las heces de los animales, generalmente son aprovechadas en bioabono o generación de biogás

Restos vegetales: provenientes de podas o jardines, también se consideran algunos residuos de cocina que no han sido sometidos a cocción como son las cáscaras de frutas y las legumbres.

Cuero: derivados de artículos de cuero en desuso.

Papel y cartón: son residuos con un gran potencial para su reciclaje, estos son considerados dentro de los residuos orgánicos ya que se fabrican a partir de compuestos orgánicos.

En este punto, si se mira con detenimiento cómo la naturaleza asimila la materia orgánica, se encuentra claramente que todo elemento orgánico, resulta inmerso en un ciclo, que después de ser aprovechado su condición final es como residuo, el cual se convierte inherentemente en un nuevo recurso. Es el caso de la biomasa fresca en los bosques que cuando llega al suelo, la actividad biológica de descomposición la transforma en humus. Pues, la materia orgánica que en su momento fue un tejido vivo, al perecer se convierte en una fuente de nutrientes y energía.

En este sentido por ejemplo, el rol y los efectos de la materia orgánica sobre el suelo están directamente ligados al mejoramiento de la microfauna y microflora, que por la gran oferta de carbono de los compuestos orgánicos mejora y aumenta la biodiversidad, favorece a algunos organismos que inciden en la aireación del suelo, lo que impide la compactación y permite el crecimiento de las raíces, las cuales absorben los nutrientes que han quedado disponibles. En suma, la materia orgánica favorece las características físicas, químicas y biológicas de los suelos (Sierra & Rojas, 2003).

Igual es el caso de los ecosistemas agrícolas tradicionales donde la materia orgánica representa un valioso recurso, pues todos los residuos orgánicos son convertidos mediante métodos biológicos en abono orgánico, el cual contiene un notable poder nutritivo, un considerable potencial energético y unas características, en cuanto a su composición, que lo hace idóneos para su uso en los cultivos. (Navarro et al, 1995). El uso de materia orgánica se ha convertido en la base para el desarrollo de la agroecología, donde se considera de gran importancia generar un manejo ecológico de los suelos mediante la inclusión de productos biológicos y evitar los productos de origen sintético o fertilizantes químicos (Julca et al., 2006).

Una situación opuesta se evidencia en los ecosistemas urbanos, donde en algunos contextos la materia orgánica, representa una gran problemática. Primero porque comprende una gran fracción de los residuos producidos y segundo porque su tratamiento y disposición es una situación compleja ante el déficit de lugares aptos o disponibles para tal fin. En dicho ecosistema, el procesamiento de la materia orgánica está pensado desde la planificación para el manejo integral de los residuos orgánicos, y se crean planes de gestión porque evidentemente, quienes los generan lo hacen de forma indiscriminada y los desechan sin ninguna preocupación debido a que tales elementos ya no les representan beneficios directos.

Sin lugar a dudas, una gran parte la comunidad urbana trata la materia orgánica como un residuo o desecho y como tal le da su manejo. Pero de manera exclusiva, un potencial de personas, le da mayor importancia y optan por reciclarla o reintegrarla en los ciclos biológicos, acción que asegura que de alguna forma los compuestos orgánicos vuelvan a los suelos convertidos en un sustrato factible de ser aprovechado por otros organismos.

Desde esta mirada, la biomasa se convierte en un residuo que debe ser tratado, que no puede ser desaprovechado ni desvalorizado, pues siendo un recurso vital para los ciclos naturales, garantiza la permanencia, preservación y mantenimiento de la zonas naturales urbanas al proveer a la fauna y flora de energía y nutrientes. Ante ello, un tratamiento apropiado y ecológico de la materia orgánica podrá garantizar ecosistemas sostenibles, saludables y habitables.

5.5. Digestión de la materia orgánica

La palabra digestión, proviene del latín *digestio*, que significa separar o dividir. Según la RAE, desde el concepto científico, la digestión se refiere al proceso de degradación de la materia orgánica mediante calor, reactivos químicos o microorganismos. En este caso, solo se abordará la biodigestión que se refiere estrictamente a la acción de los organismos vivos mediante la cual la materia orgánica es reciclada y transformada.

A partir del rol de los organismos recicladores o transformadores, en los ecosistemas se lleva a cabo uno de los procesos más importantes que es la descomposición de la materia orgánica, la cual mediante un proceso de digestión o metabolización de algunas moléculas complejas en sustancias simples, que luego pueden ser asimilados por otros organismos para obtener su propia energía; los mineralizadores, son organismos que aprovechan la labor de los descomponedores y se encargan de transformar la materia orgánica sencilla en materia inorgánica o mineral. Así, la materia inorgánica termina reincorporándose al ambiente y puede ser aprovechada por los productores, estos organismos forman el primer nivel

alimenticio en el ciclo de la materia de un ecosistema, y se encargan de sintetizar de nuevo la materia orgánica.

Los organismos vivos, poseen un gran poder de adaptación, esto significa que según las influencias o características del entorno ellos tienen la capacidad de ajustarse al ambiente. La adaptación de los organismos se da mediante un proceso de selección natural durante el desarrollo generacional, permitiendo acumular las pequeñas variaciones favorables de una población; esto no significa que la selección natural se limita a eliminar a los individuos "menos aptos", al contrario, es un factor crítico en la preservación y la promoción de la variabilidad (Curtis et al., 2008).

De este modo, la capacidad de adaptación es la característica que le permite a los individuos ajustarse al ambiente y a los cambios asociados, como resultado de la selección natural y medida en cambios generacionales (Curtis et al., 2008). Tal característica se ve favorecida en organismos con un ciclo de vida corto y un nivel de reproducción rápida lo que facilita la propagación masiva.

En el caso de los organismos encargados de la descomposición de la materia orgánica, como son las bacteria, hongos y algas, por ejemplo su capacidad de adaptación es alta debido a que la mayoría de estos microorganismos puede multiplicarse rápidamente si las circunstancias le son propicias (Roovers, 2016) es decir, en tanto su función biológica y dotación genética les permita sobrevivir en diversos ecosistemas con unos factores ambientales específicos.

La materia orgánica fresca, es un hábitat favorable para la proliferación de microorganismos y en las partículas que lo conforman se desarrollan microcolonias (Pascual & Vanegas, 2007). Como la disponibilidad de compuestos orgánicos es alta en dicho ecosistema, esto favorece el desarrollo de unos organismos específicos conocidos como microorganismos heterótrofos⁵, que aun cuando sin lugar a dudas obtienen la energía y los nutrientes esenciales para sobrevivir del medio externo, pueden desarrollar un metabolismo particular para efectuar la descomposición. Desde el punto de vista ecológico, las interacciones de los microorganismos con las variaciones ambientales (pH, temperatura, humedad, disponibilidad de oxígeno y composición del sustrato) determinan su naturaleza (Luna P., 2006).

5.5.1. La biodigestión en la paca

La Paca Biodigestora es un método para el tratamiento biológico de la materia orgánica fresca o no, una biotecnología que permite descomponer toda clase de excedentes biodegradables mediante la acción de microorganismos. Como se dijo

⁵ Los microorganismos heterótrofos obtienen su fuente de carbono de compuestos orgánicos, de donde también extraen la energía química y dependen de los microorganismos autótrofos los cuales sintetizan la materia orgánica.

en párrafos anteriores, la naturaleza de los microorganismos descomponedores está relacionada con las variaciones ambientales del ecosistema. Lo que significa, que una condición principal que caracteriza a dichos microorganismos es la presencia o no del oxígeno, que los hace efectuar una digestión aeróbica o anaeróbica, respectivamente.

La disposición de la materia orgánica en las pacas se efectúa mediante la compactación, lo que garantiza que la disponibilidad de oxígeno sea mínima, mas no nula, pues alguna porción de éste queda latente entre las partículas del material. Además, la evolución de las pacas se debe dar preferiblemente en condiciones de intemperismo, como un sistema abierto y variable que interactúa con el medio, esto significa que el oxígeno del entorno también interactúa directamente con la paca, pero solo su capa exterior.

De acuerdo con Guillermo Silva, la capa externa de las pacas siempre debe estar conformada por material vegetal (hojarasca y poda, verde o seca sin necesidad de ser triturada); esta capa cubre y protege debidamente los excedentes de cocina (restos de verduras, frutas, cáscaras o alimentos cocinados) del contacto directo con el oxígeno, ya que en su presencia los vuelve factibles a la pudrición⁶, condición que se quiere evitar en su totalidad con el fin de lograr un manejo ecológico de los residuos orgánicos. En consecuencia, la hojarasca se convierte en un biofiltro protector de los excedentes de cocina, pero igualmente se suma a la materia orgánica disponible para ser degradada, aunque su proceso sea más lento.

En concordancia, se podría afirmar que la digestión de la materia orgánica mediante el método de la Paca Biodigestora se efectúa bajo condiciones anaeróbicas no estrictas, donde los niveles de oxígeno son tan bajos que no favorece el desarrollo de microorganismos aeróbicos, sino de microorganismos anaerobios facultativos, los cuales son capaces de vivir tanto en presencia como en ausencia de oxígeno molecular y aunque no lo usan para su crecimiento ni obtención de energía, éste no les es tóxico (Decheco E., 2011).

Considerados metabólicamente los anaerobios facultativos caen dentro de dos grandes subgrupos. Algunos, como las bacterias del ácido láctico, tiene un metabolismo productor de energía que es exclusivamente fermentativo, pero no son sensibles a la presencia del oxígeno; a estos se les denomina, con mayor precisión, anaerobios aerotolerantes. Otros, como muchas levaduras, pueden pasar de un metabolismo respiratorio a otro fermentativo (Stanier et al., 1992), lo que significa que tienen la versatilidad para adaptarse a entornos con o sin oxígeno, y en cualquier condición pueden metabolizar y producir energía.

⁶ La pudrición o putrefacción, es el proceso de descomposición que se da en presencia de oxígeno y que en algunas ocasiones tiene como resultado la formación de productos de mal olor. (Stanier et al., 1992)

Fermentar es entonces la forma cómo los facultativos llevan a cabo su actividad biológica, es el principal proceso bioquímico mediante el cual transforman y metabolizan la materia orgánica, obtienen energía para crecer y reproducirse. Lo que significa que un mecanismo de fermentación es desarrollado y efectuado en las pacas por los facultativos, que encuentran en este lugar el ambiente propicio para sus condiciones de vida.

La fermentación es el proceso que da como resultado la formación de alcoholes y ácidos orgánicos, tiene lugar de manera característica en los materiales vegetales, como consecuencia de la degradación de los carbohidratos⁷, que son los compuestos orgánicos predominantes en los tejidos vegetales (Stanier et al., 1992) y por ende el principal constituyente del contenido de las pacas. La fermentación de carbohidratos, realizada por bacterias facultativas bajo condiciones de anaerobiosis, es una oxidación incompleta. Los productos de fermentación son frecuentemente ácidos orgánicos (como el ácido acético), alcoholes (como el etanol) y otras sustancias de bajo peso molecular incluidos gases como hidrógeno y dióxido de carbono (Rodríguez et al., 2005), estos productos que son garantía de la descomposición, también aseguran que en el proceso la materia orgánica sea desinfectada y neutralizada.

Entre algunas concepciones de investigadores sobre los procesos de fermentación, se habla que cuando el proceso de descomposición se realiza utilizando un sustrato natural como soporte sólido se refiere a fermentación en estado sólido (FES) (Ferrer et al., 2014). Ahora bien, si el sustrato, insoluble en agua y humedecido, sirve como soporte físico (Pastrana, 1996), principal fuente de carbono y otros nutrientes a los microorganismos, se le conoce como fermentación de sustrato sólido (FSS) (Ferrer et al., 2014).

Según tal concepción, en cada Paca Biodigestora, el material contenido es la fuente de energía para los microorganismos que efectúan la descomposición, ya que la materia orgánica fresca tiene las características fisicoquímicas adecuadas para utilizarse en bioprocesos de la FES. De acuerdo con (Pastrana, 1996), como sustrato ideal para la FES se considera aquel que provea a los microorganismos de todos los nutrientes necesarios para el metabolismo celular y fermentativo.

Tal afirmación se corrobora por ejemplo con algunos de los sustratos más utilizados para la FES dentro de los bioprocesos agroindustriales (Ferrer et al., 2014) que son: bagazo de yuca, caña de azúcar, naranja, manzana, uva, aceituna, tomate, cascarilla y pulpa de café, salvado de trigo, paja de arroz, paja de trigo, harina de trigo y de maíz, escobajo de uva y okara (residuo generado en la preparación del

⁷ Los carbohidratos son los compuestos orgánicos más abundantes de la biosfera y a su vez los más diversos. Normalmente se los encuentra en las partes estructurales de los vegetales y en los tejidos animales, como glucosa o glucógeno. Sirven como fuente de energía para todas las actividades celulares vitales. Los Carbohidratos o hidratos de carbono, glúcidos o azúcares son la fuente más abundante y económica de energía alimentaria del ser humano. (Annekey, 2011)

queso de soya); los cuales son utilizados para la producción de abono orgánico, ensilaje, alimento para animales y solución nutritiva para los cultivos hidropónicos (Ferrer et al., 1995). Puesto que el bajo contenido de cenizas y la alta capacidad de retención de agua les da ventajas con respecto a otros materiales, debido a que no necesitan ningún tipo de pre tratamiento para su uso como sustrato (Ferrer et al., 2014).

De este modo se puede afirmar finalmente que la digestión de la materia orgánica en las pacas se da mediante un proceso de fermentación de sustrato sólido desarrollado en medio de un entorno con disponibilidad mínima de oxígeno, el cual favorece la reproducción de microorganismos facultativos y aerotolerantes. Durante la fermentación se genera ácido acético, etanol, hidrógeno y dióxido de carbono, los dos primeros son elementos benéficos para la desinfección de la materia orgánica presente e inhiben la presencia de vectores y moscas, los segundos no generan grandes impactos al dispersarse en la atmósfera, ya que su nivel de producción no es detectable (Ardila & Cano, 2011), y no generan malos olores.

5.6. Factores ambientales que influyen en la descomposición

En el proceso de transformación biológica de la materia orgánica, inciden algunos factores ambientales que son determinantes en todo proceso de descomposición. La rapidez con la que un material es transformado depende de la naturaleza del sustrato, la presencia de los organismos descomponedores idóneos y de las condiciones físico y químicas del medio circundante (Torres & Medina, 2009).

Para activar la digestión por parte de los microorganismos facultativos en el ecosistema de la Paca Biodigestora, es necesario realizar una adecuada selección y reconocimiento de las variables que influyen en el proceso, pues son éstas las que condicionan una efectiva fermentación en estado sólido (Pastrana, 1996).

5.6.1. Contenido de humedad

Sin duda es el factor más decisivo sobre una fermentación en estado sólido. El nivel adecuado es función de la naturaleza del sustrato, el tipo de producto final y los requerimientos de los microorganismos (Pastrana, 1996). El motivo de dicha relevancia se ha atribuido a que la actividad del agua es un parámetro fundamental para la transferencia de masa del agua y los solutos a través de la pared celular. Por consiguiente el control de este parámetro se podrá usar para conocer y controlar la producción metabólica de los microorganismos.

El porcentaje de humedad en la fermentación sólida puede variar entre 30 y 80%, según el sólido utilizado, el microorganismo y el objetivo del proceso (formación de producto, crecimiento de la biomasa). Aun cuando el porcentaje de humedad es una

de las variables que comúnmente se optimiza en los sistemas de fermentación sólida, hoy se reconoce que no es solo la cantidad de agua presente en el sistema la que ejerce su influencia sobre la eficiencia del proceso, sino el carácter de las interacciones entre el agua y el medio sólido. Por eso no es contradictorio observar que un mismo microorganismo se desarrolle plenamente en dos sustratos diferentes con porcentajes de humedad bastante disímiles. La actividad del agua (H_2O) es el parámetro que se ha utilizado para caracterizar cuantitativamente esas interacciones físicas y/o químicas del agua en el sistema (Torres & Medina, 2009).

Un alto contenido de humedad del sustrato (>80%) puede provocar en ocasiones descensos de la porosidad y por consiguiente de la difusión del oxígeno, lo que puede aumentar el riesgo de la contaminación bacteriana y la generación de malos olores, en caso contrario, un bajo contenido de humedad en el sustrato (<30%) puede producir un descenso en la actividad microbiana y por ende una reducción e inmovilidad en la dinámica de descomposición (Pastrana, 1996).

5.6.2. Variación de la temperatura

Es frecuente, que como consecuencia de la actividad metabólica de los microorganismos, se produzca una elevación de la temperatura en los sistemas de fermentación, especialmente en las zonas internas del sustrato. Este incremento térmico afecta directamente el crecimiento y reproducción de los organismos lo que desacelera o detiene la actividad microbiana (Pastrana, 1996), incide en la formación del producto deshidratando el medio sólido y ocasionando que el metabolismo se desvíe hacia un mecanismo de defensa ante el calor y la deshidratación (Torres & Medina, 2009).

La medición de la temperatura puede ayudar a reconocer la evolución del proceso de descomposición, pues los cambios que experimenta este parámetro en el medio sólido indican la actividad microbiana y determinan la estabilidad del sustrato (Pastrana, 1996).

El proceso de biodegradación comienza a una temperatura ambiente y mientras aumenta la actividad microbiana la temperatura va incrementando también. La presencia de altas temperaturas durante las primeras semanas de descomposición, reflejan la actividad microbiana y causan la inactividad de los organismos patógenos, esto es importante para conseguir una desinfección correcta del producto (Agreda & Deza, 2006). Aunque, si la temperatura incrementa demasiado en el sistema, se podría producir la muerte de los microorganismos y en consecuencia una disminución en la velocidad de descomposición de la materia orgánica y afectaciones en la calidad del producto.

Existen tres rangos de temperatura óptima en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos: por debajo de 25°C para los organismos psicrófilos, entre 25 y 45°C para los mesófilos y entre 45 y 65°C para los termófilos. (FAO,

2011) Los microorganismos que resulten beneficiados a una temperatura concreta son los que principalmente descompondrán la materia orgánica del ecosistema, produciéndose un desprendimiento de calor (Bueno M. et al., 2009), en cuanto se da una variación en la temperatura, también se renueva y cambia la diversidad de los microorganismos.

5.6.3. Variación del pH

El pH es otro factor que incide en el proceso de la fermentación, ya que influye activamente sobre la actividad microbiana, pues las bacterias y los hongos se desarrollan óptimamente a valores de pH diferentes (Decheco E., 2011). Aunque el seguimiento y control del pH en un medio sólido durante el transcurso de la descomposición es particularmente dificultoso, no obstante, los sistemas de fermentación en estado sólido suelen tener una relativa estabilidad frente al pH, ello es debido a la elevada capacidad tampón de los sustratos orgánicos (Pastrana, 1996).

El pH cambia por diferentes razones; normalmente disminuye por la secreción de ácidos orgánicos como acéticos y lácticos durante el proceso. Aunque también la fuente de nitrógeno utilizada influye mucho en la tendencia que sigue el pH (Domenech, 2000), al igual que la naturaleza del sustrato. Un pH entre 3 y 6 siempre favorece el crecimiento y la actividad fermentativa (Pastrana, 1996). Aunque en la mayoría de las bacterias el crecimiento óptimo es entre 6.5 y 7.5, muy pocas bacterias crecen a un pH menor de 4.0. El pH aumenta hasta valores entre 8 y 9, por la formación de amoníaco y la desaminación de las proteínas, aparte aumentos fuertes de pH facilitan la pérdida de nitrógeno en forma amoniacal. Cuando el pH se sitúa en torno a 7 y 8, es porque el compuesto ha llegado a su fase de maduración o porque la temperatura ha inhibido la actividad biológica (Agreda & Deza, 2006).

5.6.4. Naturaleza del sustrato

En la Paca Biodigestora es posible utilizar todo aquel material que sea biodegradable, el cual posea las características bioquímicas indicadas para permitir la actividad, el desarrollo y la propagación de organismos fermentadores. Las relaciones entre algunos de los elementos contenidos es de particular importancia, por ejemplo la relación carbono nitrógeno, los cuales garantizan y soportan la eficiencia y la actividad de los microorganismos.

El carbono representa aproximadamente el 50% de la masa celular, así como la fuente de energía metabólica de los organismos. El nitrógeno por su parte es un componente mayoritario de ácidos nucleicos, proteínas estructurales, enzimas y coenzimas, aporta todo lo necesario para el crecimiento y desarrollo de las funciones microbianas (Agreda & Deza, 2006).

La relación C/N varía según los diferentes materiales usados en el proceso de descomposición. El valor de esta relación decrece según avanza el proceso, por lo

que es importante como indicador de la evolución de la materia orgánica, ya que refleja el estado de los materiales que se están biodegradando (Agreda & Deza, 2006). Al inicio del proceso la relación debe estar en torno a 25 y 35, esto se logra mediante una buena mezcla de las materias primas. Luego, mientras progresa la digestión, la relación C/N decrece entre los valores 12 y 20, reflejando una maduración del sustrato (Bueno M. et al., 2009), ya que algunas fuentes de carbono se convierten en dióxido de carbono y el nitrógeno se mineraliza en nitratos (Agreda & Deza, 2006).

5.6.5. Aireación

La aireación está determinada por la presencia de aire y por tanto de oxígeno; para un buen proceso de descomposición de la materia orgánica mediante el método de la Paca Biodigestora, debe prevalecer un ambiente anóxico, donde la presencia de oxígeno sea mínima. De este modo, se puede garantizar que se efectúe una fermentación adecuada, ya que los microorganismos para su metabolismo deberán contar con los niveles óptimos de materia orgánica, mas no con la presencia de oxígeno, para poder efectuar la descomposición.

Ante esto, la Paca Biodigestora no requiere ser volteada u oxigenada, al contrario desde el proceso de ensamblaje se debe garantizar una correcta compactación del material orgánico, tratando de eliminar de entre los residuos el oxígeno presente y solo se deberá intervenir cuando ya el material esté en su fase de maduración y haya terminado el proceso de descomposición.

5.6.6. Tiempo

El tiempo es un factor difícil de determinar o generalizar para el proceso de descomposición mediante la Paca Biodigestora, pues un factor altamente influyente es el microclima local, es decir las condiciones ambientales a las que se ve expuesta la paca pueden hacer que el tiempo de fermentación se acelere o se prolongue, en caso de temperaturas bajas y temporada de días lluviosos, o temperaturas altas y temporada de sequía, respectivamente.

Lo que sí es cierto es que, mientras mayor sea el tiempo de permanencia de la materia orgánica en la paca, mas seguridad se tendrá de la completa degradación y madurez del abono orgánico.

El tiempo mínimo considerado para la degradación de la materia orgánica fresca contenida en una paca de un metro cúbico es de seis meses, pero es importante acotar que el tamaño o altura de la paca, es un condicionante con el que se puede determinar si a los seis meses una paca puede ser utilizada como abono o no, ya que en ocasiones, la paca antes de los seis meses puede tener una altura menor a 30 cm y mediante la observación directa del material se detecta que ya tiene una estructura y un color adecuado para ser utilizado como abono, o de lo contrario,

pasados los seis meses la paca aún conserva una altura superior a los 50 cm y la observación refleja un material muy grueso e inmaduro.

5.7. El abono orgánico de las Pacas Biodigestoras

El proceso de la digestión y toda la labor de transformación de la materia orgánica fresca en las Pacas Biodigestoras dejan como resultado un producto orgánico con importantes cantidades de nutrimentos, entre compuestos orgánicos e inorgánicos disponibles para nuevos receptores y asimiladores.

La obtención de abono orgánico luego de un proceso de descomposición, es la muestra tácita que en la naturaleza la materia es móvil y dinámica, se torna en hojas, semillas y frutos y luego en un sustrato que fortalece las plantas y los animales, incluyendo el ser humano.

Los abonos orgánicos son muy variables en sus características físicas y composición química (Trinidad S., 2001), su estructura está determinada por la materia orgánica fresca que fue degradada, los factores ambientales que influyeron y los organismos recicladores que llevaron a cabo la labor de transformación.

Los abonos orgánicos, por las propias características en su composición son formadores del humus y enriquecen al suelo con este componente, modificando algunas de las propiedades y características físicas, químicas, biológicas y sanitarias del suelo (Sierra & Rojas, 2003). La aplicación contante de abonos en los suelos, con el tiempo, puede renovar su estructura, optimizar su productividad, mantener su componente orgánico, estimular la actividad biológica (Trinidad S., 2001), favorecer la reproducción de la vida, en especial el desarrollo de la cubierta vegetal, mejorar su fertilidad y evitar la pérdida de recursos y energía (Navarro et al., 1995).

Sin embargo, para potenciar el uso del abono orgánico y reconocer explícitamente sus características, composición y calidad, se han planteado algunos métodos y parámetros que desde lo técnico y experimental, permiten valorar mediante análisis cuantitativos y cualitativos cómo es el estado del abono, además de comprobar que el material es benéfico para las plantas, los organismos y los suelos.

5.7.1. Evaluación de la calidad del abono orgánico

5.7.1.1. Análisis cualitativo: cromatografía

La cromatografía en papel circular es una técnica utilizada para el análisis cualitativo de un medio sólido o líquido (Restrepo R. & Pinheiros, 2015), mediante el cual se puede obtener información sobre la calidad del medio y sus partes, mas no sobre la cantidad de sus componentes, a lo que se refiere el análisis cuantitativo.

La cromatografía se trata de un método físico de separación para la caracterización de mezclas complejas, mediante un conjunto de técnicas basadas en el principio de la retención selectiva, cuyo objetivo es separar los distintos componente de una mezcla para identificar y en muchos casos para determinar la calidad de dichos componentes (Restrepo R. & Pinheiros, 2015).

En los parámetros que refleja la cromatografía mediante la lectura del croma se pueden observar, entre otras cosas: si el proceso de descomposición y fermentación de los materiales orgánicos está muy crudo, si el proceso contiene mucha humedad o la suficiente, si hay putrefacción, si los materiales orgánicos comienzan a integrarse o a estar disponibles, si hay un buen proceso de integración de la fracción mineral y la materia orgánica a partir de una buena actividad biológica y si el proceso transcurre normalmente durante el tiempo requerido para dar por terminada la descomposición y fermentación de los abonos orgánicos para su inmediata aplicación en el suelo (Restrepo R. & Pinheiros, 2015).

La lectura o interpretación del croma se realiza a partir de las zonas que lo componen. Las zonas son cinco, del centro hacia afuera, en el siguiente orden (Restrepo R. & Pinheiros, 2015): zona central, zona interna, zona intermedia, zona externa y zona de manejo o periférica.

La zona central: Es el ombligo del cromatograma, el lugar por donde todas las sustancias presentes en la muestra del sustrato que se analiza circulan, por el fenómeno de la capilaridad, a través del pabilo. Esta zona central, también llamada zona de la aireación u oxigenación, es donde reacciona el nitrato de plata con alguno de los elementos presentes en la muestra analizada. Un color crema desvaneciéndose hacia la siguiente zona es deseable. Además, se considera que esta zona está normalmente desarrollada cuando se prolonga por un radio de un centímetro alrededor del centro y poco desarrollada cuando sus dimensiones se limitan a espacios muy reducidos en el centro del croma.

La zona interna: Es la segunda franja. Está localizada después de la zona central u ombligo del croma. También se denomina zona mineral, porque allí se concentra la gran mayoría de las reacciones con los minerales de la muestra que se está analizando. Es también la zona donde quedan atrapadas las sustancias más

pesadas, que reaccionan con el nitrato de plata que impregna el papel filtro. Buenas muestras presentan colores de crema a amarillo con una integración suave y continua en haces con formas pinnadas que siguen a la siguiente zona.

La zona intermedia: Es el tercer anillo. Se localiza después de la zona mineral del cromatograma. También se le denomina zona proteica o de la materia orgánica. Es aquí donde se expresan tanto la presencia como la ausencia de materia orgánica, ya sea cruda o en proceso de descomposición. Debe existir continuidad armónica entre la zona interna y la zona externa. Son deseables los colores amarillos a rojizos de mayor a menor intensidad.

La zona externa: Es el cuarto y último anillo de la figura que genera el análisis cromatográfico. También se denomina zona enzimática o nutricional. Se puede casi asegurar que cuando esta zona se manifiesta de forma gradual y armónica con nubes onduladas muy tenues o lunares suaves de colores café, es reflejo de un sustrato ideal, totalmente saludable y pleno de vida. Pequeñas nubecitas en forma de erupciones en colores amarillos indican abundante actividad enzimática con facilidad de interactuar.

Para la interpretación de la cromatografía además de la observación directa de las zonas, se utilizan otros tres criterios: terminación de los dientes estampados, los colores y los haces radiales. A continuación se describe grosso modo el criterio de cada una para su interpretación.

Por la terminación de los dientes: Se basa en las formas estampadas al final del cromatograma, las formas ideales, como lo muestra la imagen 9., serían aquellas que se asemejan a volcanes con erupciones, las formas redondeadas o semejantes a granos de maíz son indeseables y denotan baja calidad de la muestra.

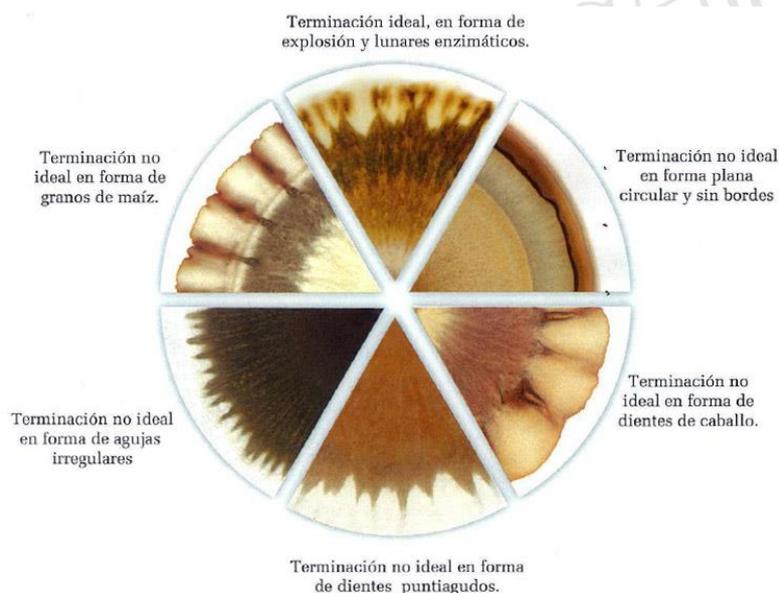


Imagen 9. Características diferentes de la terminación de los dientes de un cromatograma. (Restrepo R. & Pinheiros, 2015)

En función de los colores: Los blancos y pardos son de mala calidad; los colores vivos (naranjas, verdes y amarillos) son marcadores indirectos de buena calidad de la muestra (ver imagen 10.).



Imagen 10. Patrón de colores para análisis cromatográfico.
(Restrepo R. & Pinheiros, 2015).

Por su radiación: Los haces radiales que van del centro hasta afuera son un indicador de una adecuada integración de las propiedades físicas, químicas y biológicas. Deben estar en forma de puntas de flechas superpuestas como se observa en los numerales 7 a 12 de la imagen 11.

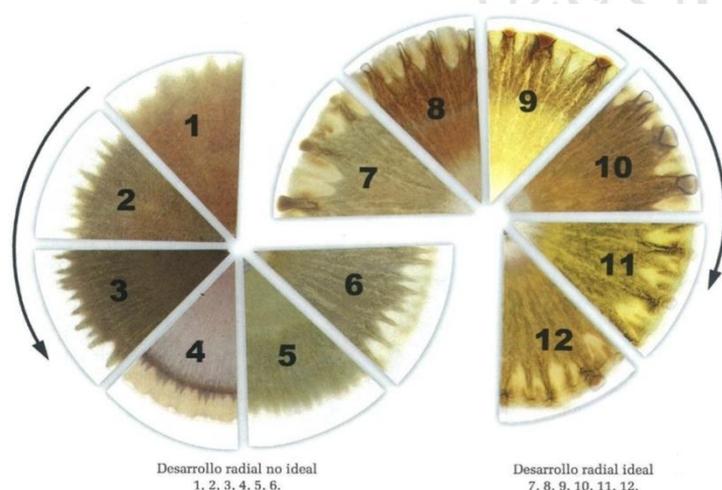


Imagen 11. Evolución radial de los análisis cromatográfico.
(Restrepo R. & Pinheiros, 2015)

Para un completo análisis de la muestra, se deben integrar tanto los factores mencionados y recomendados por (Restrepo R. & Pinheiros, 2015) y conjugarlos con toda la información que se tenga de la naturaleza del sustrato y las condiciones ambientales en las cuales se efectuó el proceso de descomposición.

5.7.1.2. Análisis cuantitativo:

A. Parámetros fisicoquímicos

Los parámetros fisicoquímicos tienen la característica de determinar y reflejar las propiedades y constituyentes del abono orgánico; son utilizados como un indicador que establece la calidad y estado de madurez de la materia orgánica transformada mediante cantidades numéricas.

En Colombia, la Norma Técnica 5167 de 2004 establece los requisitos generales y específicos que deben cumplir los productos orgánicos usados como abonos, fertilizantes o enmiendas (acondicionadores) del suelo. Como requisitos generales establece que todo producto cuyo origen sea materia orgánica fresca, debe ser sometido a procesos de transformación que aseguren su estabilización agronómica, tales como: compostaje o fermentación. Además, deberá declararse el origen (clase y procedencia) de las materias primas y los procesos de transformación empleados. Y como requisitos específicos contempla para abonos orgánicos, una serie de parámetros a caracterizar y garantizar, donde se estipulan algunos límites máximos o rangos permisibles, establecidos en la Tabla 1.

Tabla 1. Requisitos específicos de calidad para productos utilizados como abonos orgánicos. Tomada de NTC 5167, 2004.

Parámetros a caracterizar	Parámetros a garantizar (base húmeda)
Pérdidas por volatilización %	Contenido de carbono orgánico oxidable total (%C)
Contenido de cenizas máximo 60%	Humedad máxima (%)
Contenido de humedad para materiales de origen vegetal, máximo 35%	Contenido de Cenizas (%)
Contenido de carbono orgánico oxidable total mínimo 15%	Capacidad de Intercambio Catiónico (meq/100g)
N ₁ P ₂ O ₅ y K ₂ O totales (Declararlos si cada uno es mayor de 1%)	Capacidad de Retención de Humedad (%) pH
Relación C/N	Contenido de Nitrógeno Total (%N)
Capacidad de Intercambio Catiónico, mínimo 30 meq/100g	Densidad (g/cm ³)
Capacidad de retención de humedad, mínimo su propio peso.	
pH mayor de 4 y menor de 9	
Densidad máximo 0,6 g/cm ³	
Límites máximos en mg/Kg (ppm) de los metales pesados expresados a continuación: Arsénico (As) 41 Cadmio (Cd) 39 Cromo (Cr) 1 200 Mercurio (Hg) 17 Níquel (Ni) 420 Plomo (Pb) 300	

En concordancia con lo establecido por la norma, el análisis cuantitativo realizado para determinar la calidad fisicoquímica del abono orgánico se manifiesta a través de los siguientes parámetros:

Humedad: El contenido de humedad es función de la naturaleza del material, del proceso de descomposición, las condiciones ambientales del entorno y el almacenamiento de la materia orgánica (Torrentó, 2011). El rango máximo de humedad para abonos orgánicos estables es del 45% al 60% de agua en peso del material base según (Román et al., 2013).

Pero un valor óptimo de la humedad debe oscilar entre 35 - 45%; los abonos con humedad por debajo de 35% pueden haber quedado inestables, y aquellos con menos del 30% de humedad se pulverizan y son de difícil manejo.

Carbono orgánico total: Los microorganismos descomponedores requieren carbono como fuente de energía para su crecimiento y metabolismo, ya que al ser heterótrofos, no pueden asimilar el dióxido de carbono del aire directamente con la ayuda de la luz, por ello su desarrollo depende de la disponibilidad de carbono (Villalba, 2005). Cuando el proceso de digestión de la materia orgánica avanza, el carbono disponible empieza a escasear, como indicador de la estabilidad del abono orgánico. Según la NTC 5167 (2004), el valor mínimo admisible para el abono orgánico es del 15%.

Nitrógeno orgánico total: Representa uno de los macronutrientes esenciales en el abono orgánico, debido a se refiere a la suma de fracciones orgánicas como aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos y otros compuestos que tienen nitrógeno en su estructura. Su cantidad refleja la calidad del abono, en términos del grado de nitrógeno orgánico disponible, pero su presencia depende de la naturaleza de la materia orgánica inicial, el material verde favorece la presencia de nitrógeno y el material seco la presencia de carbono. El nitrógeno orgánico de un abono maduro debe estar entre el 2% y 3% (Sánchez et al., 2001).

Relación carbono-nitrógeno: Es el factor más importante en un proceso de descomposición inducido y debe conocerse para asegurar que hay una fermentación correcta siendo éste uno de los parámetros que mejor indica el estado de maduración del abono. El proceso de biodegradación depende de la acción de los microorganismos que requieren de una fuente de carbono que les proporcione energía y material para nuevas células junto a un suministro de nitrógeno para proteínas celulares (Sánchez R., 2008), cuando las fracciones biodegradables se agotan, la actividad microbiológica se ve limitada.

Por lo general, un abono orgánico se considera maduro cuando su relación C/N en fase sólida es menor de 20 y lo más cercano a 15 (Villalba, 2005).

Contenido de macro y micronutrientes: Definen la calidad del abono orgánico en términos de la disponibilidad de macro y micronutrientes como carbono, nitrógeno,

fósforo, potasio, calcio, magnesio, zinc, sodio. Los cuales permiten mejorar la productividad de los suelos, en tanto se encuentran disponibles para ser utilizados por las plantas. Nutrientes como el fósforo desempeñan un papel fundamental en la formación de compuestos celulares ricos en energía, siendo necesario para el metabolismo microbiano. Además, el potasio, calcio, magnesio, zinc, sodio tienen un importante papel en la síntesis de las enzimas, en el metabolismo de los microorganismos y en los mecanismos de transporte intra y extracelular, además mejoran la producción de los suelos y la calidad de los alimentos (Bueno M. et al., 2009).

Un abono orgánico de buena calidad debe contener al menos un 1% de cada micronutriente, los macronutrientes como el carbono y el nitrógeno, deben estar presente en mayor cantidad puesto que constituyen el 50% de las células de los microorganismos (Bueno M. et al., 2009).

pH: Es un buen indicador para determinar el proceso de digestión de la materia orgánica, ya que éste registra valores bajos (menores a 6) en condiciones de acidez, cuando hay presencia de ácidos orgánicos en la descomposición como producto de la fermentación debido a la acción de microorganismos sobre la materia orgánica más lábil, luego se presenta una progresiva alcalinización del medio debido a la pérdida de ácidos orgánicos en la medida en que el material se va estabilizando, lo que hace que finalmente el pH tienda a la neutralidad con valores entre 6 y 8, debido a la formación de compuestos húmicos que tienen propiedades tampón o de amortiguamiento (Sánchez et al., 2001).

Conductividad eléctrica: Dicho parámetro da una idea de los contenidos en iones del abono orgánico. La conductividad eléctrica aumenta conforme avanza el proceso de digestión, debido posiblemente a la liberación de iones que tiene lugar al producirse la biodegradación de la materia orgánica (García, 1990). Una alta conductividad eléctrica, está relacionada con el grado de salinidad del abono orgánico, lo que puede afectar la germinación de las semillas y el desarrollo y crecimiento de las plantas, ante ello un buen abono debe tener una cantidad menor a 3 dS/m. Además, debido a que las concentraciones de sodio aumentan la conductividad eléctrica, esta debe estar en un rango de 0,35% a 2,1% (Saldarriaga, 2009).

Cenizas: La medida de las cenizas refleja la cantidad de minerales contenidos en el abono orgánico (Trinidad S., 2001), las cuales aumentan durante el proceso de descomposición debido a la mineralización de la materia orgánica. Según la NTC 5167 (2004), los abonos de buena calidad deben contener un valor máximo del 60% en cenizas.

Densidad: Es un factor determinante en la calidad del abono orgánico, debido a que representa la capacidad de absorción, aireación y estructura del suelo. Según la

NTC 5167 (2004), el valor máximo permisible para abonos orgánicos es de 0,6 g/cm³.

Capacidad de Retención de Agua (CRA): En el abono orgánico representa su calidad y define cómo puede favorecer la humedad de los suelos, su porosidad y la disponibilidad de nutrientes, ya que no se pierden por lixiviación. Cuanto mayor sea la capacidad de retención de agua de un abono orgánico, mayor será la cantidad de agua disponible para la planta (Sierra & Rojas, 2003). Según la NTC 5167 (2004), la capacidad de retención de agua para el abono orgánico debe ser mínimo su propio peso.

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC): Este parámetro en el abono orgánico da la idea de la potencialidad en la retención de nutrientes en el suelo para la disponibilidad de las plantas, la capacidad de inmovilización de sustancias fitotóxicas, la posibilidad de amortiguar cambios súbitos de pH. Además, da información sobre el nivel de estabilización de la materia orgánica en el proceso de digestión, donde a medida que aumenta el grado de estabilidad de la materia la CIC aumenta (Villalba, 2005).

Este parámetro está estrechamente relacionado con la relación C/N, al final del proceso, la CIC se estabiliza y se considera a un abono orgánico maduro cuando su valor es superior a 60 meq/100 g (Costa et al., 1991), aunque la NTC 5167 (2004) considera un valor mínimo admisible de 30 meq/100 g.

Tamaño de partícula: También definido como granulometría del abono orgánico, representa el aspecto y la facilidad de manejo que puede condicionar su uso. Este parámetro es particularmente importante cuando el destino del material vaya a ser su uso en los suelos, debido a que influye en la porosidad. En ciertos casos una granulometría muy fina, además de dar problemas en la utilización (exceso de polvo), puede ser debida a un tratamiento de molturación final para “esconder” cierto tipo de impurezas, un abono de buena calidad que haya tenido un buen proceso de maduración, debe tener un tamaño de partículas menor o igual a 1,6 mm (Soliva & López, 2004).

Color y textura: Estos factores representan el análisis organoléptico del abono orgánico, un color café oscuro o negro es característico de un buen proceso de digestión ya que reflejan la estabilidad del material y una textura fina heterogénea representa facilidades en el manejo y uso del material (García, 1990).

B. Parámetros microbiológicos

Los parámetros microbiológicos determinan la presencia o ausencia de microorganismos como mesófilos, termófilos, mohos y levaduras para analizar el grado de madurez o estabilidad del abono orgánico. También, se cuantifican

nematodos, protozoos, enterobacterias y *Salmonellas sp.* para conocer si existen o no organismos patógenos que pueden interferir en la calidad sanitaria del sustrato.

En el proceso de biodigestión de la materia orgánica participan un sin número de microorganismos que tienen por función transformarla y reciclarla, pero su metabolismo y reproducción están condicionados por factores ambientales como la humedad, temperatura y pH que favorecen o no su presencia. Tal es el caso de las bacterias mesófilas y termófilas, que aunque son un indicativo de la fase de descomposición del material pueden encontrarse o ausentarse según las variaciones de la temperatura. Así, temperaturas medias (entre 15° y 35°C) favorecen la presencia de organismos mesofílicos y altas temperaturas de los termofílicos.

Los mohos y levaduras son parte del grupo de los hongos, también están condicionados a las variaciones de la temperatura y el pH. En el caso de los mohos, su presencia es favorecida en un rango de pH entre 2 a 9 y a una temperatura entre 25°C y 35°C. Las levaduras, en su caso, su crecimiento se desarrolla en condiciones de pH ácido, entre 4 y 5 y no se desarrollan bien en medios alcalinos a menos que se hayan adaptado al mismo (Navarro B. & Navarro G., 2003). Ante la temperatura, las levaduras requieren del mismo rango de los mohos y en humedad ambos se reproducen en medios que contengan buenas proporciones de agua (Ramírez A., 2001).

Según lo establecido por la NTC 5167 (2004) si el abono orgánico presenta contenidos de microorganismos benéficos, debe declararse el recuento de microorganismos mesófilos, termófilos, mohos y levaduras en su análisis microbiológico.

Los nematodos y protozoos son microorganismos que contribuyen en la degradación de la materia orgánica aunque su presencia en el abono orgánico pueda representar condiciones negativas debido a que en el caso de los nematodos su actividad está centrada en atacar el tejido de las plantas y transmitir enfermedades (Navarro B. & Navarro G., 2003) lo que puede ser perjudicial para el desarrollo y sostenimiento de la fauna. Ante ello, la NTC 5167 (2004) establece que el abono orgánico debe estar exento de la presencia de nematodos fitopatógenos.

Las enterobacterias y *Salmonellas sp.* son un indicador de la calidad del abono orgánico, pues como agentes patógenos su ausencia es representativa de un material apto para el uso en los suelos debido a que es ambiental y sanitariamente admisible, si alguno de estos microorganismos se encuentra presentes en el abono, indica que no debe ser utilizado en los suelos y se debe aplicar un tratamiento adicional que permita su descontaminación.

Aunque la identificación de las enterobacterias, no siempre está asociada a material patógeno, debido a que en ocasiones son representativas de procesos de fermentación, en tanto la materia orgánica en descomposición no haya tenido

presencia de heces fecales, por su condición anaeróbica facultativa se encargan de transformar los carbohidratos y producir dióxido de carbono, hidrógeno y ácidos orgánicos. Cuando en el sustrato se encuentran cantidades menores a 1000 UFC/g significa que los patógenos han sido destruidos y que las enterobacterias presentes aun están llevando a cabo la fermentación del material orgánico (Román et al., 2013).

La NTC 5167 (2004) establece los niveles máximos de microorganismos patógenos con los que debe cumplir el abono orgánico para ser considerado de buena calidad. En el caso de *Salmonella sp.*, debe considerarse ausente en 25 g de producto final y las enterobacterias totales deben ser menos de 1000 UFC/g de producto final.

C. Parámetros fitotóxicos

Los análisis fitotóxicos buscan determinar la estabilidad y madurez del abono orgánico previo a su uso en los suelos, con el objetivo de dilucidar si éste afecta o favorece el desarrollo de la flora ante la presencia de componentes fitotóxicos. Dichos análisis se realizan mediante pruebas de germinación y actividades respirométricas en el laboratorio.

Los efectos fitotóxicos de un material orgánico se presentan normalmente en el estado inmaduro y se debe principalmente a factores como la presencia de ácidos volátiles orgánicos, amonio, metales pesados o sales. Estas sustancias, en altas concentraciones, pueden afectar el crecimiento de las plantas, la germinación de las semillas o el desarrollo de las raíces, lo que representa un gran riesgo al usarse como abono orgánico en los suelos (Varnero et al., 2007).

Las pruebas de germinación son las más utilizadas por su simplicidad, y además son relativamente fáciles de interpretar (Soliva & López, 2004), representan el porcentaje fitotóxico que contienen los abonos orgánicos. El proceso de germinación incluye la brote y el desarrollo de la semilla hasta convertirse en plántula, así el índice de germinación representa el grado de madurez de la materia orgánica, que de acuerdo con (Varnero et al., 2007) se considera maduro cuando la prueba de germinación es mayor al 50%.

La actividad respirométrica en cambio, representa el nivel de actividad biológica en el abono orgánico, así mismo es un determinante para conocer su estabilidad debido a la demanda de materia orgánica y producción de dióxido de carbono, los cuales decrecen en tanto el material se encuentra completamente degradado o mientras aumenta el grado de mineralización. Según (Varnero et al., 2007) a mayor grado de madurez del abono orgánico menor es la actividad respirométrica, la cual debe coincidir con valores óptimos que se encuentren menores a 5 mg CO₂/g.

6. Metodología

A través del desarrollo de esta investigación en su fase experimental y a posteriori en su fase escrita se ha impulsado recuperar la importancia de reciclar la materia orgánica e incluirla en los ciclos bioquímicos logrando así restituirla a la naturaleza los beneficios y alimentos que provee. Recalcando la aplicación de las Pacas Biodigestoras como un método para el tratamiento ecológico de los residuos orgánicos que no solo brinda soluciones al problema de generación de residuos sino que abre vías de investigación para las comunidades académicas, debido a que aún sigue siendo un método poco investigado, estudiado y aplicado.

En consecuencia, la presente investigación buscó evaluar la biotecnología de las Pacas Biodigestoras en el proceso de digestión de los residuos orgánicos, con el objetivo particular de viabilizar e incluir dicho método en el Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos. A continuación se encontrará entonces la descripción de cada uno de los pasos realizados para alcanzar los objetivos planteados y lograr el desarrollo y evaluación del proceso de las Pacas Biodigestoras.

6.1. Cuánto se genera y cuánto se composta en la Universidad

Con el objetivo de conocer la cantidad de residuos orgánicos que se generan en el campus y la capacidad de compostación de la Planta de Tratamiento de los Residuos Orgánicos de la Universidad, se accedió al aplicativo de servicio al cliente, que funciona de manera virtual, para la solicitud de información, peticiones, quejas, reclamos, sugerencias o consultas (PQRS), mediante el cual se efectuó un derecho de petición de documentos para conocer el Plan de Manejo Integral de Residuos y se recibió una respuesta oportuna con un documento adjunto que contenía el Decreto 526 de 2004 en el cual se describe dicho plan.

También, se realizaron entrevistas y conversaciones abiertas con la Gestora Ambiental de la Universidad de Antioquia la ingeniera Ana Mercedes Montoya Restrepo, la cual suministró para efectos de la investigación, el estudio de caracterización de residuos sólidos generados en el sector no residencial del municipio de Medellín y el historial de generación de residuos en Ciudad Universitaria para los meses julio, agosto, septiembre y octubre del año 2015.

El personal operativo encargado de las actividades en la planta de compostaje, aportó una visión clara del proceso, funcionamiento y tratamiento que se realiza a los residuos orgánicos que se disponen para la estabilización, las cantidades diarias depositadas en los biorreactores, la preparación y picado del material orgánico, el monitoreo y seguimiento, la cantidad de abono orgánico que resulta mensualmente y cómo se efectúa el aprovechamiento del material ya transformado.

6.2. Pacas Biodigestoras: el método alternativo

Con el propósito de brindar a la comunidad universitaria y a sus administrativos un método alternativo, complementario y ecológico para la disposición y tratamiento de los residuos orgánicos que se generan diariamente en el campus de la Universidad de Antioquia, se evaluó en virtud de ésta investigación, la biotecnología de las Pacas Biodigestoras con el objetivo de cuantificar la cantidad de residuos orgánicos que procesa en relación con la cantidad de residuos orgánicos que se generan per cápita y la cantidad de espacio que sería necesario ocupar para procesarlos.

Ligado al objetivo mencionado, a la presente investigación se incorpora como propuesta pedagógica el desarrollo de un Proyecto de aula llamado Pacas Biodigestoras. Tal proyecto se llevó a cabo con los cursos de Introducción a la Ingeniería Sanitaria del semestre 2015-2, y el apoyo de algunos integrantes del Grupo de Investigación Aliados con el Planeta; con ellos se ejecutó el montaje de cuatro Pacas Biodigestoras en la zona verde ubicada entre los bloques 20 y 21 de la Facultad de Ingeniería. Dicho montaje se realizó durante dos días, en el día 1 se ensamblaron dos Pacas, para valorar además los organismos presentes y la forma como se desarrolla la sucesión; en el día 2 se ensamblaron las otras dos pacas, en las cuales se evaluaría parametrización y posibilidades de desarrollo de productos de huerta.



Imagen 12. Ubicación de las Pacas Biodigestoras en la Universidad de Antioquia.
Tomada de Google Earth.

Para efectos del Proyecto de aula, las pacas representaron para los estudiantes un objeto de estudio diferente que generó entonces el nombre de cada una (paca de organismos, paca de sucesiones, paca de parametrización y paca de huerta

urbana), pero en razón de la presente investigación en este capítulo se explicará la metodología aplicada para realizar cada una de ellas.

El ensamblaje de una Paca Biodigestora requiere principalmente del uso de un molde rector o guía que permita darle forma y estructura al material orgánico a disponer o empacar. Los moldes pueden ser de madera, lámina metálica, lona o cualquier otro material que permita ser adecuado y reutilizado, el tamaño dependerá de la cantidad de residuos orgánicos y el espacio disponible para ser utilizado.

Los moldes usados para el ensamblaje de las cuatro pacas realizadas tenían un tamaño de 1 m² pero diferían en su altura; se usó un molde de lámina metálica (ver imagen 13.a.) con una altura de 0,5 m con el cual se construyeron las pacas de organismos y huerta y también se usó un molde de madera (ver imagen 13.b.) con una altura de 1 m, con el cual se ensambló las pacas de sucesiones y parametrización.



Imagen 13. Moldes guía para ensamblar las Pacas Biodigestoras.

Luego de tener los moldes disponibles, se debe recolectar y preparar los residuos orgánicos a disponer y empacar. Para ello, se accedió al centro de acopio de residuos de la Universidad en donde se encuentran apiladas en bolsas plásticas la hojarasca, tal como se observa en la imagen 14.a., las cuales fueron transportadas en varios viajes, mediante un carro manual de recolección de residuos (ver imagen

14.b.), hasta el punto donde se ensamblarían las pacas. También, se recurrió a otro lugar de la Universidad donde se realiza la disposición temporal de material grueso como madera y chamizos, el lugar está ubicado al costado izquierdo de la portería del Metro (ver imagen 14.e.), desde allí se llevó el material hasta el lugar de ensamblaje. Para los residuos orgánicos de cocina se concertó previamente con las personas encargadas de las cafeterías cercanas a la facultad de ingeniería para que acumularan durante un día los residuos en bolsas y canecas, sin llevarlos al centro de acopio y así poder recogerlos para usarlos en la construcción de las pacas.



Imagen 14. Proceso de recolección y preparación de los residuos orgánicos a empacar.

El paso a seguir luego de tener los moldes y los residuos orgánicos disponibles es elegir el lugar exacto donde se querrán realizar las pacas, preferiblemente un metro cuadrado de suelo que este plano, donde no se estanque el agua y le ofrezca condiciones perfectas de intemperismo, es decir, no esté cerca o debajo de algún techo. En consecuencia, se eligieron cuatro áreas distantes en la zona verde entre los bloques 20 y 21 referenciada anteriormente, que por su apariencia y características físicas aparenta ser un suelo afectado y deteriorado por la actividad humana, pero que alberga una variedad de árboles que aportan un microclima benéfico para ese entorno y en especial para la evolución y transformación de las pacas.

Teniendo los anteriores pasos resueltos, se procede a ensamblar la Paca Biodigestora. Para ello, se utilizaron herramientas como machete, pala, guantes y pisones, que ayudaron en su orden a: adecuar el tamaño del material, depositarlo entre el molde, entre tanto protegerse de objetos cortos punzantes o sustancias que irriten la piel y los últimos a compactar el material orgánico.

La materia orgánica empacada estaba compuesta por: hojarasca, poda de jardín verde y seca, semillas, tallos y hojas de plantas verdes, ramas de palmas, chamizos, cascara y restos de frutas (papaya, mango, naranja, maracuyá, mandarina, melón, piña, banano, fresa, uvas, sandía, manzana) y restos y cascara de verduras (plátano, lechuga, aguacate, guineos, tomate, cebolla, repollo, cilantro, papa y limón).

6.3. Construcción de las Pacas Biodigestoras

Con el molde bien nivelado y ubicado en el lugar exacto se procede a ensamblar la paca, que capa a capa se construye siguiendo los pasos descritos a continuación:

Paso 1: Capa de chamizas.

Seleccionando un grupo de chamizas se cortan de un largo igual o menor a un metro, se ubican sobre el suelo cubriendo toda el área que demarca el molde, tal como muestran las imágenes 15.a. hasta la 15.f. Las chamizas se incluyen en la base con el objetivo de favorecer la percolación del agua hacia el suelo que resulta de la deshidratación de los residuos orgánicos (lixiviado) y disminuir los excesos de humedad en épocas de lluvia evitando que se encharque la paca.



Imagen 15. Construcción de la paca, ubicación de las chamizas.

Paso 2: Capa de hojarasca.

Sobre la capa de chamizas, se agrega una primera capa de hojarasca o poda de jardín, en estado verde o seco (ver imágenes 16.a. y 16.b.). La cual debe cubrir todo el área disponible y luego ser compactado con la ayuda de los pies o pisones, tal como muestra la imagen 16.c. En este caso, para efectos de una correcta compactación se usaron martillos metálicos y pisones de madera que con su peso, ayudaron a obtener una buena compactación del material depositado.

Como paso extra, es necesario revisar y seleccionar de entre los residuos orgánicos (hojarasca y residuos de cocina) antes de ser compactados, algún otro residuo sólido (ver imagen 16.d.) como bolsas de plástico, vidrio, lata, sorbetes de plástico, colillas de cigarrillo, entre otros que puedan afectar, contaminar o estropear la biodegradación del material orgánico.



Imagen 16. Construcción de la paca, inclusión capa de hojarasca.

Paso 3: Capa de residuos de cocina.

Sobre la capa de hojarasca depositada y cuidando de no llegar hasta la capa de chamizas se debe abrir un espacio en el centro para agregar los residuos de cocina (ver imágenes 17.a. y 17.b.). Con el objetivo de que tales residuos no queden en contacto con las paredes del molde, se debe bordear con más hojarasca y así proceder a compactar de nuevo. Debido a que los residuos de cocina están compuestos por cascara de frutas, verduras, semillas, frutas muy maduras y demás residuos que contienen alta cantidad de humedad y en aras de realizar una compactación con los pies, se puede agregar sobre estos otra capa de hojarasca o material verde para evitar ensuciarse o mancharse los zapatos (ver imagen 17.c. y 17.d.).





Imagen 17. Construcción de la paca, inclusión capa de residuos de cocina.

Paso 4: Capa de hojarasca.

Sobre los residuos de cocina ya compactados, se agrega una nueva capa de hojarasca bien distribuida por toda el área disponible dentro del molde, sin olvidar realizar una buena compactación que permita eliminar de entre los residuos el oxígeno presente en los espacios vacíos, tal como se observa en las imágenes 18.a. y 18.b.



Imagen 18. Construcción de la paca, nueva capa de hojarasca.

Paso 5: Ubicación de amarres.

Los amarres pueden ser tallos de plantas, ramas de palma o chamizos (como se observa en las imágenes 19.a. y 19.d.) que se ubican rodeando el perímetro del molde y sobre una capa de hojarasca compactada (ver imágenes 19.b. y 19.c.) para darle firmeza y rigidez a la paca, evitando así que esta se desmorone o desbarate en su proceso de descomposición.



Imagen 19. Construcción de la paca, ubicación de amarres.

Paso 6: Capa de hojarasca.

Luego de amarrar, una nueva capa de hojarasca puede ser depositada. Y así sucesivamente capa tras capa de hojarasca, residuos de cocina y amarres, junto a su respectiva compactación, se deben seguir agregando hasta ajustar aproximadamente un metro de altura, tal como se muestra en las imágenes 20.a. hasta la 20.j.





c. Capa de residuos de cocina



d. Capa de residuos de cocina



e. Capa de hojarasca



f. Recubrimiento de los residuos de cocina con hojarasca



g. Compactación



h. Compactación

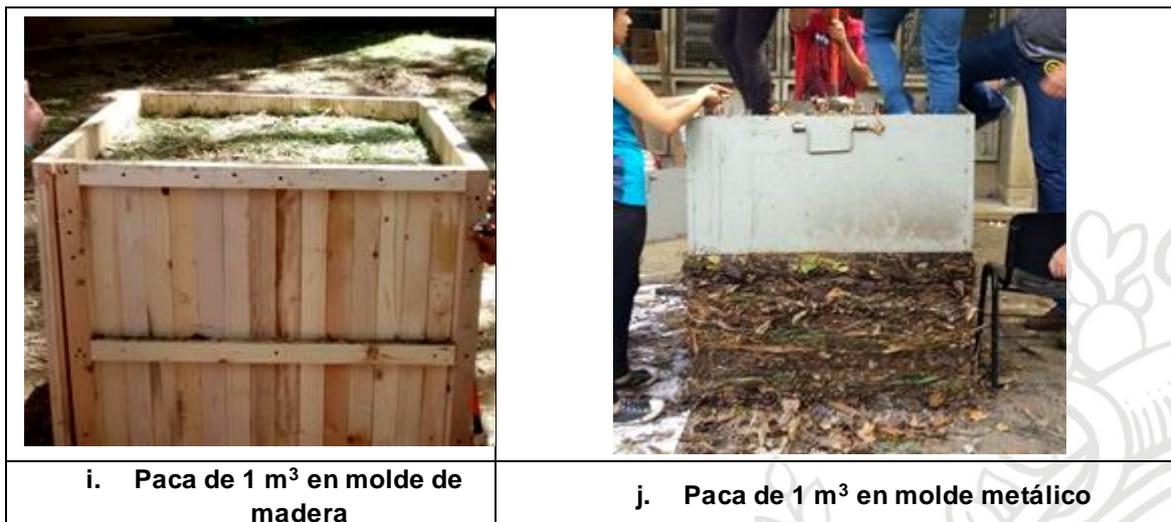
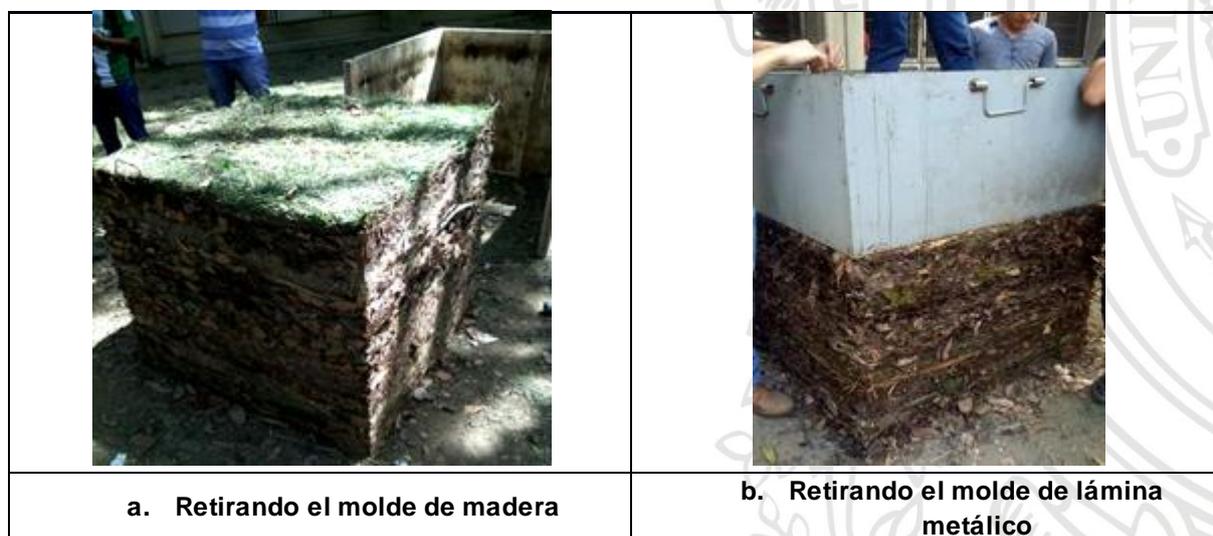


Imagen 20. Construcción de la paca, proceso de ensamblaje.

Paso 7: Retirar el molde.

Habiendo depositado la cantidad de residuos orgánicos para ajustar un metro cúbico, se procede a retirar el molde (ver imágenes 21.a. y 21.b.), y quedará al descubierto una Paca Biodigestora (ver imágenes 21.c. y 21.d.), la cual tiene la apariencia de una calicata o como un cubo extraído el suelo para observar su perfil, a simple vista las capas parecen estratos o vetas de diferentes composiciones y colores.



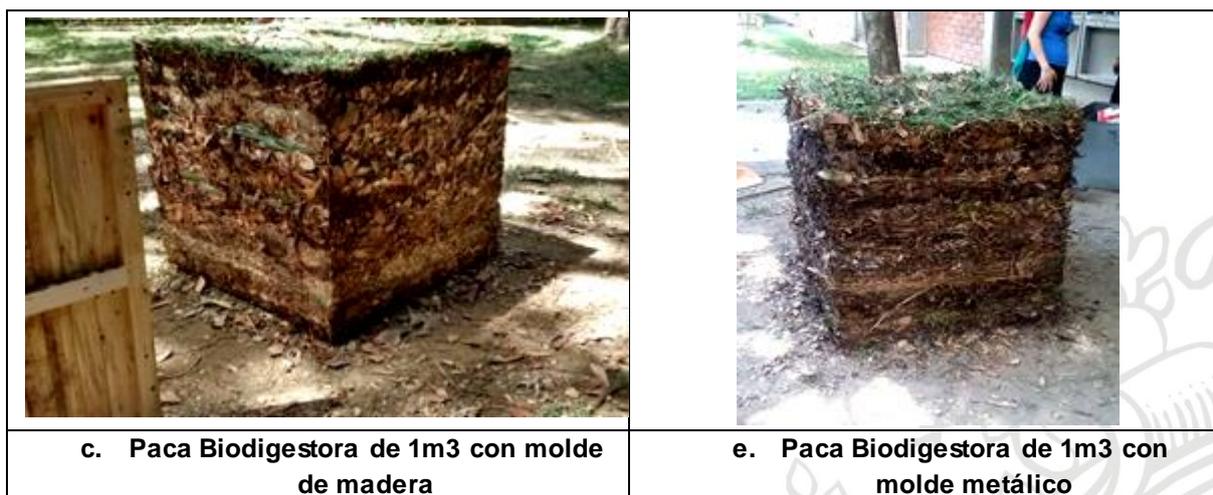


Imagen 21. Pacas Biodigestoras de un metro cúbico.

En las cuatro pacas biodigestoras realizadas se estimó la cantidad en masa del material orgánico depositado. Con la ayuda de una balanza digital (ver imagen 22), se determinó la cantidad aproximada que puede contener o almacenar cada Paca Biodigestora, ya sea usando el molde de madera o el de lámina metálica. El pesaje del material sólo se realizó en el día 1 del montaje de las pacas, ya que con dicha información se obtuvo un aproximado de la cantidad de residuos orgánicos que puede contener cada molde particularmente.



Imagen 22. Balanza digital y tara de plástico para el pesaje del material orgánico.

6.4. Parametrización fisicoquímica de las Pacas Biodigestoras

Con el objetivo de determinar y conocer los factores que condicionan el proceso de descomposición de los residuos orgánicos mediante la biotecnología de las Pacas Biodigestoras, se realizó la medición día por medio de los siguientes parámetros fisicoquímicos: cambios en la altura con el tiempo, variaciones del pH, la temperatura y la humedad, en tres de las pacas ensambladas: Paca Organismos, Paca Sucesiones y Paca Parametrización.

Debido a dificultades para la consecución de los instrumentos de medida y la planificación del cronograma estipulado que implicaba realizar el montaje de las pacas en la fecha descrita, las mediciones de los parámetros fisicoquímicos se efectuaron a partir del 27 de noviembre del 2015, lo que corresponde a la semana 11 y terminaron el 8 de marzo de 2016, en la semana 27.

Durante las primeras 10 semanas de actividad en las pacas, los estudiantes del grupo parametrización del proyecto de aula pudieron medir cambios en la altura y la temperatura en su paca de estudio, de allí se obtuvo alguna información inicial de las variables registradas (ver Anexo 1).

Sobre cada paca, en su capa superior se delimitaron 3 puntos: punto 1 en el centro, punto 2 a 20 cm del centro y punto 3 a 10 cm del borde, como muestra la imagen 23.

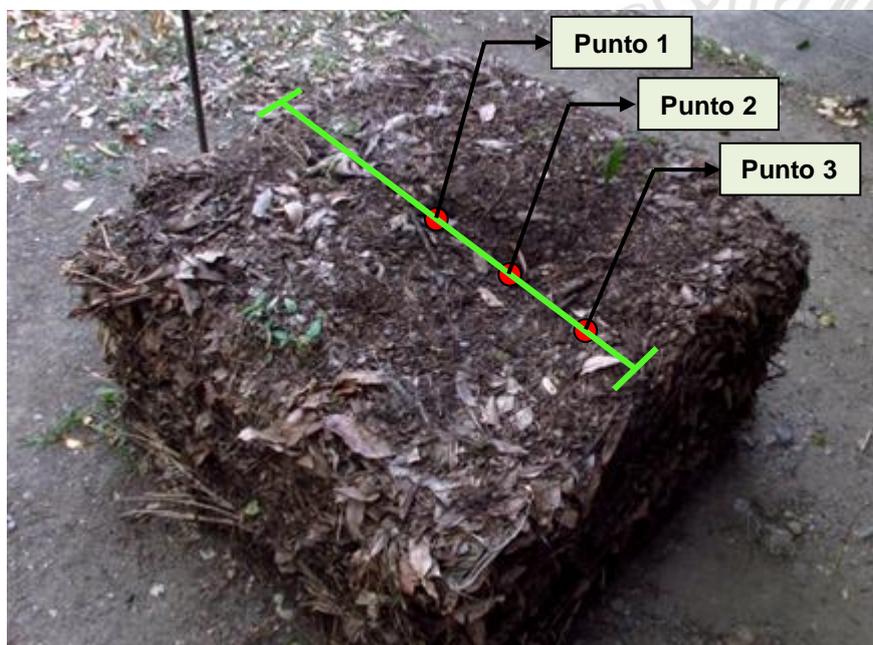


Imagen 23. Puntos delimitados para la medición de las variables.

En cada punto delimitado, se realizaron las mediciones del pH, la temperatura y la humedad, mediante instrumentos de medición directa para suelos y compost, los cuales cuentan con una sonda metálica de diferentes longitudes y funcionan de forma rápida, práctica y precisa.

Para las medición de la temperatura y el pH se utilizó un multiparamétrico digital (ver imagen 24.b.) con sonda de 20 cm, que reporta la temperatura en grados Celsius o grados Fahrenheit en un rango de -9°C a 50°C y el pH en un rango de 3,5 (ácido) a 9 (alcalino) . Con el instrumento se reportó la temperatura ambiente sobre la superficie de las pacas y se midió la temperatura a 10 y a 20 cm de profundidad y el pH a 20 cm de profundidad en cada punto. La medición de la humedad, se realizó con un sensor análogo (ver imagen 24.c.) con sonda de 70cm, el cual reporta los

datos en un rango de 0 (seco) a 10 (saturado) y se determinó en cada punto a una profundidad de 10 cm, 30 cm y 50 cm.



a. Instrumentos de medición directa para suelos y compost



b. Multiparamétrico digital (pH y T°)



c. Sensor de humedad análogo

Imagen 24. Instrumentos de medición directa para compost.

El volumen inicial de las pacas biodigestoras se determinó luego de cada montaje con el uso de un flexómetro, corroborando el metro cuadrado en el largo y ancho de sus caras y midiendo la altura inicial de cada una. Durante el monitoreo, las variaciones en la altura se tomaron en el centro de las cuatro caras laterales de las pacas desde la superficie del suelo y luego los valores se mediaron, para obtener la altura promedio de las pacas en algún instante de tiempo.

Adicionalmente, se hizo una observación constante de las variaciones físicas de las pacas, la presencia de olores, vectores, hongos, la evolución de la sucesión ecológica presentada, los cambios en su estructura, las interacciones con el entorno circundante y sus impactos o molestias ocasionadas a la comunidad.

6.5. El experimento de la huerta sobre la Paca Biodigestora

Hasta el momento, solo se ha referenciado el monitoreo realizado a tres de las cuatro pacas ensambladas para el desarrollo de la presente investigación, esto se debe a que la cuarta paca tuvo como objeto el desarrollo de la siguiente premisa: *mientras se digiere un metro cúbico de residuos orgánicos, se obtiene un metro cuadrado de suelo productivo.*

Corroborar la premisa significó hacer un plan de siembra, tipo ensayo-error sobre dicha paca, además de agregar en el proceso de ensamblaje una última capa de 15 cm de altura, aproximadamente, de abono orgánico (ver imagen 25), extraído de una Paca biodigestora realizada por el grupo de investigación *Aliados con el Planeta* en enero de 2015.



Imagen 25. Paca huerta urbana con ultima capa de abono orgánico.

Sobre la paca se realizó una siembra por trasplante de plántulas de lechuga crespita, cebolla de rama, albahaca, cilantro y acelga, y siembra directa de semillas de amaranto y chíca.

Inicialmente, las plántulas para trasplantar se pusieron a germinar en cáscaras de huevo con el mismo abono orgánico de la Paca Biodigestora ya madura, como se observa en la imagen 26. Luego resquebrajando el huevo y abriendo un hueco en la capa superior de la paca, se sembraron las plántulas a las cuales se les monitoreó su crecimiento, desarrollo, capacidad de adaptación, se observaron las plagas presentes, se investigó sobre repelentes ecológicos para plagas, el ciclo de vida de las plantas sembradas, cómo cosecharla y sus usos luego de la cosecha.



Imagen 26. Germinados de plántulas de cilantro.



Imagen 27. Plántulas de cebolla de rama, lechuga crespa, albahaca y cilantro trasplantadas.

6.6. Cromatografía del abono orgánico de la Paca Biodigestora

Todos los materiales orgánicos que se someten a la acción de agentes biológicos, sufren una descomposición que tiene en esencia la transformación de los compuestos en productos más simples, que les permite ser asimilados en la naturaleza. Así mismo, en el proceso de descomposición de las Pacas Biodigestoras se obtiene como producto final abono orgánico, al cual fue necesario conocerle su calidad, el estado de maduración y la composición.

Con tal objetivo, se aplicó el método de la cromatografía circular, la cual permite analizar cualitativamente la calidad del abono orgánico resultante de las Pacas Biodigestoras, además de la calidad evolutiva del procesamiento de la materia orgánica en los abonos fermentados. En los parámetros que refleja la cromatografía,

mediante la lectura del cromograma, se puede observar, entre otras cosas: si el proceso de descomposición y fermentación de los materiales orgánicos está muy crudo, si el proceso contiene mucha humedad o la suficiente, si hay putrefacción, si los materiales orgánicos comienzan a integrarse o a estar disponibles, si hay un buen proceso de integración de la fracción mineral y la materia orgánica a partir de una buena actividad biológica y si el proceso transcurre normalmente durante el tiempo requerido para dar por terminada la descomposición y fermentación de los abonos orgánicos para su inmediata aplicación en el suelo (Restrepo R. & Pinheiros, 2015).

La realización de la cromatografía para el abono orgánico de las Pacas Biodigestoras se desarrolló en dos etapas siguiendo la metodología propuesta por Restrepo R. & Pinheiros (2015), primero una práctica de campo y segundo una práctica de laboratorio, las cuales se describirán a continuación:

6.6.1. Práctica de campo

Paso 1: Reconocimiento previo del lugar de extracción de la muestra.

Inicialmente, se eligió el lugar de donde se extraería la muestra de abono orgánico, escogiendo la Paca Organismos (ver imagen 28) como la indicada, debido a su grado de madurez y a la altura de la paca.



Imagen 28. Paca Organismos, lugar de extracción de la muestra.

Paso 2: Obtención de la muestra.

De la Paca Organismos, se retiraron 5 cm de la capa superior y luego se extrajo el material orgánico contenido en aproximadamente 30 cm de profundidad. El abono orgánico obtenido se homogenizó y de este último se tomó 1 kilo de muestra con la ayuda de una pala y se depositó en una bolsa hermética, tal como se muestra en las imágenes 29.a. hasta la 29.d.).

Durante la toma del muestreo, se observó y documentó el olor, color, textura del sustrato que se extrajo. También se tuvo en cuenta la cobertura vegetal de la paca, los niveles de exposición al Sol, la temporada climática por la que atravesó el proceso de descomposición y los componentes de la materia orgánica inicial que fueron empacados.



Imagen 29. Proceso de obtención de la muestra de abono.

Paso 3: Identificación de la muestra.

Para un correcto reconocimiento de la muestra, esta fue debidamente rotulada e identificada. Consignando sobre el papel de rótulo el nombre de la muestra, el lugar de extracción, la fecha y hora, la profundidad, el código del proyecto y la persona que la extrajo como se observa en la imagen 30.

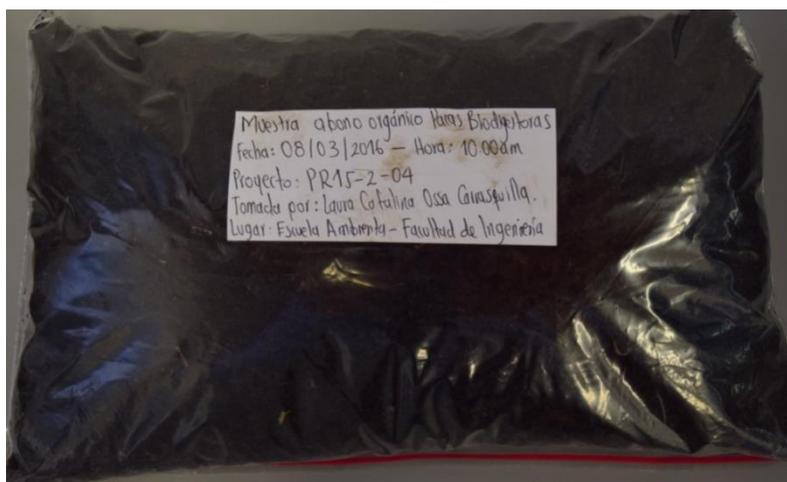


Imagen 30. Rotulación de la muestra de abono orgánico.

Paso 4: Secado de la muestra.

Ya extraída la muestra se depositó sobre una bandeja metálica cubierta con papel bond (ver imagen 31) y se puso a secar indirectamente al Sol o a media sombra, durante 48 horas. Además, se retiraron las piedras, palos y el material grueso presente.



Imagen 31. Proceso de secado de la muestra de abono orgánico.

Paso 5: Toma de submuestra del sustrato seco y tamizado.

Una vez la muestra estuvo totalmente seca, se tomó una submuestra de 150 g, la cual se pasó por un colador plástico (ver imagen 32), con la finalidad de lograr una mejor uniformidad en las partículas del sustrato.



Imagen 32. Tamizado de la muestra de abono orgánico seco.

Paso 6: Molienda de la muestra.

Con el auxilio de un mortero de porcelana, tal como se observa en la imagen 33, se molieron concienzudamente las partículas del sustrato hasta que se obtuvo un polvo homogéneo, tipo talco, del cual finalmente se pesaron 30 g.



Imagen 33. Molienda de la muestra de abono orgánico seco.

Paso 7: Pesaje y contramuestra.

Con el auxilio de una balanza digital, se pesaron de a 5 g del material pulverizado para cada análisis, dividiendo los 30 g iniciales en seis submuestras, las cuales fueron almacenadas en beakers, como se observa en la imagen 34.

El resto del material ya molido, se almacenó como contramuestra de seguridad para futuros análisis del mismo tipo u otro procedimiento de investigación, por tal motivo, el sustrato se conservó en bolsitas de papel enceradas, se rotuló especificando el tipo de muestra y la fecha y finalmente fue guardada en un recipiente de plástico a salvo de cualquier humedad.



Imagen 34. Beakers con las submuestras de 5 g del abono orgánico pulverizado.

6.6.2. Práctica de laboratorio

Una vez terminados los pasos de la práctica de campo en el proceso de recolección y preparación de la muestra, se pasó al proceso de la práctica de laboratorio. En la cual prepararon dos soluciones, hidróxido de sodio para disolver la muestra de abono orgánico pulverizado y nitrato de plata para sensibilizar el papel filtro donde se realizará el análisis de la cromatografía.

Paso 1: Preparación de la solución de hidróxido de sodio (NaOH), soda cáustica, o sosa para disolver la muestra de abono orgánico.

La solución de hidróxido de sodio se preparó a tres diferentes concentraciones, 0,5%, 1,0% y 1,5%. Disolviendo de a 5 g de hidróxido de sodio en escamas en 250 ml, 500ml y 750 ml de agua destilada respectivamente. Las soluciones se almacenaron en botellas de plástico con tapa hermética debidamente rotuladas con el nombre de la sustancia y su concentración.

Luego en los beakers que contenían 5 g de abono orgánico pulverizado se les agregó 50 ml de la solución de hidróxido de sodio, dejando cada dos de los seis beakers con la misma concentración de la solución de sosa, como muestra la imagen 35.a.

Los beakers fueron debidamente rotulados con la cantidad de abono orgánico depositado y la concentración de la solución de hidróxido de sodio agregada, tal como se observa en la imagen 35.b.

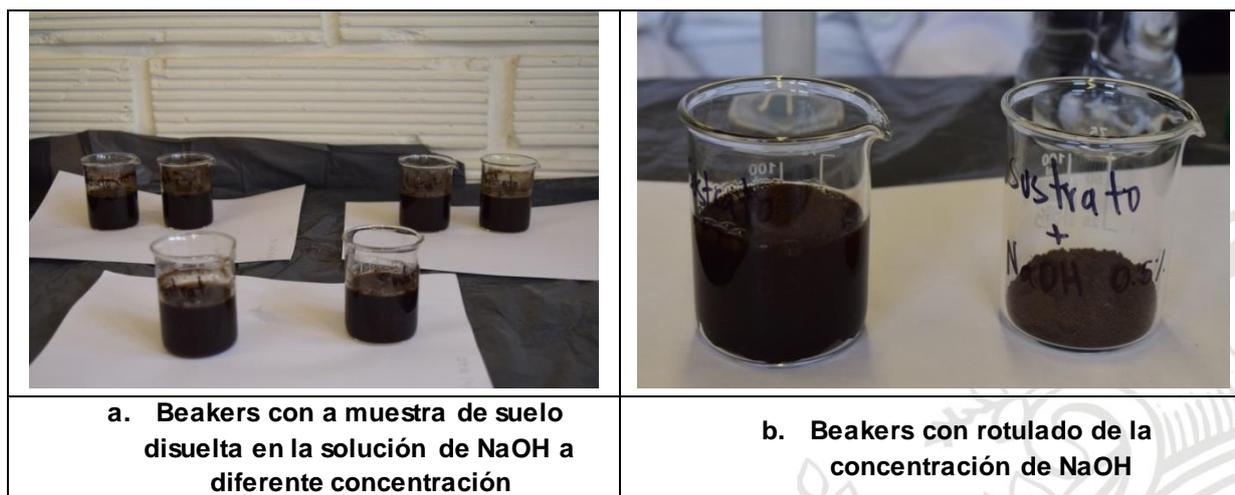


Imagen 35. Disolución de la muestra de abono orgánico.

Luego de tener la disolución en los beakers se procedió a mezclar y agitar la muestra con un mezclador de vidrio (ver imagen 36) realizando giros de derecha a izquierda y de izquierda a derecha durante dos minutos, para homogenizar la solución. Se dejó reposar durante 15 minutos y luego se procedió a agitar por dos minutos más y nuevamente se dejó en reposo, esta vez durante una hora y luego se repitió el proceso de agitación por 2 minutos.

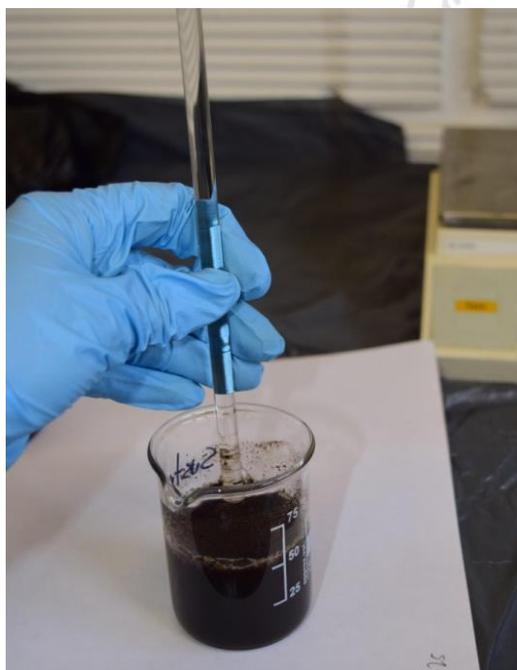


Imagen 36. Agitación de la disolución del abono orgánico y la solución de sosa.

Finalmente, se taparon los beakers con placas de vidrio y se dejaron reposar por 12 horas, para que se completara la reacción alcalina de la muestra del abono orgánico con la solución de hidróxido de sodio.

Paso 2: Preparación de la solución de nitrato de plata (AgNO_3) para sensibilizar el papel filtro.

La solución de nitrato de plata se preparó a una concentración del 0,5%, para esto se disolvió medio gramo de nitrato de plata sólido en 100 ml de agua destilada y se almacenó en un frasco ámbar plástico, dada a su alta sensibilidad a la luz y el calor. El frasco fue debidamente rotulado con el nombre de la sustancia y su concentración.

Paso 3: Preparación del papel filtro circular.

Se utilizaron los papeles filtro cualitativos de la marca Sartorius Stedim Biotech de grados 292 (el equivalente a Whatman N°1) y 1288 (el equivalente a Whatman N°4), con diámetros de 150 mm y 185 mm respectivamente.

Con el uso de un sacabocado de 2mm de diámetro, se perforó el centro de 12 filtros (seis de cada grado). Luego con el uso de una aguja de jeringa se demarcaron los límites de impregnación para el nitrato de plata a 4cm de distancia del centro del papel circular y para la disolución del sustrato con la sosa a 6cm de distancia desde el centro, tal como se observa en la imagen 37.



Imagen 37. Preparación del papel filtro circular.

Paso 4: Impregnación o sensibilización del papel filtro.

Para impregnar los papeles filtro con la solución de nitrato de plata al 0,5%, se prepararon unos pabilos de dos centímetros de longitud con el papel filtro de grado 1288 y se insertaron por el agujero del centro del filtro (ver imagen 38.a.). Para la impregnación se utilizaron dos cajas circulares de vidrio (cajas petri) de 5cm y 10 cm de diámetro. Se puso la menor dentro de la mayor, centrada, y se agregó dentro de la menor la solución de nitrato de plata (ver imagen 38.b.). Luego se puso en contacto el pabilo con la solución y se esperó a que la impregnación cubriera los 4cm de distancia demarcados en el papel (ver imagen 38.c.).

Ya impregnado el papel filtro, se retiró el pabilo y se dejó secar dentro de una cámara oscura elaborada con cajas de cartón envueltas en bolsas plásticas y tela negra. Para ello, se ubicó el papel filtro impregnado como un sandwich entre dos pedazos de papel higiénico y dos hojas de block limpias para facilitar el secado y evitar que los cromas se manchen entre sí. El tiempo de secado de los papeles filtros duró 3 horas.

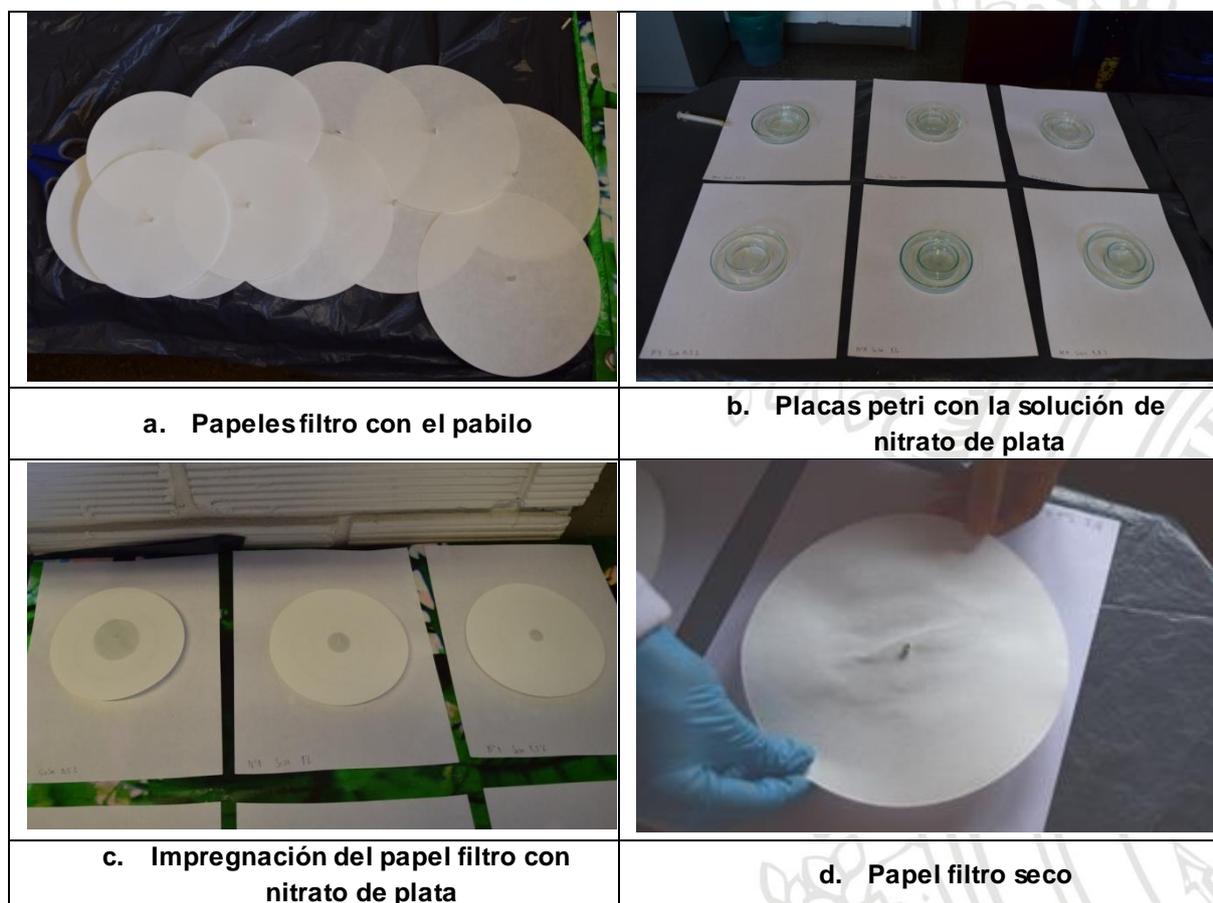


Imagen 38. Impregnación del papel filtro.

Paso 5: Corrida final de la muestra en el papel filtro.

Una vez el papel filtro impregnado de nitrato de plata estaba seco y las partículas del abono orgánico en la disolución con el hidróxido de sodio sedimentadas, se procedió a la corrida final de la muestra o análisis del abono orgánico propiamente dicho.

Para ello, se prepararon de nuevo las cajas petri de 5cm y 10cm y dentro de la menor, con la ayuda de una jeringa, se agregaron 15 ml del líquido que estaba en la parte superior de la mezcla del abono orgánico y la solución de sosa (el sobrenadante). De igual forma, se prepararon los papeles filtro insertando un nuevo pabilo en el orificio central y se procedió a la impregnación del papel filtro con el sobrenadante hasta alcanzar la marca de los 6cm, como se observa en la imagen 39. Una vez terminada la corrida, se retiró el pabilo y se paso a la fase de revelado.



Imagen 39. Corrida final de la muestra de abono orgánico en papel filtro N° 1288.

Paso 6: Secado o revelado.

Terminada la fase de la recorrida de la solución de abono orgánico en el papel filtro circular, se siguió al proceso de secado de los cromatogramas, que debió hacerse con mucho cuidado para no arruinarlos.

Los cromas primero se dejaron descansar horizontalmente sobre una hoja de papel block mientras se secaban, durante 15 minutos aproximadamente, como se observa en la imagen 40.a. Una vez secos se colgaron en una ventana de vidrio y expuestos gradualmente, de forma indirecta, a la luz del Sol se efectuó el revelado lentamente hasta que se vieron estabilizados, como muestra la imagen 40.b.

Teniendo los cromatogramas revelados y estabilizados se procedió a la identificación, marcando con un lápiz carbón el grado de porosidad del papel filtro utilizado y la concentración de hidróxido de sodio a la que se disolvió la muestra del abono orgánico.

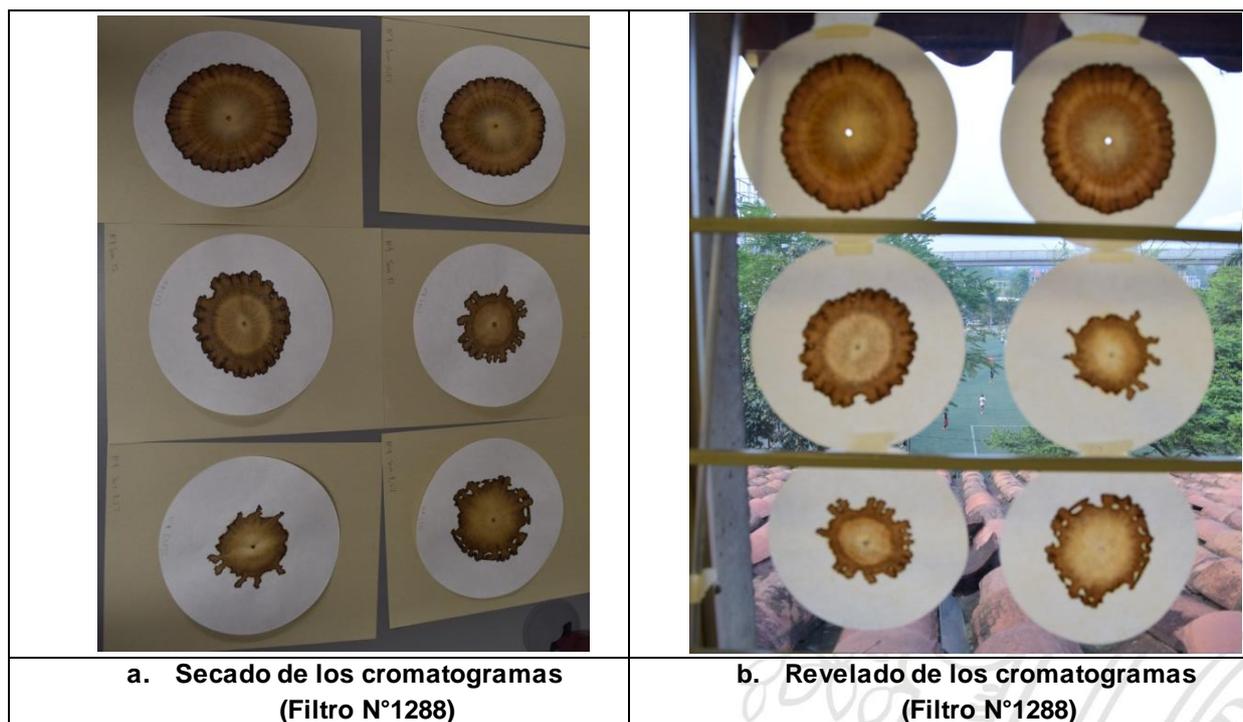


Imagen 40. Proceso de secado y revelado de los cromas.

6.7. Análisis fisicoquímico, microbiológico y fitotóxico del abono

Para la evaluación de la calidad y composición del abono orgánico obtenido de las Pacas Biodigestoras, se contrató con el Laboratorio de Estudios Moleculares (GIEM), la caracterización fisicoquímica, microbiológica y fitotóxica, la cual arroja un análisis cuantitativo de la muestra mediante el estudio de los siguientes parámetros:

Análisis físico químicos: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, zinc, sodio, humedad, carbono orgánico, relación carbono-nitrógeno, pH, conductividad, cenizas, densidad, Capacidad de Retención de Agua (CRA), Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y tamaño de partícula.

Análisis microbiológicos: recuento total de mesoaerobios, termófilos, mohos, levaduras, enterobacterias, *Salmonella sp.*, protozoos y nematodos (presencia o ausencia).

Análisis fitotóxicos: pruebas de germinación y actividad respirométrica.

Para dicha evaluación, se tomó una muestra de 1 kilo de abono orgánico de la Paca Organismo en una bolsa hermética debidamente rotulada, del mismo modo como se realizó en el Paso 2 y 3 de la práctica de campo para la cromatografía del abono orgánico de la Paca Biodigestora.

7. Resultados y análisis

7.1. Lo que se genera y lo que se composta en la Universidad

Los residuos sólidos generados en la Universidad de Antioquia, son clasificados de tipo institucional y agrupados como: residuos ordinarios y comunes, reciclables, biodegradables y peligrosos. Para el tratamiento de estos residuos la Universidad ha creado estrategias de manejo, con el objetivo de reducir los costos económicos ligados a la disposición final y los impactos ambientales negativos que se propician ante un mal manejo (Decreto 526, 2004 - UdeA).

Según el Comité Operativo para el Manejo Integral de los Residuos de la Universidad de Antioquia, los residuos biodegradables cuya descomposición se da fácilmente en el ambiente, como los restos de vegetales y alimentos preparados, provenientes de las cafeterías, así como, madera, restos de las podas de los árboles de las zonas verdes, jardines y barrido de hojas, son transformados en materia orgánica estabilizada mediante el compostaje, para su reutilización en las mismas labores de abonado de las zonas verdes de las diferentes sedes de la Universidad (Decreto 526, 2004 - UdeA).

Los registros de producción y disposición histórica de los residuos sólidos de la Universidad (ver tabla 2.), contenidos en el Decreto 526 de 2004, son descritos para los años 2003 al 2006. Estos, reflejan la población según el número de habitantes presente en Ciudad Universitaria para cada año, la cantidad total de residuos generados al día, además de la cantidad que fue reciclada, compostada y enviada al relleno sanitario para su disposición final por medio de Empresas Varias de Medellín (EEVVM).

Tabla 2. Producción y disposición histórica de los residuos sólidos.

Fuente: Departamento de Sostenimiento e Infraestructura de la Universidad

Año	Población (hab.)	Reciclaje (kg/d)	Disposición final EEVVM (kg/d)	Compostaje (kg/d)	Producción de residuos (kg/d)
2003	27717	753	1047	-	1800
2004	29110	1000	1050	350	2400
2005	29307	450	2080	500	3030
2006	29916	600	1600	900	3100

A partir del año 2004, justo cuando entra en funcionamiento la planta de compostaje, se tiene que del total de los residuos orgánicos producidos por día, un porcentaje del 14,6%, 16,5% y 29% fue compostado, en los años 2004, 2005 y 2006 respectivamente. Además, del total de residuos compostados, la cantidad de

residuos orgánicos generados per cápita, corresponde al 0,01 kg/hab/día en el año 2004, 0,02 kg/hab/día en el año 2005 y 0,03 kg/hab/día en el año 2006.

La información anterior representa que en cuanto avanza el tiempo y la cantidad de personas que habitan y concurren en la Universidad incrementa, la producción de residuos orgánicos aumenta también. Lo que se traduce en mayores retos para el Comité de Gestión Integral de Residuos Sólidos de la Universidad, por las grandes cantidades de residuos biodegradables que se pueden acumular mensualmente y que deben ser tratados en la fuente para evitar aumentar los porcentajes de residuos ordinarios que son enviados al relleno sanitario.

La mejor estrategia sería reducir las producciones generadas, pero contrario a ello, una tendencia creciente se demarca en el incremento de la población universitaria que al margen de complejas dinámicas de vida, sesgadas por el consumismo y la gran demanda de bienes y servicios, causan potencialmente un incremento en la producción de residuos.

De acuerdo con el informe suministrado por el Departamento de Infraestructura y Sostenimiento, en el periodo de normalidad académica del año 2015, la Ciudadela Universitaria contó con una población de aproximadamente 40.000 personas y las cantidades de generación y disposición de residuos para los meses julio, agosto, septiembre y octubre del mismo año, se ven reflejadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Producción y disposición de los residuos sólidos en el año 2015.

Fuente: Departamento de sostenimiento e infraestructura de la UdeA

Mes	Población (hab)	Reciclaje (kg)	Disposición final EEVVM (kg)	Compostaje (kg)	Producción de residuos (kg)
Julio	40000	5753,4	82385,1	7500	95638,5
Agosto	40000	5251,1	82385,1	5000	98527,7
Septiembre	40000	7331,9	127129,4	6800	141261,30
Octubre	40000	6538,60	147582,80	2500	156621,40

Cuando en el año 2015, la población universitaria casi duplicaba la cantidad de habitantes que había en el año 2004, la producción de residuos representaba fuertes incrementos, mes a mes. Además, contrario a la dinámica creciente, las cantidades compostadas reflejaron una disminución, pues en agosto, septiembre y octubre se compostaron 1500 kg, 700 kg y 5000 kg de residuos orgánicos menos que en el mes de julio, donde se compostaron 7500 kg.

Calculando para cada mes, la producción de residuos, las cantidades compostadas, recicladas y llevadas al relleno sanitario diariamente, como lo muestra la Tabla 4, se encuentra un marcado incremento entre la producción de residuos en kilogramos-día

para cada mes en relación con lo generado en los otros años. Verbigracia, en el mes de octubre se produjo alrededor de 5220,71 kg de residuos sólidos diarios, de esos el 1,6% fue compostado, lo que representa que cada persona generó aproximadamente 0,13 kg/día de residuos orgánicos en ese mes.

Tabla 4. Producción y disposición de los residuos sólidos diarios.

Mes	Población (hab)	Reciclaje (kg/día)	Disposición final EEVVM	Compostaje (kg/día)	Producción de residuos	GPC (kg/hab/día)	Compostado (%)
Julio	40000	191,78	2746,17	250,00	3187,95	0,08	7,84
Agosto	40000	175,04	2942,55	166,67	3284,26	0,08	5,07
Septiembre	40000	244,40	4237,65	226,67	4708,71	0,12	4,81
Octubre	40000	217,95	4919,43	83,33	5220,71	0,13	1,60

Ahora, analizando el mes en el que se ensamblaron las Pacas Biodigestoras, en septiembre, se generaron 4708,71 kg/día, de los cuales sólo el 4,81% fue compostado diariamente y se calcula que la cantidad aproximada producida per cápita fue de 0,12 kg/día de residuos orgánicos. Esta elevada producción de material orgánico está causando que la capacidad de carga de la planta de compostaje y el espacio disponible se sature.

7.2. Cantidad de materia orgánica fresca que procesa la Paca Biodigestora

Las Pacas Biodigestoras ensambladas, se construyeron con un volumen inicial de un metro cúbico aproximadamente, el cual alcanzó a contener una cantidad de 626,90 Kg de materia orgánica fresca (entre chamizas, amarres, hojarasca, poda y restos de cocina) usando el molde de madera y una masa de 584,81 Kg con el molde de lámina metálica, tal como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Cantidad de materia orgánica fresca empacada.

Molde	Pacas Biodigestoras	Material Orgánico	Masa (Kg)
Madera	Paca Sucesiones	Chamizas y amarres	43,48
	Paca Parametrización	Hojarasca y poda	399,47
		Restos de cocina	183,96
		Total	626,90
Lámina metálica	Paca Organismos	Chamizas y amarres	38,77
		Hojarasca y poda	369,78
	Paca Huerta Urbana	Restos de cocina	176,25
		Total	584,81

Lo anterior significa, que la uniformidad que aporta el molde de madera, durante la compactación de los residuos y las ventajas que ofrecen sus caras de un metro de altura, hace que mayor cantidad de material pueda ser depositado y dispuesto a un proceso de descomposición. Contrario a lo que se evidencia con el molde de lámina metálica, cuya altura de 0,5 m determina que el molde deba elevarse en cuanto se va compactando generando mayores espacios capilares que son ocupados por el oxígeno y menor contenido de materia orgánica fresca pueda ser empacada y reciclada, aun cuando sigue siendo una fracción considerable para el espacio que se utiliza.

Si se establece una relación entre la cantidad de residuos orgánicos que procesa la Paca Biodigestora y la producción de residuos a compostar, reportados en la Tabla 3. para los meses de junio a octubre del año 2015, es posible determinar el número de pacas que se deberían ensamblar para procesar con este método esa misma cantidad a compostar.

Por ejemplo como muestra la Tabla 6. en el mes de septiembre, se depositaron en los bioreactores 6800 kg de materia orgánica fresca, si se quisiera procesar esa misma cantidad mediante el método de las pacas es necesario ensamblar 11 Pacas Biodigestoras utilizando el molde de madera o 12 con el molde de lámina metálica.

Tabla 6. Relación entre la cantidad de residuos orgánicos que procesa la Paca Biodigestora y la producción de residuos compostados para el año 2015.

Mes	Materia orgánica fresca (kg)	M. Madera (626,9 kg)	M. Metálico (584,81)
Julio	7500	12	13
Agosto	5000	8	9
Septiembre	6800	11	12
Octubre	2500	4	5

Ahora, teniendo en cuenta que el ensamblaje de una Paca Biodigestora que alcanza a digerir entre 500 y 630 kg de residuos orgánicos contenidos en un metro cúbico y construida por cuatro personas, tarda aproximadamente cuatro horas y ocupa un espacio de un metro cuadrado del suelo. La cantidad de espacio requerida para digerir mediante las pacas los residuos orgánicos compostados en el mes de septiembre, realizando 12 pacas en un mismo espacio, sería de 21,25 m², usando indistintamente el molde de madera o el molde de lámina metálica, tal como lo muestra la imagen 41. Además, la cantidad en horas destinadas para ensamblar dichas pacas sería entre 44 y 48 horas, para una labor efectuada por cuatro personas.

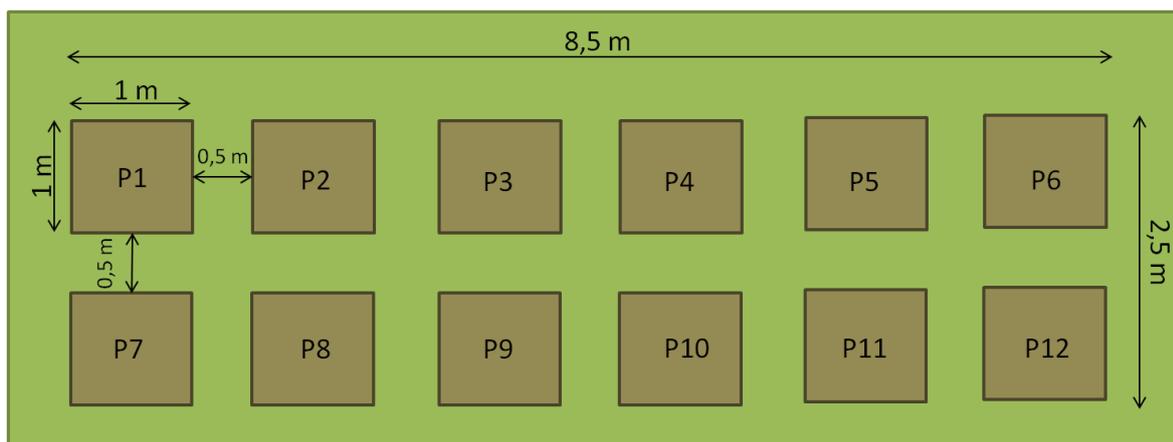


Imagen 41. Distribución de 12 pacas en una misma área.

7.3. Parámetros fisicoquímicos monitoreados

El registro de los factores que reflejaron el proceso de digestión de cada paca estuvieron mediados por el monitoreo de las variables: densidad, cambios en la altura, la temperatura, la humedad y el pH. Cabe recordar, que las mediciones registradas comenzaron el 27 de noviembre de 2015, correspondiente a la semana 11 y terminaron el 8 de marzo de 2016, en la semana 27, y se efectuaron los lunes, miércoles y viernes de cada semana.

A continuación se presenta una descripción en detalle de cada variable, incluyendo las gráficas de los datos monitoreados y en algunos casos, la proyección de los datos registrados en las primeras 10 semanas por el grupo parametrización del proyecto de aula.

7.3.1. Densidad

La densidad, está dada en términos de la masa (gramos) en relación con el volumen (cm^3), en condiciones iniciales y finales. Las condiciones iniciales de la densidad en las pacas fueron determinadas por las medidas tomadas durante y después del momento del ensamble.

La paca de organismos contó con una masa inicial de 584.810 g y un volumen inicial de 100 cm^3 , registrando una densidad inicial de $0,58 \text{ g/cm}^3$. Las pacas de sucesiones y parametrización tuvieron individualmente una masa inicial de 626.900 g, contenida en un volumen inicial de 100 cm^3 , lo que representa una densidad de $0,63 \text{ g/cm}^3$ para cada una.

La densidad final fue determinada mediante el análisis fisicoquímico en el laboratorio, evaluada para el abono orgánico obtenido de la paca organismos.

Suponiendo que la densidad reportada por el Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares (GIEM) para la muestra recolectada, es un representativo para todas las pacas debido a que la distribución y naturaleza de su contenido fue muy similar, además el tiempo de descomposición y las condiciones ambientales a las que estuvieron expuestas fueron las mismas, la densidad final para cada Paca Biodigestora fue de $0,42 \text{ g/cm}^3$.

El valor de la densidad final reportado para las pacas, está dentro del margen que estipula la NTC 5167 (2004), donde el producto final debe tener una densidad máxima $0,6 \text{ g/cm}^3$.

7.3.2. Cambios en la altura

Justo después de terminar el montaje de las pacas se registró con el flexómetro una altura de aproximadamente 100 cm en cada una. Y durante las primeras 10 semanas de digestión, el grupo parametrización registró algunos cambios importantes en la altura. En la tercera semana por ejemplo, la paca tenía una altura promedio de 90,9 cm, en la cuarta de 86,5 cm, en la quinta y sexta de 85 cm y 83,5 cm respectivamente. Dichos valores fueron proyectados para todas las pacas durante las 10 semanas iniciales debido a que tuvieron comportamientos muy similares, a partir de dicha semana se registró particularmente los cambios en cada paca.

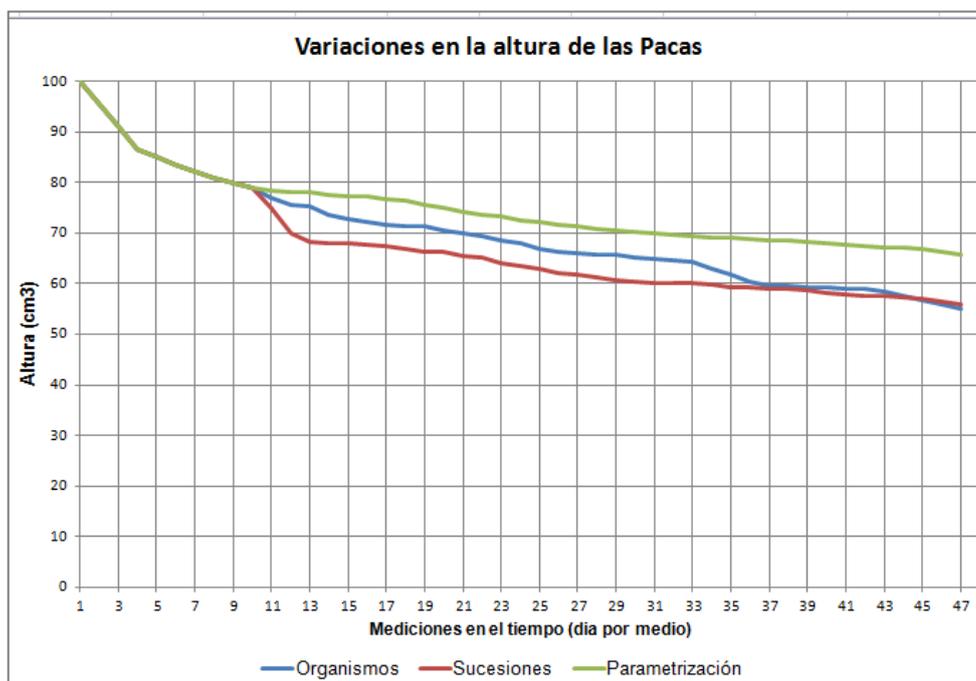
En la semana once, la paca de organismos tenía una altura de 77 cm, la paca de sucesiones una altura 70 cm y 78 cm la paca de parametrización. La diferencia marcada en la paca de sucesiones, está muy relacionada con la propagación de hormigas, lo que causó un desnivel muy pronunciado en una de sus caras, el cual se fue intensificando con el tiempo, la imagen 42., muestra la inclinación de ella.



Vista frontal y lateral del desnivel en la Paca Organismos

Imagen 42. Desnivel en la Paca Organismos.

A continuación, la gráfica 1 muestra la disminución progresiva de la altura de las pacas a lo largo de seis meses de digestión, mediante 47 mediciones efectuadas los días lunes, miércoles y viernes de cada semana a partir de la semana 11.



Gráfica 1. Variación en la altura de las pacas durante el tiempo de digestión.

A los seis meses de digestión, mediante el registro 47, la altura promedio reportada para la Paca Organismos fue de 55 cm, para la Paca Sucesiones de 56 cm y la Paca Parametrización de 65,7 cm.

7.3.3. Variaciones en la temperatura

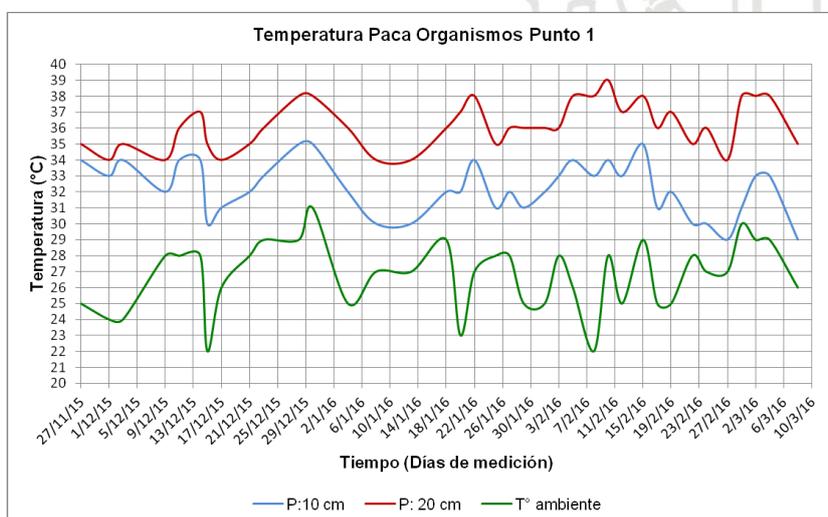
Durante las primeras 10 semanas, las mediciones efectuadas por el grupo parametrización del proyecto de aula, reportaron para la semana 3 una temperatura, en las esquinas de la cara superior, entre 21° C y 26°C y en el centro de la cara una temperatura de 41°C. A la cuarta semana la temperatura muestra un progresivo incremento y las esquinas registrando valores entre 26°C y 27°C y el centro de 43°C. A la quinta semana, la temperatura muestra una disminución, reportando un rango entre 20°C y 22°C para las esquinas y 36°C en el centro. Pero esta situación se revierte al encontrarse en la semana seis un notable incremento con valores para las esquinas entre 34°C y 39°C y en el centro de 40°C. Algunas mediciones efectuadas en las caras laterales, registraron una variación entre un rango de 36,75°C a 44,5°C.

Entre la sexta y séptima semana, el centro de la cara superior siguió presentado aumentos entre un rango de 36°C a 50°C. Correspondiendo el último valor a la máxima temperatura registrada en las pacas, durante este tiempo. Esto puede significar que, efectivamente en los tres primeros meses de digestión, las pacas

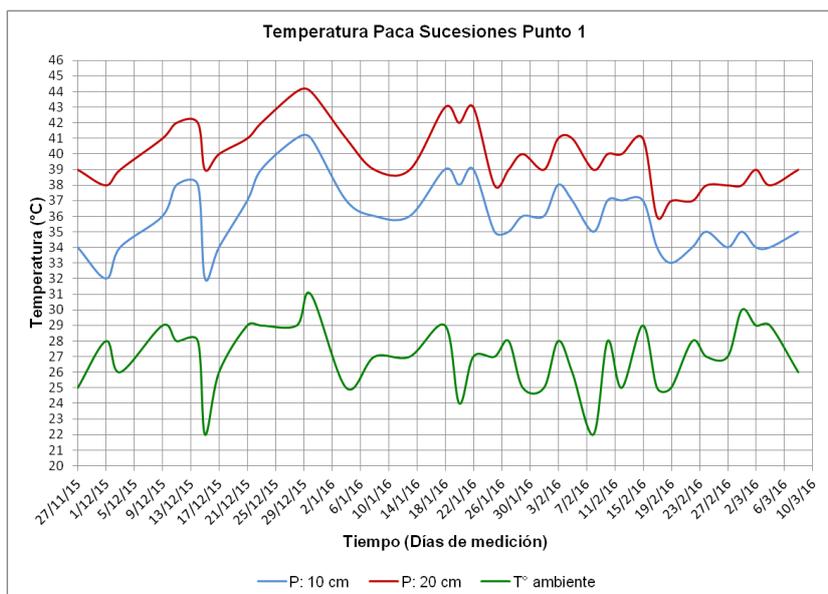
pasan por la etapa mesófila o de temperatura regulada y termófila o de alta temperatura. La mesófila demora un par de días, la temperatura del material comienza en condición ambiente y en cuanto aumenta la actividad biológica por los organismos mesófilos, que rompen rápidamente los compuestos solubles fácilmente degradables, aumenta la temperatura hasta por encima de los 40°C, causando que los organismos mesófilos se vuelvan menos competitivos y sean remplazados por los termófilos (Bueno M. et al., 2009). Aparte de causar la inhibición de los organismos patógenos que no son resistentes a altas temperaturas.

En la fase termofílica, las altas temperaturas favorecen el desarrollo de organismos capaces de degradar moléculas más complejas como las proteínas, los ácidos grasos y polisacáridos como la celulosa y la hemicelulosa, las principales moléculas estructurales de las plantas. En la medida que estos compuestos altamente energéticos son agotados, la temperatura baja gradualmente y los microorganismos mesofílicos vuelven a colonizar y se encargan de la fase final de maduración de la materia orgánica remanente (Agreda & Deza, 2006), en esa medida es posible garantizar que los organismos termófilos han culminado su labor.

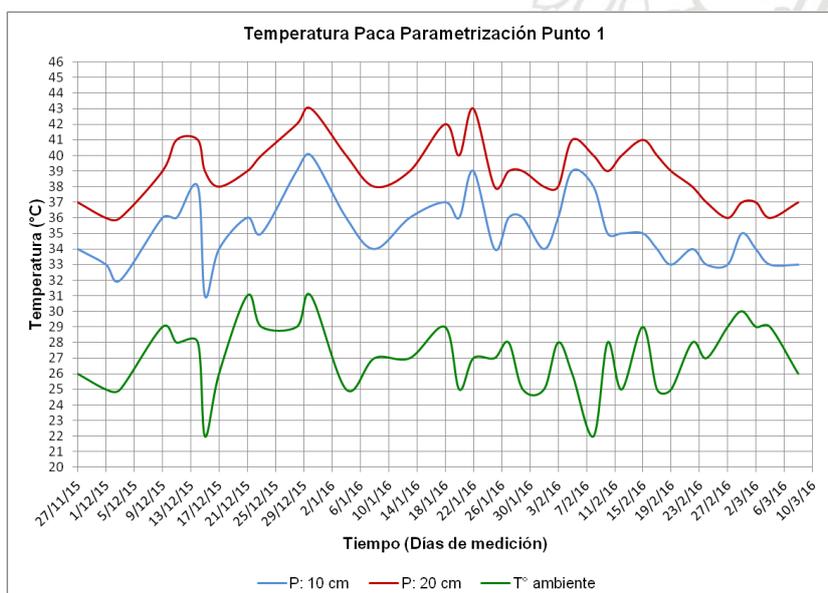
Las gráficas 2, 3 y 4, muestran el comportamiento de la temperatura en el Punto 1, correspondiente al centro de la cara superior, tomada a dos diferentes profundidades a 10cm (línea azul) y 20cm (línea roja) y se toma de referencia la variación de la temperatura ambiente sobre la paca (línea verde) durante los días de medición.



Gráfica 2. Variación de la temperatura en la Paca Organismos en el Punto 1.



Gráfica 3. Variación de la temperatura en la Paca Sucesiones en el Punto 1.



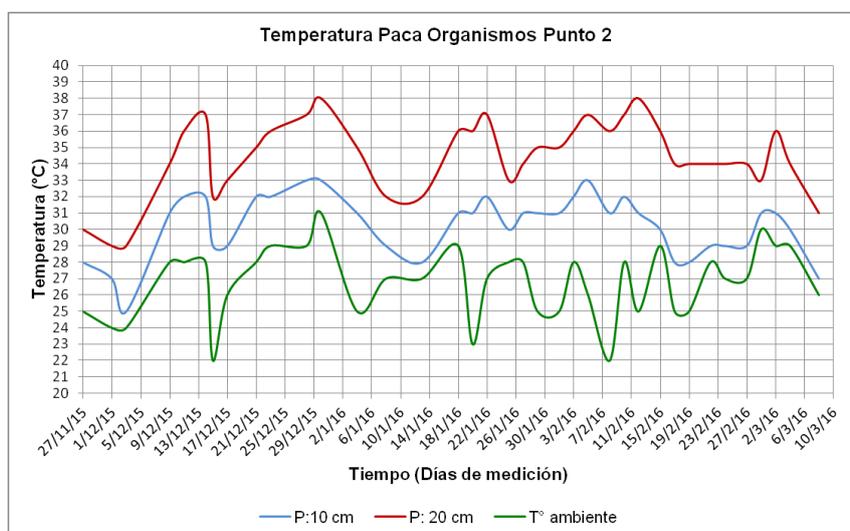
Gráfica 4. Variación de la temperatura en la Paca Parametrización en el Punto 1.

La temperatura durante los últimos tres meses de descomposición muestra una oscilación irregular en ambas profundidades. Aunque persiste una diferencia notable entre los rangos de oscilación a 10 cm de profundidad con respecto a 20 cm, donde: a mayor profundidad se encuentran rangos de temperaturas más altas y a menor profundidad rangos de temperatura más bajos.

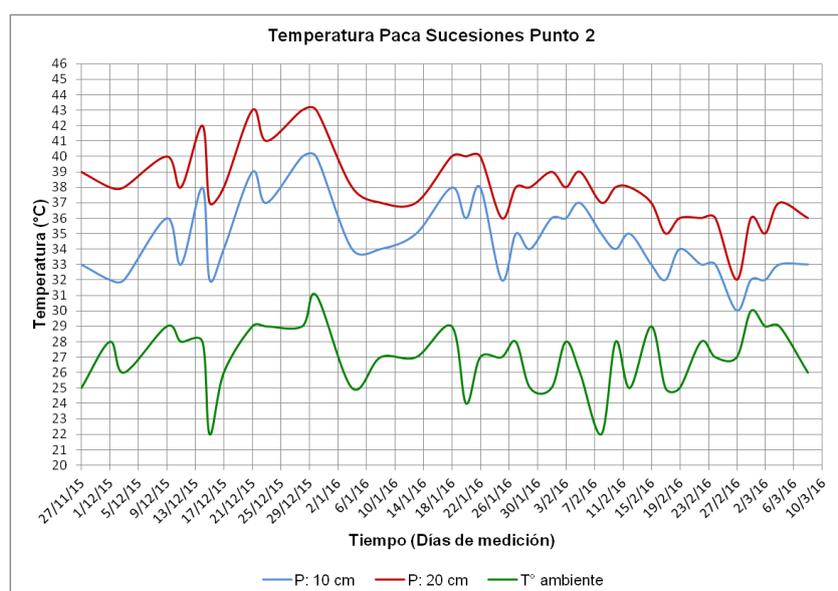
Es importante considerar que hay una gran influencia en las variaciones de la temperatura de las pacas con respecto a la temperatura ambiente, pues en ocasiones cuando la medición de la temperatura ambiente reportó aumentos, la temperatura en la paca también se incrementó especialmente en los primeros diez centímetros de profundidad.

Tales aumentos irregulares de la temperatura, podrán ocasionar que haya afectaciones y rápidas variaciones en la actividad microbiológica, pues organismos que no las resistan pueden morir y el proceso de digestión puede desacelerarse. Aunque la misma situación, también favorece a los organismos resistentes a altas condiciones de temperatura que logran propagarse más fácilmente, pero una nueva estabilidad no se observa sino hasta que estos logren adaptarse.

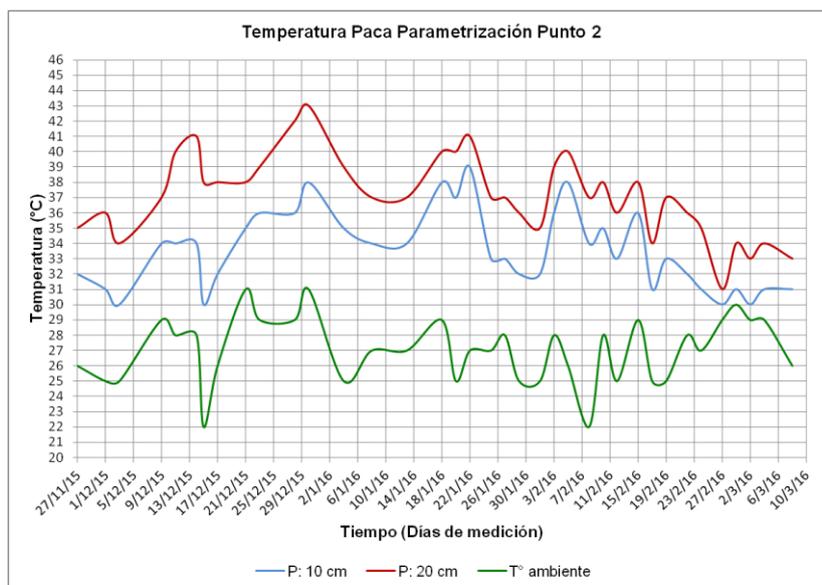
Similar a los registros en el centro de las pacas, sucede a 20 cm de distancia (Punto 2) donde la temperatura se registró a las mismas profundidades y también fueron comparadas con la temperatura ambiente, tal como se observa en las gráficas 5, 6 y 7.



Gráfica 5. Variación de la temperatura en la Paca Organismos en el Punto 2.



Gráfica 6. Variación de la temperatura en la Paca Sucesiones en el Punto 2.



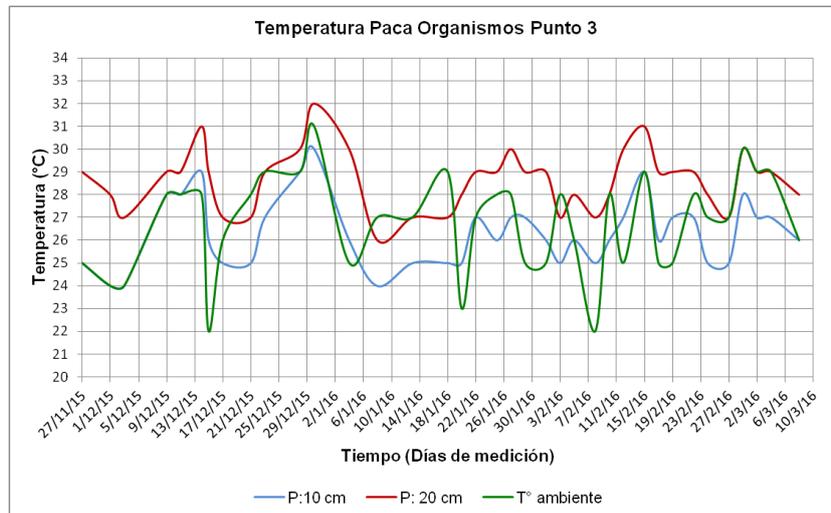
Gráfica 7. Variación de la temperatura en la Paca Parametrización en el Punto 2.

En las gráficas anteriores, se puede notar el mismo patrón que en el punto 1, donde la línea roja (profundidad igual a 20 cm) sobrepasa la línea azul (profundidad igual a 10 cm), representando que a menor profundidad prevalece el desarrollo de organismos mesófilos y a mayor profundidad organismos termófilos, lo cual puede tener relación con la naturaleza del material (residuos de alimentos) que se encuentra a la distancia del punto 2 y a una profundidad de 20 cm, están conformados por moléculas complejas que implican mayor actividad biológica en la cual se generan pérdidas de energía en forma de calor.

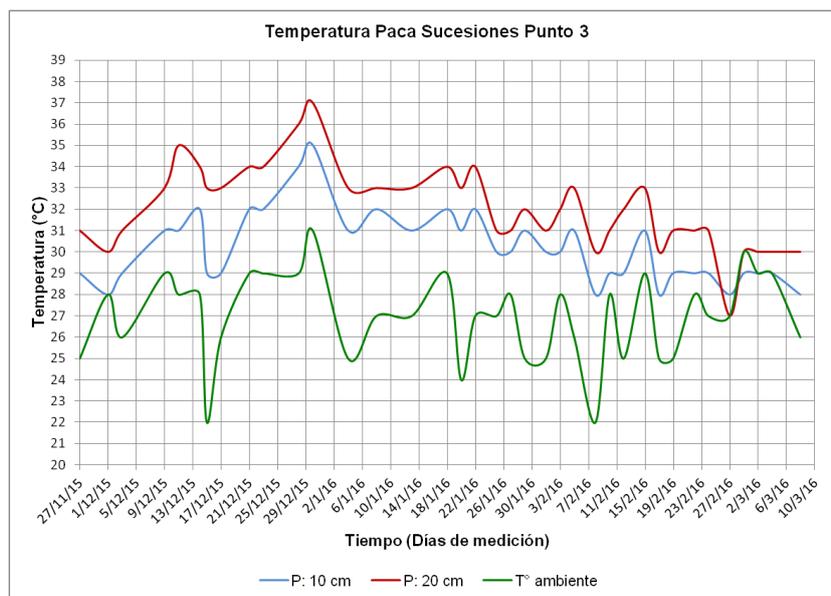
Si se mira con detenimiento la línea roja en la gráfica de la Paca Sucesiones, un fuerte incremento de temperatura se evidencia en el mes de diciembre de 2015 donde la temperatura oscila entre 40°C y 43°C, que siendo un directo reflejo de los aumentos en la temperatura ambiente de esa época, tal situación pudo haber perjudicado las condiciones de humedad y por ende de actividad microbológica, ocasionando disminución en el proceso de digestión de la materia orgánica allí contenida. En la Paca Parametrización también se evidencia este caso, pero con aumentos de temperatura hasta 40°C registrados con mayor tendencia en la segunda semana de diciembre, permaneciendo estable en 38°C durante la tercer semana de diciembre, para alcanzar a fin del mes un máximo de temperatura de 43°C que luego toma una tendencia decreciente hasta 36°C que dura hasta la segunda semana de enero de 2016.

La tendencia de la línea azul muestra como las condiciones ambientales interfieren de manera directa en la variación de la temperatura en los primeros diez centímetros de profundidad. Aunque se puede considerar que la Paca Biodigestora tiene una buena capacidad de autorregulación, pero en ocasiones los cambios bruscos interfieren en el proceso de digestión de la materia orgánica que pueden verse reflejados en la poca disminución de la altura de las pacas.

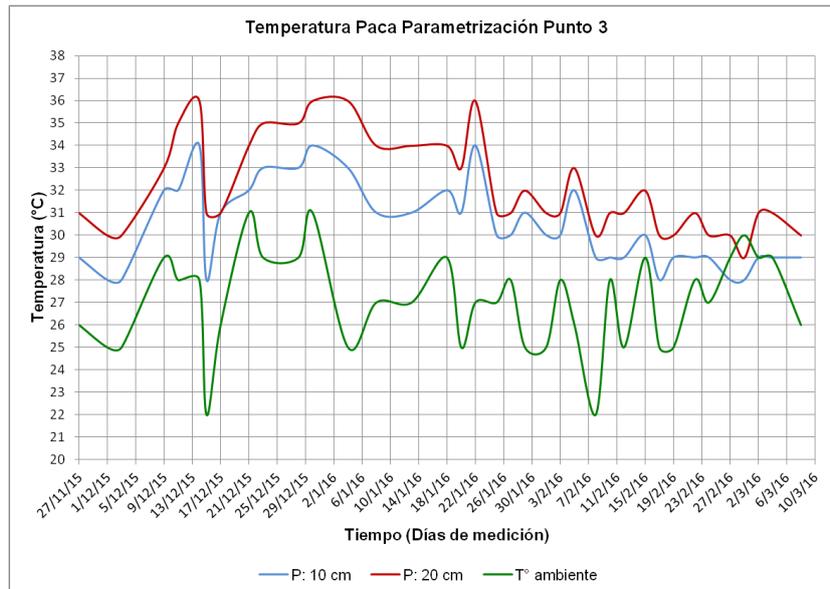
Un mejor indicador de esta situación, lo reflejan las gráficas 8, 9 y 10 donde la temperatura fue tomada a diez centímetros de distancia del borde (Punto 3) e igualmente en las dos profundidades determinadas.



Gráfica 8. Variación de la temperatura en la Paca Organismos en el Punto 3.



Gráfica 9. Variación de la temperatura en la Paca Sucesiones en el Punto 3.



Gráfica 10. Variación de la temperatura en la Paca Parametrización en el Punto 3.

En este punto 3, en la Paca Organismos por ejemplo, las líneas que marcan las mediciones a una profundidad de 10 y 20 cm, se súper ponen a los registros de la temperatura ambiente en muchos momentos, indicando condiciones similares y muy próximas a las del entorno, que influyen con mayor incidencia en los primeros centímetros de profundidad de la paca.

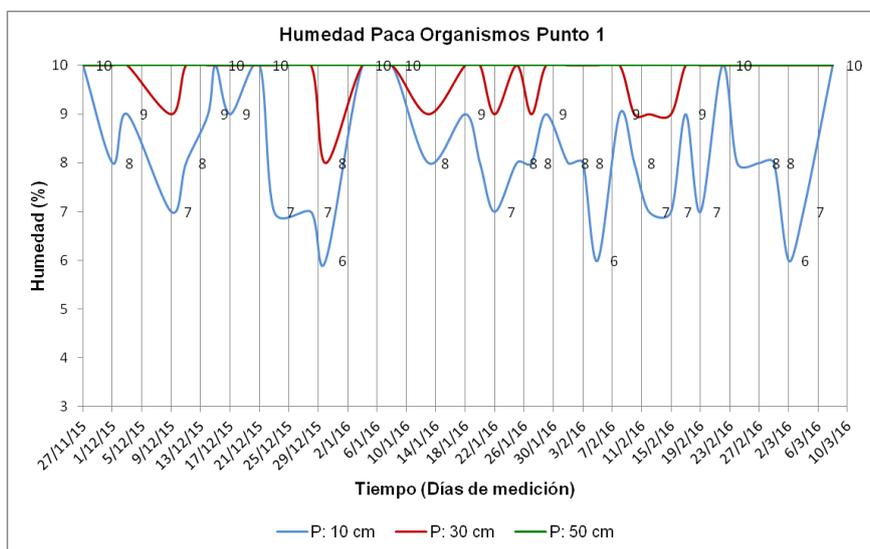
El comportamiento en las otras dos pacas no es muy distante, claramente se nota la influencia de la temperatura ambiente en ellas debido a las oscilaciones tan similares que muestran las líneas. Aunque el rango de variación de las líneas rojas y azules es mayor que la línea verde, lo que refleja que los aumentos también están relacionados con la actividad de descomposición. Además la línea roja fluye por encima de las otras indicando mayores temperaturas en el interior de la paca.

7.3.4. Variaciones en la humedad

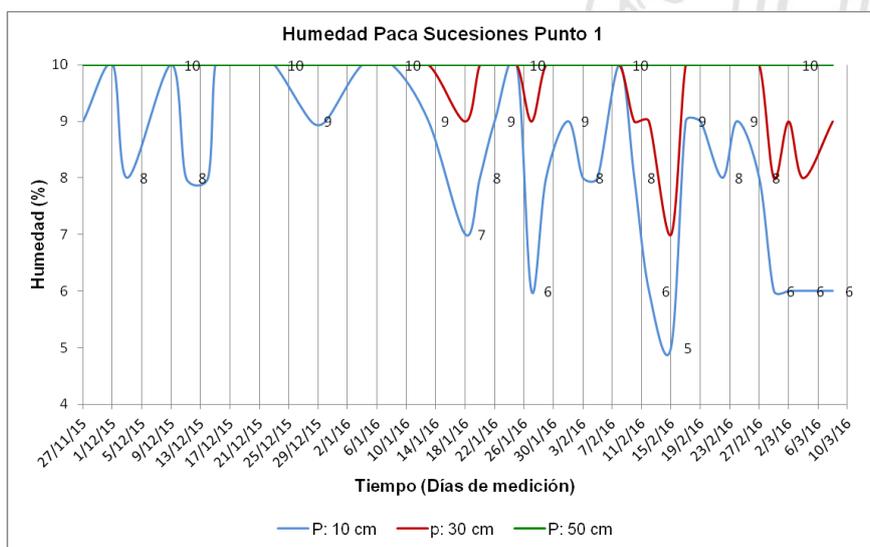
Al igual que la temperatura, la humedad se midió durante el mismo tiempo y en los mismos tres puntos delimitados en la capa superior de cada paca, pero ésta vez a tres diferentes profundidades: 10 cm, 30 cm y 50 cm. Los datos son arrojados en un rango de 0 (seco,) correspondiente al cero por ciento de humedad y 10 (saturado), correspondiente al cien por ciento de humedad.

Las variaciones en la humedad dependen de los cambios de la temperatura, es decir a mayores temperaturas, mayor cantidad de agua se evapora y menor es el porcentaje de humedad. Y viceversa, a menores temperaturas, mayor cantidad de humedad queda disponible para favorecer la actividad biológica de descomposición.

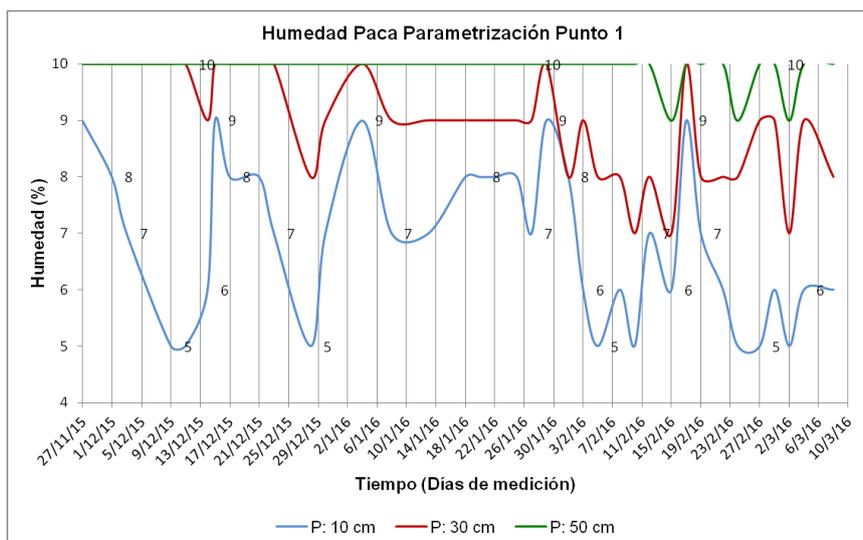
Las gráficas 11, 12 y 13 representan las variaciones de la humedad en el Punto 1 para las pacas Organismos, Sucesiones y Parametrización respectivamente en las tres distintas profundidades, línea azul (P: 10 cm), línea roja (P: 30 cm) y línea verde (P: 50 cm).



Gráfica 11. Variación de la humedad en la Paca Organismos en el Punto 1.



Gráfica 12. Variación de la humedad en la Paca Sucesiones en el Punto 1.

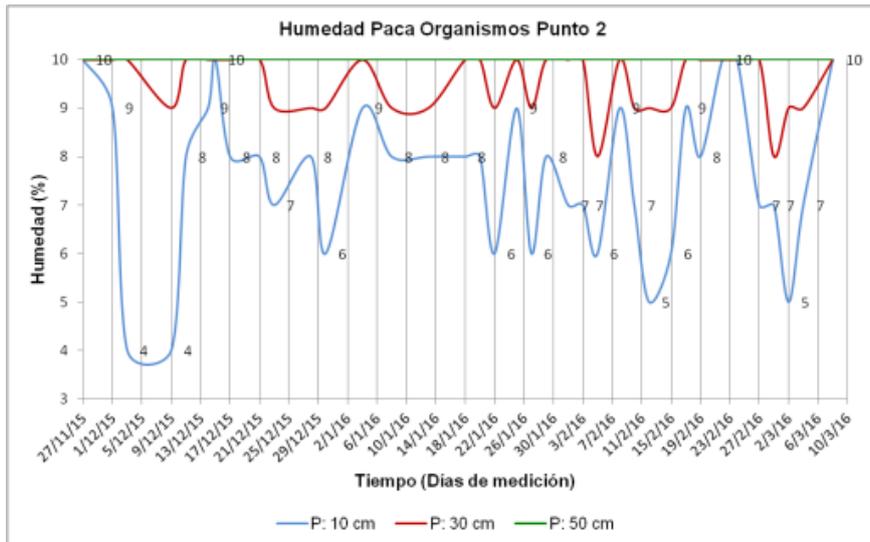


Gráfica 13. Variación de la humedad en la Paca Parametrización en el Punto 1.

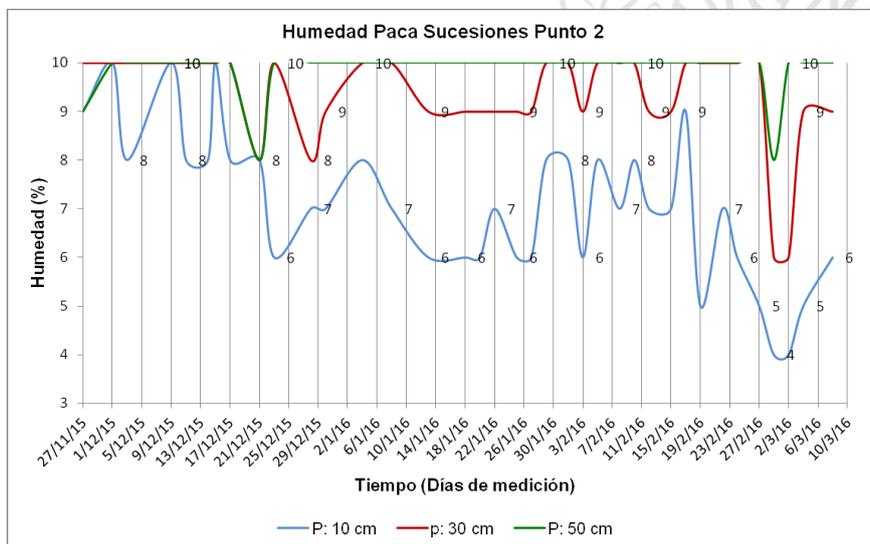
En las gráficas se puede observar que la línea verde permanece constante la mayor parte del tiempo registrado, en un valor correspondiente al 100% de humedad. En condiciones de saturación según el rango establecido, el interior de la paca nunca se ve escaso de humedad, situación que favorece la reproducción y abastecimiento de los microorganismos descomponedores.

Contrario a esta tendencia, la línea azul, que es la medida a menor profundidad, oscila de manera continua en los porcentajes de humedad, llegando a tomar valores mínimos de 50% y 60%. Aunque no sea una condición desfavorable para los microorganismos, es muestra que la incidencia de la luz solar y la temporada climática de sequía a la que estuvo expuesto el proceso de degradación, ocasionó que los niveles de humedad no fueran óptimos todo el tiempo y se presentaran pérdidas por evaporación debido a las altas temperaturas registradas.

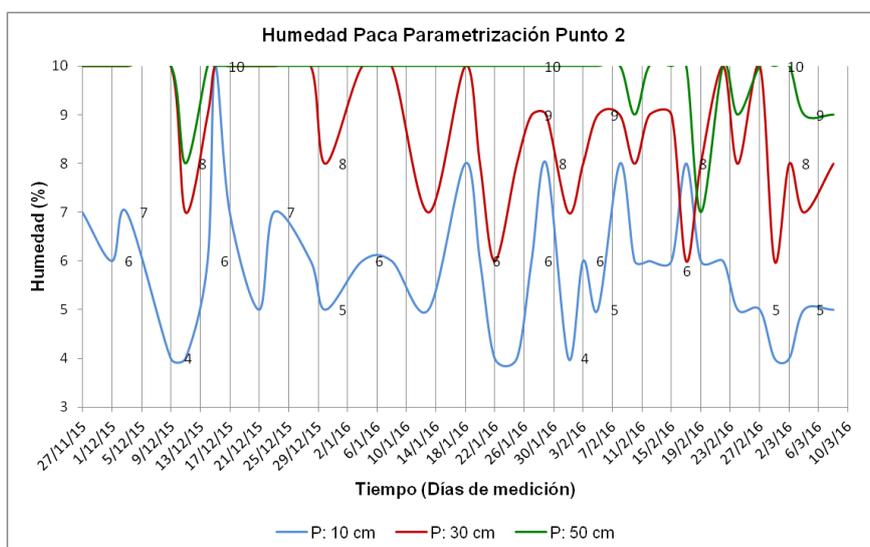
En las gráficas 14, 15 y 16 se ve representada las variaciones de la humedad en el Punto 2 para las pacas organismos, sucesiones y parametrización en tres distintas profundidades.



Gráfica 14. Variación de la humedad en la Paca Organismos en el Punto 2.



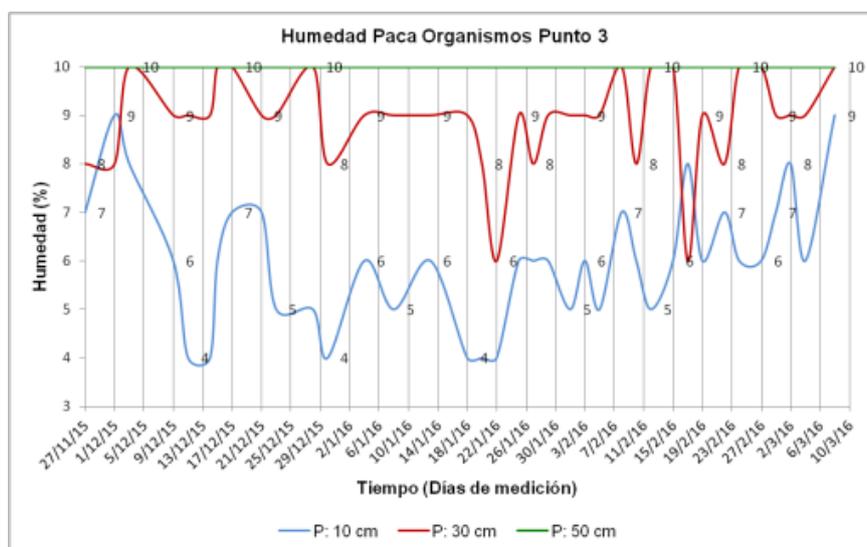
Gráfica 15. Variación de la humedad en la Paca Sucesiones en el Punto 2.



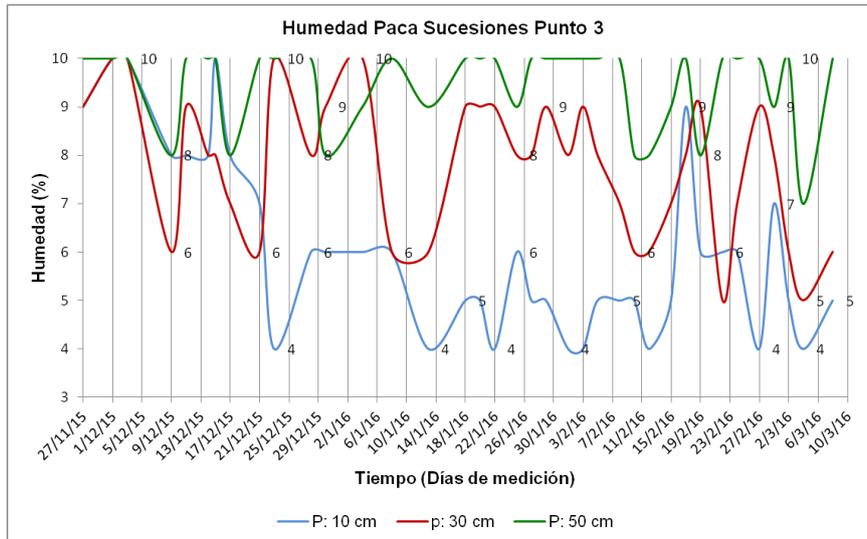
Gráfica 16. Variación de la humedad en la Paca Parametrización en el Punto 2.

En este punto de medición, la situación de la humedad aunque permanece regulada a mayor profundidad, a menor profundidad se observan grandes variaciones, reflejando porcentajes de humedad por debajo del 50%. En algunos casos, cuando la humedad estaba por debajo del porcentaje medio, se recurrió a agregar agua sobre la paca, estimulando la reproducción microbiana y la actividad de descomposición, que se ve gravemente afectada cuando la humedad disminuye en tan extremas condiciones.

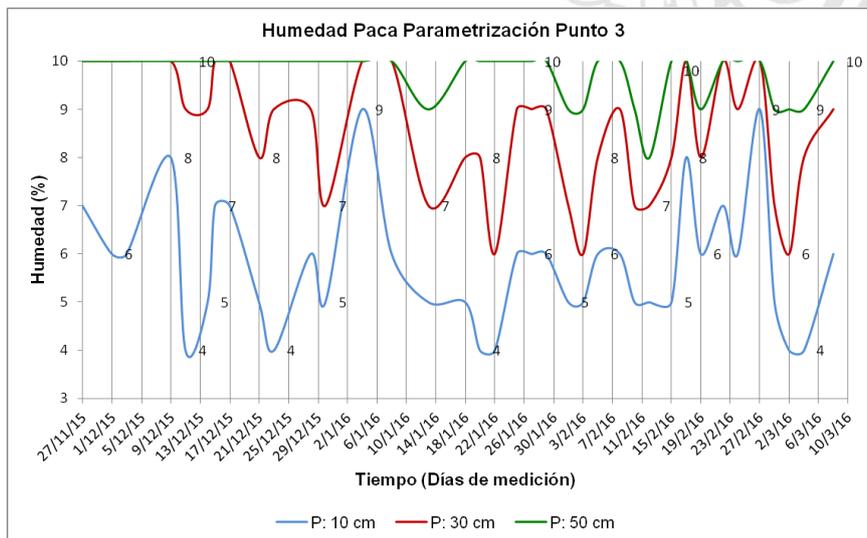
Realmente un 40% de humedad puede reflejar que el sustrato esta deshidratándose y que la mayor parte de energía de los microorganismos no va a ser usada para descomponer el material sino para combatir la deshidratación. Esta situación se ve marcada con mayor incidencia en las mediciones de la humedad en el Punto 3 de las pacas, como se observa en las gráficas 17, 18 y 19. A diez centímetros de profundidad, la mayor parte del tiempo, osciló entre el 40% y 70%, mostrando condiciones muy variables y poco favorables para la actividad de descomposición.



Gráfica 17. Variación de la humedad en la Paca Organismos en el Punto 3.



Gráfica 18. Variación de la humedad en la Paca Sucesiones en el Punto 3.



Gráfica 19. Variación de la humedad en la Paca Parametrización en el Punto 3.

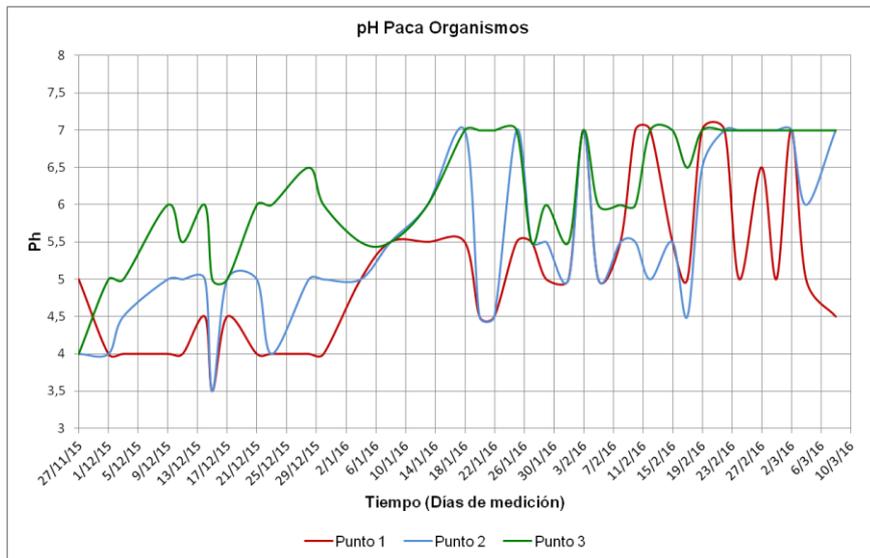
La incidencia de los bajos porcentajes de humedad a menor profundidad en la paca, indica que los niveles de descomposición en estas áreas son más lentos. Por ende, la capa de hojarasca que conforman los bordes y la capa superior, la cual tiene las funciones de biofiltro, ya que cubre los residuos de alimentos que están en el núcleo y son más propensos a la pudrición cuando interactúan directamente con el oxígeno, se demoran más tiempo para degradarse en tanto cumplen su función de membrana o cascara protectora.

7.3.5. Variaciones del pH

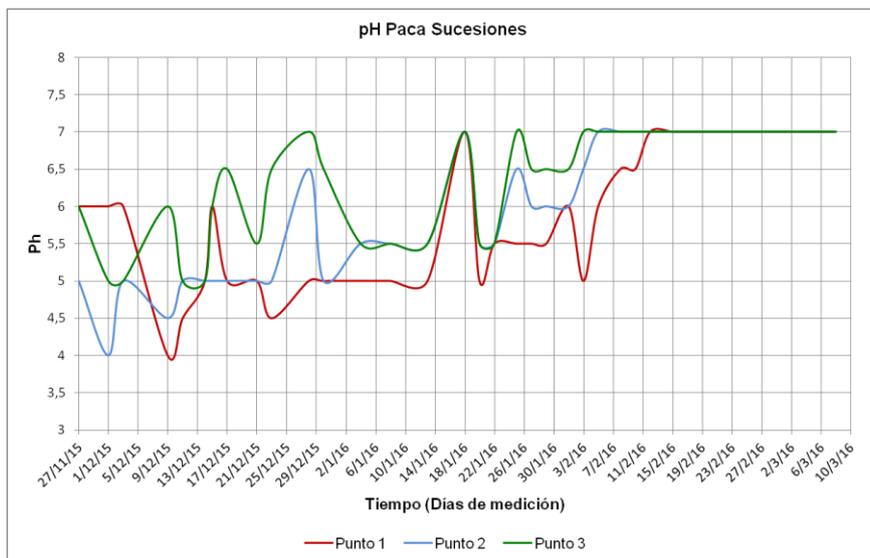
La medida del pH se tomó en los tres puntos delimitados en la capa superior de las pacas, como se mostró en la imagen XX y a una profundidad de 20 cm. El tiempo de medición fue día por medio al igual que en la temperatura y la humedad.

Valores del pH cercanos a la neutralidad favorecen la actividad de descomposición de los microorganismos, pero valores por debajo de cinco, reflejan un medio donde hay actividad fermentadora y por ende, generación de ácidos orgánicos, como el ácido acético. Que más que acidificar el sustrato, su producción permite desinfectar y sanear la materia orgánica en digestión.

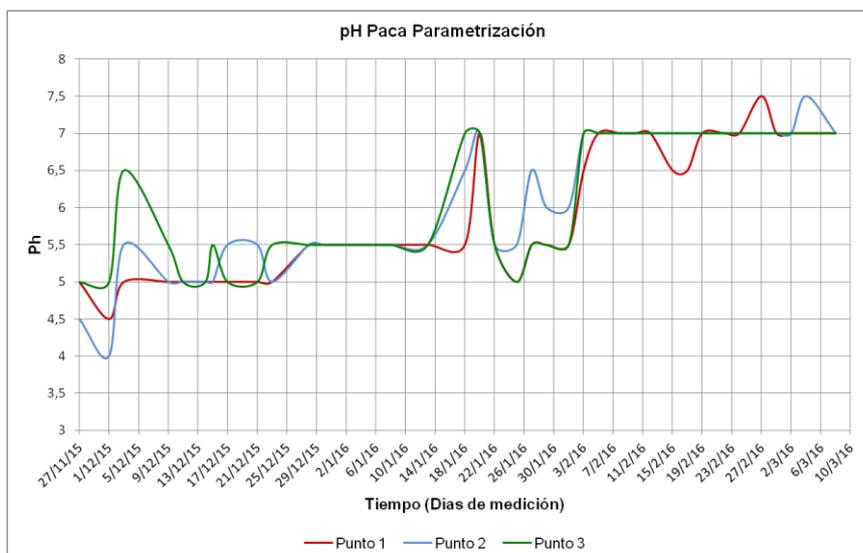
Las imágenes 20, 21 y 22 muestran los cambios del pH en los distintos puntos de las tres pacas, registrados durante el monitoreo.



Gráfica 20. Variación del pH en la Paca Organismos.



Gráfica 21. Variación del pH en la Paca Sucesiones.



Gráfica 22. Variación del en la Paca Parametrización.

En todas las pacas, los rangos de pH entre 4 y 5 se ven muy marcados en las mediciones del mes de diciembre y los primeros 15 días de enero. Después de estas fechas, los rangos de pH aumentan, oscilando entre 5.5 y 7, condición favorable que demuestra que la gran fase de desinfección del material orgánico debido al ácido acético generado por la fermentación se da en los primeros cuatro meses de descomposición, luego de este tiempo, el pH se acerca a la neutralidad indicando una evolución aceptable en el proceso de digestión, que es característico de la fase de maduración, donde una mayor fracción de la materia orgánica fresca ya ha sido transformada.

Además, en la mayor parte del proceso de digestión las líneas roja y azul que denotan los puntos 1 y 2 delimitados, se superponen indicando que en el área correspondiente al núcleo de la paca, se dan condiciones similares en la variación del pH, pues allí especialmente una dinámica fermentadora se activa cuando los microorganismos anaerobios facultativos y aerotolerantes encuentran las condiciones apropiadas para desarrollar su metabolismo.

7.4. Observaciones sobre la Paca Huerta

En la Paca Huerta, cuyo objetivo fue demostrar que *mientras se digiere un metro cúbico de residuos orgánicos, se obtiene un metro cuadrado de suelo productivo*, tuvo sembrado sobre su capa superior plántulas de lechuga cressa, cebolla de rama, albahaca, cilantro, acelga, amaranto y chí. Es importante recordar que sobre la Paca Huerta se incluyó una última capa con abono proveniente de una paca ya madura

Las plantas tuvieron muy buena adaptación al mencionado abono; las semillas de amaranto y chíá que fueron sembradas directamente germinaron a la primera semana y crecieron, pero entre la octava y novena semana ambas plantas se vieron afectadas por un mutualismo entre áfidos (pulgones) y hormigas que atacaron las raíces y la base de los tallos. Para revertir la infestación de hormigas se agregó alrededor de las plantas durante esos días borra de café y un batido de ají con pimienta, ajo y cebolla, pero estos repelentes no lograron controlar la labor de los áfidos lo que causó que las plantas murieran, tal como se observa en la imagen 43 donde las últimas plantas de amaranto que habían resistido se ven caídas sobre la paca.



Imagen 43. Plantas de amaranto marchitas y borra de café alrededor de las plantas.

En cambio, las plantas de cilantro, lechuga crespá, cebolla de rama, acelga y albahaca, las cuales todas fueron trasplantadas, se desarrollaron sin ningún inconveniente y alcanzaron su madurez en la semana 14, siguiendo su ciclo de vida. Se pudo cosechar nueve plantas de cilantro, ocho de lechuga crespá, ocho de cebolla de rama, una de albahaca y una de acelga. El proceso de crecimiento de las plantas se muestra en las imágenes a continuación.



Imagen 44. Desarrollo de las plantas en la Paca Huerta.

La experiencia de cosechar y consumir las plantas sembradas en un cubo de residuos orgánicos puede significar que no solo hay alternativas para solucionar problemas sino también que se pueden obtener beneficios complementarios. De igual modo, las Pacas Biodigestoras no solo se convierten en un ecosistema reciclador de materia orgánica sino también en productor y generador de alimentos, que puede favorecer y desarrollar procesos de soberanía y autonomía alimentaria.

7.5. Análisis cualitativo de la calidad del abono orgánico: por cromatografía

El análisis cromatográfico de la muestra de abono orgánico obtenida de la Paca de organismos produjo una totalidad de doce cromas, seis de ellos realizados con papel filtro N° 1288 y los otros seis con papel filtro N° 292. Además, los seis fueron divididos en tres pares e impregnados con la solución del suelo y el hidróxido de sodio a diferentes concentraciones: 0,5%, 1,0% y 1,5%, como se explicó en la metodología.

Mediante los experimentos se pudo determinar a qué concentración de hidróxido de sodio y con cuál papel filtro es más efectivo realizar el análisis de cromatografía para el abono obtenido de las Pacas Biodigestoras, dando como resultado que ambos papeles filtro mostraron un buen comportamiento pero sólo cuando la concentración del hidróxido de sodio era del 0,5%. Las imágenes 45 y 46, muestran los cromas obtenidos usando el papel filtro N°1288 y el papel filtro N° 292, respectivamente.



Imagen 45. Cromas en papel filtro de N° 1288 y con hidróxido de sodio a una concentración de 0,5%.



Imagen 46. Cromas en papel filtro de N° 292 y con hidróxido de sodio a una concentración de 0,5%.

Las diferencias generadas para el análisis del croma según el tipo de papel filtro usado, es que el menos poroso (N°292) concentra la imagen, mientras que el más poroso (N°1288) expande dicha imagen y permite una lectura más detallada.

La interpretación de los cromas se realiza mediante el análisis de cada una de sus zonas, tal como se muestran delimitadas en las imágenes 47 y 48.

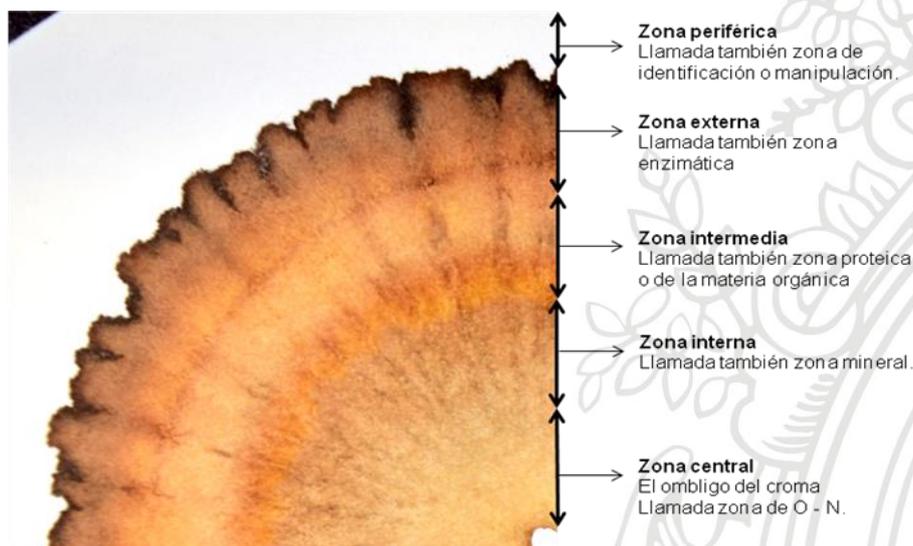


Imagen 47. Identificación de las zonas en el croma del filtro N° 1288.

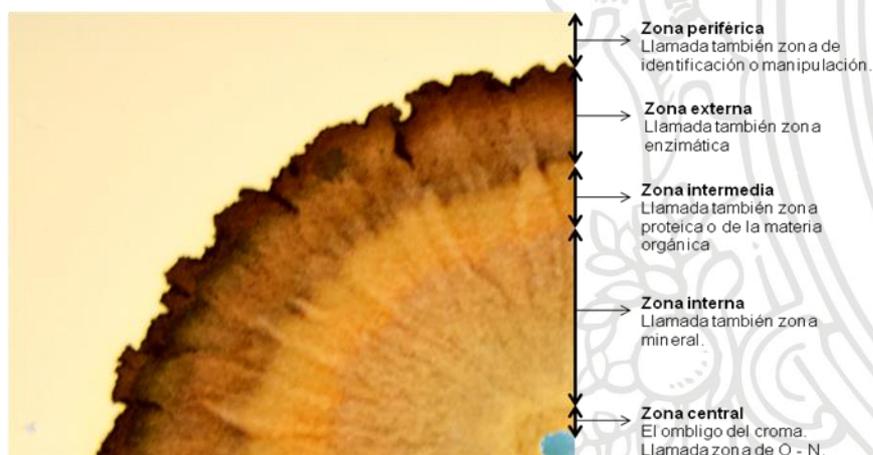


Imagen 48. Identificación de las zonas en el croma del filtro N° 292.

La zona central, indica el contenido de oxígeno y nitrógeno en la sustancia. Se ubica en el área más próxima al centro del papel filtro, como muestra la imagen A, y por lo general presenta una coloración oscilante entre blanco, blanco perlado y blanco cremoso como buenos indicadores, que se van desvaneciendo uniforme y armónicamente hasta la siguiente zona.

La zona interna o zona mineral, indica la presencia de minerales en el abono orgánico. Es la zona concéntrica subsiguiente de la zona central, se distingue

porque generalmente presenta una coloración más oscura, entre café y marrón, que varía de tonalidad según el estado de mineralización de la materia orgánica. El tono marrón claro que reflejan ambos cromas, demuestran que en la muestra aunque se evidencia buena cantidad de minerales que pueden ser benéficos para las plantas cuando el abono se incluye en el suelo, si se deja descomponer por un tiempo más, el potencial de minerales disponibles puede ser mayor.

La zona intermedia, proteica o de la materia orgánica, indica los procesos de transformación de las sustancias. Puede presentar diferentes colores como amarillo, marrón, café u otros, pero con diferentes tonos. El color amarillo que se observa, presenta una diferencia entre el café que procedía de la zona interna, cambia el desvanecimiento pero sigue con buena interrelación, con un tono que indica gran presencia de materia orgánica disponible en la muestra, que acorde con la fase mineral aún no ha sido transformada.

La zona externa o enzimática, no se manifiesta de forma gradual y armónica con nubes onduladas muy tenues o lunares suaves de colores café, contrario a ello, se presenta de manera densa, lo que significa que aún hay demasiada actividad enzimática y microbiológica. Pero refleja un sustrato totalmente saludable y pleno de vida que aún no ha llegado a su madurez y requiere mayor tiempo de digestión.

La interpretación de la zona externa, se puede corroborar con la terminación del croma que presenta forma de granos de maíz, una terminación no deseada cuando se trata de identificar un abono orgánico totalmente maduro. Aunque si se observa con detenimiento, pequeñas franjas con forma de erupciones de volcanes, de tonos más oscuros, emergen de la zona intermedia, reflejando que el tiempo que falta para culminar su digestión es poco, ya hay formación de figuras estampadas que según Restrepo R. & Pinheiros (2015) es la manifestación ideal en un croma.

En relación a los colores vivos, naranjas y amarillos, visibles en el croma, los cuales son indicadores indirectos de buena calidad, la muestra de abono orgánico analizada se encuentra dentro del rango tonal admisible que permite reconocerla como un sustrato apto para dotar de beneficios físicos, químicos y biológicos al suelo y a la micro fauna donde sea aplicado.

Los haces radiales que se observan desde el centro hasta afuera pero que se detienen con una delgada línea café visible en la imagen A, son un indicador de una adecuada integración entre los minerales, la materia orgánica y la actividad enzimática, aunque refleja que aún hay gran actividad microbiana de descomposición.

7.6. Análisis cuantitativo de la calidad del abono orgánico

7.6.1. Parámetros fisicoquímicos

La evaluación de la calidad del abono orgánico obtenido mediante el método cualitativo llevado a cabo por el Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares (GIEM), arrojó una serie de resultados para cada parámetro considerado, como se observa en la Tabla 7, que en comparación con la NTC 5167 (2004) y la literatura permite determinar si la muestra analizada cumple o no, con los niveles máximos permisibles y en consecuencia poder definir su estado y calidad.

Tabla 7. Parámetros fisicoquímicos de la muestra de abono orgánico.

Parámetros	Resultado GIEM	Unidad	Valor óptimo	Cumple
Cenizas	43,8	%	Max. 60%	Cumple
CIC	51,8	meq/100 g	Min. 30	Cumple
CIC/CO	237	meq/100 g CO	No definido	
Carbono orgánico oxidable total	21,8	%	Min. 15%	Cumple
Conductividad eléctrica	0,076	dS/m	Menor 3	Cumple
CRA	183	%	Min. su propio peso	Cumple
Densidad	0,42	g/cm ³	Max. 0,6	Cumple
Humedad	55,6	%	Max. 35%	No cumple
Nitrógeno orgánico total	1,60	%	2 y 3	No cumple
pH	7,12	-	>4 y <9	Cumple
Relación C/N	13,7	-	Menor a 20	Cumple

El contenido de cenizas representa el grado de mineralización de la materia orgánica y refleja el porcentaje de sustancias inorgánicas no volátiles presentes en la muestra analizada, su valor aumenta a medida que transcurre el proceso de digestión. El valor reportado por GIEM es de 43,8%, lo cual es inferior al 60% que es el nivel máximo permisible por la NTC 5167 (2004).

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) refleja la capacidad que tiene el abono orgánico para liberar cationes del suelo, como potasio, calcio y magnesio y dejarlos como nutrientes disponibles para ser utilizados por las plantas. Niveles mayores a 30 meq/100g representa un buen contenido de sustancias húmicas, característico de abonos de buena calidad. El valor reportado es de 51,8 meq/100 g, reflejando una buena Capacidad de Intercambio Catiónico en la muestra analizada.

El porcentaje de Carbono orgánico total, expresa la concentración a la que se encuentra este nutriente en la muestra de abono orgánico analizado. Según al NTC 5167 (2004) cuando su porcentaje es mayor al 15% representa un sustrato de buena calidad, como es el caso del abono obtenido de la paca que tiene un porcentaje de 21,8%.

Al igual que el carbono, el nitrógeno orgánico total, es uno de los macronutrientes más importantes en la materia orgánica transformada. Su presencia, depende de la naturaleza de la materia orgánica fresca, pues cuando ésta se encuentra seca favorece la presencia de carbono y cuando se encuentra verde la presencia de nitrógeno. Un buen porcentaje de nitrógeno en un sustrato debe estar entre 2% y 3%. El valor registrado para la muestra analizada es del 1,6%, aunque está muy cerca del valor óptimo no es suficiente, lo que implica que para próximas pacas a ensamblar se debe pensar en incluir componentes orgánicos que favorezcan la presencia de nitrógeno en el abono.

La relación carbono/nitrógeno refleja el estado de madurez y la estabilidad de la materia orgánica, el valor registrado de 13,7 menor a 20 cumple con el nivel óptimo indicado, pero de acuerdo con (Villalba, 2005) un valor cercano a 15 determina un grado de madurez mayor. Lo que significa que la muestra de abono analizada, está cerca de alcanzar dicho valor.

La conductividad eléctrica en una muestra de abono, condiciona la posibilidad de germinación de las semillas y el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que el nivel de sales disueltas pueden afectar en gran medida dichos procesos. Una cantidad menor de 3 dS/m representa un abono de buena calidad, así, el abono orgánico analizado el cual obtuvo una cantidad de 0,076 dS/m puede considerarse que es apto para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

La capacidad de retención de agua reportada para el abono de la paca es de 183%, la NTC 5167 (2004) exige como valor óptimo que la capacidad debe ser mínimo su propio peso, lo que significa que dicho porcentaje cumple a cabalidad con lo estipulado y su uso como abono orgánico puede favorecer la humedad de los suelos, su porosidad y la disponibilidad de nutrientes para las plantas, ya que no se pierden por lixiviación.

El porcentaje de humedad reportado por el laboratorio para la muestra analizada es de 55,6% el cual supera el nivel máximo permisible que es de 35%, según la NTC 5167 (2004). El exceso de humedad encontrado puede deberse a que durante los dos días antes de extraer la muestra a analizar se presentaron eventos de alta precipitación y bajas temperaturas lo que llevó a que el material adquiriera altas concentraciones en dicho parámetro.

El pH reportado para la muestra es de 7.12, el cual significa que el abono se encuentra en su proceso de estabilización y alcalinización debido a que dicho valor está sobre el rango de la neutralidad, el cual es representativo de abonos aptos para su uso en los suelos.

El tamaño de las partículas del abono, incide en la porosidad de los suelos, lo que facilita o perjudica la retención de nutrientes y de agua. Según Soliva & López, (2004) un abono de buena calidad debe estar compuesto por partículas menores o iguales a 1,6 mm. En consecuencia, la muestra analizada que contiene el 56% en masa seca de partículas menores a 2 mm, tal como muestra la Tabla 8, puede considerarse apropiada para su uso y manejo.

Tabla 8. Tamaño de las partículas de la muestra de abono orgánico.

Tamaño de partícula	% en masa seca
> 2 mm	44.0
< 2 mm	56.0

El análisis cuantitativo de la calidad del abono orgánico realizado por GIEM, también arroja una serie de resultados organolépticos donde se determina el estado, el color y la textura de la muestra. El estado del abono orgánico de las pacas fue reportado como sólido húmedo, de color café y con textura gruesa heterogénea.

El contenido de macro y micronutrientes definen la calidad del abono, además cuando este es aplicado en los suelos, favorece el crecimiento y desarrollo de las plantas si su contenido es suficiente. Según García (1990) una cantidad superior al 1% representa una buena disponibilidad del nutriente en el abono orgánico. En concordancia, la Tabla 9 muestra el contenido de macro y micronutrientes presentes en la muestra, y según lo observado solo el nitrógeno total y el calcio total superan el 1%.

Tabla 9. Contenido de macro y micronutrientes.

Parámetro	Expresado como	Resultado	Desviación estándar	Unidades
Nitrógeno total	N	1,6	-	%
Potasio total	K ₂ O	0,60	0,02	%
Fósforo total	P ₂ O ₅	0,47	-	%
Magnesio total	MgO	0,38	0,02	%
Sodio total	Na	-	-	%
Calcio total	CaO	4,38	0,04	%
Zinc total	Zn	-	-	%
Aluminio total	Al	0.64	0.03	%

Aunque los análisis reflejen que nutrientes como el potasio, fósforo, magnesio y aluminio no superen la cantidad óptima del 1%, se contabilizan y están presentes en el abono. A diferencia del sodio y el zinc, los cuales no se reportan y están totalmente escasos en la muestra analizada.

7.6.2. Parámetros microbiológicos

Los análisis microbiológicos realizados al abono orgánico incluyen la estimación de microorganismos (mesófilos, termófilos, mohos, levaduras, nematodos, protozoos, enterobacterias y salmonellas) mediante aislamientos microbiológicos y conteos de las unidades formadoras de colonias (UFC), los cuales determinan la calidad sanitaria e higiénica del material y su aptitud para distintos usos en los suelos (Corlay Chee et al., 2011). Los microorganismos reportados para la muestra analizada se observan en la Tabla 10:

Tabla 10. Recuento de microorganismos en la muestra de abono orgánico.

Mesófilos ufc/g	Termófilos ufc/g	Mohos ufc/g	Levaduras ufc/g	Nematodos y Protozoos	Entero bacterias ufc/g	Salmonella ufc/25 g
6,6E+06	7,7E+07	7,2E+07	0,0E+00	Ausentes	3.0E+02	Ausentes

La presencia de organismos mesófilos, termófilos y mohos da a entender que aún el abono orgánico tiene gran actividad biológica, lo que significa que el proceso de descomposición, no ha culminado en las pacas. En este caso, luego de seis meses de fermentación la materia orgánica todavía se encuentra en la fase de maduración por ende no se puede considerar un abono completamente estabilizado, pero dicha condición podrá lograrse con uno o dos meses más de actividad microbiana de descomposición.

La ausencia de levaduras puede estar asociada al reporte del pH en el abono (de 7,12), ya que su resultado cercano a la neutralidad, desfavorece la reproducción de dichos microorganismos los cuales prefieren medios ácidos para reproducirse y metabolizar.

Por otro lado, la ausencia de nematodos, protozoos y *Salmonella sp.* representa que el abono orgánico obtenido de la paca cumple con las condiciones de calidad óptimas establecidas por la NTC 5167 (2004), lo cual permite su uso y hace factible su integración a los suelos. Además, esta condición también significa que el método de las Pacas Biodigestoras es eficiente para inhibir la reproducción y propagación de los organismos patógenos que pueden ser perjudiciales para la salud de los suelos y el desarrollo de las plantas.

Las enterobacterias reportadas corresponden a una cantidad de 300 UFC/g, lo cual significa que por ser una cantidad menor a 1000 UFC/g y según lo establecido por (Román et al., 2013) los microorganismos patógenos han sido eliminados y las enterobacterias presentes aún están llevando a cabo la fermentación del material orgánico.

7.6.3. Parámetros fitotóxicos

Las Tablas 11 y 12, corresponden en su orden a los resultados de la prueba de germinación y la actividad respirométrica de la muestra de abono orgánico analizada. El primero, indica el grado de madurez del abono, el cual es favorable cuando supera el 50%. El segundo, representa el nivel de estabilidad del abono, el cual se considera estable cuando su valor es menor a 5 mg CO₂/g.

Tabla 11. Prueba de germinación.

Muestra	Concentración (% P/V) Muestra sólida (% V/V) Muestra líquida	% Germinación
Testigo	0	100
Abono orgánico	10	100

Tabla 12. Actividad respirométrica de la muestra de abono orgánico.

Muestra	Parámetro	Resultado	Unidades
Abono orgánico	Respirometría 24 horas	0.46	mg (CO ₂)/g

Según lo reportado, el abono orgánico analizado contiene un grado de madurez y de estabilidad aceptable debido a que la prueba de germinación reportó un porcentaje del 100% y la actividad respirométrica una cantidad de 0,46 mg CO₂/g. Además, es factible afirmar que dicho abono no representa un potencial fitotóxico para los suelos donde se aplique, al contrario favorece y enriquece las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, contribuyendo a su productividad y mejorando la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

8. Conclusiones

La Universidad de Antioquia es un espacio plural, dinámico y finito que ha visto con el tiempo, transcurrir un sin número de generaciones, por ello la importancia de conservarlo y preservarlo para las generaciones venideras que tienen trazado su destino en este lugar. Sus espacios verdes y naturales se convierten en el legado de la historia que se cuenta con los años en que los árboles que la integran han permanecido de pie y los nuevos árboles que la oxigenan comienzan a adaptarse y crecer. Los suelos guardan la marca de quienes han transitado, pero han sentido con fuerza la huella que han dejado, y quienes permanecen aún en este espacio tienen el compromiso de construir y forjar una Universidad ecológicamente sostenible, habitable y saludable.

La producción residuos orgánicos en la Universidad está directamente ligada a lo que se genera en las cafeterías, como residuos de alimento y lo que se genera en las zonas verdes, como residuos vegetales. Ante ello, se puede ver que no se incluye la cantidad precisa que producen las personas que no consumen alimentos en las cafeterías, lo que ocasiona que una fracción de materia orgánica se esté enviando al relleno sanitario en forma de residuos ordinarios, debido a que en los puntos ecológicos no existe un recipiente donde se puedan depositar de manera selectiva los restos de alimentos o cáscaras de frutas y vegetales, residuos que se producen cotidianamente en la comunidad académica. Cambiar esta directriz, no solo representa un reto más para la Universidad sino una responsabilidad y un compromiso para la comunidad, que se deben tejer e incentivar a través de la educación ambiental, donde se refuerce el conocimiento y la importancia que tiene para la Naturaleza el hecho de hacer una buena separación de los residuos que generamos, ya que esto se traduce en la posibilidad de ejercer un manejo integral y un aprovechamiento óptimo para el mantenimiento de zonas arboladas y jardines del campus universitario y sus otras sedes.

Como se informó, en cuanto pasa el tiempo, aumentan las personas y con ello la producción de residuos, pero es posible decidir si aumentan los problemas o aumentan las soluciones, todo depende de las decisiones. Ante ello, frente al problema complejo que representa la generación de residuos orgánicos se deberán incluir métodos complementarios, económicos y ecológicos que propicien el cuidado por la salud de la comunidad y la preservación del ecosistema universitario.

Según este estudio, con cada Paca Biodigestora ensamblada, es posible digerir como mínimo una cantidad entre 500 a 600 kg de materia orgánica, la cual puede estar distribuida entre un 50% de residuos vegetales y un 50% de residuos de alimentos o en su defecto el 100% sólo de residuos vegetales. Cada paca ocupa como máximo un metro cuadrado de suelo y con una altura de un metro se ensambla un cubo de materia orgánica, el cual puede ser realizado en cuatro horas con el trabajo de compactación y de disposición del material de cuatro personas.

Por otro lado, el proceso de digestión de la materia orgánica y la evolución de las Pacas Biodigestoras están determinadas por los cambios y las variaciones de los parámetros temperatura, humedad, pH y altura, los cuales están directamente influenciados por las condiciones externas, la particularidades del microclima y la

naturaleza del material que de un modo u otro establecen un comportamiento y un desarrollo diferente en cada paca, pues cada una conforma y forja un micro ecosistema propio e incomparable. Pero esto no quiere decir que no sea posible determinar un patrón de comportamiento que permita vislumbrar un momento donde el material orgánico fresco ha podido atravesar por una serie de transformaciones físicas, químicas y biológicas necesarias para considerarse que el sustrato se encuentra en estado maduro y en condiciones tales que puede ser aprovechado y utilizado para restablecer la actividad biológica y la fertilidad de los suelos.

Observar las variaciones de la altura con el tiempo, representan el mejor indicativo para considerar que el proceso de digestión está evolucionando perfectamente, pues en muchas ocasiones cuando la paca se ha reducido a una altura de 50 cm o menos, al cabo de seis meses de descomposición y las condiciones de humedad son óptimas, el material extraído a diez centímetros de profundidad puede observarse de color marrón y con una textura y olor parecida a la tierra de capote de los bosques, lo que indica que el material cumple con las condiciones mínimas visibles para ser aprovechado.

La temperatura y la humedad, las cuales interfieren en la sucesión microbiana y en la actividad de descomposición, propenden porque efectivamente se genere una disminución en la altura. La temperatura por ejemplo, es mayor en el centro de la paca, a diferencia de los bordes, y aumenta con la profundidad. En el caso de la humedad, es menor en los bordes y en la superficie, debido a las interferencias del medio, pero a mayor profundidad las oscilaciones son menores y hay un efecto autoregulador que favorece la fermentación.

El pH, varía según el proceso de la fermentación, primero el medio se acidifica reflejando la producción de ácidos orgánicos que sanean y desinfectan el material; en tanto la descomposición avanza, la acidificación cesa y una actividad de amortiguamiento de los compuestos húmicos hace que el pH se alcalinice y oscile con valores cercanos a la neutralidad, lo que puede reflejar un dinámico proceso de digestión, unas condiciones favorables para la reproducción microbiana y una inhibición de los organismos patógenos.

El abono orgánico, que es el producto final del proceso de fermentación inducido en la Paca Biodigestora, representa la viabilidad ambiental de reciclar los residuos orgánicos y los efectos positivos en los suelos debido a su aprovechamiento y aplicabilidad. En concordancia con lo observado en los análisis cuantitativo y cualitativo realizados, el sustrato que se obtiene cumple y se encuentra dentro de los rangos permitidos y aceptados, en términos de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y fitotóxicos establecidos por la NTC 5167/2004.

De acuerdo con la norma, es posible considerar que se obtiene un abono de buena calidad, con buena capacidad de intercambio catiónico y de retención de agua. El cual, puede ser usado para mejorar la disponibilidad de nutrientes en los suelos, en especial por su aporte de carbono, nitrógeno, potasio, fósforo, magnesio y calcio. Además, por su baja conductividad eléctrica, favorece la germinación de semillas y el crecimiento de las plantas. El pH reportado, representa un sustrato con un grado de madurez aceptable, con una relación carbono-nitrógeno por debajo del nivel máximo permisible, pero muy cerca de ser un sustrato completamente estabilizado

biológicamente. El abono se encuentra libre de patógenos y de compuestos contaminantes o fitotóxicos, lo que lo hace favorable y óptimo para el uso en los suelos.

De otro lado, la cromatografía del abono de la Paca Biodigestora, pudo corroborar mediante el análisis cualitativo que el sustrato posee una buena relación e interacción entre los minerales, la materia orgánica y los microorganismos, visibles en los atractivos colores del cromograma, amarillo, dorado, naranja y marrón claro, que se integran armónicamente entre las zonas. También se observa en las áreas marrones oscuras que hay gran actividad enzimática, reflejando que el proceso de descomposición aún no cesa y los microorganismos aún están trabajando. Aun cuando ya hay formación de propulsiones volcánicas que brotan de la zona enzimática, que es lo esperado, significa que falta poco para la estabilización y maduración completa del material, ante esto es posible considerar que es necesario extender la digestión uno o dos meses más.

Las Pacas Biodigestoras entonces, son un método complementario y ecológico, que según lo evaluado a lo largo del desarrollo de la presente investigación, pudo analizarse y comprobarse que no solo brinda una alternativa para la disposición, tratamiento y aprovechamiento de los residuos orgánicos, sino que también embellece los entornos, sana los residuos e imita los mecanismos de reciclaje de la materia orgánica en la Naturaleza para retornar los nutrientes a los suelos, mediante el cual se desdibuja la idea del residuo o desperdicio hacia la concepción de un recurso o una materia prima que posibilita continuar el ciclo y favorecer la vida.

Las pacas además, favorecen el desarrollo de procesos investigativos y educativos que ofrecen alternativas a la sociedad para la solución de los problemas generados por la desmedida producción de residuos orgánicos. Las pacas biodigestoras son un proceso que puede aplicarse en instituciones, unidades residenciales, parques, empresas, barrios, fincas, municipios y demás sectores donde sea necesario construir y aplicar un manejo ecológico de los residuos biodegradables. En sumatoria, las pacas con su mecanismo saneador y desinfectante es inhibidor de malos olores, plagas o vectores lo que lo convierte en un método sano y ecológico, de tal manera que se hace posible convivir con los residuos ya que no es un representante de incomodidad o contaminación, sino por lo contrario favorece la relación directa con los procesos biológicos de la naturaleza.

Paralelo a ello, con la aplicación de las Pacas Biodigestoras mientras se digiere un metro cúbico de residuos orgánicos se obtiene un metro cuadrado de suelo productivo, lo que representa una gran posibilidad de desarrollar planes de siembra, procesos de huerta y construcción de autonomía y soberanía alimentaria mediante el aprovechamiento eficiente de la materia orgánica. Ya que las pacas no solo son método biotecnológico reciclador sino una propuesta alternativa que vincula una concientización ante el cuidado y la preservación de los recursos naturales de los ecosistemas urbanos y rurales.

Finalmente, es menester considerar, que las Pacas Biodigestoras son un método complementario, ecológico, económico y saludable para el tratamiento de los residuos orgánicos de la Universidad de Antioquia; su aplicación favorece y aporta una actualización del Plan de Manejo Integral de Residuos al margen de los

beneficios ambientales, sociales y ecosistémicos, además de una serie de ventajas y cambios positivos donde se vislumbra la inclusión de la vía ecológica en la Universidad, que como dice el pensador sistémico Edgar Morín, será la vía que permitirá construir una comunidad sostenible en capacidad de convivir en armonía con la naturaleza.

9. Referencias Bibliográficas

Agreda, R., & Deza, M. (2006). *Factores que condicionan el proceso de compostaje*. Revista de la Facultad de Agronomía. Chile.

Annekey, N. (2011). *Carbohidratos en plantas, funciones, dónde se encuentra y su obtención*. Universidad Internacional de las Américas. Costa Rica.

Ardila, J., & Cano, J. (2011). Tesis de grado: *Técnica de descomposición de residuos forestales y heces de establo con pacas digestoras: aspectos físico-químicos, ambientales y sanitarios en el Centro Educativo Conquistadores*. Medellín - Colombia.

Arteaga, C., & Castaño, S. (2015). Tesis de grado: *Tratamiento sano de hojarasca y residuos orgánicos para restaurar las zonas verdes en la ciudadela central de la Universidad de Antioquia*. Medellín - Colombia.

Bueno M. et al., P. (2009). *Factores que afectan al proceso de Compostaje*. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología. Sevilla – España.

Chávez, L. (1998). *Estudio preliminar para el aprovechamiento de los residuos del proceso de desfibrado de la cabuya (Forcea cabuya)*. Tesis de Licenciatura en Química. Universidad de Costa Rica. p. 22-29. San José - Costa Rica.

Colomer, F., & Gallardo, A. (2007) *Tratamiento y gestión de residuos sólidos*. Editorial Limusa. México.

Corlay Chee et al., L. (2011). *Calidad microbiológica de abonos orgánicos*. Departamentos de Suelos y Agroecología. Universidad Autónoma Chapingo. México.

Costa et al., (1991). *Residuos orgánicos urbanos: Utilización*. Editorial CEBAS - CAJA MURCIA. España.

Curtis et al., H. (2008). *Biología* (Septima edición en español). Editorial Médica Panamericana. Buenos Aires, Argentina.

Decheco E., A. (2011). *Metabolismo microbiano*. Universidad Nacional del Callao. Callao – Perú.

Decreto 1713, (2002). *Diario oficial de la República de Colombia*. Obtenido de <http://www.alcaldiabogota.gov.co>

Decreto 4741, (2005). *Diario Oficial de la República de Colombia*. Obtenido de <http://www.alcaldiabogota.gov.co>

Decreto 838, (2005). *Diario oficial de la República de Colombia*. Obtenido de <http://www.alcaldiabogota.gov.co>

Decreto 526 (2004). *Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos (PMIRS)*. Departamento de Sostenimiento e Infraestructura. Universidad de Antioquia. Medellín – Colombia.

Domenech, F. (2000). *Obtención de un biopreparado a partir de Metarhizium anisopliae por fermentación en estado sólido para su empleo como control biológico de insectos en la agricultura*. Subdirección de Biotecnología, ICIDCA. Habana – Cuba.

Durán L., & Henríquez C. (2006). Tesis de grado: *Caracterización química, física y microbiológica de vermicompostes producidos a partir de cinco sustratos orgánicos*. Sede del Atlántico y Centro de Investigaciones Agronómicas: Universidad de Costa Rica.

FAO. (2011). *Manual del biogas*. MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF. Chile.

Félix Herrán, e. a. (2008). *Importancia de los abonos orgánicos*. Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable. 57-67.

Ferrer et al., J. (1995). *Ensilaje de la pulpa de café*. Revista Facultad de Agronomía. 417-428.

Ferrer et al., J. (2014). *Fermentación en estado sólido: Una alternativa biotecnológica para el aprovechamiento de desechos industriales*. Revista tecnocientífica URU. 11-22.

Ferrer G. et al., (2014). *Fermentación en estado sólido: Una alternativa biotecnológica para el aprovechamiento de residuos agroindustriales*. Revista Tecnocientífica URU .

García et al., (2005). *Biotecnología Alimentaria*. Editorial Limusa. México.

García, C. (1990). *Estudio del compostaje de residuos orgánicos. Valoración agrícola*. Murcia: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (C.E.B.A.S.).

Greenpeace. (2005) *Recomendaciones para un Tratamiento Ambientalmente Saludable de los Residuos Orgánicos*. Campaña contra la contaminación. Argentina.

Jaramillo, G., & Zapata, L. (2008). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. Universidad de Antioquia. Medellín – Colombia.

Julca et al., (2006). *La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura*. Revista Scielo Chile. 49-61.

Julián R., M., & Ramos S., L. (2007). *Fermentación en estado sólido: Producción de alimento animal*. Tecnología Química .

López M., P. (2002). *Compostaje de residuos orgánicos*. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle. Santiago de Cali, Colombia.

Luna P., V. (2006). *Atlas de ciliados y otros microorganismos frecuentes en sistemas de tratamiento anaeróbico de aguas residuales*. Departamento de biología. Laboratorio de microbiología experimental. México.

Mancha, M. d. (2016). *Motor de la Vida*. Obtenido de <http://pagina.jccm.es/museociencias>

MAVDT. (Diciembre de 2008). *Construcción de criterios técnicos para el aprovechamiento y valorización de residuos sólidos orgánicos con alta tasa de biodegradación, plásticos, vidrio, papel y cartón*. Recuperado el Marzo de 2016, de Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial: www.minambiente.gov.co

MAVDT. (2007). *Gestión Integral de residuos o desechos peligrosos. Bases conceptuales*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Trritorial, Bogotá-Colombia.

Milhaud. (16 de Febrero de 2011). *Arquímedes y el problema de la corona de oro del rey Hierón*. Obtenido de Recuerdos de Pandora: <http://recuerdosdepandora.com>

Navarro B., S., & Navarro G., G. (2003). *Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. Mundi-Prensa. Madrid – España.

Navarro et al., (1995). *Residuo orgánicos y agricultura*. Universidad de Alicante. Alicante – España.

NTC 5167, (2004). *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)*. Obtenido de Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo.: <http://www.icontec.org>

Pascual, R., & Vanegas, S. (2007). *La materia orgánica el suelo: papel de los microorganismos*. Universidad de Granada. Granada – España.

Pastrana, L. (1996). *Fundamentos de la fermentación en estado sólido y aplicación a la industria alimentaria*. Ciencia y Tecnología Alimentaria. 4-12.

Posada, A. (2015). Trabajo de grado: *Evaluación de dos sistemas de degradación biológica en zona rural del corregimiento San Antonio de Prado*. Medellín - Colombia.

Ramírez A., L. S. (2001). *Manual de Microbiología*. Universidad Tecnológica de Pereira. . Pereira – Colombia.

Restrepo R., J., & Pinheiros, S. (2015). *Cromatografía: Imágenes de vida y destrucción del suelo*. Imágenes gráficas S.A. Cali, Colombia.

Riechmann, J. (2008). *¿En qué estamos fallando? Cambio social para ecologizar el mundo*. Icaria editorial S A. Barcelona – España.

Rodríguez et al., E. (2005). *Bacteriología General. Principios y prácticas de laboratorio*. Editorial Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje para el agricultor: experiencias en América Latina*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile –Chile.

Roovers, T. (2016). *Microorganismos en el sustrato*. Obtenido de Fundación CANNA: www.canna.es

Saldarriaga, F. (2009). *Orgánicos Volátiles (VOCs) en el Proceso de Compostaje de los Residuos Sólidos Urbanos con Separación en la Fuente y su Efecto en la Salud Humana*. Universidad de Medellín. Medellín – Colombia.

Sánchez et al., (2001). *Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures*. Bioresource Technology. 301-308.

Sánchez R., A. (2008). *Elaboración, caracterización, y comparación de abonos orgánicos a base de equinaza y bovinaza*. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga- Colombia.

Sierra, B. C., & Rojas, W. C. (2003). *La materia orgánica y su efecto en las características físicoquímicas y biológicas del suelo*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Centro Regional de Investigación Rayetue. Chile.

Silva, G. (2012). *Manejo limpio y sano de residuos biodegradables en Pacas Digestoras Silva: Una alternativa hacia Basura Cero en Medellín para porteger la salud pública, el ambiente y la agricultura ecológica*. Medellín - Colombia.

Soliva, M., & López, M. (2004). *Calidad del compost: Influencia del tipo de materiales tratados y de las condiciones del proceso*. Escuela Superior de Agricultura de Barcelona. Barcelona – España.

Stanier et al., (1992). *Microbiología* (Segunda edición ed.). Editorial Reverté S.A. España.

Torrentó, M. (2011). *Materia orgánica y compostaje. Control de la calidad y del proceso*. Jornada Técnica: Fertilidad y Calidad del Suelo., Instituto canario de Investigaciones Agrarias., Chile.

Torres, G., & Medina, V. (2009). *Obtención de abono orgánico a partir de la fermentación en estado sólido de la concha de mango*. Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo – Venezuela.

Trinidad S., A. (2001). *Abonos orgánicos*. Secretaria de agricultura, ganadería desarrollo rural, pesca y alimentación. Texcoco, México.

Varnero et al., (2007). *Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje*. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal. 28 - 37.

Villalba, L. (2005). Trabajo de grado: *Caracterización físico-química y biológica de un compost elaborado con desechos generados en la USB*. Universidad Simón Bolívar. Venezuela.

Villa M., G. (2006). *Compostaje: una alternativa en el establecimiento de modelos agroecológicos*. Eolo Revista Ambiental. Medellín. Vol. 06, N° 11.



10. Anexos

10.1. Anexo 1

El grupo que trabajó la Paca Organismos encontró diversidad de macro y meso organismos tanto descomponedores como depredadores, que con la ayuda de una estudiante de biología pudieron identificar y observar en un estereoscopio, a continuación se exponen algunos registros fotográficos del proceso:

	
Recolección de muestras	Almacenamiento de las muestras
	
Arácnido (organismo depredador)	Arácnido (organismo depredador)
	
Quilópodos (organismo descomponedor)	Hormigas (picadoras y transportadoras)

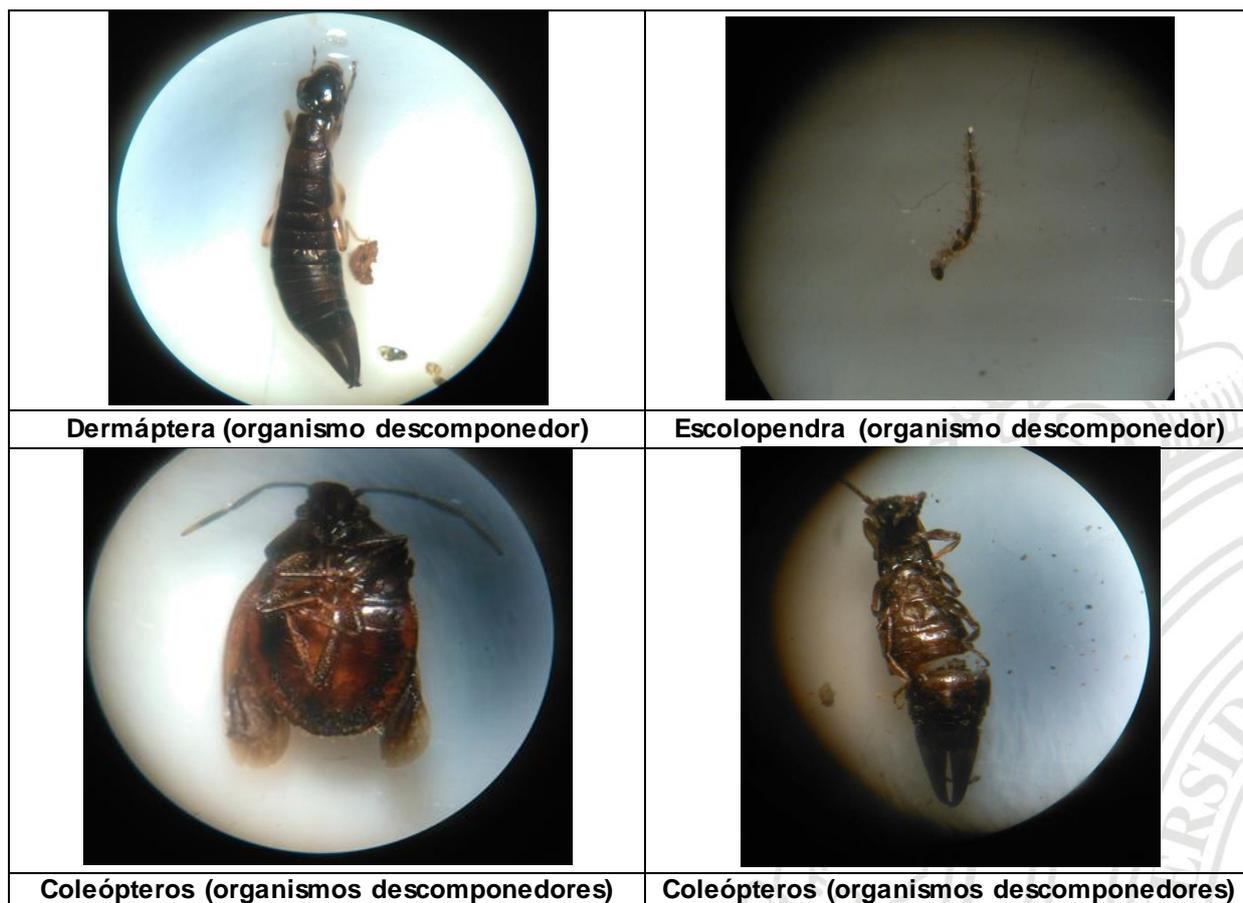


Imagen 49. Organismos observados en la Paca Biodigestora.

El grupo que trabajó la Paca Sucesiones pudo observar y documentar los cambios a través de la aparición paulatina de plántulas sobre las caras laterales y superior. En el proceso de recolección y análisis de las muestras, fueron asesorados por el Herbario de la Universidad de Antioquia, donde les informaron sobre cómo llevar a cabo tal proceso.

Desde lo observado, los estudiantes informaron que a partir de la tercer semana luego de ensamblada la paca se comienza a notar la germinación de plántulas, especialmente sobre la cara superior, las cuales se identificaron como producto de las semillas contenidas en los abonos verdes de la poda de los jardines, material que allí depositado.

Mientras las plantas iban creciendo, la paca iba reduciendo su tamaño y con el tiempo se empezó a observar que las plantas presentes no solo provenían de las semillas contenidas en la paca sino también que pudieron ser transportadas por el viento u otros organismos.

Un suceso particular que expresaron los estudiantes del Grupo Organismos, fue la presencia de hormigas las cuales generaron un desnivel en una de las caras laterales de la paca, inclinación que se vio muy marcada durante el tiempo de descomposición de los residuos orgánicos.

Las siguientes imágenes, muestran de algún modo ese proceso de sucesión ecológica documentado por los estudiantes durante la evolución de la Paca.

	
Paca Sucesiones semana 3	Plántulas semana 3
	
Tréboles semana 3	Hongo semana 3
	
Paca sucesiones - semana 4	Plántulas semana 4



Imagen 50. Proceso de sucesión ecológica documentada en la Paca Biodigestora.

El grupo que trabajó la Paca Parametrización, logró observar la evolución desde la medición y monitoreo de los parámetros temperatura y cambios en la altura; para dichas mediciones, utilizaron un termómetro análogo de sonda metálica de 22cm de longitud y flexómetro como instrumentos de medida.

Las mediciones de la temperatura se realizaron en cinco puntos sobre la cara superior de la paca, cuatro en las esquinas y uno en el centro. Los puntos fueron distribuidos de la siguiente manera:

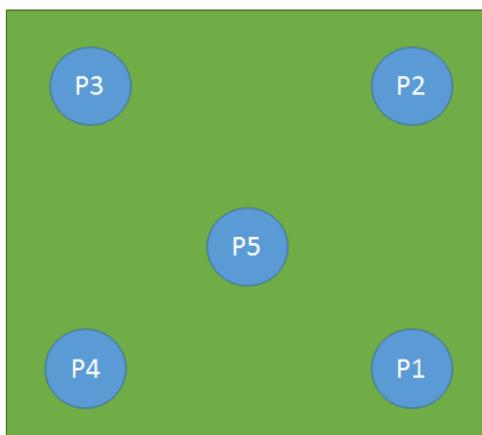


Imagen 51. Distribución de puntos de medición sobre la paca del grupo parametrización.

También se midió la temperatura en el centro de cada cara y se sacó un promedio de los valores obtenidos.

La altura se midió en las esquinas y en el centro de cada cara, en doce puntos diferentes y luego se promediaron los valores obteniendo un valor único aproximado de la altura de la paca.

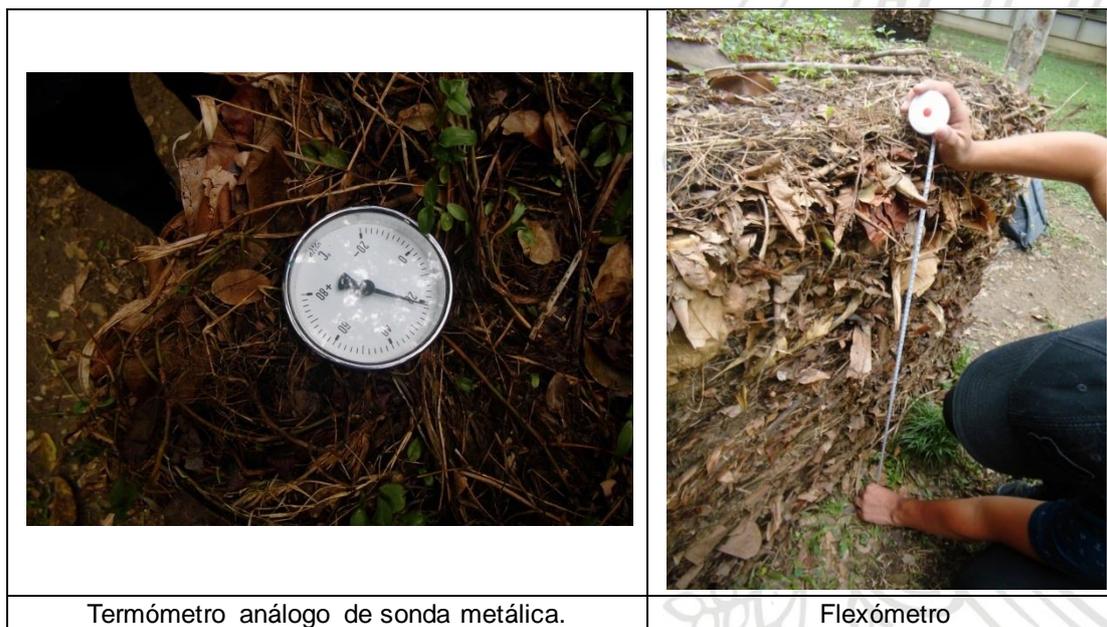


Imagen 52. Instrumentos de medida utilizados por el grupo parametrización.

Algunos datos obtenidos para la temperatura y altura fueron:

Semana 3: En los cuatro puntos ubicados en las esquinas de la cara superior se hallaron las siguientes temperaturas:

P1: 25°C, P2: 26°C, P3: 21°C, P4: 21°C, en el centro (P5) se encontró una temperatura de 41°C.

La temperatura en el centro de cada cara lateral fue:

Cara 1: 46°C, Cara 2: 44°C, Cara 3: 40°C, Cara 4: 43°C, con un promedio de 43,25°C.

La altura promedio fue de 90,9 cm.

Semana 4: Los datos obtenidos fueron:

P1: 26°C; P2: 27°C; P3: 27°C; P4: 27°C; P5: 43°C

Cara 1: 41°C; Cara 2: 40°C; Cara 3: 41°C; Cara 4: 39°C. Promedio: 40,25°C

Altura promedio: 86,5 cm

Semana 5: Los datos obtenidos fueron:

P1: 20°C; P2: 22°C; P3: 22°C; P4: 22°C; P5: 36°C

Cara 1: 39°C; Cara 2: 39°C; Cara 3: 35°C; Cara 4: 34°C. Promedio: 36,75°C

Altura promedio: 85 cm

Semana 6: Los datos obtenidos fueron:

P1: 29°C; P2: 30°C; P3: 32°C; P4: 30°C; P5: 40°C

Cara 1: 44°C; Cara 2: 47°C; Cara 3: 44°C; Cara 4: 43°C. Promedio: 44,5°C

Altura promedio: 83,5 cm

El grupo que trabajó la Paca Huerta, realizó la siembra, cuidado y monitoreo del crecimiento, adaptación y desarrollo de las plantas. Inicialmente analizaron el proceso de germinación de las semillas, investigaron su función o posibles usos como productos comestibles.

La actividad pudo llegar a feliz término a pesar de las dificultades, pues algunas plantas sembradas como el amaranto no pudieron desarrollarse debido a plagas, tales como áfidos y hormigas, que atacaron las raíces y la base de los tallos. Pero plantas como la lechuga crespita, la cebolla de rama, la albahaca, la acelga y el cilantro, pudieron ser cosechadas y consumidas.

Los estudiantes evidenciaron una buena adaptación y crecimiento de las plántulas en el abono de la paca, además tuvieron la experiencia de ver germinar, crecer y consumir alimentos que ellos mismos habían sembrado.

Las imágenes a continuación, muestran el transcurso de esa experiencia:



Imagen 53. Proceso de siembra sobre la Paca Huerta.

10.2. Anexo 2



Imagen 54. Plano de la Universidad de Antioquia.
 Adaptado para señalar las zonas donde se podrían ubicar las Pacas Biodigestoras.