

# Compostaje de residuos sólidos biodegradables del restaurante institucional del Tecnológico de Costa Rica

## Composting of biodegradable wastes from the university restaurant at Tecnológico de Costa Rica

Raizeth Chaves-Arias<sup>1</sup>, Rooel Campos-Rodríguez<sup>2</sup>,  
Laura Brenes-Peralta<sup>3</sup>, María Fernanda Jiménez-Morales<sup>4</sup>

*Fecha de recepción: 16 de enero de 2018*  
*Fecha de aprobación: 13 de abril de 2018*

Chaves-Arias, R; Campos-Rodríguez, R; Brenes-Peralta, L;  
Jiménez-Morales, M. Compostaje de residuos sólidos biodegradables del restaurante institucional del Tecnológico de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-1. Enero-Marzo 2019. Pág 39-53.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i1.4117>



- 1 Estudiante Escuela de Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: raizethchavesarias@gmail
- 2 Doctor en Ciencias Naturales para el Desarrollo, docente e investigador de la Escuela de Agronegocios. Coordinador del Área Académica Agroforestal Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rocampos@tec.ac.cr ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4460-2313>
- 3 Ingeniera Agropecuaria Administrativa y máster en Gerencia y Gestión Ambiental. Profesora Investigadora. Escuela de Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: labrenes@tec.ac.cr
- 4 Ingeniera Agropecuaria Administrativa y máster en Sistemas Modernos de Manufactura. Profesora Investigadora. Escuela de Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: maria.jimenez@tec.ac.cr

## Palabras clave

Residuos biodegradables; Takakura; compostaje; valorización de residuos.

## Resumen

En procura de un mejor aprovechamiento de los residuos sólidos biodegradables del restaurante Institucional del Tecnológico de Costa Rica, Sede Cartago, se evaluaron tres tratamientos de compostaje para la generación de abono orgánico. Para esto se seleccionaron técnicas de acuerdo a criterio experto y se valoraron variables como pH, humedad, temperatura y eficiencia, con el fin de determinar la más eficiente que permita la valorización del residuo.

Se utilizó un diseño experimental factorial, en el cual se compararon los tres tratamientos denominados Takakura (TK), Microorganismos de Montaña (MM) y Pellets (P) con Residuos Sólidos Biodegradables cada uno, en compostera de volteo y otro directamente en una superficie de concreto en el suelo, con dos repeticiones. El valor de  $p$  utilizado fue de 0,05.

Se determinó que el tratamiento Takakura fue el que mejores resultados presentó desde el punto de vista técnico, ambiental y económico, alcanzando la mayor temperatura promedio (53°C) y la fase termófila más rápidamente, manteniendo un pH, cercano a 7, humedad entre 50 y 70% y eficiencia del 81%, por lo que se concluye que este tratamiento es una estrategia viable de economía circular para el aprovechamiento de residuos biodegradables del restaurante institucional del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

## Keywords

Biodegradable waste; Takakura; composting; waste valorization.

## Abstract

The university restaurant from Tecnológico de Costa Rica's main Campus in Cartago, has the purpose of a better waste management; therefore, three composting methods were evaluated to produce organic fertilizer from its biodegradable residues. The researchers selected the techniques through expert's opinion, assessing variables like pH, temperature, moisture and efficiency in each technique, in order to determine the most efficient one to re-valorize the organic waste.

A factorial experimental design was selected, in which three treatments were compared: Takakura (TK), Mountain microorganisms (MM) and Pellets (P) with biodegradable solid wastes on each case, in tumbling composters and in pile composters (on the ground), with two repetitions. The used  $p$  value was 0,05.

As a result, the Takakura treatment showed the best results from a technical, environmental and economic point of view, since it reached the highest average temperature (53°C) and achieved the thermophilic phase faster than the other ones, maintaining the expected indicators for proper composting, such as a pH close to 7, moisture between 50% and 70% and efficiency of 81%.. Consequently, the researchers conclude this treatment represents a valid strategy to aim towards a circular economy approach at the university's restaurant from Tecnológico de Costa Rica.

## Introducción

A nivel global, entre un cuarto y un tercio de los alimentos producidos anualmente para consumo humano se pierde o se desperdicia. El desperdicio equivale a más de 1 300 millones de toneladas de alimentos anualmente. En promedio se pierde o desperdicia el 30% de los cereales, entre el 40 y el 50% de las raíces, frutas, hortalizas y semillas oleaginosas, el 20% de la carne y productos lácteos, y el 35 % de los pescados. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) calcula que dichos alimentos serían suficientes para alimentar a 2 000 millones de personas [1].

En las últimas décadas, la generación de residuos sólidos ha ido aumentando potencialmente en el mundo, incluyendo a países como Costa Rica [2]. Estudios puntuales indican que la generación de residuos sólidos biodegradables es de alrededor del 44 al 52% del total de residuos sólidos generados, dependiendo del estrato social o zona del país [3]. Encontrar opciones sostenibles para un manejo integral es de suma importancia para reducir el impacto ambiental negativo que la ausencia de tratamiento ocasiona, además del potencial uso como sustrato, enmienda o fertilizante en actividades agrícolas tras su compostaje [4].

Por tal motivo el país debe apostar a estrategias de economía circular donde en primera instancia se busque la reducción de las entradas a los procesos productivos, es decir, la reducción en la fuente, y el aprovechamiento de los residuos que se generen en los mismos, jugando la gestión integral de los residuos un papel fundamental para el éxito de la estrategia.

Respaldando lo anterior, el 13 de Julio del año 2010 se creó la Ley para la Gestión Integral de Residuos 8839 dictada por la Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, que indica que los entes generadores deben contar con planes para una gestión integral de residuos, misma que define la ley como “*conjunto articulado e interrelacionado de acciones regulatorias, operativas, financieras, administrativas, educativas, de planificación, monitoreo y evaluación para el manejo de los residuos, desde su generación hasta la disposición final*”[5].

Dentro de las alternativas para aprovechar los residuos biodegradables se encuentra el compostaje, que es un proceso bio-oxidativo de los residuos orgánicos en condiciones controladas de temperatura, humedad y aireación, el cual convierte los residuos orgánicos degradables en un material estable e higienizado [6].

Los principales parámetros para el desarrollo efectivo del compostaje son la temperatura, humedad y el pH. Respecto a la temperatura, el proceso de compostaje comprende cuatro fases, una mesófila, donde el material aumenta su temperatura a rangos de 20 a 35 C; una termófila, donde asciende de 35 a 65 C y se digieren las moléculas complejas, por lo que facilita la eliminación de microorganismos patógenos; una fase de enfriamiento y finalmente una de maduración [7].

En cuanto al pH en el compostaje se da en tres fases. En la inicial se observa una disminución del mismo debido a la acción de los microorganismos en la materia orgánica fácilmente degradable, lo cual produce una liberación de ácidos orgánicos; en la segunda fase se produce una alcalinización progresiva del medio, debido a la pérdida de ácidos orgánicos y a la liberación de amoníaco procedente de la descomposición de proteínas, y en la tercera, el pH tiende a la neutralidad por la formación de compuestos orgánicos del suelo [8].

Si durante el proceso de compostaje el pH es bajo, se inhibe la degradación orgánica, pero si el pH se mantiene por encima de 7,5 o cercano a este valor, se puede decir que hay suficiente descomposición [4].

La humedad, es una de las variables de compostaje que afecta de manera considerable a las actividades microbianas, ya que proporciona un medio para el transporte de nutrientes disueltos necesario para las actividades metabólicas y fisiológicas de los microorganismos [9]. La humedad óptima para el crecimiento microbiano está entre el 50-70%. La actividad biológica decrece cuando la humedad está por debajo del 30% y por encima del 70% el agua desplaza al aire en los espacios libres existentes entre las partículas, reduciendo la transferencia de oxígeno y produciéndose una anaerobiosis. Cuando las condiciones se hacen anaerobias se originan malos olores y disminuye la velocidad del proceso [8].

El aprovechamiento por medio de compostaje, consiste en la utilización de sustratos con inóculos microbiales, entre ellos el Takakura y los MM (microorganismos de montaña).

El inóculo MM se deriva de sustratos recolectados en ecosistemas silvestres como hojarasca, que al colocarlos en una determinada mezcla con otros ingredientes propicia una elevada y diversa calidad nutricional. Estos medios son ideales para el establecimiento y multiplicación de las diversas especies de microorganismos colectados. El método Takakura, es una técnica de conversión de los residuos orgánicos del hogar a abono orgánico, donde se utilizan microorganismos fermentativos provenientes de cáscaras de fruta o comida fermentada [4].

También se pueden utilizar pellets que son cilindros de aserrín prensado, virutas o polvo de madera y que ayudan a la descomposición de los residuos, mantenimiento de una humedad adecuada, lo que repercute en la temperatura, pH relación C/N favoreciendo el accionar de los microorganismos para la descomposición [9].

Es necesario tomar en cuenta que todo aprovechamiento de residuos trae consigo una serie de costos sociales, económicos o ambientales; por tal razón, la economía y el ambiente son elementos mutuamente dependientes, ya que el uso de los recursos y las condiciones del entorno varían según el desarrollo económico [10].

Entre las principales ventajas que tiene la valorización de los residuos sólidos biodegradables, se encuentran la posibilidad de cerrar el ciclo de la materia orgánica en el sistema, por medio de la mineralización realizada por los microorganismos que garantizan la reincorporación al suelo, la reducción de residuos sólidos destinados a los vertederos locales lo cual se traduce en una disminución de las emisiones que conllevan la descomposición de la materia orgánica, la generación de ahorro y el decremento en los costos en los que incurre el transporte, combustión y el tratamiento de esos residuos.

Además, el producto terminado del compostaje se comporta como un potenciador de la productividad del suelo natural y la adecuada gestión integral de los residuos sólidos biodegradables, y actúa como una vía de educación ambiental para cada individuo de la sociedad.

Por tal razón, el objetivo de la presente investigación es evaluar alternativas de compostaje de los residuos sólidos biodegradables del restaurante institucional del Tecnológico de Costa Rica, con el fin de brindar una posibilidad para la valorización de los residuos sólidos biodegradables.

## Metodología

La investigación se realizó en el Instituto Tecnológico de Costa Rica en la Sede Central de la Universidad, en el Cantón Central de la Provincia de Cartago, en el distrito Oriental, Barrio Los Ángeles 9°51'16"N 83°54'33"O.

## Diseño del Experimento

Se utilizó un diseño experimental factorial, el cual comparó tres tratamientos denominados Takakura (TK), Microorganismos de Montaña (MM) y Pellets (P), y a cada uno de ellos se incorporó Residuos Sólidos Biodegradables (RSB) en compostera de volteo y directamente sobre una superficie limpia de concreto sobre el suelo, con dos repeticiones cada uno.

Estos tres tratamientos tuvieron el debido seguimiento del proceso de compostaje. Primero, se adicionó los RSB provenientes del restaurante institucional incorporando los insumos propios de cada tratamiento. Luego se inspeccionó el comportamiento por medio de mediciones de temperatura, pH y humedad, y por último se obtuvo el compost, cuyas características también fueron revisadas.

El cuadro 1, muestra las cantidades, días de aporte y sistema utilizado en cada repetición para las alternativas propuestas en la investigación.

**Cuadro 1.** Estructura de diseño de los tratamientos de compostaje propuestos.

Tratamiento	Compostera de volteo	Suelo	Kg de RSB inicial	Cantidad de inoculante inicial	Total de días de aporte de RSB	Kg de RSB total	Kg total de RSB + inoculante
TK +RSB	X	X	6	20 Kg	10	60	80
MM + RSB	X	X					
P + RSB	X			1,2 Kg *			72

\*Se colocó 1,2 kilogramos de Pellets por cada aporte de residuos.

El experimento se desarrolló entre los meses de abril a setiembre de 2017, en los cuales se aportó RSB por 10 días a cada uno de los tratamientos y se dejó 20 días en reposo.

## Recintos y compostera utilizados para la realización de los tratamientos

En el caso de los tratamientos vía compostera de volteo, se utilizó el modelo JK 400 con dimensiones de 1400 x 800 (mm) de hierro galvanizado, con doble cámara. El sistema es completamente cerrado y su material de fabricación permite temperaturas altas y ácidos orgánicos típicos del proceso, mínimos olores y capacidad de operación de 16 kg por día por cámara.

Se utilizaron dos composteras de este tipo, mismas que se encontraban resguardadas de la lluvia en el Campo de Prácticas e Investigación Agropecuaria de la Escuela de Agronegocios como se muestra en la figura 1.

En cuanto a los tratamientos en suelo, se utilizó una infraestructura en las instalaciones del Campo de Prácticas Docentes e Investigación Agropecuaria de la Escuela de Agronegocios, cuyas dimensiones son 5 metros de ancho y 30 metros de largo, con suelo de cemento, ventilación y resguardado para evitar que animales intervinieran en el experimento.

## Preparación y adición de los RSB

Los RSB estaban conformados por una mezcla de residuos de alimentos del desayuno, almuerzo o cena, acorde a la disponibilidad. Dentro de la variedad de residuos se pueden

mencionar cáscaras de frutas, hojas de hortalizas, restos de arroz, frijoles, vegetales, huesos, pan, cáscaras de huevo, entre otros.

Se trasladaron a la Escuela de Agronegocios, se trituraron hasta un diámetro de 2 milímetros y se colocaron en una malla para que drenaran y así disminuir el exceso de humedad.



**Figura 1.** Compostera de volteo.

### Medición de Variables

Se midieron las variables de temperatura del proceso de compostaje, pH y humedad, utilizando instrumentos de precisión para su cuantificación. Se construyeron hojas de Excel para el registro respectivo de los datos.

#### *Temperatura*

La temperatura interna de cada tratamiento se tomó de forma diaria durante 24 días. El termómetro fue colocado en un punto medio de cada tratamiento para captar la lectura correspondiente.

#### *pH*

La medición de la acidez se realizó con la utilización de un pH-metro HI 98127 contra agua. El bulbo del instrumento medidor se insertó en el medio de las diferentes mezclas, se dejó estabilizar la medición por 5 minutos. La medición de los datos se realizó diariamente durante 24 días para cada tratamiento.

#### *Humedad*

La medición del porcentaje se realizó con un medidor de humedad relativa BK precisión modelo 725, el cual se introdujo en el medio de cada una de los tratamientos, se esperó por 5 minutos y se realizaron en total, seis mediciones para cada tratamiento.

### *Costos económicos*

Se cuatificó cada uno de los rubros necesarios para llevar a cabo el proceso de compostaje y se expresó el costo en colones y dólares por kilogramo de residuo sólido biodegradable tratado. Además, se calculó el carbono equivalente por año que se dejaría de emitir al tratar los residuos por compostaje.

## **Resultados y discusión**

### **Propuesta de mezclas para el proceso de compostaje**

Tomando en cuenta investigaciones realizadas recientemente en el tema de compostaje por investigadores del TEC [3,4,10], criterio experto y apoyándose en bibliografía se trabajó en dos modalidades para determinar la efectividad de cada uno de los tratamientos postulados. La primera consistió en una compostera de volteo JK400 en la cual se evaluaron los sustratos Takakura, microorganismos de montaña y pellets de madera; la segunda modalidad fue el composteo en suelo con los sustratos Takakura y Microorganismos de montaña.

La selección de una modalidad u otra, va determinado por la elección que más le convenga al desarrollador, ya que ninguno de las modalidades está catalogada mejor que el resto. Se elige la que más se adecua a las cantidades y tipos de residuos que se desean compostar, al espacio que se dispone, o a las condiciones económicas [11].

Por tal motivo el resultado fue la elección de tres diferentes mezclas (tratamientos) como se detalla a continuación.

- 1) Takakura (TK) y Residuos Sólidos Biodegradables (RSB), en compostera de volteo y suelo.
- 2) Microorganismos de Montaña (MM) y Residuos Sólidos Biodegradables (RSB) en compostera de volteo y suelo.
- 3) Pellets (P) y Residuos Sólidos Biodegradables (RSB) en compostera de volteo

El Takakura y los Microorganismos de Montaña han sido probados en varias investigaciones, donde, por ejemplo, [12] obtuvieron como resultado que el uso de sustratos microbiales, como TK y MM en el compostaje doméstico, reduce, estabiliza y transforma los residuos biodegradables en compost inocuo de alta calidad química, física y microbiológica.

De igual forma [12], señalan la calidad del proceso de compostaje y la calidad del compost obtenido por medio del sustrato Takakura presenta mejores características, en comparación con el compost del sustrato MM. Además, señalan que la utilización de TK y MM presentan comportamientos adecuados para la degradación de los residuos sólidos, con temperaturas superiores a 50 °C, una evolución de pH adecuada para este tipo de compostaje y una reducción en altura del volumen del material de compost. Además, indican que no se observaron lixiviados ni se percibieron olores desagradables, ni se tuvo presencia de insectos en los sitios de procesamiento. Igualmente, señalan que por ambos métodos se obtuvo un abono inocuo y con características apropiadas para ser utilizado en huertas caseras, se identificaron diferencias significativas entre los procesos en cuanto a las variables temperatura y altura, no así en cuanto al pH. El compostaje con el método TK alcanzó una mayor temperatura y el volumen disminuyó más que con el MM, por lo que fue más eficiente en la reducción del residuo.

También [10], en un estudio donde compararon el TK respecto al MM y otros dos tratamientos en el crecimiento del cultivo de lechuga se determinó que a pesar de que el proceso de obtención de compost por el método Takakura tiene un costo mayor que el de MM, los beneficios dados por la eficiencia técnica (tamaño y diámetro de las lechugas) y ambiental lo postulan como el mejor de los tratamientos.

Por último [4], al probar TK y MM, indican que para ambos tratamientos se alcanzaron temperaturas termófilas superando los 50°C, necesaria para la eliminación de patógenos, y se mantuvieron en el rango óptimo por debajo de los 70°C.

Además, señalan que el Takakura presentó el mejor comportamiento en cuanto a temperatura promedio con diferencias significativas ( $p=0,0002$ ). De igual forma variables como pH, reducción del volumen de los residuos, fitotoxicidad y grado de germinación, estos últimos dos factores en pruebas del producto para su uso en huertas caseras, hacen concluir que el compost obtenido por medio de la técnica Takakura presenta mejores resultados respecto al aprovechamiento del residuo y calidad del compost.

Respecto al uso de Pellets, éste fue exclusivo para la compostera de volteo, esto por recomendación de la casa fabricante y además porque los comprimidos de madera logran una superficie de contacto adecuada para reducir la humedad a un punto óptimo y así obtener un compost de calidad. También estos comprimidos coadyuvan a la degradación de los residuos y al mantenimiento de la temperatura, son una opción efectiva, inocua, barata y estandarizada para complementarla con las composteras de volteo [13].

## VARIABLES EVALUADAS

### Temperatura de los tratamientos propuestos

Las temperaturas iniciaron su aumento a partir del primer aporte de residuos sólidos alcanzando temperaturas termófilas 35 °C a 65 °C (cuadro 2), en los tratamientos TK en ambas repeticiones, así como MM desde el primer día. En el caso de los Pellets a partir del cuarto día inició el ascenso hacia fase termófila 35 °C a 65 °C, pero fue el tratamiento con las temperaturas más bajas en promedio, dado que solamente se obtuvieron incrementos de temperatura al agregar los RSB, pero no se logró mantener a lo largo del experimento, esto por no contar con un inóculo para el aumento de temperatura, lo que provoca que exista mayor variabilidad de los datos.

**Cuadro 2.** Temperaturas promedio de los tratamientos propuestos en repeticiones 1 y 2.

Temperaturas promedio (°C)	
TKR2 (volteo)	53,39
TKR1 (volteo)	51,17
MMR1 (volteo)	49,1
TKSR1 (suelo)	47,93
MMSR1 (suelo)	47,55
TKSR2 (suelo)	46,78
MMSR2 (volteo)	46,36
MMR2 (suelo)	42,83
PR1 (volteo)	42,04
PR2 (volteo)	39,96

R1: Repetición 1.

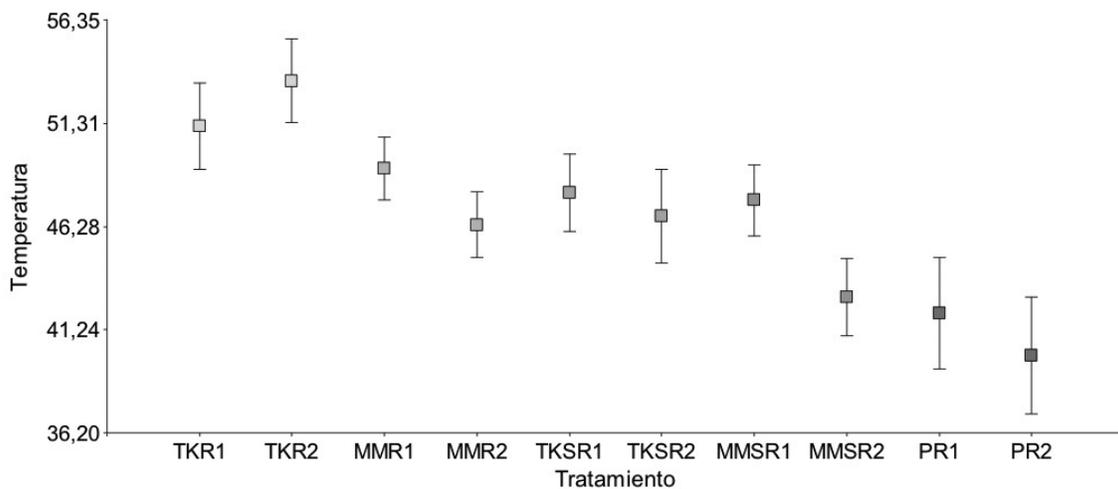
R2: Repetición 2.

S: Suelo

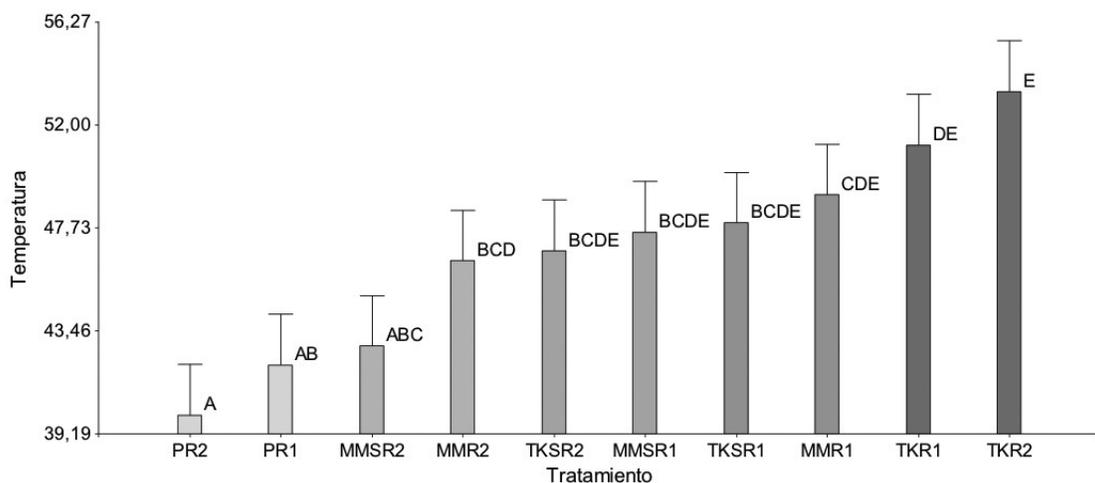
Para los tratamientos en suelo (TK, MM) las temperaturas también siguieron un patrón de ascenso, mostrando temperaturas termófilas, sin embargo, las máximas alcanzadas, así como los promedios fueron menores que en compostera de volteo.

La figura 2 muestra la relación de temperaturas para cada tratamiento. El Tratamiento TK fue el que alcanzó las mayores temperaturas en volteo, seguido del MM en volteo y TK en suelo, posteriormente el tratamiento de MM suelo y por último el P. Debido a que el TK y MM contienen un inoculante en la mezcla, provoca la activación de los microorganismos al colocar los residuos sólidos, coadyuvando al alza desde el primer aporte.

Las pruebas estadísticas evidencian diferencias significativas ( $p=0,0001$ ) siendo Takakura en volteo la que alcanzó mayor temperatura, superior al tratamiento con Pellets y similar al TK en suelo (figura 3).



**Figura 2.** Mediciones de temperaturas de los tratamientos propuestos.



**Figura 3.** Temperatura de los tratamientos de compostaje de residuos de alimentos. Letras diferentes denotan diferencias significativas.

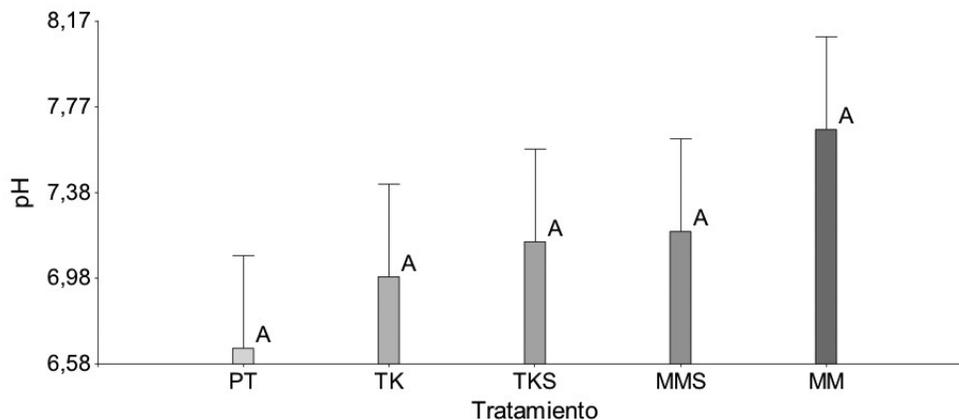
## pH

Respecto al pH, se evidencia que todos los tratamientos presentaron los valores más bajos al inicio del proceso (días 1 al 5) debido a la liberación de ácidos orgánicos, durante los días del 10 al 20 aumentan los valores por la disposición de amoníaco y en el día 24 se tiende a un pH neutro (cuadro 3), por lo que se evidencia la descomposición de los residuos sólidos biodegradables.

**Cuadro 3.** Mediciones de pH de los tratamientos propuestos.

Día	MM	TK	P	MMS (Suelo)	TKS (Suelo)
1	6,5	5,0	4,5	5,4	5,68
5	7,0	6,5	5,7	6,7	6,4
10	8,5	7,9	8,3	8,1	8,3
15	8,2	7,8	6,8	7,7	8,1
20	7,9	7,5	7,4	7,8	7,4
24	7,8	7,1	7,1	7,43	7,02

Se obtuvo un valor de  $p=0,5740$  por lo que estadísticamente indica que no hay diferencias significativas entre las medias de cada una de los tratamientos que se plantearon (figura 4).



**Figura 4.** Acidez (pH) de los tratamientos de compostaje de residuos de alimentos. Letras diferentes denotan diferencias significativas.

## Humedad

La humedad en el compostaje está relacionada con el contenido de agua de los materiales originales, la actividad biológica, el contenido de oxígeno, la porosidad de los materiales y la temperatura [14].

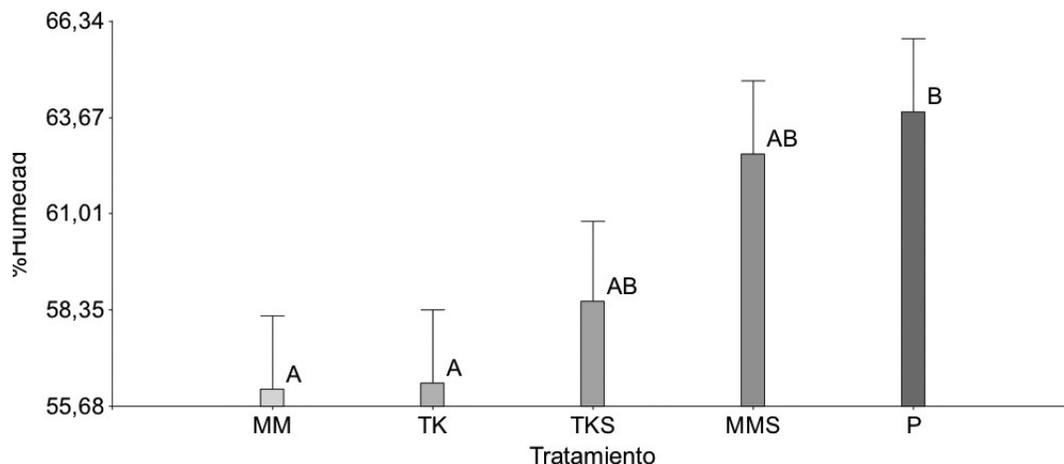
Los microorganismos requieren de agua para asimilar nutrientes, metabolizar nuevas células, catabolizar biomoléculas y reproducirse. La humedad máxima en un proceso de compostaje dependerá de la porosidad y absorción de los materiales, sin embargo, un contenido entre 50 – 70% es recomendado como óptimo [14 y 8].

La humedad tiende a disminuir con el avance del proceso de compostaje, debido a la evaporación. Si la humedad baja del 40% la actividad biológica disminuye y la descomposición se vuelve lenta, debido a que los nutrientes ya no están disponibles para los microorganismos por no estar en un medio acuoso. La actividad de estos es completamente inhibida por debajo del 15% de humedad [14].

Según el cuadro 4, se nota que todos los tratamientos siguieron un comportamiento normal y se encuentran dentro de los rangos esperados para un proceso de compostaje. Las humedades en los casos del volteo para MM y TK fueron menores que en suelo, esto debido a las condiciones de temperatura que presentaron los tratamientos, favoreciendo el aumento de ésta la pérdida de humedad. El P obtuvo la máxima humedad, inclusive que los tratamientos en suelo, y esto se debió a las bajas temperaturas en promedio alcanzado por P (42°C y 39 °C), lo que denota diferencias significativas ( $p=0,0343$ ) en la humedad entre MM, TK y P (figura 5).

**Cuadro 4.** Humedad (%) durante el proceso de compostaje.

Día	MM	TK	P	MMS (suelo)	TKS (suelo)
1	66	63	72	65	65
5	60	61	68	64	61
10	57	57	65	64	58
15	54	55	61	62	56
20	51	53	60	61	53
24	49	49	57	60	51



**Figura 5.** Diferencias significativas de % humedad de los tratamientos propuestos.

## Eficiencia

La determinación de la eficiencia en el proceso de compostaje fue dada porcentualmente, en la cual participan el peso inicial a los 10 días de terminado el aporte con respecto al peso del material que resultó.

$$\% \text{ Eficiencia} = 100 - ((\text{peso final del material} * 100) / \text{peso inicial del material})$$

El cuadro 5 presenta los porcentajes de efectividad de cada uno de los tratamientos, es decir, la capacidad de disminuir la cantidad de residuos sólidos biodegradables incorporados.

Con respecto a las pruebas realizadas la mayor eficiencia se alcanzó en volteó con TK (86,88%), seguido por el tratamiento MM y con diferencias significativas entre ambas ( $p < 0,0001$ ). Esto demuestra que en ambos casos el contar con un inóculo favorece la disminución del volumen de los residuos sólidos biodegradables, dadas las temperaturas termófilas alcanzadas y el porcentaje de humedad entre el 50% y 70% en los tratamientos.

**Cuadro 5.** Eficiencia del compost final de los tratamientos propuestos.

Modalidad	Tratamientos	cantidad de inóculo (kg)	cantidad de RS colocados (kg)	Kg de compost obtenido	Eficiencia
Suelo	TK	40	120	47,5	70,32
	MM	40	120	51	68,13
Compostera de volteo	TK	20	60	15	81,25
				10,5	86,88
	MM			18	77,50
				25	68,75
	Pellets			12	65,28
				12	62,50

\*cantidad de pellets incorporado, no es inóculo.

## pH y humedad del compost

En el cuadro 6 se observa como el pH del compost proveniente del proceso de volteo es más cercano a lo neutro, valor que sería lo ideal, aunque se debe tomar en cuenta que el rango óptimo es de 6,0 a 8,5 [15]. Por tal razón, el resultado por resaltar es que los compost de volteo presentaron mejores características que los de suelo. Lo anterior también se ve reflejado en la humedad, la cual debe ser de 35 a 45% [16].

Los contenidos de humedad del compost se acercan más a lo ideal, aunque se determina una oportunidad de mejora, ya que contenidos bajos de humedad favorecen el transporte del material final, pero dificultan el manejo y la aplicación debido al polvo que se origina, por ejemplo, si este se usara como enmienda al suelo.

**Cuadro 6.** Resultados de pH y humedad del compost.

Tratamiento	pH	Humedad (%)
PT (volteo)	7,01	33,18
TKT (volteo)	7,84	33,33
TKT (suelo)	8,26	20,40
MMP (suelo)	8,38	21,42

### Costos económicos y valoración ambiental del proceso de compostaje

Para todos los tratamientos se tomó en cuenta el costo de los materiales, la mano de obra, inversión, transporte, análisis de laboratorio, así como todas las cargas de ley respectivas. El cuadro 7 presenta el costo total por kilogramo de residuo tratado, es decir, el costo de compostar un kilogramo de residuo sólido biodegradable

**Cuadro 7.** Costo por kilogramo de Residuo Sólido Biodegradable compostado.

Tratamiento	Costo en colones	Costo en dólares
Takakura	429,62	0,76
Microrganismos de Montaña	430,69	0,76
Pellets	810,53	1,43

\* Banco Central de Costa Rica, tipo de cambio 568,59 colones costarricenses. Al 19 de diciembre del 2017

Básicamente, los costos de operación en compostera de volteo y suelo son los mismos, claro está, sin tomar en cuenta el valor de las composteras de volteo y de las instalaciones donde se realiza el compostaje en suelo, por ser parte de la inversión inicial.

Del cuadro 7 se desprende que el Takakura y MM son los tratamientos que representan los menores costos económicos, pero se debe tomar en cuenta que el TK a lo largo de esta investigación ha demostrado mejores resultados técnicos.

Dados los buenos resultados del TK en todas las variables analizadas, ambientalmente se estaría reduciendo el volumen de los residuos en la salida del proceso, además de generar un compost con valor productivo y de inocuidad apropiado, por lo que la estrategia de economía circular se estaría cumpliendo.

Tomando en cuenta los factores de emisión de gases efecto invernadero del Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica para el año 2017, con un factor de emisión de 0,0581 kg CH<sub>4</sub>/kg de residuos sólidos, si se lograra estabilizar los residuos sólidos biodegradables por medio de compostaje y tratar los 229,16 kilogramos por día que se generan en el restaurante institucional (cuadro 8), bajo un escenario de 5 días por semana y 32 semanas al año (solo

periodo lectivo), se dejarían de emitir, 44, 7 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente al año, por la disposición en relleno sanitario, mientras que en compostaje se emitirían 37,18 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente al año.

**Cuadro 8.** Generación de residuos sólidos biodegradables en el restaurante institucional.

Generación de RS en el restaurante institucional	Día	Semana	Año
Kg	229,16	1145,8	36665,6
Toneladas	0,22916	0,11458	33,666

Fuente: [17]

## Conclusiones

Una gestión adecuada de los residuos sólidos orgánicos no solo afecta positivamente a la gestión de residuos en general, sino que también contribuye a la gestión sostenible de los recursos, a la protección del suelo y ayuda a combatir el cambio climático [18]. La implementación de las propuestas de compostaje de esta investigación se postula como actividades potencialmente sostenibles que contribuyen a un sistema ambiental integral dentro del Tecnológico de Costa Rica, que contribuye a la economía circular.

Las diferentes mezclas propuestas para tratar los residuos sólidos biodegradables cumplieron en general, ya que se presentó una reducción de los residuos. La mezcla TK fue la que brindó los mejores resultados en la compostera de volteo y en general los tratamientos en volteo resultaron ser mejores técnicamente, que los de suelo, ya que el sistema cerrado de las mismas permitió un mejor control de las variables analizadas. Por tal motivo las mezclas propuestas son acertadas para la valorización de los residuos sólidos biodegradables impactando positivamente en el ambiente y la economía circular.

Respecto a las variables analizadas, la temperatura se comportó según lo esperado, es decir, un aumento de la misma según se incrementaban los días de aporte de residuos sólidos hasta alcanzar temperatura termófila y luego su enfriamiento en la etapa de reposo.

Las temperaturas en volteo fueron mayores que en suelo, siendo TK (53,39°C) la que alcanzó el máximo valor promedio. Además, se presentaron diferencias significativas ( $p = 0,0001$ ).

Respecto al pH, no hubo diferencias significativas entre los tratamientos ( $p = 0,5740$ ) y todos estuvieron cercanos a un pH neutro al final del proceso de compostaje, lo cual es adecuado para el mismo.

Respecto a la humedad, en volteo, las bajas temperaturas del tratamiento P, hicieron que éste tuviera el valor promedio más alto respecto a esta variable (64%), pero en los casos de MM y TK dada la elevada temperatura alcanzada provocaron una humedad ideal para el proceso de compostaje, superando a los tratamientos en suelo.

El tratamiento TK y MM presentaron los menores costos por kilogramo de residuo biodegradable tratado, pero si se toman en cuenta las variables analizadas, el TK supera al MM, por lo que se convierte en una buena alternativa de valorización de residuos, ya que se logra interiorizar las externalidades al aprovechar el residuo sólido y sacarlo de la corriente de descarte (economía

circular), además de ser una solución de bajo costo, eficiente y segura, lo que permite crear un ciclo integral de los residuos que se generan, el cumplimiento de la ley 8839 y evita costos en la disposición final en el relleno sanitario, además del aporte en disminución de carbono equivalente.

## Referencias

- [1] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), "Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe. [En Línea] Disponible en <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/239393/> [Accedido: 09 de Enero, 2018]
- [2] R. Campos, N. Quirós y A. Navarro. "Alternativas y acciones en el tema de residuos sólidos planteadas por las municipalidades de Jiménez y Oreamuno y su relación con el desarrollo y la sostenibilidad," *Tecnología en Marcha*, vol. 26, n.º 2, pp. 104-111, 2013.
- [3] R. Campos y S. Soto. "Análisis, de la situación del estado de la Gestión Integral de Residuos (GIR) en el Cantón de Guacimo, Costa Rica," *Tecnología en Marcha*, vol. 27, n.º 1, pp. 114-124, 2014.
- [4] R. Campos, L. Brenes y M. Jiménez. "Evaluación de métodos de compostaje para el tratamiento de residuos sólidos biodegradables domiciliarios y su uso en huertas caseras," *Tecnología en Marcha*, Encuentro de Investigación y Extensión, pp. 25-32, 2016.
- [5] Asamblea Legislativa de Costa Rica, "Ley para la gestión integral de residuos sólidos," San Jose, 2010.
- [6] M. Rodríguez, J. Venegas, M. Angoa y J. Montañez. "Extracción secuencial y caracterización fisicoquímica de ácidos húmicos en diferentes compost y el efecto sobre trigo," *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 1, n.º 2, 2010
- [7] P. Román, M. Martínez y A. Pantoja, "Manual de Compostaje del Agricultor. Experiencias en América Latina," Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2013.
- [8] M. Bueno, "Cómo hacer un buen compost. Manual para horticultores ecológicos," *Navarra, España, 2010*.
- [9] Grupo de Investigación de Compostaje, "Parameters affecting the composting process," Universitat Autònoma de Barcelona, [En Línea] Disponible en <http://www.gicom.cat/parameters-affecting-the-composting-process/> [Accedido el 20 de noviembre del 2017]
- [10] F. Ramírez, R. Campos, M. Jiménez y L. Brenes. "Evaluación técnica, ambiental y económica de tres tipos de tratamiento para el cultivo de lechuga en huertas caseras de Guacimo, Limón, Costa Rica," *Tecnología en Marcha*, Encuentro de Investigación y Extensión, pp. 14-24, 2016.
- [11]. M. Alcolea y C. González, "Manual de Compostaje Doméstico," Barcelona, 2010.
- [12] G. Borrero, F. Pacheco, D. Arias, y R. Campos, "Estudio comparativo del uso de dos sustratos con inóculos microbiales para el tratamiento de residuos orgánicos sólidos en compostaje doméstico: Variables físicas, químicas y biológicas en el proceso de compostaje", *VI Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos Sólidos: Hacia la Carbono Neutralidad 2021. CYTED*. ISBN: 978-9968-641-28-9. Pp. 522-528, 2015.
- [13] A. Fernández, "360 soluciones verdes," [En Línea] Disponible en <http://www.360solucionesverdes.com/composteras-organicas/pellets> [Accedido el 4 de diciembre del 2017]
- [14] J. Arrigoni, "Evaluación del Desempeño de diferentes Prototipos de composteras en el tratamiento de residuos orgánicos," M. S. Thesis, Universidad Nacional del Comahue, Argentina, 2011.
- [15] G. Soto y G. Meléndez, "Cómo medir la calidad de los abonos orgánicos," *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología*, n.º 72, pp. 91-97, 2004.
- [16] M. Soliva y M. López, "Calidad del compost: Influencia del tipo de materiales tratados y de las condiciones del proceso," *Escuela Superior de Agricultura, Barcelona, España, 2004*.
- [17] L. Brenes, M. Jiménez, R. Campos y M. Gamboa. "Entender las pérdidas de alimentos para actuar sobre la gestión de residuos desde la minimización," Libro de actas. VII Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos. Universidad de Cantabria, Santander. ISBN: 978-84-697-3824-5. Pp. 762, 2017.
- [18] V. Bravo, "Introducción a los impactos ambientales sobre los recursos naturales," Departamento de Economía Energética, Argentina, 2015.