



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DE
LOS RESIDUOS CERVECEROS GENERADOS EN LA CERVECERÍA
BARRANCO BEER COMPANY”

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por:

Claudia María Capurro Navarro

Asesor:

Wilfredo Celestino Baldeón Quispe

LIMA – PERÚ
2018

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Lima, 4 de setiembre de 2018.

Los integrantes del Jurado de tesis:

Presidente: Dra. GLADYS LILIANA LINO VILLANUEVA
Integrante: Dr. JOSE ALBERTO IANNAcone OLIVER
Integrante: Ing. MABEL TERESA ALMEIDA MENCHOLA

Se reúnen para evaluar la tesis titulada:

“Optimización de la producción de metano a partir de los residuos cerveceros generados en la cervecería “Barranco Beer company”

Presentada por la bachiller:

- CLAUDIA MARÍA CAPURRO NAVARRO

Para optar el Título Profesional de **Ingeniera Ambiental**

Asesorada por:

- Mg. Sc. WILFREDO CELESTINO BALDEÓN QUISPE

Luego de haber evaluado el informe final de tesis y evaluado el desempeño de los estudiantes en la sustentación, concluyen de manera unánime (x) por mayoría simple () calificar a:

• CLAUDIA MARÍA CAPURRO NAVARRO			Nota (escrito): DIECISEIS
Aprobado ()	Aprobado - Muy buena (x)	Aprobado - Sobresaliente ()	Desaprobado ()

Los miembros del jurado firman en señal de conformidad.



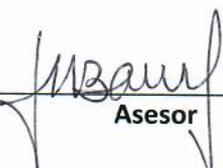
Presidente del Jurado



Miembro del Jurado



Miembro del Jurado



Asesor

ÍNDICE

I. RESUMEN.....	9
II. ABSTRACT	10
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
IV. MARCO TEÓRICO.....	14
4.1. Digestión anaerobia.....	14
4.1.1. Bioquímica y microbiología del proceso	15
a. Hidrólisis	16
b. Acidogénesis	17
c. Acetogénesis	18
d. Metanogénesis.....	18
4.2. Factores que intervienen en el proceso.....	19
4.2.1. Tiempo de retención hidráulica (TRH)	19
4.2.2. Relación Carbono-Nitrógeno (C/N).....	20
4.2.3. Temperatura	21
4.2.4. pH Y alcalinidad	21
4.2.5. Dilución.....	24
4.3. Producción y composición del biogás.....	25
4.3.1. Pretratamiento.....	26
4.4. Biodigestores	29
4.4.1. Cuantificación de la producción de CH₄.....	31
4.5. Industria cervecera	31
4.5.1. Proceso de producción	32
4.5.2. Generación de residuos	33
a. Bagazo cervecero.....	35

b. Levadura: <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	37
V. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	38
5.1. Hipótesis	38
5.1.1. Hipótesis Nula (H_0)	38
5.1.2. Hipótesis Alternativa (H_a)	38
5.2. Objetivos	38
5.2.1. General	38
5.2.2. Específicos	38
VI. MÉTODOLOGÍA	39
6.1. Lugar de ejecución	39
6.2. Caracterización de residuos	39
6.2.1. Humedad	40
6.2.2. Sólidos Totales (ST)	41
6.2.3. Sólidos Volátiles (SV)	41
6.2.4. Carbono Orgánico (CO)	41
6.2.5. Nitrógeno	42
6.2.6. Relación Carbono-Nitrógeno (C/N)	42
6.2.7. pH	42
6.2.8. Contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa en el bagazo	43
6.2.9. Características de la levadura	43
6.3. Construcción del sistema de biodigestión	44
6.3.1. Biodigestor	44
6.3.2. Gasómetro	45
6.4. Instalación de sistema de biodigestión	47
6.4.4. Prueba de ensayo	47

6.4.5. Instalación real.....	47
6.5. Preparación y caracterización de los residuos	49
6.5.4. Relación C/N.....	50
6.5.5. pH.....	52
6.6. Proceso de biodigestión anaerobia y registro de parámetros.....	53
6.6.1. Temperatura	53
6.6.2. Biogás.....	53
6.6.3. CH ₄	54
6.6.4. pH.....	54
6.7. Análisis Estadístico	54
VII.RESULTADOS	56
7.1. Caracterización de residuos	56
7.2. Análisis de resultados.....	56
7.2.1. Producción de biogás	57
7.2.2. Producción de CH ₄	60
a. Calidad diaria de biogás (% de CH ₄)	61
b. Volumen de producción de CH ₄ (mL)	62
7.2.1. Comportamiento de la temperatura	65
7.2.2. pH.....	66
VIII. DISCUSIÓN.....	68
IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
9.1. Conclusiones	78
9.2. Recomendaciones	79
X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
XI. GLOSARIO.....	91

XII. ANEXOS..... 96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Proceso de la digestión anaeróbica (AD)..... 16

Figura 2: Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones de microorganismos 17

Figura 3: Composición del Biogás en función del pH de las mezclas de guano – tuna..... 23

Figura 4: Consumo de alcohol per cápita por tipo de bebida alcohólica, 2010 (Litros de alcohol puro) 32

Figura 5: Elaboración de Bebidas (Miles de litros) 32

Figura 6: Diagrama general del proceso productivo de la cerveza 33

Figura 7: Composición química del bagazo de cebada 36

Figura 8: Biodigestor instalado..... 44

Figura 9: Sistema para la medición de gases mediante el método de desplazamiento 46

Figura 10: Gasómetro instalado..... 46

Figura 11: Válvulas de plástico 48

Figura 12: Burbujas en los biodigestores 49

Figura 13: Rastrojo de maíz molido 52

Figura 14: Producción diaria de biogás 58

Figura 15: Producción acumulada de biogás 60

Figura 16: Precipitación en la solución barrera..... 60

Figura 17: Calidad diaria de biogás (% de CH₄)..... 62

Figura 18: Producción diaria de CH₄ (mL)..... 63

Figura 19: Producción acumulada de CH₄ (mL).	64
Figura 20: Temperatura diaria (°C)	65
Figura 21: Temperatura ambiental vs. Temperatura tratamientos	66
Figura 22: pH inicial vs. pH final	67
Figura 23: Muestras de bagazo fresco.	99
Figura 24: Muestras de bagazo y levadura en la estufa a 105°C.	99
Figura 25: Muestras de bagazo y levadura después de 24 horas en la estufa.	99
Figura 26: Muestra de bagazo siendo pesada en la balanza analítica.	100
Figura 27: Muestras de bagazo y levadura en la mufla a 550°C.	100
Figura 28: Muestras de bagazo y levadura luego de dos horas en la mufla.	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tiempo de retención hidráulica según temperatura	19
Tabla 2. Rangos de Temperatura y Tiempo de Fermentación Anaeróbica	21
Tabla 3. La influencia de los diferentes métodos de pre-tratamiento sobre la descomposición de la lignocelulosa	27
Tabla 4. Pre-tratamientos según principios y técnicas	28
Tabla 5. Propiedades físico-química del bagazo cervecero	35
Tabla 6. Composición química del bagazo cervecero	36
Tabla 7. Parámetros físico-químicos	39
Tabla 8. Tratamientos del sustrato	50
Tabla 9. Relación C/N tratamientos del sustrato	51
Tabla 10. Cantidad de materiales corregidos de los tratamientos	52

Tabla 11. pH de los tratamientos del sustrato	52
Tabla 12. Caracterización de residuos	56
Tabla 13. Comparación de las medias para el pH inicial y el pH final	67
Tabla 14. Resultados detallados de la caracterización de residuos	101
Tabla 15. Datos registrados diarios: Producción de biogás	103
Tabla 16. Datos registrados diarios: Calidad de biogás (%CH ₄)	104
Tabla 17. Datos registrados diarios: Volumen de producción de CH ₄	105
Tabla 18. Datos registrados diarios: Comportamiento de la temperatura	106
Tabla 19. Datos registrados diarios: pH	107
Tabla 20. ANOVA por parámetros analizados	108
Tabla 21. ANOVA de pH inicial y pH final	108
Tabla 22. Comparación de las medias para la producción diaria de biogás	109
Tabla 23. Comparación de las medias para la producción de biogás acumulada	109
Tabla 24. Comparación de las medias para la calidad diaria de biogás..	109
Tabla 25. Comparación de las medias para la producción diaria de CH ₄	110
Tabla 26. Comparación de las medias para la producción de CH ₄ acumulada	110
Tabla 27. Comparación de las medias para el comportamiento diario de la temperatura	110

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Informe de Ensayo del Laboratorio SGS	96
Anexo 2. Ficha Técnica Levadura Safale US-05.....	98
Anexo 3. Informe fotográfico de la caracterización de residuos.....	99
a. Humedad y Sólidos Totales (ST).....	99
b. Sólidos Volátiles (SV) o Materia Orgánica (MO)	100
Anexo 4. Resultados detallados de la caracterización de residuos... 	101
Anexo 5. Datos registrados diarios de los parámetros analizados....	103
Anexo 6. Resultados análisis estadístico SPSS	108

I. RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo optimizar la producción de metano a partir de los residuos cerveceros más abundantes de la cervecería Barranco Beer Company, los cuales son bagazo y la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Para ello, se realizaron cuatro tratamientos distintos (T1, T2, T3 y T4) que fueron sometidos a la digestión anaerobia en un biodigestor del tipo batch a escala laboratorio. Los cuatro tratamientos consistieron en diferentes concentraciones entre ambos residuos de la cervecería con una cantidad adicional de rastrojo de maíz para balancear la relación Carbono/Nitrógeno del sustrato. El T1 consistió de 100 % bagazo, el T2 de 90 % bagazo y 10 % levadura, el T3 de 50 % bagazo y 50 % levadura, y por último el T4 de 100 % levadura. Se llevó un registro diario durante diez días de la producción de biogás y metano, del comportamiento de la temperatura, y se comparó el pH inicial con el final. Se comprobó la diferencia entre los tratamientos mencionados con la prueba estadística de Análisis de Varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 95 %. Así pues, se concluyó que la presencia de levadura en el sustrato acelera y aumenta la producción de metano; y, se recomienda a la cervecería en estudio escalar el sustrato utilizado en el T2, debido a que éste representa la proporción en la que se generan los residuos en su establecimiento.

Palabras clave: Digestión Anaerobia, Gases de Efecto Invernadero, Residuos Orgánicos, Potencial Energético

II. ABSTRACT

The objective of the present investigation was to optimize the production of methane from the most abundant beer residues of the Barranco Beer Company brewery, which are bagasse and the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. For this, four different treatments were performed (T1, T2, T3 and T4) in a laboratory scale batch biodigester where anaerobic digestion was carried out. The four treatments consisted of different concentrations between both brewery residues with an additional amount of maize stubble to balance the Carbon/Nitrogen ratio of the substrate. T1 consisted of 100 % bagasse, T2 had 90 % bagasse and 10 % yeast, T3 had 50 % bagasse and 50 % yeast, and finally T4 had 100% yeast. A daily record of biogas and methane production, and of the temperature behavior was kept for 10 days, plus the initial pH was compared to the final pH. The difference between the mentioned treatments was verified with the statistical test of Analysis of Variance (ANOVA) with a level of significance of 95 %. Thus, it was concluded that the presence of yeast in the substrate accelerates and increases the production of methane; therefore, it is recommended that the brewery scales up the substrate used in T2 since it represents the proportion in which these residues are generated in their establishment.

Key words: Anaerobic Digestion, Energy Potential, Greenhouse Gases, Organic Waste

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

“Barranco Beer Company” (BBC) es una cervecería artesanal que abrió sus puertas en octubre del 2013 en el distrito de Barranco en Lima, Perú. Como toda fábrica cervecera, genera grandes cantidades de residuos orgánicos que al descomponerse en ambientes anaeróbicos producen biogás y otros subproductos contaminantes (Greenpeace Argentina, 2005). El biogás contiene metano (CH_4) en un 55-80 % (Nizami, 2012), un gas contribuyente al calentamiento global cuyo efecto invernadero es 21 veces superior al dióxido de Carbono (CO_2) (Chamy & Vivanco, 2007).

Adicionalmente, en el Perú existe un déficit preocupante en rellenos sanitarios, pues según el coordinador de Residuos Sólidos del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental se requieren 270 rellenos, y sólo existen 34 en la actualidad a nivel nacional (Briceño, 2018). Por lo tanto, existe un alto índice de informalidad en la gestión de residuos del país, que además de generar contaminación visual, contribuye con el calentamiento global debido a la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEIs) que no son controlados.

La BBC prioriza el reciclaje de sus residuos, por lo que en la medida de lo posible le entrega pequeñas cantidades a criaderos de cerdos u otras actividades que les genere un valor comercial; sin embargo, los recicladores no se dan abasto para llevárselos por completo. Por ello, la gran mayoría de los desechos son dispuestos por Empresas Prestadoras de Servicio (EPS) o por el

servicio municipal, sin acierto alguno de dónde van a parar. Es decir, la gestión actual de los residuos orgánicos en la BBC es de alto costo, ineficiente, con una alta demanda de tiempo y recurso humano y en algunos casos, informal.

La digestión anaerobia tiene ciertos beneficios que la posicionan como un proceso comúnmente utilizado para la estabilidad de los residuos sólidos y aguas residuales, y para la producción de bioenergía (Nizami, 2012). El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE, 2007) asegura que debido al alto porcentaje de CH_4 que contiene el biogás es susceptible a un aprovechamiento energético mediante su combustión en motores, en turbinas o en calderas. Un adecuado tratamiento de los residuos orgánicos generados en la cervecería BBC evitaría las emisiones incontroladas de CH_4 y la contaminación de agua y suelos proveniente de los vertederos y botaderos. Como también el aprovechamiento del potencial energético del biogás producido con la digestión anaerobia, se percibiría una reducción del CO_2 ahorrado por sustitución de energía fósil (IDAE, 2007).

El presente estudio tuvo como objetivo optimizar la producción de CH_4 a partir de los residuos orgánicos generados en la cervecería BBC utilizando un biodigestor de tipo Batch a escala laboratorio. Para ello, se realizaron cuatro tratamientos con concentraciones diferentes de sustrato y fueron sometidos a la digestión anaeróbica dentro del biodigestor, monitoreando la generación de biogás, CH_4 , temperatura y pH en cada ensayo de manera diaria. Así, se

comprobó la hipótesis planteada ya que fue posible optimizar la producción de CH_4 a partir de los residuos cerveceros asegurando la correcta concentración del sustrato.

La metodología aplicada en el presente estudio para cuantificar la producción de CH_4 a partir de diferentes sustratos para un posterior aprovechamiento del biogás como fuente de bioenergía es aplicable a cualquier industria que genere residuos orgánicos. Además, contribuye a mejorar la gestión de residuos sólidos en el Perú, incentivando el aprovechamiento de los Recursos Energéticos Renovables (RER), tanto en las industrias como en los rellenos sanitarios.

IV. MARCO TEÓRICO

4.1. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico en el cual se transforma la materia orgánica, en ausencia de oxígeno (O_2) y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, en biogás (IDAE , 2007). Dicho proceso ocurre tanto en la naturaleza, por ejemplo en el estómago de la vaca, pantanos y permutas, como también en los vertederos y rellenos sanitarios en los cuales se depositan todos los residuos urbanos generados (Nizami, 2012).

Durante la DA se libera energía principalmente en la forma de CH_4 (Ecuación 1). Esto lo distingue del proceso de degradación aeróbica, donde la energía se recupera en su mayoría en nueva biomasa, CO_2 y en pocas cantidades en calor de baja temperatura (Ecuación 2).

Ecuación 1: 33 g materia orgánica (CH_2O) \rightarrow 22 g CO_2 + 8 g CH_4 + 3 g biomasa (Wellinger, 1999)

Ecuación 2: 33 g materia orgánica (CH_2O) + 12.8 g O_2 \rightarrow 17.6 g CO_2 + 7.2 g H_2O + 21 g biomasa (Wellinger, 1999)

El biogás producido por la DA es usado como un recurso energético renovable (RER). Éste puede ser empleado como combustible en las cocinas, calefacción o iluminación, y en grandes instalaciones se puede utilizar para alimentar un motor que genere electricidad (Martí Herrero, 2008).

Adicionalmente, existen ciertos beneficios de la DA los cuales la posicionan como un proceso comúnmente utilizado para la estabilidad de los residuos y aguas residuales, y para la producción de bioenergía (Nizami, 2012). Korres, O’Kiely, Benzie, & West (2013) consideran éste proceso como la tecnología más apropiada disponible para convertir la biomasa y cualquier residuos orgánico en biometano.

Los subproductos de la digestión anaerobia son digestato (fracción sólida) y biol (fracción líquida), abonos naturales que se pueden utilizar, posterior a un tratamiento, para riego, fertilización de campos o venta como compost (IDAE, 2007). Actualmente, el biol se está tratando con la misma importancia, o mayor, que el biogás, ya que es considerado un fertilizante natural que mejora fuertemente el rendimiento de las cosechas (Martí Herrero, 2008).

4.1.1. *Bioquímica y microbiología del proceso*

La DA sucede en cuatro procesos biológicos sucesivos: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Nizami, 2012), tal como se demuestra en la Figura 1.

La bioquímica y microbiología de los procesos anaerobios son mucho más complejos que los procesos aerobios, ya que existen numerosas rutas que puede utilizar una comunidad anaerobia para la degradación de la materia orgánica (Cuadros, López-Rodríguez, Ruiz-Celma, Rubiales, & González-

González, 2009). Es importante diferenciar entre la disponibilidad de biomasa degradable y el total de Demanda Química de Oxígeno (DQO) de entrada, ya que una fracción considerable de la DQO puede ser en condiciones anaerobias no biodegradable (Batstone et al., 2002).

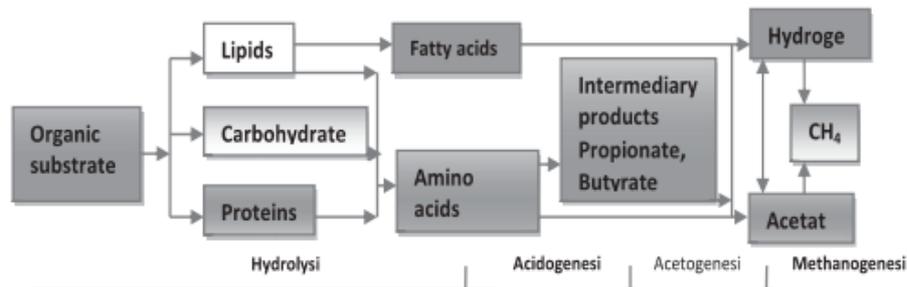
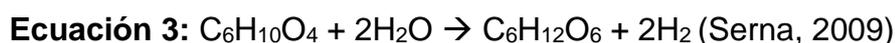


Figura 1: Proceso de la digestión anaeróbica (AD). Fuente: Nizami (2012).

a. Hidrólisis

Durante la hidrólisis se producen monómeros a partir de polímeros complejos, mediante la acción de enzimas extracelulares (Nizami, 2012), que son absorbidos por las bacterias (Wellinger, 1999).

En ésta primera fase, las bacterias transforman las proteínas, los carbohidratos y los lípidos en aminoácidos, monosacáridos (azúcares) y ácidos grasos, respectivamente (Figura 2) (Serna, 2009). La siguiente ecuación muestra un ejemplo de una reacción de hidrólisis, donde el sustrato es descompuesto en un monómero, en éste caso la glucosa:



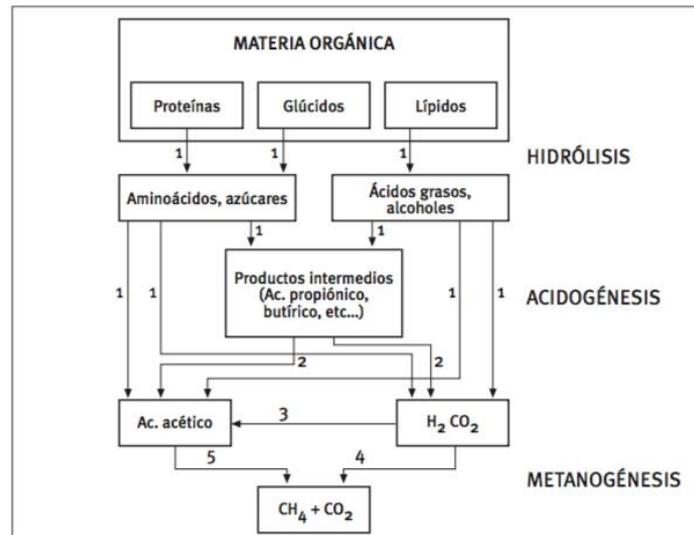


Figura 2: Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones de microorganismos: 1) Bacterias hidrolíticas-acidogénicas; 2) Bacterias acetogénicas; 3) Bacterias homoacetogénicas; 4) Bacterias metanogénicas hidrogenófilas; 5) Bacterias metanogénicas acetoclástica. Fuente: IDAE (2007).

El proceso limitante de la velocidad para los residuos agrícolas por lo general es la hidrólisis, debido a la presencia de celulosa y hemicelulosa, compuestos de difícil degradación (Wellinger, 1999).

b. Acidogénesis

Durante la acidogénesis, las bacterias acidogénicas transforman los monómeros producidos en el proceso anterior en ácidos grasos volátiles (AGV), hidrógeno (H₂) (Nizami, 2012), CO₂, cetonas y alcoholes (Serna, 2009). De estos productos, el hidrógeno, el CO₂ y ácido acético omiten la tercera etapa, la acetogénesis, y son directamente utilizadas por las bacterias metanogénicas en la etapa final (Figura 2) (Serna, 2009).

c. Acetogénesis

Durante la acetogénesis se producen acetato, CO₂ e hidrógeno a partir de los AGV (Nizami, 2012).

Las siguientes ecuaciones representan la conversión del propionato, glucosa y etanol a acetato:

Ecuación 4: $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 3\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- + 3\text{H}_2$
(Serna, 2009)

Ecuación 5: $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2$ (Serna, 2009)

Ecuación 6: $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2 + \text{H}^+$ (Serna, 2009)

d. Metanogénesis

Por último, en la metanogénesis los productos de la acetogénesis se combinan y se convierten en CH₄ (Nizami, 2012). Aproximadamente el 70 % del CH₄ se forma del ácido acético y el 30 % del hidrógeno y el CO₂ mediante la actividad de bacterias metanogénicas (Wellinger, 1999).

Las bacterias responsables por ésta conversión son denominadas metanogénicas y son estrictamente anaerobias. En las siguientes ecuaciones se observan las reacciones que son realizadas por dichos microorganismos:

Ecuación 7: $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ (Serna, 2009)

Ecuación 8: $2\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (etanol) + CO₂ → CH₄ + 2CH₃COOH (Serna, 2009)

Ecuación 9: CH₃COOH (ácido acético) → CH₄ + CO₂ (Serna, 2009)

4.2. Factores que intervienen en el proceso

La formación de CH₄ se mantiene sólo si todas las bacterias involucradas en el proceso biológicos de la DA se encuentran operando bajo condiciones óptimas (Wellinger, 1999). Por ello, es necesario mantener ciertos factores que intervienen en el proceso dentro de los rangos adecuados.

4.2.1. Tiempo de retención hidráulica (TRH)

El TRH es el tiempo que requieren las bacterias para digerir el lodo y producir biogás (IDAE, 2007). Es por lo tanto, el tiempo promedio que el sustrato se mantiene dentro del digestor (Wellinger, 1999).

El TRH dependerá de la temperatura de la región (Martí Herrero, 2008) donde se vaya a instalar el biodigestor. Así, a menores temperaturas, mayor tiempo de retención (IDAE, 2007). En la Tabla 1 se muestran los TRH promedios definidos según la región.

Tabla 1. Tiempo de retención hidráulica según temperatura

Región Característica	Temperatura (°C)	TRH (días)
Trópico	30	20
Valle	20	30
Altiplano	10	60

Fuente: Martí Herrero (2008).

Por otro lado Wellinger (1999) asegura que el TRH mínimo dependerá del tipo de sustrato a ser digerido; a menor velocidad de degradación, más lento será el tiempo de duplicación de las bacterias, y mayor será el TRH. La velocidad de degradación de los compuestos básicos aumenta de la siguiente manera:

celulosa, hemicelulosa, proteínas, lípidos, carbohidratos. Por lo tanto, la digestión de un sustrato con alto contenido de lípidos requiere un menor TRH que aquel con alto contenido de celulosa.

4.2.2. Relación Carbono-Nitrógeno (C/N)

La concentración de C/N determina el rendimiento de la digestión anaeróbica: el carbono constituye la fuente de energía para los microorganismos (Hilkiah, Ayotamuno, Chibuogwu, Ogaji & Probert, 2008) y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células (Varnero Moreno, 2011). Si el contenido de nitrógeno es bajo, la concentración de microorganismos se mantendrá bajo y les tomará más tiempo descomponer el carbono disponible; pero, el exceso de nitrógeno, sobrepasando los requerimientos microbianos, se pierde en el proceso como gas amonio (Hilkiah et al., 2007).

Las bacterias metanogénicas consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1 (Varnero Moreno, 2011).

Para prevenir la falta de nitrógeno durante el proceso, se le puede añadir algún suplemento rico en éste elemento, tales como estiércol, lodos depuradores, residuos sépticos y urea (Hilkiah et al., 2007).

4.2.3. *Temperatura*

La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que a su vez, dependen de la temperatura. Es decir, la temperatura influye principalmente en el TRH (Martí Herrero, 2008). A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión y con ello la producción de biogás (Varnero Moreno, 2011); sin embargo, la sensibilidad a algunos inhibidores también aumenta con la temperatura, como el amoníaco (IDAE, 2007).

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos (Tabla 2): psicrófilos, mesófilos y termófilos (Varnero Moreno, 2011).

Tabla 2. Rangos de Temperatura y Tiempo de Fermentación Anaeróbica

Fermentación	Mínimo (°C)	Óptimo (°C)	Máximo (°C)	Tiempo de fermentación (días)
Psicrófilos	4-10	15-18	20-25	+ 100
Mesófilos	15-20	25-35	35-45	30-60
Termófilos	25-45	50-60	75-80	10-15

Fuente: Varnero Moreno (2011).

4.2.4. *pH Y alcalinidad*

La operación exitosa de los sistemas anaerobios depende en gran medida de que el rango de pH se mantenga entre 6,6 y 7,4 (Molina Perez, 2007). Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaeróbica presentan niveles de actividad óptima en torno a la neutralidad. El óptimo es entre 5,5 y 6,5 para acidogénicos y entre 7,8 y 8,2 para metanogénicos. El pH

óptimo para cultivos mixtos se encuentra en el rango entre 6,8 y 7,4, siendo el pH neutro el ideal (Varnero Moreno, 2011).

Durante el proceso de la acidogénesis se producen grandes cantidades de AGV en el reactor, lo cual puede llevar a caídas de pH a valores en los cuales la actividad metanogénica es completamente inhibida (Rojas, 1987) resultando a un pH de 5,5 (Molina Perez, 2007).

La acidificación ocurre debido a la diferencia de velocidad con que las poblaciones bacterianas realizan la acidogénesis y la metanogénesis, con lo cual se acumulan AGV, produciéndose la acidificación del reactor (Molina Pérez, 2007) y la disminución de bicarbonatos (Pérez & Torres, 2008).

El sistema tampón o buffer en un sistema anaerobio es generalmente el sistema carbonático, en el cual el ion bicarbonato (HCO_3^-) reacciona con los protones H^+ de los AGV, produciendo la respectiva sal e impidiendo así un descenso en el pH (Rojas, 1987). En la Ecuación 10 se muestra dicha reacción donde HA representa un ácido genérico que se disocia en H^+ y A^- que se descomponen en CO_2 :

Ecuación 10: $\text{HA} + \text{NaHCO}_3 \leftrightarrow \text{NaA} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ (Pérez & Torres, 2008)

El pH y la capacidad tampón en un sistema anaerobio son completamente dependientes del equilibrio entre el gas carbónico (H_2CO_3) y el HCO_3^- que regula la concentración del ion hidrógeno (H^+) como lo muestran las siguientes ecuaciones:

Ecuación 11: $CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow HCO_3^- + H^+$ (Pérez & Torres, 2008)

Ecuación 12: $HCO_3^- + OH^- \leftrightarrow CO_3^{2-} + H_2O$ (Pérez & Torres, 2008)

El valor del pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición (Figura 3). Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en CH_4 y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas (Martí Ortega, 2006).

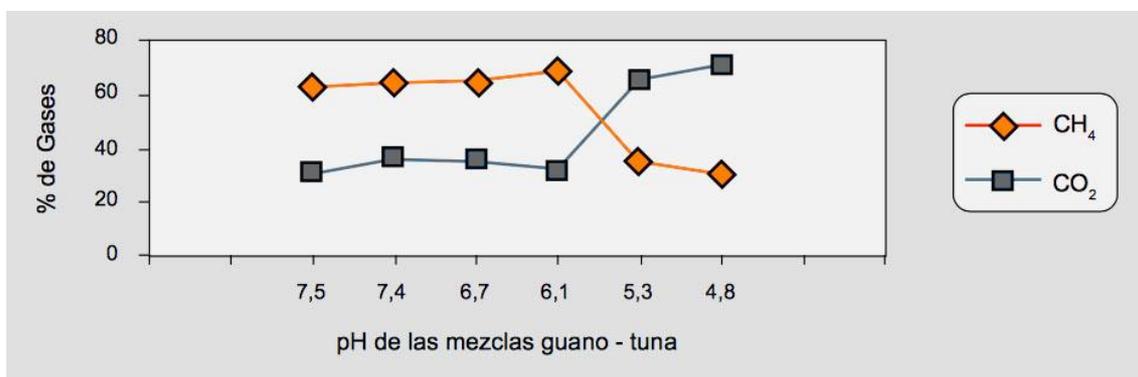


Figura 3: Composición del Biogás en función del pH de las mezclas de guano – tuna. Fuente: Varnero Moreno (2011).

Por otra parte, el pH también afecta los equilibrios químicos, pudiendo influir en la formación de agentes inhibidores. Tal es el caso del equilibrio ácido-base del amoníaco y del ácido acético: al aumentar el pH se favorece la

formación de amoníaco que, en elevadas concentraciones, es inhibidor del crecimiento microbiano y a pH bajos se genera la forma no ionizada del ácido acético, que inhibe el mecanismo de degradación del propionato (Martí Ortega, 2006).

En muchos casos para mantener el pH óptimo en el reactor, es necesaria la suplementación de alcalinidad utilizando químicos tales como bicarbonato de sodio, carbonato de sodio, hidróxido de amonio, gas amoníaco, cal, hidróxido de sodio y potasio. Se prefiere el bicarbonato de sodio debido a su alta solubilidad y baja toxicidad (Varnero Moreno, 2011). Para asegurar la capacidad tampón y evitar la acidificación es recomendable una alcalinidad superior a 1,5 g/l CaCO_3 (IDAE , 2007).

4.2.5. Dilución

La materia orgánica o Sólidos Volátiles (SV) se refiere a la parte de la materia seca (MS) o Sólidos Totales (ST), que se volatilizan durante la incineración a temperaturas superiores a 550°C (Varnero Moreno, 2011). Los SV son aquellos que pueden ser transformados a biogás (Chillo Abril & Paguay Cuvi, 2015). Los ST se refiere a al residuo seco que se obtiene luego de secar el sustrato 105°C en estufa (Martí Ortega, 2006).

Se deberá observar una disminución de los ST durante la digestión anaerobia, debido a la hidrólisis de sus moléculas formando monómeros solubles

y productos finales volátiles, lo cual provoca la degradación y licuefacción del sustrato (Montenegro Aquino, Tapia Molina, & Cárdenas Murillo, 2013).

Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores semi-continuos no debe tener más de un 8 % a 12 % de ST para asegurar el buen funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos, que tienen entre un 40 a 60 % de ST (Varnero Moreno, 2011).

4.3. Producción y composición del biogás

Hilkiah et al. (2007) define biogás como “un subproducto de la descomposición biológica, en condiciones libres de O₂, de los residuos orgánicos tales como plantas, residuos de cultivos, maderas y residuos de corteza, y el estiércol animal y humano”. Éste es incoloro, relativamente inodoro, inflamable, estable y no-tóxico.

La composición del biogás producido depende de la materia prima o sustrato que alimenta el biodigestor; por ejemplo, el biogás a partir del césped contiene alrededor de 55 % de CH₄, mientras que el biogás a partir de la gallinaza contiene entre 60 y 80 % de (Korres et al., 2013). En general, el biogás contiene CH₄ en un 55-80 % y CO₂ en un 20-45 % (Nizami, 2012); cuando tiene un contenido de CH₄ superior al 45 % es inflamable (Rodríguez Venandy, 2002). Debido al alto porcentaje de CH₄ que contiene el biogás es susceptible a un

aprovechamiento energético mediante su combustión en motores, en turbinas o en calderas, tanto sólo como mezclado con otro combustible (IDAE , 2007).

4.3.1. Pretratamiento

La habilidad de producir biogás a partir de una gran variedad de sustratos es una de las mayores ventajas de la DA sobre otros RER; sin embargo, algunos sustratos pueden tomar mucho tiempo en degradarse porque:

- Contienen químicos que inhiben el crecimiento y la actividad de los microorganismos (Montgomery & Bochmann, 2014)
- Crean problemas físicos tales como flotación, formación de espuma o aglutinación, bloqueando ciertos conductos de las plantas de biogás (Montgomery & Bochmann, 2014)
- La estructura molecular es poco accesible por microorganismos y enzimas (por ejemplo: sustratos lignocelulósicos tales como el afrecho de cervecería) (Montgomery & Bochmann, 2014)

En sustratos utilizados para la generación de biogás, las principales fuentes de CH₄ son azúcares y otras moléculas pequeñas. En las plantas (sustratos lignocelulósicos) estas pequeñas moléculas provienen de la descomposición del almidón, celulosa y hemicelulosa. Mientras que el almidón es relativamente fácil y rápido de descomponer biológicamente, la celulosa y hemicelulosa se utilizan para mantener la estructura de la planta, y son, por necesidad, difíciles y lentas para descomponerse (Montgomery & Bochmann,

2014).

Para superar éstos problemas, se realiza un pre-tratamiento, procesos al cual se somete el residuo antes de alimentar el biodigestor (Hilkiah et al., 2007). En la Tabla 3 se observa la influencia de diferentes tecnologías de pre-tratamiento sobre la lignocelulosa. La finalidad de estas operaciones es introducir el residuo lo más homogéneo posible, con las condiciones físico-químicas adecuadas, y sin elementos que puedan dañar el digestor (IDAE , 2007).

Tabla 3. La influencia de los diferentes métodos de pre-tratamiento sobre la descomposición de la lignocelulosa

Método de pre-tratamiento	Descristalización de celulosa	Degradación de la hemicelulosa	Degradación de lignina	Incremento de la superficie específica
Biológico				+
Molienda	+			+
Explosión por vapor		+	+	+
Ácido concentrado		+	+	+
Ácido diluido		+		+
Álcali		-	+	+
Extrusión				+

Nota: El símbolo más (+) indica que el método de tratamiento previo logra este efecto, un signo menos (-) indica que no tiene ningún efecto, y ningún símbolo significa que no está claro si hay un efecto o no. Fuente: Montgomery & Bochmann (2014).

En general, la velocidad del proceso está limitada por la velocidad de la etapa más lenta, la cual depende de la composición de cada residuo. Por ejemplo, para residuos en los que la materia orgánica esté en forma de

partículas, la fase limitante es la hidrólisis, cuya velocidad depende de la superficie de las partículas.

Para aumentar la velocidad, una de las estrategias es el pre-tratamiento para disminuir el tamaño de partículas o ayudar a la solubilización (maceración, ultrasonidos, tratamiento térmico, alta presión, o combinación de altas presiones y temperaturas) (IDAE , 2007).

Existen muchos tipos diferentes de pre-tratamiento, los cuales se pueden clasificar según los principios por los cuales funcionan, tal como se demuestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Pre-tratamientos según principios y técnicas

Principio	Técnica
Físico	Mecánico Térmico Ultrasonido Electro-químico
Químico	Alcalinidad Acidez Oxidación
Biológico	Microbiológico Enzimático
Procesos Combinados	Explosión de vapor Extrusión Termoquímico

Fuente: Montgomery & Bochmann (2014).

4.4. Biodigestores

Un biodigestor es un sistema natural o artificial que aprovecha la digestión anaerobia de las bacterias que ya habitan la materia orgánica, para transformar éste en biogás y fertilizante (Nizami, 2012).

El diseño y operación de los digestores anaeróbicos es crítico para lograr un buen rendimiento en la producción de biogás (Nizami, 2012). Para ello, se deben considerar ciertos factores tales como el tipo de residuo a tratar, la tasa de generación del residuo y las condiciones ambientales locales (Hilkiah et al., 2007).

Los tipos de digestores anaerobios varían con los siguientes factores, o la combinación de los mismos:

- Frecuencia de alimentación: Batch, semicontinuo o continuo
- Temperatura de operación: Mesofílico o termofílico
- Contenido de materia seca: húmedo o seco
- Tipo de sustrato: alto o bajo contenido de sólidos
- Complejidad del proceso de DA: de una o varias cámaras

(Nizami, 2012)

Los biodigestores del tipo Batch o discontinuo son ideales a nivel laboratorio para la evaluación de los parámetros del proceso o el comportamiento de un residuo orgánico o una mezcla de ellas. Éstos

biodigestores son cámaras cerradas que una vez llenados con el sustrato no se puede sacar o introducir más del mismo, es decir que se carga una sola vez y se retira cuando ya se ha finalizado la biodegradación (Soluciones Prácticas, 2009). Normalmente se da un espacio del 75 % del volumen total a la fase líquida, y del 25 % restante a la fase gaseosa (Martí Herrero, 2008).

Es importante instalar un filtro para disminuir el sulfuro de hidrógeno (H_2S), CO_2 y monóxido de carbono (CO), los cuales son tóxicos, reducen la calidad del biogás como combustible y corroen el metal de los cilindros de los motores, en el caso que se utilice el biogás para la generación de energía eléctrica (Coto, Maldonado, Botero, & Mur, 2007). Existen diferentes filtros para reducir éstos gases indeseables, Coto et al. (2007) considera el filtro de óxido de calcio (CaO) como el más efectivo; y Rodríguez Venandy (2002) recomienda tubos de PVC rellenos con viruta metálica.

Varnero Moreno (2011) afirma que es imprescindible un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura para evitar la desestabilización del proceso debido a variaciones bruscas de temperatura en el digestor. También se deberá tener en cuenta la velocidad de agitación, pues debe ser lo suficientemente alta para permitir una homogeneización completa del sustrato, pero no tan alta ya que podría romper los agregados bacterianos (Martí Ortega, 2006).

4.4.1. Cuantificación de la producción de CH₄

Para cuantificar el volumen de CH₄ producido por kilogramo de SV presentes en la materia orgánica (m³/Kg SV) (Chillo Abril & Paguay Cuvi, 2015) existen diferentes equipos y metodologías. Sin embargo, la mayoría de los medidores volumétricos de gas utilizados a nivel laboratorio se basan en el método de desplazamiento de líquidos (Parajuli, 2011).

El método volumétrico se basa en la cuantificación del volumen de CH₄ producido mediante el uso de una sustancia desplazante, como el NaOH o el hidróxido de potasio (KOH), en un rango de 15-20 g/L, por su propiedad de reaccionar con el CO₂ presente en el biogás, permitiendo una medición más aproximada del volumen de CH₄ producido (Torres Lozada & Pérez, 2010).

El volumen del gas se calcula a partir de la medición del cambio en la altura de la solución barrera (Parajuli, 2011).

4.5. Industria cervecera

En el Perú se consumen 44,5 L per cápita de cerveza al año (Marroquín, 2015), lo cual representa casi el 50 % del consumo de alcohol a nivel nacional (Figura 4) y viene demostrando un crecimiento sostenido desde el años 2010 (Figura 5).

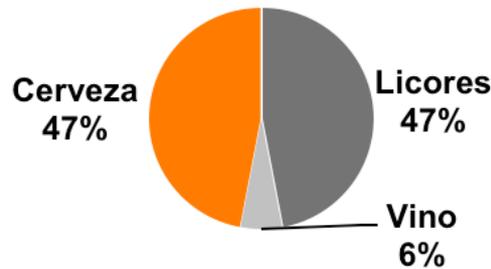


Figura 4: Consumo de alcohol per cápita por tipo de bebida alcohólica, 2010 (Litros de alcohol puro). Fuente: OMS (2014).

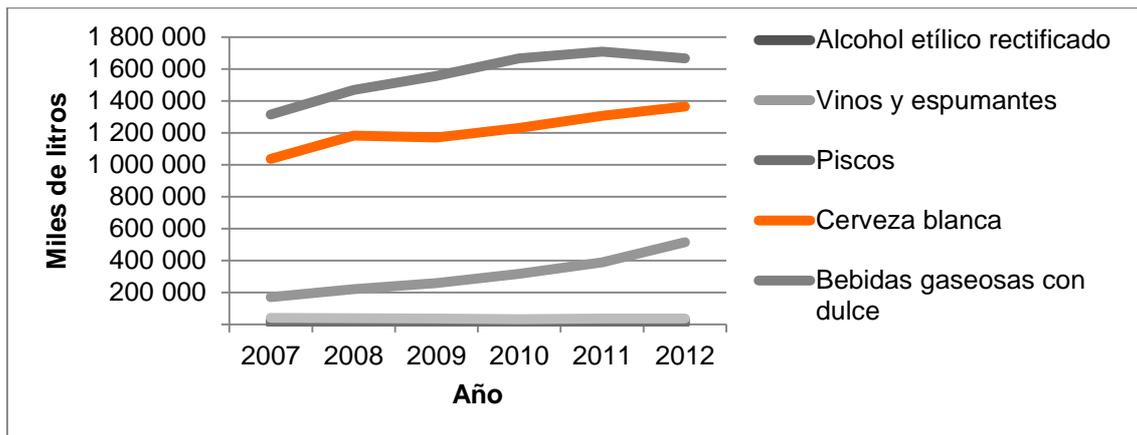


Figura 5: Elaboración de Bebidas (Miles de litros). Fuente: Elaboración propia a partir de datos publicados en el INEI. Fuente: INEI (2013).

A nivel mundial la industria de micro cervecías o cervecías artesanales vienen experimentando un crecimiento importante y el Perú no es la excepción. Diego Rodríguez, presidente de la Unión de Cervecías Artesanales del Perú, aclara que en el 2014, con cerca de 30 cervecías artesanales se logró vender 350 mil litros aproximadamente, y para el año 2015 se logró casi doblar el número de micro cerveceras y el triplicar las ventas (Gonzales, 2015).

4.5.1. *Proceso de producción*

La Figura 6 muestra el proceso general de producción de cerveza. Se destacan en diferentes colores las distintas operaciones agrupadas de acuerdo

a las cuatro fases productivas principales:

- 1.- Fabricación del mosto
- 2.- Fermentación y guarda
- 3.- Filtración
- 4.- Estabilización microbiológica y envasado



Figura 6: Diagrama general del proceso productivo de la cerveza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos publicados en Ainia (2005).

4.5.2. **Generación de residuos**

En la industria cervecera, el residuo más abundante corresponde a bagazo cervecero, con un volumen de producción de un 85 % en relación al total de los residuos generados por la industria. Otros residuos de menor importancia por sus volúmenes producidos, son lúpulos y levaduras (Rodríguez Venandy, 2002). La cantidad de levadura generada durante la fermentación supone una relación de 1:4, lo que significa que una cuarta parte de la levadura que se obtiene se reutiliza en sucesivos procesos y el resto se elimina como residuo (Ainia, 2005). Estos residuos merecen ser considerados como subproductos ya que pueden ser aprovechados por otras industrias tales como la alimentaria

(tanto para humanos como para animales), farmacéutica, agricultura, etc. Debido al elevado valor comercial otorgado a los residuos generados en el proceso de producción y la elevado Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) que presentan, se recomienda no arrojarlos como basura sino aprovecharlos (Ainia, 2005).

Chamy & Vivanco (2007) identificaron que la tasa de generación de residuos sólidos en la industria cervecera de Chile es de 16,38 kg por Hectolitro (HL) de cerveza producida. Por otro lado, Backus, empresa líder del mercado cervecero peruano, reportó en su Memoria de Sostenibilidad del año 2015 haber generado 73,849 toneladas (tn) de residuos generales y 98,87 tn de residuos peligrosos (Backus y Johnston S.A.A., 2015).

Debido a su alto nivel nutritivo, el bagazo y la levadura suelen ser un subproducto apreciado por los ganaderos y son vendidos a \$9/kg y \$1/kg, respectivamente (Chamy & Vivanco, 2007). Las propiedades físico-químicas del bagazo se encuentran detalladas en la Tabla 5. Además, la levadura también se utiliza como materia prima en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica (Ainia, 2005).

Sin embargo, en los territorios alejados de las actividad ganadera, tanto el bagazo como la levadura, son comúnmente considerados casi en su totalidad como un residuos contaminante.

Por otro lado, en el caso de que estos subproductos no puedan ser aprovechados y por tanto pasen a ser considerados como residuos orgánicos, es posible utilizar técnicas de valorización como el compostaje y la producción de biogás o la obtención de sustancias de valor añadido para la industria agroalimentaria, química o farmacéutica (Ainia, 2005).

Tabla 5. Propiedades físico-química del bagazo cervecero

Parámetro	Bagazo Cervecerero
Humedad (%)	14,1
Fibra (%)	4,2
Lípidos (%)	7,3
Nitrógeno (%)	1,82
Proteínas (%)	11,38
Sólidos Totales (%)	67,3
Sólidos Volátiles (%)	14,84
Carbono (%)	47
Relación C/N	25,9
Carbohidratos (%)	28,6
pH	5,03

Fuente: Uzodinma & Ofoefule (2008).

a. Bagazo cervecero

El bagazo cervecero está compuesto por las capas que cubrían la semilla de la cebada (Lynch, Steffen, & Arendt, 2016). La presencia de almidón y otros compuestos va a depender del proceso cervecero que se haya realizado, tales como la intensidad del malteado y la molienda, o la adición de otras sustancias (Mussatto, Dragone, & Roberto, 2006). En la Tabla 6, Lynch, et al. (2016) cita a varios autores para evidenciar las diferencias que existen en la composición química de los bagazos producidos en diferentes cervecerías, considerando que

Mussato & Roberto (2006) y Waters et al. (2012) utilizaron ambos cebada únicamente como base.

Sin embargo, el bagazo de cebada está compuesto principalmente por fibra (hemicelulosa y celulosa), proteína y lignina, como se muestra en la Figura 7 (Lynch et al., 2016).

Tabla 6. Composición química del bagazo cervecero

Componente	Mussatto & Roberto (2006)	Waters et al. (2012)
Hemicelulosa	28,4	22,2
Celulosa	16,8	26
Almidón	n.d.	n.d.
Proteína	15,2	22,1
Lignina	27,8	n.d.
Lípidos	n.d.	n.d.
Cenizas	4,6	1,1
Fenólicos	n.d.	n.d.

Nota: Todos los valores están expresado en g por 100g de material seco (% W/W); n.d., no determinado. Fuente: Lynch et al. (2016).

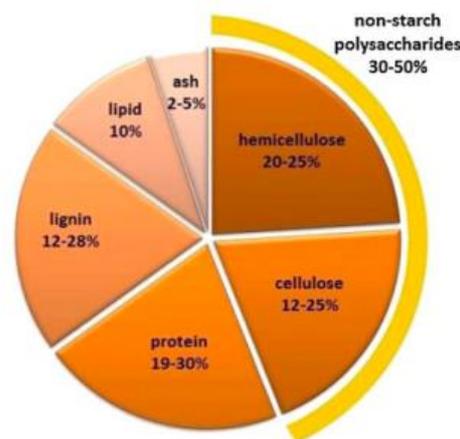


Figura 7: Composición química del bagazo de cebada. Fuente: Lynch et al. (2016).

b. Levadura: *Saccharomyces cerevisiae*

El segundo gran subproducto de la industria cervecera es la biomasa de la levadura *S. cerevisiae*, la cual se adiciona al mosto para que lo fermente en alcohol (Vitanza, Cortesi, Gallo, Colussi, & De Arana-Sarabia, 2016). *S. cerevisiae* es el hongo unicelular (levadura) más utilizado en la industria, denominado por Suwannarat & Ritchie (2015) como el microorganismo detrás de las fermentaciones más comunes. El proceso fermentativo se lleva a cabo por células de la levadura que convierten los azúcares, utilizando enzimas, y producen CO₂ y alcohol etílico bajo condiciones anaeróbicas (Suwannarat & Ritchie, 2015). El pH óptimo en el cual se desarrollan mejor estos microorganismo varía entre 4,5 y 6,5 (Walker & Stewart, 2016).

Las células de *S. cerevisiae* son redondas a ovoides, de 5-10 µm de diámetro y se reproducen por un proceso de división conocido como brotación, pero también tiene una etapa sexual (Suwannarat & Ritchie, 2015). La nutrición de la levadura se realiza a través de un proceso osmótico, por lo que es importante evitar medio hipertónicos o hipotónicos para reducir la posibilidad de una plasmoptisis o plasmólisis (Suárez Machín, Garrido Carralero & Guevara Rodríguez, 2016).

V. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

5.1. Hipótesis

5.1.1. *Hipótesis Nula (H₀)*

Es posible optimizar la producción de CH₄ a partir de los residuos cerveceros de la empresa BBC asegurando la correcta concentración del sustrato.

5.1.2. *Hipótesis Alternativa (H_a)*

No es posible optimizar la producción de CH₄ a partir de los residuos cerveceros generados en la empresa BBC asegurando la correcta concentración del sustrato.

5.2. Objetivos

5.2.1. *General*

Optimizar la producción de CH₄ a partir de los residuos cerveceros generados en la cervecería BBC

5.2.2. *Específicos*

- Caracterizar los residuos cerveceros que serán utilizados para la generación de biogás
- Evaluar la eficiencia de producción de CH₄ de los diferentes tratamientos realizados

VI. METODOLOGÍA

6.1. Lugar de ejecución

El bagazo cervecero y la levadura residual utilizados en el presente trabajo se obtuvieron de la cervecería BBC, ubicada en el distrito de Barranco, Lima, Perú. Una vez recolectados, se llevaron al laboratorio habilitado para la ejecución de la tesis ubicado en el distrito de La Molina, Lima, Perú.

6.2. Caracterización de residuos

Se utilizaron los dos tipos de residuos orgánicos que se generan en la cervecería en mayor cantidad: bagazo y levadura en presentación líquida. La levadura recolectada es la denominada “Safale US-05” de la marca “Fermentis”, utilizada para la producción de cerveza del tipo “Pale”; y, el bagazo fue de cebada pura, utilizado para el proceso de producción de cerveza del tipo “Lager”. Los parámetros físico-químicos evaluados se encuentran en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros físico-químicos

Parámetro	Método	Referencia
Humedad	Método gravimétrico: 105°C	(DeAngelis, 2007)
Sólidos Totales (ST)	Método gravimétrico: 105°C	(Martí Ortega, 2006)
Sólidos Volátiles (SV)	Método gravimétrico: 550°C	(Gamble, 2014)
Carbono Orgánico (CO)	Factor de Conversión M.O/1,84	(Eyherabide, Saínez Rozas, Barbieri & Echeverría, 2014) (Larney, Ellert & Olson, 2004)
Nitrógeno Relación C/N	Método de Kjeldahl C/N	Laboratorio SGS del Perú (Rodríguez Venandy, 2002)
pH	EPA 9045D	(EPA, 2004)

6.2.1. Humedad

La humedad de cada muestra de residuo se cuantificó con el método gravimétrico descrito por DeAngelis (2007), el cual determina el contenido de agua por la diferencia de pesos de las muestras húmedas y secas, cuantificando la fracción evaporada (Zagal & Sadzawka, 2007).

Para ello, se realizó el siguiente proceso:

- i. Se utilizó la balanza analítica de la marca “Sartorius” modelo “Extend ED224S” para registrar el peso del crisol
- ii. Se colocó 10 g del residuo fresco en un crisol
- iii. Se registró el peso del crisol con la muestra fresca
- iv. Se realizaron tres repeticiones para cada residuo obteniéndose un total de seis crisoles con muestra fresca.
- v. Una vez preparadas las seis muestras, éstas se llevaron a la estufa de la marca “Binder” modelo “FD23” a 105°C por 24 horas.

El contenido de agua se obtuvo utilizando la Ecuación 13, restando previamente la masa de los crisoles a cada muestra.

$$\text{Ecuación 13: Humedad(\%)} = \frac{\text{masa de la muestra fresca} - \text{masa de la muestra seca}}{\text{masa de la muestra fresca}} \times 100$$

6.2.2. Sólidos Totales (ST)

La medición de los ST resulta del mismo proceso realizado para la cuantificación del contenido de agua de la muestra, pero en éste caso se calcula la fracción remanente. La fórmula utilizada en éste caso es la Ecuación 14.

$$\text{Ecuación 14: ST (\%)} = \frac{\text{masa de la muestra seca}}{\text{masa de la muestra fresca}} \times 100$$

6.2.3. Sólidos Volátiles (SV)

Para el cálculo de los SV se calcinaron las muestras secadas durante el proceso para la cuantificación de ST, en la mufla de la marca “Thermo Scientific” “FB1415M” a una temperatura de 550°C por dos horas (Gamble, 2014). Una vez calcinada la muestra, se dejó enfriar hasta llegar a temperatura ambiente. Se utilizó la Ecuación 15 para la cuantificación de SV.

$$\text{Ecuación 15: SV (\%)} = \frac{\text{masa de la muestra seca} - \text{masa de la muestra calcinada}}{\text{masa de la muestra seca}} \times 100$$

6.2.4. Carbono Orgánico (CO)

El contenido de CO se calculó a partir del contenido de la materia orgánica (M.O) utilizando un factor de conversión de 1,84, tal como lo muestra la Ecuación 16. Este factor de conversión ha sido investigado por diferentes autores, determinando valores para diferentes tipos de suelos, residuos orgánicos, y otros sustratos. En el presente estudio se utilizó un promedio de los diferentes autores citados por Larney, Ellert, & Olson (2004), Rodríguez Venandy (2002) y el factor de Van Bemmelen de 1,724, considerado como el factor universal (Eyherabide et al., 2014).

$$\text{Ecuación 16: CO (\%)} = \frac{\text{M.O}}{1,84}$$

En el presente estudio se utilizó el valor de SV como el contenido de Materia Orgánica (MO), basándose en lo descrito por Paéz-Osuna (1983), quien citando a Dean (1974) asegura que las pérdidas por ignición a 550°C proveen una medida del contenido del material orgánico con una precisión comparable a otros métodos.

6.2.5. Nitrógeno

Para la cuantificación de Nitrógeno se enviaron unas muestras al laboratorio SGS del Perú, en el cual utilizaron el Método de Kjeldahl. Los informes de ensayo certificados por el laboratorio se encuentran en el Anexo 1.

6.2.6. Relación Carbono-Nitrógeno (C/N)

Se calculó dividiendo el contenido de Carbono y Nitrógeno de cada tipo de residuo (Rodríguez Venandy, 2002).

6.2.7. pH

El pH se obtuvo según el método descrito por el estándar EPA (2004). Éste método consiste en mezclar el sustrato con agua destilada y mezclar la solución por 5 minutos, para el cual se utilizó el agitador magnético de la marca “Faithful” modelo “SH-4C”; luego de dejar que se sedimente los sólidos, se sumergió el potenciómetro o pH-metro de la marca “Hitech” modelo “PH009 (III)” en la parte acuosa.

6.2.8. Contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa en el bagazo

En el presente estudio, se considera el bagazo como un material lignocelulósico compuesto por 17 % de celulosa, 28 % de polisacáridos no celulósicos y 28 % de lignina (Mussatto et al., 2006).

A pesar de la presencia de éste material lignocelulósico, en el presente estudio no se aplicó ningún pre-tratamiento ya que durante el proceso cervecero, el bagazo es molido y sufre shocks de temperatura que permite la aceleración de la hidrólisis. Por otro lado, la aplicación de pre-tratamiento tales como explosión por vapor y molienda requieren un aporte de energía considerable (Suwannarat & Ritchie, 2015) y significa un costo adicional que puede ser innecesario y por lo que se sugiere primero evaluar la producción de CH₄ sin mayor modificaciones.

6.2.9. Características de la levadura

La levadura utilizada fue *Saccharomyces cerevisiae*, cepa Safale US-05 de la marca Fermentis. Ésta es una levadura del tipo Pale, con una temperatura de fermentación ideal de 18-28°C. En el Anexo 2 se muestra la ficha técnica de la levadura utilizada.

6.3. Construcción del sistema de biodigestión

El sistema de biodigestión estuvo compuesto por dos partes: el biodigestor donde se llevó a cabo la DA y un gasómetro utilizado para cuantificar el CH₄ producido durante el proceso fermentativo. Se instaló un sistema de biodigestión para cada repetición de los tratamientos.

6.3.1. Biodigestor

Se utilizaron botellas de plástico de 1 Litro como biodigestores (Gamble, 2014), correctamente hermetizadas, considerando un volumen del 50 % para la fase líquida y el 50 % restante para la fase gaseosa. Se instaló un biodigestor para cada repetición sumando un total de 12 unidades, todos de flujo discontinuo o tipo batch, tal como se muestra en la Figura 8.



Figura 8: Biodigestor instalado.

En la parte superior del biodigestor se instaló una llave de paso con un adaptador de gas por el cual se retiraba el biogás generado. En el lado lateral, se instaló un termómetro digital de la marca “Boeco” modelo “BOE 310”. Además, tomando en consideración el efecto obtenido en el ensayo realizado por (Gamble, 2014), se le adicionó 10 mL de inóculo a cada biodigestor de lodo recogido de la planta de tratamiento de agua residual (PTAR) de la Universidad Científica del Sur (UCSUR), Lima, Perú.

6.3.2. Gasómetro

Se instaló un sistema como el de la Figura 9 (a), utilizando como solución barrera soda caustica (NaOH) a una concentración de 20 g/L (Field, 1987), y unas gotas de fenolftaleína, tal como se muestra en la Figura 10. La fenolftaleína se utilizó como indicador de acidez, pues al desaparecer OH (-) del medio la fenolftaleína vira al color que tiene en medio ácido (transparente) y se tendría que adicionar más NaOH para que éste reaccione con el CO₂.

La solución barrera de NaOH forma un precipitado de bicarbonato de sodio según la reacción demostrada en la Ecuación 17.



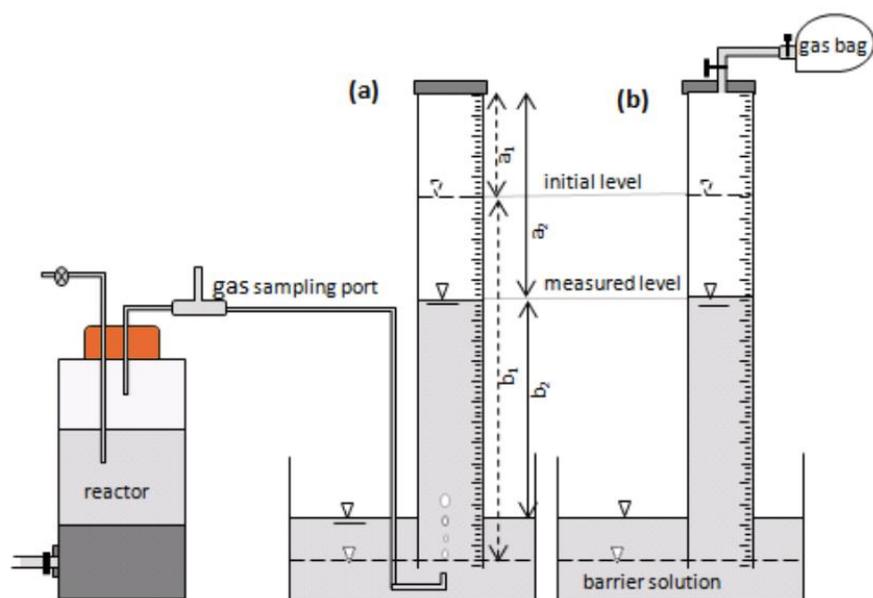


Figura 9: Sistema para la medición de gases mediante el método de desplazamiento: b) indirectamente mediante la colección del gas de un punto de almacenamiento. Fuente: Parajuli (2011).

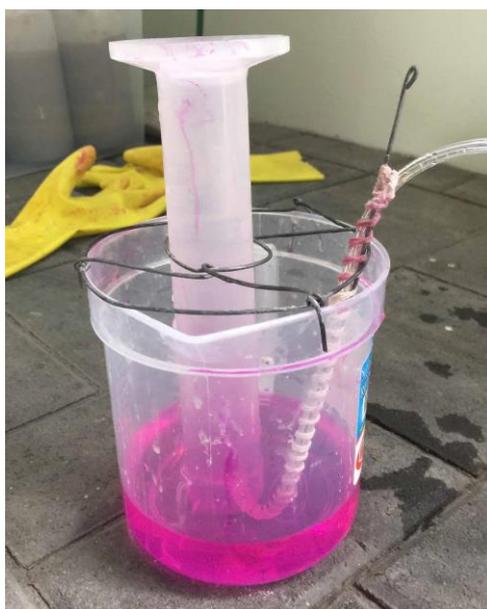


Figura 10: Gasómetro instalado

6.4. Instalación de sistema de biodigestión

La instalación del sistema se llevó a cabo en 2 partes: prueba de ensayo e instalación real.

6.4.4. Prueba de ensayo

Se realizó un ensayo previo a la instalación real del sistema completo el cual se denominó “Prueba de Ensayo”. Ésta tuvo como objetivo probar únicamente el sistema de biodigestión descrito en el numeral 7.3.3.

El ensayo se hizo en cuatro días y se realizó con una muestra de residuos orgánicos comunes obtenidos en una cocina, entre estos se recolectó lechuga, palta y zanahoria. La razón por la cual no se utilizó el sustrato del ensayo real fue por las complicaciones que se presentaron para el recojo de las muestras de la cervecería en estudio, pues ambos residuos dependían del cronograma de cocimiento de la misma lo cual podía variar desde siete a 14 días.

Esta prueba fue realizada con éxito, considerando que no se presentaron fugas y se logró cuantificar el biogás con la jeringa y el CH₄ a través del gasómetro instalado.

6.4.5. Instalación real

La instalación real se realizó de la misma manera que la “Prueba de Ensayo”. Sin embargo, en éste caso registramos dos errores que se tuvieron que

subsanan y volver a realizar el ensayo.

El primer error se identificó al finalizar la primera experiencia del ensayo. Luego de 25 días de ensayo, al realizar el análisis estadístico, se pudo observar que la varianza de los datos registrados era muy alta en todos los tratamientos y se consideraban todas las medias iguales. Adicionalmente, pudimos identificar con esta primera experiencia que no era necesario realizar el ensayo durante 25 días, sino que al décimo día la producción de biogás era muy poca, coincidiendo así con los tiempo de producción de gas por Suwannarat & Ritchie (2015).

Este primer error se subsanó cambiando las válvulas de plástico instaladas (Figura 11) por unas metálicas de mayor duración e impermeabilidad (Figura 8). Una vez modificado el sistema, se volvió a realizar una “Prueba de Ensayo”.



Figura 11: Válvulas de plástico

El segundo error se observó en el segundo día de la segunda experiencia del ensayo. En este caso, el material utilizado para impermeabilizar el sistema (sikaflex) no se había secado y cedió por la rápida producción de gas creando burbujas en la parte superior del biodigestor, tal como se muestra en la Figura 12.

Este error se subsanó reduciendo la cantidad de muestra insertada al biodigestor, reduciéndolo del 75 % expresado por (Martí Herrero, 2008) al 50 % del contenedor.



Figura 12: Burbujas en los biodigestores

Así pues, se realizó la tercera experiencia del ensayo en diez días con un volumen del sustrato del 50 %. Este último ensayo se logró con éxito y se procedió con el análisis estadístico de los resultados.

6.5. Preparación y caracterización de los residuos

Se le denominó sustrato a la biomasa total que fue sometida al proceso

de DA, la cual corresponde al 50 % del biodigestor. Los diferentes tratamientos que se le realizaron a los sustratos se encuentran detallados en la Tabla 8. Se utilizó una dilución de sustrato : agua en un ratio de 1:4 (Martí Herrero, 2008).

Tabla 8. Tratamientos del sustrato

Tratamientos	Descripción	Repeticiones
T1	100 % Bagazo	3
T2	90 % bagazo + 10 % levadura	3
T3	50 % bagazo + 50 % levadura	3
T4	100 % levadura	3

6.5.4. Relación C/N

Se cuantificó la relación C/N de cada tratamiento descrito en la Tabla 8 utilizando la Ecuación 18, obteniendo los resultados expuestos en la Tabla 9.

Ecuación 18:
$$K = \frac{C_1 \times Q_1 + C_2 \times Q_2 + \dots + C_n \times Q_n}{N_1 \times Q_1 + N_2 \times Q_2 + \dots + N_n \times Q_n}$$
 (Varnero Moreno, 2011)

k: C/N de las mezclas de materias primas

C: % Carbono Orgánico contenido en cada materia prima

N: % Nitrógeno Orgánico contenido en cada materia prima

Q: Peso fresco de cada materia, expresado en Kg

Para darle cumplimiento a este factor de diseño, tomando como referencia la relación promedio de 25 determinada por Varnero Moreno (2011), se utilizó rastrojo de maíz por su alta relación C:N. Además, de acuerdo al estudio realizado por Vitanza et al. (2016), se determina que el residuo de levadura del

proceso cervecero lograría una co-digestión eficiente con el este material.

Tabla 9. Relación C/N tratamientos del sustrato

Tratamiento	Descripción	Bagazo (B) (%)	Levadura (L) (%)	Relación C/N (B+L)
T1	100 % Bagazo	100	0	13,58
T2	90 % Bagazo + 10 % levadura	90	10	13,20
T3	50 % Bagazo + 50 % levadura	50	50	12,04
T4	0 % Bagazo + 100 % levadura	0	100	11,08

El rastrojo de maíz se obtuvo de la Universidad Agraria La Molina y su relación C/N promedio es de 70 (Zea, Osorio & Bolaños, 1997). Este material fue molido, tal como se observa en la Figura 13, utilizando una licuadora debido a que podía obstruir la salida del gas y al mismo tiempo aumentamos su superficie específica acelerando así su digestión.

En la Tabla 10 se muestran la cantidad de cada material (bagazo, levadura y rastrojo de maíz) que se colocaron en cada tratamiento para cumplir la relación C/N de 25.



Figura 13: Rastrojo de maíz molido

Tabla 10. Cantidad de materiales corregidos de los tratamientos

Tratamiento	Cantidad Corregida (%)			Cantidad Corregida (kg)		
	Bagazo	Levadura	Rastrojo de maíz	Bagazo	Levadura	Rastrojo de maíz
T1	83	0	17	0,083	0,000	0,017
T2	73	8	19	0,073	0,008	0,019
T3	38	38	24	0,038	0,038	0,024
T4	0	71	29	0,000	0,071	0,029

6.5.5. pH

El pH calculado para todos los tratamientos expuestos en la Tabla 8 cumplen con el valor recomendado para un buen funcionamiento del biodigestor, el cual debería estar entre 6,6 y 7,4 (Molina Perez, 2007). Los pH calculados de cada tratamiento se encuentran en la Tabla 11.

Tabla 11. pH de los tratamientos del sustrato

Tratamiento	pH agua	pH Bagazo	pH Levadura	pH rastrojo de maíz	pH mezcla
T1	7,26	6,04	3,97	7,01	7,05
T2	7,26	6,04	3,97	7,01	7,02
T3	7,26	6,04	3,97	7,01	6,90
T4	7,26	6,04	3,97	7,01	6,78

6.6. Proceso de biodigestión anaerobia y registro de parámetros

Una vez preparados los diferentes tratamientos, se procedió a colocarlos dentro del biodigestor instalado para que suceda la DA. De manera diaria se agitó el biodigestor durante cinco minutos (Martí Ortega, 2006) y se tomaron los registros de los cuatro parámetros definidos más adelante. El tiempo de evaluación fue de diez días, momento en el cual la generación de biogás disminuyó considerablemente.

6.6.1. Temperatura

Se insertó un termómetro en la parte lateral del biodigestor tal como se muestra en la Figura 8, mediante el cual se registró la temperatura diariamente.

La temperatura ambiental se obtuvo de los datos hidrometeorológicos de la Estación Von Humboldt ubicada en el distrito de La Molina, Lima, Perú, publicados en el portal del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2018).

6.6.2. Biogás

De manera diaria, con ayuda de la jeringa de 100 mL, se retiraba por la llave de paso ubicada en la parte superior del biodigestor el biogás producido las últimas 24 horas. En algunos casos, se lograba tomar más de una muestra diaria por biodigestor.

6.6.3. CH₄

La muestra de biogás retirada del biodigestor con la jeringa se insertaba al gasómetro y se registraba el volumen de gas atrapado en la probeta, siendo éste el volumen de CH₄.

Tomando como referencia la primera experiencia del ensayo, la medición de CH₄ se ve alterada cuando se produce una baja cantidad de biogás. Así pues, se tomó como estándar cuantificar el CH₄ únicamente cuando la producción de biogás era igual o mayor a 30 mL.

6.6.4. pH

El pH se midió al inicio y al final del ensayo según el método descrito en la Tabla 7.

6.7. Análisis Estadístico

El análisis estadístico se realizó con el programa estadístico “IBM SPSS Statistics Processor 19”.

El Análisis de la Varianza y la comparación de las medias entre los tratamientos se realizaron para los cuatro parámetros analizados de manera diaria durante la digestión anaerobia (Producción de biogás, producción de CH₄, comportamiento de la temperatura y pH). La prueba de ANOVA de un factor y la prueba de Tukey se realizaron teniendo en cuenta que los datos pasen la

prueba de normalidad y homogeneidad implícita en la prueba de ANOVA según el estadístico utilizado (SPSS). Se consideró el intervalo de confianza de 95 % y la significancia del *p valor* cuando es menor a 0,05.

VII. RESULTADOS

7.1. Caracterización de residuos

La cervecería en estudio genera un mínimo de 1000 Kg de bagazo cervecero y 100 L de levadura de manera mensual, dependiendo del consumo de cerveza. Ambos residuos fueron caracterizados siguiendo las metodologías detalladas en la Tabla 7, y se obtuvo como resultado los valores descritos en la Tabla 12.

Tabla 12. Caracterización de residuos

Parámetro	Bagazo	Levadura
Humedad	78 %	68 %
Sólidos Totales (ST)	22 %	32 %
Sólidos Volátiles (SV)	20,74 %	27,32 %
Carbono Orgánico (CO)	11,27 %	14,85 %
Nitrógeno (TKN)	0,83 %	1,34 %
Relación C/N	13,58	11,08
pH	6,04	3,97

En los Anexo 3 y 4 se encuentra el Informe fotográfico y los cálculos detallados de la caracterización de residuos, respectivamente.

7.2. Análisis de resultados

El análisis de resultados se hizo tanto con el programa estadístico SPSS, explicado en el numeral 6.7, como con Microsoft Excel. El análisis estadístico se realizó para comprobar la diferencia con un nivel de significancia del 95 % entre los tratamientos instalados; y, el análisis de datos con Excel se realizó para graficar y evaluar el comportamiento diario y acumulado de los parámetros expresados en numeral 6.6.

Los datos registrados de manera diaria para los cuatro parámetros analizados durante la digestión anaerobia se encuentran en el Anexo 5.

Los resultados detallados del análisis estadístico realizado con el programa SPSS se encuentran en el Anexo 6.

7.2.1. Producción de biogás

Los datos obtenidos para los cuatro tratamientos desde el día uno (D1) hasta el día diez (D10) se evaluaron de la siguiente forma: (i) se aplicó el Análisis de la Varianza (ANOVA) de un factor para todos los datos, luego (ii) se hizo la comparación de las medias con la prueba de Tukey. El *p valor* considerado como significativo fue menor a 0,05. Los resultados obtenidos se detallan en la Figura 14.

En la Figura 14 se puede observar que el Tratamiento uno (T1) y el Tratamiento dos (T2) demostraron cierto grado de similitud a lo largo de todo el ensayo. El T2, además de la similitud con el T1, no demostró diferencia significativa el D1 y el día dos (D2) con el Tratamiento tres (T3). El T3, a pesar de sus similitudes durante los primeros dos días con el T2, tuvo un comportamiento casi único en el resto del ensayo, exceptuando el día 4 (D4) que tuvo similitudes con el Tratamiento cuatro (T4). Por último, el T4, sin considerar la semejanza con el T3 el D4, tuvo un comportamiento único durante el ensayo. Durante los últimos dos días de ensayo, debido a la disminución en la producción

de biogás, se puede observar que los tratamientos tienden a igualarse estadísticamente.

En síntesis, la producción de biogás diaria para el T1 y el T2 demostraron cierta similitud entre ellos durante todo el ensayo, y el T3 y el T4 demostraron tener comportamientos casi únicos.

Las curvas resultantes de la producción diaria de biogás representadas en la Figura 14 demuestran que la presencia de levadura en el sustrato significa un mayor tiempo de vida y mayor rapidez en la producción. El T1 dejó de producir biogás por completo el día nueve (D9), el T2 y el T3 el D10 y el T4 produjo todos los días.

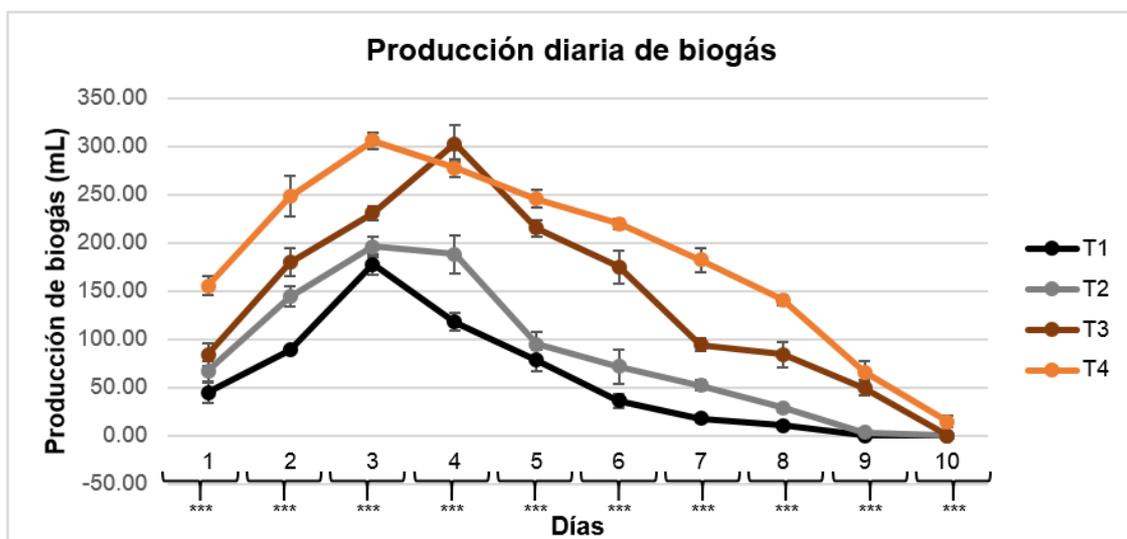


Figura 14: Producción diaria de biogás. Muestra la cinética de la producción del biogás durante los diez días de análisis. La significancia del ANOVA se muestra como: ns, $p > 0,05$; *, $p < 0,05$; **, $p < 0,01$; ***, $p < 0,001$.

Se evaluó la producción de biogás acumulada durante los diez días de ensayo mediante la prueba de ANOVA y se obtuvo un *p* valor menor a 0,05, confirmándose la diferencia de medias a un nivel de significancia del 95 %. La comparación de las medias se realizó con la prueba de Tukey. Los resultados se encuentran graficados en la Figura 15.

La Figura 15 demuestra que existe una diferencia significativa entre todos los tratamientos realizados para la producción de biogás acumulada hasta el final del ensayo el D10. Además, también se demuestra que existe una relación proporcionalmente directa entre la producción de biogás y la presencia de levadura. El T4, siendo el tratamiento con 100 % de levadura, fue el que generó mayor cantidad de biogás diaria y tuvo mayor tiempo de actividad; por el otro lado, el T1, con 100 % de bagazo, fue el tratamiento con menor producción de biogás diaria y menor tiempo de actividad. A pesar del comportamiento similar entre el T1 y el T2 registrado durante todo el ensayo, el T2, el cual contiene una baja cantidad de levadura, tuvo casi 50 % mayor producción de biogás que el T1 al finalizar el ensayo.

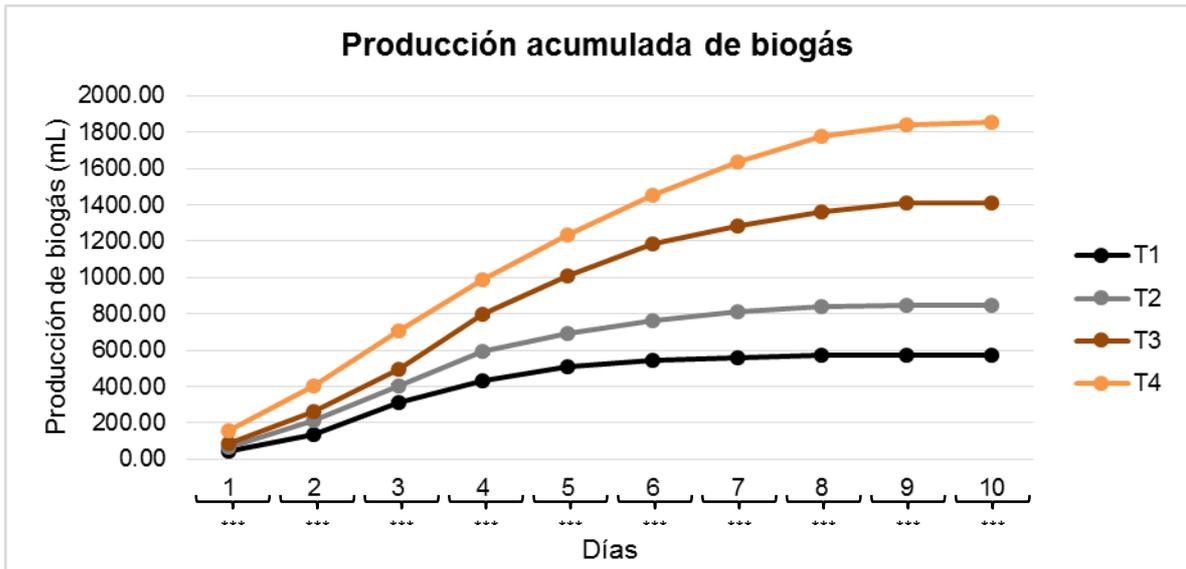


Figura 15: Producción acumulada de biogás. Muestra la cinética de la producción acumulada de biogás durante los diez días de análisis. La significancia del ANOVA se muestra como: ns, $p > 0,05$; *, $p < 0,05$; **, $p < 0,01$; ***, $p < 0,001$.

7.2.1. Producción de CH_4

Se pudo observar en la solución barrera la precipitación del bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$) que se genera por la reacción de la soda cáustica con el CO_2 presente en el biogás, tal como se observa en la Figura 16.



Figura 16: Precipitación en la solución barrera

a. Calidad diaria de biogás (% de CH₄)

Los datos obtenidos para todos los tratamientos desde el D1 al D9 se evaluaron mediante la prueba de ANOVA de un factor. El D10 no obtuvo resultados debido a que no se pudo registrar los datos de calidad de biogás por la baja producción de biogás. El día seis (D6) los tratamientos no manifestaron diferencia significativa entre ellos ya que presentaron un *p valor* mayor a 0,05. El resto de días de ensayo presentan un *p valor* considerado como significativo menor a 0,05 y se confirma la diferencia de las medias. La comparación de las medias se realizó con la prueba de Tukey. Los resultados obtenidos se encuentran graficados en la Figura 17.

En la Figura 17 se observa que el T1 y el T2 y, el T3 y el T4 demuestran cierto grado de similitud a lo largo de todo el ensayo. Además, el T2 demostró tener similitudes con todos los tratamientos a lo largo del ensayo. Por último, se observa que no hay similitud entre el T1 y el T4 en la mayor parte del ensayo.

También, podemos observar en la Figura 17 que la calidad del biogás es inversamente proporcional al contenido de levadura; a mayor cantidad de levadura, menor será la concentración de CH₄. También se expone en la misma figura que el T1 y T2 tiene un comportamiento similar, incrementando el porcentaje de CH₄ hasta el D4 y luego disminuye; y, el T3 y el T4 tienden a mantenerse constante a lo largo del ensayo. Se observa en el D1 y el D2 un alto porcentaje de CH₄ para el T3 y T4.

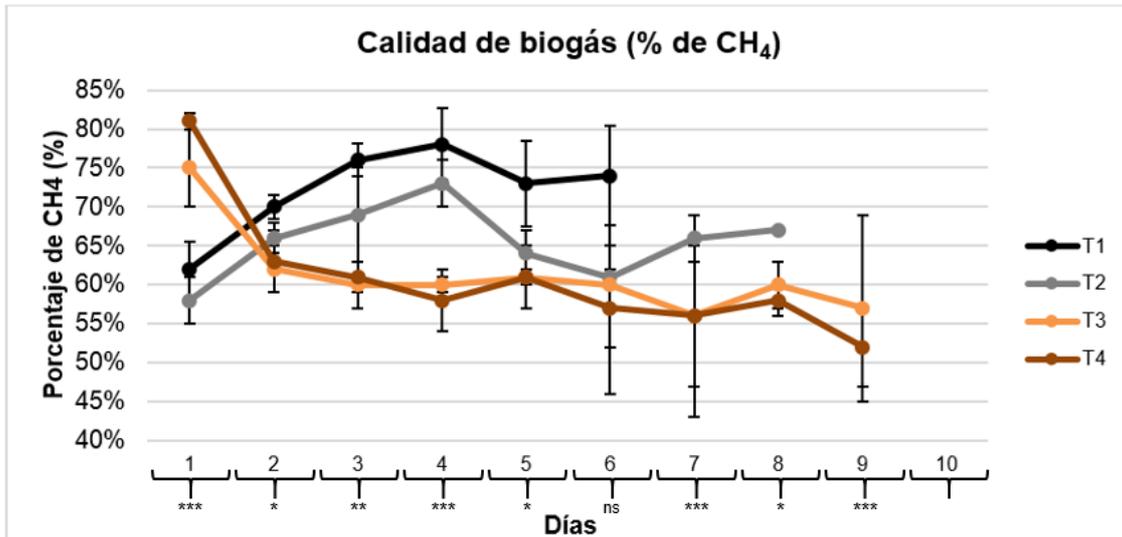


Figura 17: Calidad diaria de biogás (% de CH₄). Muestra la cinética de la calidad de biogás durante los diez días de análisis. La significancia del ANOVA se muestra como: ns, p>0,05; *, p<0,05; **, p<0,01; ***, p<0,001.

a. Volumen de producción de CH₄ (mL)

La producción de CH₄ en unidades volumétricas (mL) se obtuvo multiplicando la calidad del biogás (porcentaje de CH₄) por la producción de biogás durante el ensayo.

Los datos obtenidos para todos los tratamientos desde el D1 al D9 se evaluaron mediante la prueba ANOVA. El D10 no obtuvo resultados debido a que no se registraron datos para la calidad del biogás. Los resultados obtenidos demostraron un *p* valor considerado como significativo menor a 0,05, con lo cual se confirma la diferencia de medias a un nivel de significancia del 95 %. La comparación de las medias se realizó con la prueba de Tukey. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 18.

En la Figura 18 se observa que el T1 y el T2 presentaron cierta similitud a lo largo de todo el ensayo. El T3 tuvo semejanzas con el T2 durante el D2, D3, D4 y D7, y con el T4 el D4, día cinco (D5), D6 y D9. Por último se observa que existe diferencia estadísticamente significativa entre el T1 y el T4 a lo largo de todo el ensayo. Es preciso resaltar que debido a la baja producción de metano no se registraron datos del volumen de producción de CH₄ para todas las repeticiones a partir del día siete (D7) para el T1 y a partir del día ocho (D8) para el T2.

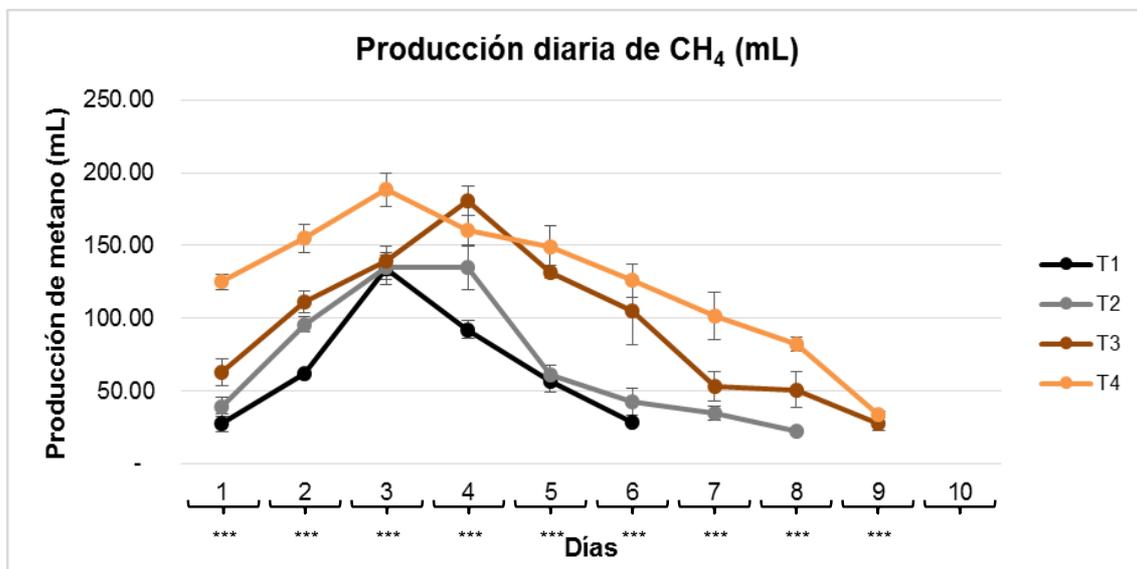


Figura 18: Producción diaria de CH₄ (mL). Muestra la cinética de la producción diaria de CH₄ durante los diez días de análisis. La significancia del ANOVA se muestra como: ns, p>0,05; *, p<0,05; **, p<0,01; ***, p<0,001.

Del mismo modo se evaluó la producción de CH₄ acumulada durante los diez días de ensayo mediante la prueba de ANOVA. Se obtuvo un *p* valor considerado como significativo menor a 0,05, con lo cual se confirma la diferencia de medias a un nivel de significancia del 95 %. La comparación de las medias se realizó con la prueba de Tukey. Los resultados se detallan en la Figura 19.

En la Figura 19 se demuestra que existe una diferencia significativa entre los cuatro tratamientos evaluados para la producción de CH₄ acumulada durante los diez días de ensayo. También, se observa que el volumen de CH₄ generado tiene una relación directamente proporcional con el contenido de levadura del sustrato; a mayor levadura mayor producción de biogás. Así, el T1 fue el tratamiento con menor producción de CH₄ y el T4 con mayor producción de CH₄.

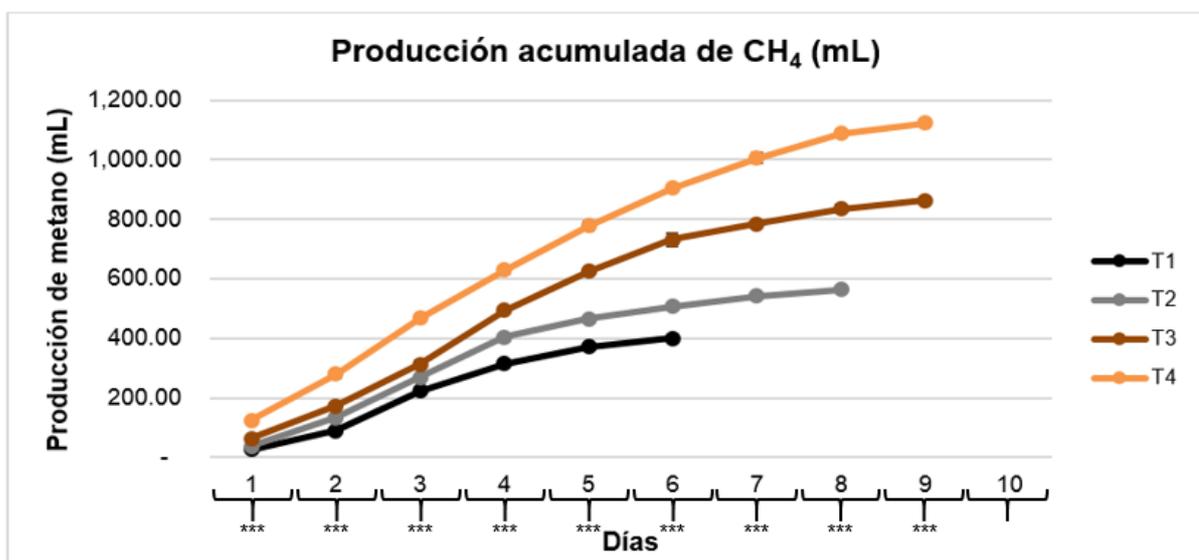


Figura 19: Producción acumulada de CH₄ (mL). Muestra la cinética de la producción acumulada de CH₄ durante los diez días de análisis. La significancia del ANOVA se muestra como: ns, p>0,05; *, p<0,05; **, p<0,01; ***, p<0,001.

7.2.1. Comportamiento de la temperatura

Los datos recopilados del comportamiento de la temperatura para los diferentes tratamientos se evaluaron con la prueba de ANOVA. Los resultados obtenidos para el día dos (D2) y el día cuatro (D4) mostraron un *p* valor considerado como significativo menor a 0,05, con lo cual se confirma la diferencia de medias a un nivel de significancia del 95 %. El resto de los tratamientos manifestaron una diferencia no significativa entre ellos ya que presentaron un *p* valor mayor a 0,05. La comparación de las medias se realizó con la prueba de Tukey. Los resultados obtenidos se demuestran en la Figura 20.

En la Figura 20 se observa que durante el D2 el T4 presenta una diferencia significativa con el T1 y T2; y el D4 el T3 con el T1.

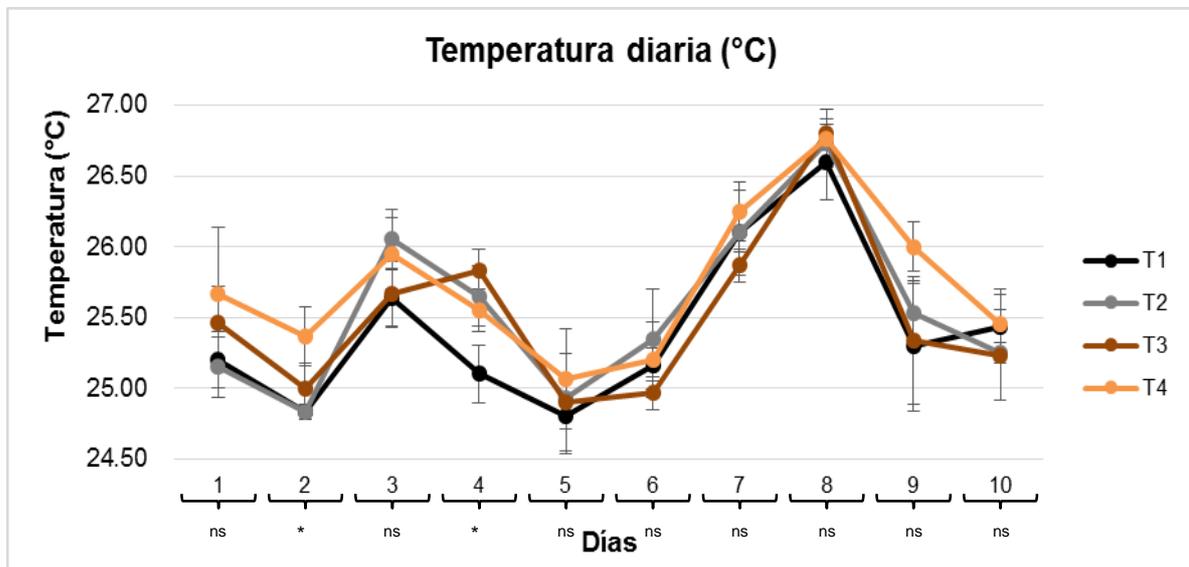


Figura 20: Temperatura diaria (°C). Muestra la cinética del comportamiento de la temperatura durante los diez días de análisis. La significancia del ANOVA se muestra como: ns, $p > 0,05$; *, $p < 0,05$; **, $p < 0,01$; ***, $p < 0,001$.

En la Figura 21 podemos observar que la temperatura dentro de los biodigestores a pesar de ser siempre superior a la temperatura ambiental, se ve condicionada por la misma.

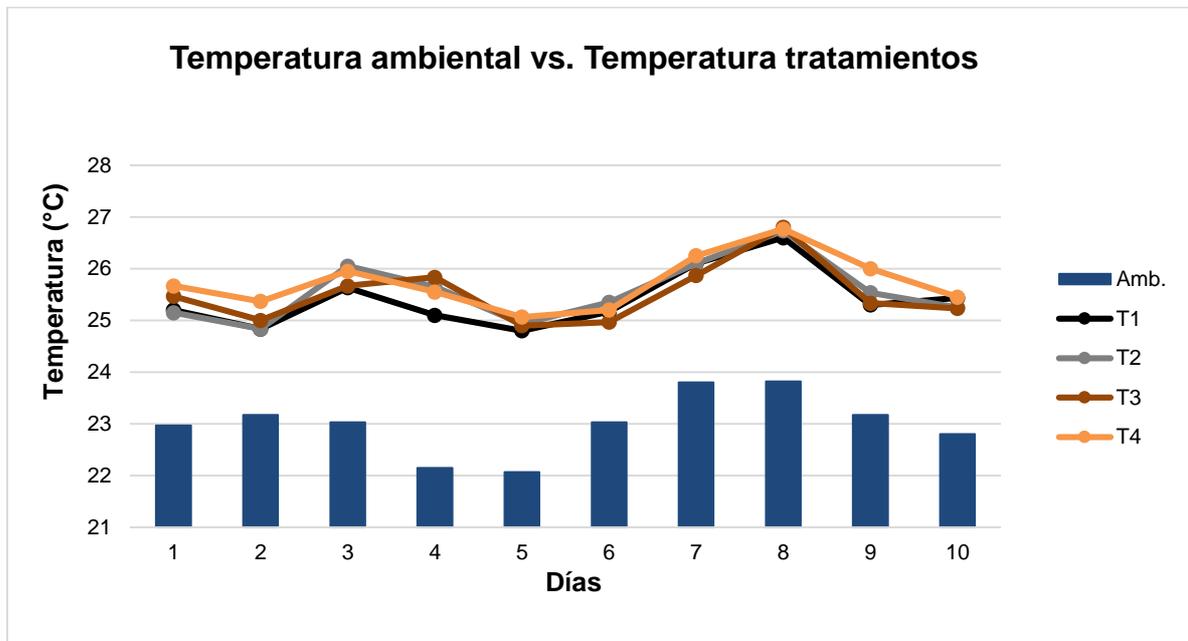


Figura 21: Temperatura ambiental vs. Temperatura tratamientos

7.2.1. pH

Las diferencias estadísticas entre los tratamientos se calcularon a través de la prueba de ANOVA tanto para el pH inicial como para el final. Así, se obtuvo que ambas variables mostraron un *p valor* considerado como significativo menor a 0,05, con lo cual se confirma la diferencia de medias a un nivel de significancia del 95 %. La comparación de las medias se realizó con la prueba de Tukey. Los resultados se observan en la Tabla 13.

En la Tabla 13 se demuestra que en el pH inicial existe una diferencia no significativa entre el T1 y el T2 y, el T3 y T4; y, en el pH final existe una diferencia significativa del T1 con el T2, T3 y T4.

Tabla 13. Comparación de las medias para el pH inicial y el pH final. Los tratamientos figuran en la columna 1: 100 % bagazo (T1), 90 % bagazo + 10 % levadura (T2), 50 % bagazo + 50 % levadura (T3) y 100 % levadura (T4); D representa el día de análisis.

Tratamiento	pH inicial	pH final
T1	6.79 ^b	5.06 ^a
T2	6.71 ^b	5.23 ^b
T3	6.39 ^a	5.33 ^b
T4	6.36 ^a	5.25 ^b

La diferenciación de las medias se muestran con las letras al costado de los valores promedios.

En la Figura 22 se observa que el pH tiende a acidificarse durante el proceso anaerobio.

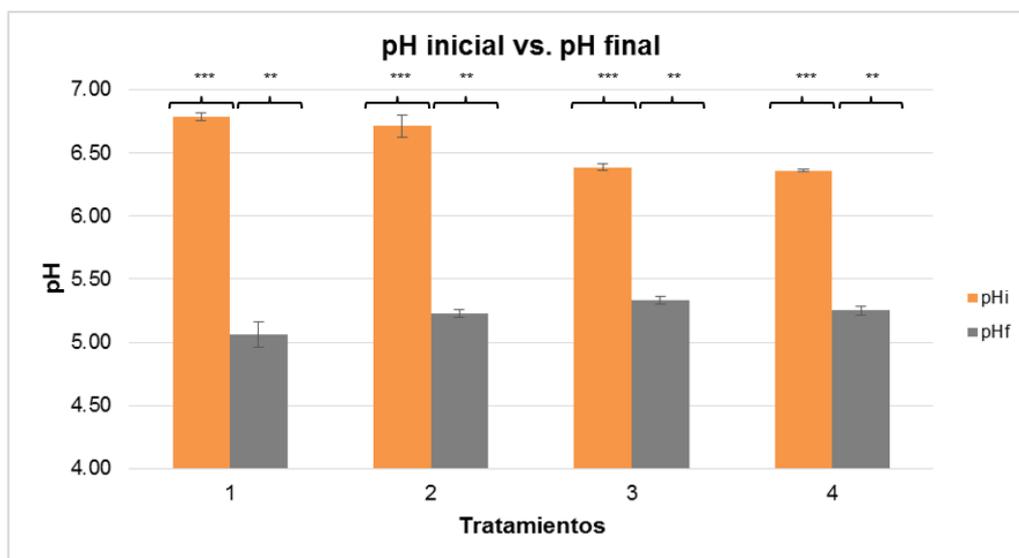


Figura 22: pH inicial vs. pH final. Muestra la evolución de la producción del biogás durante los diez días de análisis. La significancia del ANOVA se muestra como: ns, $p > 0,05$; *, $p < 0,05$; **, $p < 0,01$; ***, $p < 0,001$.

VIII. DISCUSIÓN

En la Figura 15 se observa que existe una relación directamente proporcional entre la producción de biogás y la presencia de levadura en el sustrato, a mayor levadura mayor producción de biogás. Esto coincide con el estudio realizado por Zupančič (2017), en el cual determinó que el uso de la levadura proveniente de la industria cervecera en un proceso de DA incrementa la producción de biogás en 50 %.

Suwannarat (2015) asegura citando el estudio de Yan et al. (2011) que la levadura *S. cerevisiae* proporcionó el ambiente anaerobio idóneo para el desarrollo de las bacterias productoras de hidrógeno. Igualmente, Vitanza et al. (2016) asegura que, a pesar de que el grado de conversión final (biometanización) del cultivo con levadura sola no fue alto, ésta podría ser un sustrato eficiente con propósito de co-digestión ya que su proceso de solubilización (fase de desintegración o hidrólisis) ocurre rápidamente. Este proceso de rápida solubilización lo pudimos presenciar en el presente estudio, tal como se observa en la Figura 14 en la cual la producción de biogás en el D1 es más alta en presencia de levadura.

En el estudio realizado por Mukhin y Voronin (2008) citado por Lenhart (2012) se identificó una formación de CH₄ en la descomposición de madera causada por hongos en los bosques boreales. Estos autores consideraron la

formación de CH₄ como resultado de una asociación simbiótica de hongos que descomponen la madera y microorganismos metanogénicos anaerobios.

Del mismo modo, se utilizan aditivos alimentarios tales como levadura prebiótica en la alimentación de rumiantes para manipular la población microbiana y así la fermentación ruminal. Esto maximiza la eficiencia de la utilización del alimento, y, está comprobado que con una mayor utilización se reduce la producción de CH₄ (Koeleman, 2016).

Tanto el bagazo como el rastrojo de maíz son materiales lignocelulósicos, compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa. Estos compuestos tienen una degradación muy lenta, motivo por el cual suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis (Rodríguez Venandy, 2002). Sin embargo, Košíková (1996) identificó que entre otras levaduras estudiadas, la *S. cerevisiae* tiene la capacidad de utilizar parcialmente la lignina como fuente de carbono. Adicionalmente, Suwannarat & Ritchie (2015) identificaron que la levadura *S. cerevisiae* es capaz de digerir eficientemente, además de los carbohidratos y las proteínas de los residuos, los lípidos y aceites.

Los estudios citados anteriormente señalan ejemplos de co-digestión en los cuáles el hongo no está directamente implicado en la síntesis de CH₄, pero es necesario para su formación. Lo mismo sucede en el presente estudio, pues el rastrojo de maíz beneficia el sustrato al balancear la relación C/N; y, la

levadura beneficia el proceso de fermentación realizado por las bacterias anaerobias al aumentar la disponibilidad de fuentes de carbono y habilitarle el ambiente idóneo para ellas.

Además, es importante mencionar que la co-digestión al aprovechar el sustrato complementario logra minimizar los costos operacionales e incrementar el rendimiento de la producción de CH_4 (Oliveira, Alves, & Costa, 2018). Sin embargo, se debe tomar en cuenta que este proceso es eficaz en sistemas tipo batch pero podría no desarrollarse adecuadamente en un sistema continuo, ya que la levadura o la bacteria podría tomar el cultivo por completo (Suwannarat & Ritchie, 2015). Por éste motivo, sería importante realizar una prueba a escala laboratorio con un biodigestor continuo y aplicarle, de ser necesario, métodos de control de crecimiento a los microorganismos. En caso contrario, al escalar el estudio a la fábrica cervecera, se tendrían que instalar varios biodigestores tipo batch en paralelo para mantener una producción constante.

Por otro lado, la Figura 17 muestra que la calidad del biogás es indirectamente proporcional al contenido de levadura. Así, el T1 tuvo la mayor concentración de CH_4 y el T4 la menor. Esto coincide con el estudio de Suwannarat et al. (2015), quienes concluyeron en su estudio que la levadura fue eficiente descomponiendo los compuestos orgánicos de los residuos alimenticios generando cantidades significativas de CO_2 y etanol durante los primeros días de incubación. Es decir, a mayor cantidad de levadura presente

en el sustrato, menor será el porcentaje de CH₄ en el biogás y mayor será la producción de CO₂ que se retiene en la solución barrera del gasómetro.

Además, en la Figura 17 se puede observar también que durante el D1 los tratamientos 3 y 4 generaron grandes cantidades de CH₄. Sin embargo, éste dato puede deberse a un error durante el ensayo, pues, durante la primera fase de la fermentación, la levadura consume todo el O₂ presente mediante la respiración aerobia, logrando reproducir sus células y convertir los azúcares en CO₂ y agua (Suwannarat & Ritchie, 2015). El estudio realizado por Chiva Tomás (2010) asegura que en óptimas condiciones, *S. cerevisiae* puede duplicar su población cada 90 min. Esta gran producción de CO₂ puede haber superado la capacidad de la solución barrera del gasómetro presentando resultados altos y no reales de la concentración de CH₄. Por éste motivo, se aumentó la dosis de NaOH en la solución barrera de 15 g/L a 20 g/L.

Una vez consumido todo el O₂ del sistema, se llevará a cabo la segunda fase: la fermentación anaeróbica. Ésta fase ocurre más lenta, y la levadura se concentra en convertir los azúcares en alcohol en vez de aumentar su población (Suwannarat & Ritchie, 2015). Como se observa en la Figura 2, tanto el etanol como el CO₂ son compuestos utilizados por las bacterias metanogénicas para culminar el proceso de DA con la producción de CH₄. Como se mencionó anteriormente, es probable que en el presente estudio ambos microorganismos se estén desarrollando en sinergia, en la cual los desechos que genera una

especie se conviertan en nutrientes para otra, además de posibilitar las condiciones ambientales aptas para el desarrollo de otra especie (Corrales, Antolinez Romero, Bohórquez Macías & Corredor Vargas, 2015).

La Figura 19 muestra que la producción de CH₄ tiene el mismo comportamiento que la producción de biogás, es decir, es directamente proporcional a la presencia de levadura, coincidiendo así con Oliveira et al. (2018). Así, el T4 generó la mayor cantidad de CH₄, y el T1 generó la menor cantidad. En el presente estudio se comprueba la propuesta de Vitanza et al. (2016) de utilizar la levadura con un propósito de co-digestión, pues a pesar de que la calidad del biogás es menor según aumente la levadura en el sustrato, la producción de CH₄ es mayor a medida que aumenta la levadura en el sustrato. Así, según los resultados mostrados en la Figura 19, 1 Kg de bagazo balanceado correctamente con rastrojo de maíz produciría aprox. 4,834 mL de CH₄ y, 1 Kg de levadura produciría 15,800 mL de CH₄ en diez días de ensayo.

La Figura 20 demuestra que no existe diferencia significativa en el comportamiento de la temperatura entre los sustratos durante el ensayo, lo mismo que se demuestra en la Figura 20. Por éste motivo, se deduce que la temperatura no tuvo mayor impacto en el presente estudio.

Es importante considerar que durante el ensayo se registró un rango de temperatura de 24.5 a 27 °C la cual cumple con los requerimientos tanto de las

bacterias mesófilas como de la levadura en estudio, la cual es de 18 a 28°C (Anexo 2). Sin embargo, tal como se observa en la Figura 21, la temperatura ambiental influyó la temperatura al interior de los biodigestores durante el ensayo. Por este motivo, se confirma que los biodigestores no estuvieron térmicamente aislados del ambiente y que de bajar la temperatura ambiental, se pudo haber ralentizado o incluso parado el proceso (Chiva Tomás, 2010). Esto se debe a que el TRH está condicionado por la temperatura, a menores temperaturas, mayor será el tiempo en que las bacterias digirán el sustrato, tal como se demuestra en la Tabla 2 (IDAE, 2007). En el caso de las levaduras, la temperatura tanto por encima como por debajo del rango óptimo para la fermentación, podrían ocasionar procesos perjudiciales que serán explicados en el siguiente párrafo. Es decir, se debe mantener el sistema con una temperatura dentro del rango de fermentación óptima considerando las exigencias de todos los microorganismos involucrados. Esto se debe tomar en cuenta ya que el ensayo se realizó durante los meses de verano, meses en los cuales la temperatura suele aumentar sobre la temperatura media anual de Lima de 18 a 19 °C (SENAMHI, 2018).

Según Swan & Watson (1997) citado por Chiva Tomás (2010) se ha establecido que la mayoría de organismos regulan la composición de su membrana en respuesta a cambios en la temperatura ambiental para poder mantener una permeabilidad óptima y una función celular normal. Las levaduras por su lado, reducen la permeabilidad de la membrana a bajas temperaturas

(Chiva Tomás, 2010), afectando la nutrición y aumentando el TRH. Los nutrientes se transportan a las células de levadura a través de la membrana plasmática utilizando mecanismos tales como difusión simple (un mecanismo pasivo), difusión facilitada (catalizada), canales de difusión y transporte activo (dependiente de la energía) (Walker & Stewart, 2016). Por el otro lado, se debe controlar también el aumento de la temperatura ya que las temperaturas sobre el rango óptimo de fermentación de la levadura ejercen el efecto contrario, aumentando la permeabilidad de la célula, lo que podría provocar una entrada incontrolada al interior celular de moléculas inhibitorias (Chiva Tomás, 2010), y una disminución en la biomasa (Suárez Machín et al., 2016) y en el TRH.

Se puede observar también en la Figura 21 que la temperatura promedio al interior de los biodigestores se mantuvo durante todo el ensayo aproximadamente 2,5°C por encima de la temperatura ambiental, pues, las reacciones fermentativas que ocurren en el interior son exotérmicas (Suárez Machín et al., 2016). La fermentación alcohólica también genera calor como subproducto de la glucólisis, lo cual permite acelerar el proceso pero en ciertas circunstancias los reactores requieren de refrigeración para evitar la reducción de la biomasa fúngica (Suwannarat & Ritchie, 2015).

Se puede observar en la Tabla 13 que el pH del T1 y el T2 muestran ser estadísticamente similares siendo de 6,79 y 6,71, respectivamente; y, de igual manera el T3 y el T4, con un pH de 6,39 y 6,36, respectivamente. Por lo tanto,

se demuestra que la presencia de la levadura en el sustrato acidifica el medio. Así, el T4 tuvo el pH inicial más ácido y el T1 el más básico, tal como se observa en la Figura 22, oscilando en un rango entre 6,36 y 6,79, cerca de la neutralidad recomendada (Molina Perez, 2007). En la Tabla 11 podemos observar que, a pesar que los pH calculados para cada sustrato resultaron no ser exactos, si se logró aproximar el valor real con un margen de error muy bajo y acertar con la relación mencionada anteriormente. Esta ligera acidificación entre el pH calculado y el pH real se debe a que la levadura recolectada se almacenó unos días antes de preparar los sustratos e ingresarlos a los biodigestores pues la cervecería en estudio no pudo entregarnos ambos residuos al mismo tiempo ya que éstos son dependientes del cronograma de cocimiento. Durante éste tiempo, a pesar de cumplir con los requisitos de almacenamiento referentes a la temperatura, la levadura pudo haber iniciado un proceso de fermentación.

Al igual que en el estudio de Gamble (2014), la Figura 22 demuestra que en el transcurso del ensayo el pH disminuyó, siendo el T3 el de pH final más alto y el T1 el del pH final más bajo. En éste caso, existe una diferencia estadística considerada no significativa entre los pH finales de los tratamientos 2, 3 y 4, con un pH de 5,23, 5,33 y 5,25, respectivamente.

La disminución en el pH se explica porque las levaduras, entre otros microorganismos, acidifican el medio externo durante los procesos de fermentación (Singler, 2013). Las levaduras fermentativas acidifican su entorno

de crecimiento mediante una combinación de secreción de protones durante el transporte de nutrientes (debido a la acción de la ATPasa), secreción directa de ácidos orgánicos (por ejemplo, succinato y acetato), eliminación de agentes “buffer” y la disolución de CO₂ (Walker & Stewart, 2016). Por lo tanto, la presencia de levadura en el sustrato significa una reducción en el pH del medio durante el proceso.

Sin embargo, el T1 registró un pH muy bajo de 5,06 que no podría explicarse por la presencia de levadura, pues este tratamiento fue una mezcla de bagazo y rastrojo de maíz únicamente. Los bajos valores de pH ocurren debido a la diferencia de velocidad con que las poblaciones bacterianas realizan la acidogénesis y la metanogénesis. En el caso que se acumulen AGV, se producirá la acidificación del reactor (Molina Perez, 2007) y la disminución de bicarbonatos (Pérez & Torres, 2008). Este nivel de acidez del medio, pudo ser el responsable de inactivar las bacterias fermentativas, y por lo tanto de la reducción en la producción de biogás durante los últimos días de experimento, hasta llegar a cero en el día 8 (D8).

Es importante recalcar que si bien algunos autores afirman que la DA es más eficiente a valores de pH cercanos a la neutralidad, Parra Orobio, et al. (2014) citando a Dinamarca et al. (2003) y Angelidaki et al. (2003) afirman que diferentes estudios sobre la influencia del pH indican que no se puede generalizar, debido a ciertos aspectos tales como las características

fisicoquímicas del sustrato que pueden aportar capacidad buffer, y a que cada grupo de microorganismos implicado en la degradación anaerobia tiene un rango de pH óptimo específico.

Así pues, debido que en los tratamientos con presencia de *S. cerevisiae* en el sustrato demuestran un pH final con valores más altos, se deduce que la levadura tuvo un efecto buffer en el proceso fermentativo del bagazo residual de la cervecería en estudio. Según Suwannarat (2015), la *S. cerevisiae* demostró en su estudio la capacidad de descomponer los lípidos, por lo tanto la levadura tuvo la capacidad de degradar los AGV acumulados y aumentar así la capacidad buffer del sistema tal como se demuestra en la Ecuación 10.

A manera general, el sustrato con mayor eficiencia en la producción de CH₄ en el presente ensayo fue el T4; sin embargo, en la cervecería en estudio se genera diez veces más bagazo que levadura, lo que coincide con lo expuesto por Oliveira et al. (2018). Por lo tanto, el sustrato recomendado para escalar en la cervecería es el T2.

IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. Conclusiones

- La caracterización previa de los residuos es importante para poder preparar los sustratos considerando las recomendaciones para una producción óptima de biogás en un biodigestor del tipo batch, tales como la relación C/N y el pH.
- La producción de biogás y CH₄, y el tiempo de vida del ensayo tienen una relación directamente proporcional con la presencia de levadura en el sustrato; a mayor concentración de levadura en el medio, mayor será la producción y el tiempo de vida.
- La levadura tiene un impacto de co-digestión efectiva con el bagazo de cebada y rastrojo de maíz. Pues, la presencia de levadura en el sustrato aumenta la disponibilidad de compuestos digeribles, acondiciona el medio para las bacterias y genera un efecto buffer en el medio reduciendo la probabilidad de acidificación.
- La levadura tuvo un efecto buffer en el proceso fermentativo del bagazo residual de la cervecería en estudio debido a su capacidad de degradar los AGV acumulados.

- La calidad del biogás, o el porcentaje de conversión de CH_4 , es indirectamente proporcional al contenido de levadura en el sustrato; a mayor concentración de levadura, menor será la calidad del biogás.
- El sustrato con mayor eficiencia en la producción de CH_4 en el presente ensayo fue el T4; sin embargo, en la cervecería en estudio se genera diez veces más bagazo que levadura. Por lo tanto, el sustrato recomendado para escalar es el T2.
- Durante el ensayo se registró un rango de temperatura entre 24,5 y 27 °C, la cual cumple con los requerimientos de la levadura y las bacterias presentes en el medio. Es importante mantener el sistema con una temperatura dentro del rango de fermentación óptima considerando las exigencias de todos los microorganismos involucrados.
- En el transcurso del experimento el pH disminuyó porque las levaduras, entre otros microorganismos, acidifican el medio externo durante los procesos de fermentación.

9.2. Recomendaciones

- Realizar un estudio a nivel microbiológico para identificar la producción de CH_4 por las levaduras en un proceso anaerobio y no como co-digestión con bacterias anaerobias.

- Replicar el estudio con un biodigestor continuo para identificar si es necesario aplicar metodologías para controlar la sobrepoblación de alguno de los microorganismos involucrados.
- Replicar el estudio comparando la utilización de un biodigestor continuo con uno del tipo batch para identificar cuál es más eficiente en la producción de CH₄, considerando los factores económicos y de espacio de la empresa. Se debe tomar en cuenta que se requiere la instalación de más de un biodigestor de tipo batch para mantener la continuidad en la producción del biogás.
- Realizar un estudio de factibilidad económica para definir si el proyecto significará un ahorro en el largo plazo.
- Caracterizar el digestato para evaluar su uso como fertilizante y así mejorar el estudio de factibilidad económico mencionado anteriormente.
- Debido a la capacidad de las levaduras para facilitar la digestión anaerobia de residuos lignocelulósicos demostrado en el presente estudio, se recomienda seguir investigando la aplicación de este microorganismo con otros residuos, tanto industriales como municipales.

- Se recomienda utilizar un analizador de gases para cuantificar de manera más precisa los diferentes gases que se generan en el biogás durante la fermentación.

X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ainia. (2005). *Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del Sector Cervecerero*. Madrid, España: Ministerio de Medio Ambiente. Recuperado de <http://www.prtr-es.es/>
- Backus y Johnston S.A.A. (2015). *Memoria de Sostenibilidad 2015*. Lima, Perú. Recuperado de <http://backus.pe/prosperar/reportes-anuales/>
- Batstone, D., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S., Pavlostathis, S., Rozzi, A., ...Vavilin, V.A. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science Technology*, 45(10), 65-73.
- Briceño, A. (8 de Enero de 2018). Los puntos críticos de acumulación de basura en Lima y Callao. *El Comercio*. Recuperado de <https://elcomercio.pe>
- Carroll, K., Hobden, J., Miller, S., Morse, S., Mietzner, T., Detrick, B., ... Sakanari, J. (27) (2016). *Jawetz, Melnick & Adelberg Microbiología Médica*. México D.F, México: McGraw-Hill Education.
- Chamy, R., & Vivanco, E. (2007). *Potencial de biogás: identificación de los distintos tipos de biomasa disponible en Chile para la generación de biogás*. Santiago de Chile, Chile: Proyecto de Energías Renovables No Convencionales en Chile.
- Chillo Abril, J., & Paguay Cuvi, S. (2015). *Implementación de un biodigestor continuo para producción de biogás a partir de estiércol de ganado vacuno en la finca La Poderosa* (Tesis de pregrado). Escuela Super Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. Recuperado de: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4773>

Chiva Tomás R.A. (2010). *Mecanismos moleculares y bioquímicos implicados en la adaptación de Saccharomyces cerevisiae a las bajas temperaturas de fermentación* (Tesis Doctoral). Universidad Rovira Virgili, Tarragona, España. Recuperado de:

<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8694/Tesi.pdf>

COES-SINAC. (2015). *Glosario de abreviaturas y definiciones utilizadas en los procedimientos técnicos del COES-SINAC*. Lima, Perú: COES-SINAC. Recuperado de:

http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/glosario_coes_sinac_20120423.pdf

Corrales, L., Antolinez Romero, D., Bohórquez Macías, J., & Corredor Vargas, A. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *NOVA* 13(23), 55-81.

Coto, J., Maldonado, J., Botero, R., & Mur, J. (2007). Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás en la finca pecuaria integrada de Earth. *Tierra Tropical* 3(2), 129-138.

Cuadros, F., López-Rodríguez, F., Ruiz-Celma, A., Rubiales, F., & González-González, A. (julio de 2009). Proyecto Biogasol. *Producción de biogás a partir de residuos de matadero y su uso combinado con energía solar térmica de concentración*. XIII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyecto, Badajoz, España.

DeAngelis, K. (2007). *Measurement of soil moisture content by gravimetric method*. College of Natural Resources. California: Berkely University.

- EPA. (1978). *Method 351.1: Nitrogen, Kjeldahl, Total (Colorimetric, Automated Phenate) by Autoanalyzer*. USA: Environmental Protection Agency.
- EPA. (2004). *Method 9045D: Soil and Waste pH*. USA: Environmental Protection Agency.
- Eyherabide, M., Saínz Rozas, H., Barbieri, P., & Echeverría, H. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencia del suelo*, 32(1), 13-19.
- Field, J. (1987). Medición de parámetros. En *Arranque y operación de flujos ascendente con manto de lodo (UASB): manual del curso (c1-c59)*. Universidad del Valle, CVC, Universidad Agrícola de Wageningen, Cali, Colombia. Recuperado de:
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd68/000866/000866c.pdf>
- Gamble, K. J. (2014). *Anaerobic digestion from the laboratory to the field: an experimental study into the scalability of anaerobic digestion* (Tesis de pregrado) Appalachian State University, Carolina del Norte, Estados Unidos. Recuperado de:
https://libres.uncg.edu/ir/asu/f/Gamble,%20Kevin_2014_%20Thesis.pdf
- Glosario Ecológico (01 de Junio de 2017). *Glosario Ecológico*. Recuperado el 24 de Abril de 2018, de Glosarios Servidor Alicante:
<https://glosarios.servidor-alicante.com>
- Gonzales, L. (17 de Septiembre de 2015). Cerveceros artesanales peruanos proyectan vender 1 millón de litros en 2015. *Gestión*. Recuperado de

<http://gestion.pe/empresas/cerveceros-artesanales-peruanos-proyectan-vender-1-millon-litros-2015-2143082>

Greenpeace Argentina. (2005). *Recomendaciones para un Tratamiento Ambientalmente Saludable de los Residuos Orgánicos*. Campaña Contra la Contaminación. Recuperado de <https://www.greenpeace.org>

Hilkiah, I. A., Ayotamuno, J., Chibuogwu, E., Ogaji, S., & Probert, S. (2008). Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. *Applied Energy*, 85(6), 430–438.

IDAE. (2007). *Biomasa: Digestores Anaerobios*. Madrid, España: BESEL, S.A.

INEI. (2013). *Estadísticas Temáticas*. Recuperado de: <https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/>

IPCC. (2001). *Tercer informe de Evaluación Cambio Climático 2001: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad*. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/impact-adaptation-vulnerability/impact-spm-ts-sp.pdf>

Koeleman, E. (22 de Sept. de 2016). Effect of probiotic yeast on methane output. *Dairy global*. Recuperado de <http://www.dairyglobal.net>

Korres, N. E., O’Kiely, P., Benzie, J. A., & West, J. S. (2013). Bioenergy Production by Anaerobic Digestion. *Bioresource Technology*, 247(2), 1015-1026.

Košíková B., S. E. (1996). Growth of *Saccharomyces cerevisiae*, *Rhodotorula rubra* and *Bullera alba* in the presence of beechwood prehydrolyzate-based lignin fractions. *Folia Microbiologica*, 41(5), 430-432.

- Larney, F. J., Ellert, B. H., & Olson, A. (2004). Carbon, ash and organic matter relationships for feedlot manures and composts. *Canadian Journal of Soil Science*, 85(2), 261-264.
- Lenhart K., B. M. (2012). Evidence for methane production by saprotrophic fungi. *Nature Communications*, 3(1046)
- Lynch, K., Steffen, E., & Arendt, E. (2016). Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health. *The Institute of Brewing*, 122(4), 553-568.
- Marroquín, S. (10 de Febrero de 2015). La cultura cervecera en el Perú. *El Comercio*. Recuperado de <http://elcomercio.pe/blog/destilandopisco/2015/02/la-cultura-cervecera-en-el-peru>
- Martí Herrero, J. (2008). *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*. La Paz, Bolivia: GTZ-Energía.
- Martí Ortega, N. (2006). *Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process*. Florida, Estados Unidos: Dissertetion.com.
- Molina Perez, F. (2007). *Comportamiento dinámico de digestores anaerobios* (Tesis doctoral). Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, España.
- Montenegro Aquino, G., Tapia Molina, M., & Cárdenas Murillo, J. (2013). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor con biomasa obtenida del Jacinto de Agua (Eichornia crassipes)*. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

- Montgomery, L. F., & Bochmann, G. (2014). *Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production*. IEA Bioenergy .
- Mussatto, S., Dragone, G., & Roberto, I. (2006). Brewers' Spent Grain: Generation, Characteristics and Potential Applications. *Journal of Cereal Science*, 43(1), 1-14.
- Nizami, A. (2012). Anaerobic Digestion: Processes, Products and Applications. En D. J. Caruana, & A. E. Olsen (Ed.) *Potential of Activated Sludge Utilization* (pp. 133-147). New York, United States: Nova Science.
- OEFA. (2014). *Fiscalización ambiental en residuos sólidos de gestión municipal provincial*. Lima, Perú: OEFA.
- Oliveira, J., Alves, M., & Costa, J. (2018). Biochemical methane potential of brewery by-products. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(2), 435-440.
- OMS. (2014). Country Profiles. En O. Organización Mundial de la Salud, *Global status report on alcohol and health 2014*. Ginebra, Suiza: The Global Information System on Alcohol and Health.
- Paéz-Osuna, F. (1983). *Comparación de tres técnicas para analizar materia orgánica en sedimentos*. Ciudad de México, México: Instituto de Ciencias del Mar y Limnología.
- Parajuli, P. (2011). *Biogas measurement techniques and the associated errors* (Tesis de maestría). University of Jyväskylä, Jyväskylä, Finlandia.
- Parra Orobio, B., Torres Lozada, P., Marmolejo Rebellón, L., Cárdenas Cleves, L., Vásquez Franco, C., Torres López, W., & Ordóñez Andrade, J. (2014).

Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17(2), 553-563.

Pérez, A., & Torres, P. (2008). Indices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables. *Ingeniería y Competitividad*, 10(2), 41-52.

Rodríguez Venandy, C. A. (2002). *Producción del biogás a partir del bagazo cervecero* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.

Rojas, O. (1987). *Relación alcalinidad-ácidos grasos volátiles*. En *Arranque y operación de flujos ascendente con manto de lodo (UASB): manual del curso*. Universidad del Valle, CVC, Universidad Agrícola de Wageningen, Cali, Colombia. Recuperado de:

<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd68/000866/000866c.pdf>

SENAMHI. (17 de Abril de 2018). *Datos Meteorológicos a nivel nacional*. Lima,

Perú: SENAMHI. Recuperado de

[https://www.senamhi.gob.pe/mapas/mapa-](https://www.senamhi.gob.pe/mapas/mapa-estaciones/_dat_esta_tipo.php?estaciones=472AC278)

[estaciones/_dat_esta_tipo.php?estaciones=472AC278](https://www.senamhi.gob.pe/mapas/mapa-estaciones/_dat_esta_tipo.php?estaciones=472AC278)

Serna, E. (25 de 11 de 2009). Waste to Energy Research and Techonology Council (WtERT). *Anaerobic Digestion Process*. Recuperado de <http://www.wtert.eu>

- Singler, K. (2013). Acidification Power (AP) Test and Similar Methods for Assessment and Prediction of Fermentation Activity of Industrial Microorganisms. *Kvasny Prumysl*, 59(7-8) 204-208.
- Soluciones Prácticas. (2009). *Ficha técnica N° 8: Biodigestores*. Lima, Perú: Soluciones Prácticas.
- Soluciones Prácticas. (2009). *Ficha Técnica N°15: Conceptos de la Energía de la Biomasa*. Lima, Perú: Soluciones Prácticas.
- Suárez Machín, C., Garrido Carralero, N., & Guevara Rodríguez, C. (2016). Levadura *Saccharomyces cerevisiae* y la producción de alcohol. *Red de Revistas Científicas de América Latina*, (50), 20-29.
- Suwannarat, J., & Ritchie, R. (2015). Anaerobic Fermentation of Food Waste in Phuket Province using Yeast. *Waste Management*, 42, 61-66.
- Torres Lozada, P., & Pérez, A. (03 de Setiembre de 2010). Actividad metanogénica específica: Una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. *Revista Eidenar*. Recuperado de <http://revistaeidenar.univalle.edu.co/revista/ejemplares/9/b.htm>
- Uzodinma, E. O., & Ofoefule, A. U. (2008). Effect of abattoir cow liquor waste on biogas yield of some agro-industrial wastes. *Scientific Research and Essays*, 3(10) 473-476.
- Varnero Moreno, M. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile, Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

- Vitanza, R., Cortesi, A., Gallo, V., Colussi, I., & De Arana-Sarabia, M. (2016). Biovalorization of Brewery Waste by Applying Anaerobic Digestion. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly Journal*, 30(3), 351–357.
- Walker, G., & Stewart, G. (2016). *Saccharomyces cerevisiae* in the Production of Fermented Beverages. *Beverages*, 2(4), 30.
- Wellinger, A. (1999). *Process design of agricultural digesters*. Elggerstrasse: Nova Energie GmbH.
- Zagal, E., & Sadzawka, A. (2007). *Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos*. Universidad de Concepción Facultad de de Agronomía Chillán, Chillán, Chile.
- Zea, J., Osorio, M., & Bolaños, J. (1997). Uso de rastrojo de maíz como cobertura superficial y sus implicaciones en la economía del nitrógeno en el cultivo de maíz. *Agronomía Mesoamericana*, 8(2), 85-89.
- Zupančič G.D., P. M. (2017). *Biogas Production from Brewer's Yeast Using an Anaerobic Sequencing Batch Reactor*. University of Zagreb. Zagreb: Food Technology and Biotechnology.

XI. GLOSARIO

- 1. Residuos Orgánicos:** Residuos de origen biológico (vegetal o animal), que se descomponen naturalmente, generando gases (dióxido de carbono y metano, entre otros) y lixiviados en los lugares de tratamiento y disposición final. Mediante un tratamiento adecuado, pueden reaprovecharse como mejoradores de suelo y fertilizantes (compost, humus, abono, entre otros) (OEFA, 2014).

- 2. Gases de Efecto Invernadero (GEI):** Son los componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes. Esta propiedad es lo que produce el efecto invernadero. En la atmósfera de la Tierra, los principales gases de efecto invernadero son el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4) y el ozono (O_3). Hay además en la atmósfera una serie de gases de efecto invernadero creados íntegramente por el ser humano, como los halocarbonos y otras sustancias con contenido de cloro y bromo, regulados por el Protocolo de Montreal. Además del CO_2 , el N_2O y el CH_4 , el Protocolo de Kioto establece normas respecto de otros gases de efecto invernadero, a saber, el hexafluoruro de azufre (SF_6), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC) (IPCC, 2001).

3. **Asociación simbiótica:** Asociación de individuos animales o vegetales de diferentes especies, sobre todo si los simbioses sacan provecho de la vida en común (RAE, 2017).
4. **Bacterias anaerobias:** bacterias que no utilizan oxígeno para su crecimiento y metabolismo, sino que obtienen su energía de reacciones de fermentación (Carroll et al. , 2016)
5. **Bagazo:** Residuo fibroso resultante de la trituración, presión o maceración de frutos, semillas, tallos, etc., para extraerle su jugo, especialmente de la vid o la caña de azúcar (RAE, 2017).
6. **Biodigestor batch:** Un biodigestor es un sistema natural o artificial que aprovecha la digestión anaerobia de las bacterias que ya habitan la materia orgánica, para transformar éste en biogás y fertilizante (Nizami, 2012). Los biodigestores del tipo Batch o discontinuo son ideales a nivel laboratorio para la evaluación de los parámetros del proceso o el comportamiento de un residuo orgánico o una mezcla de ellas. Éstos biodigestores son cámaras cerradas que una vez llenados con el sustrato no se puede sacar o introducir más del mismo, es decir que se carga una sola vez y se retira cuando ya se ha finalizado la biodegradación (Soluciones Prácticas, 2009).

7. **Bioenergía:** Energía obtenida a partir de la biomasa (RAE, 2017).

8. **Biometanización o Digestión Anaerobia (DA):** La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico en el cual se transforma la materia orgánica, en ausencia de oxígeno (O_2) y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, en biogás (IDAE, 2007).

9. **Botadero:** Los botaderos son lugares de disposición ilegal de residuos que impactan negativamente y generan focos infecciosos de gran magnitud para la salud de las personas y el ambiente. Poseen residuos de gestión municipal como no municipal. Independientemente de la clase de residuos que contengan, las municipalidades provinciales tienen el deber de clausurarlos de conformidad con lo dispuesto en el Artículo 18° del Reglamento de la Ley General de Residuos Sólidos (OEFA, 2014).

10. **Calentamiento global:** Incremento de la temperatura de la atmósfera terrestre asociado en parte a la emisión de gases de efecto invernadero (RAE, 2017).

11. **Co-digestión:** El término co-digestión se utiliza para expresar la digestión anaerobia conjunta de dos o más sustratos de diferente origen. La ventaja principal radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado.

La co-digestión de residuos orgánicos de diferente origen ha resultado una metodología exitosa tanto en régimen termofílico como mesofílico (Instituto para la Diversificación y ahorro de energía, 2007).

12. Efecto Buffer o Tampón: Elemento amortiguador de un sistema químico ácido-base mediante el cual se regula el grado de pH (Glosario Ecológico, 2017).

13. Empresa Prestadora de Servicio (EPS): Toda persona natural o jurídica a cargo de la prestación de servicios de residuos sólidos. Deberá estar debidamente registrada en el Ministerio de Salud y obtener las licencias municipales correspondientes (OEFA, 2014).

14. Levadura: Hongo unicelular de forma ovoide, que se reproduce por gemación o división, forma cadena y produce enzimas capaces de descomponer diversos cuerpos orgánicos, principalmente los azúcares, en otros más sencillos (RAE, 2017).

15. Metano (CH₄): Hidrocarburo que es un gas de efecto invernadero, producido por la descomposición anaerobia (sin oxígeno) de residuos en vertederos, digestión animal, descomposición de residuos animales, producción y distribución de gas natural y petróleo, producción de carbón, y combustión incompleta de combustibles fósiles. El metano es uno de los

seis gases de efecto invernadero que se intenta reducir en el marco del Protocolo de Kioto (IPCC, 2001).

16. Rastrojo de Maíz: Residuos de las cañas de la mies que queda en la tierra después de segar (RAE, 2017).

17. Recursos Energéticos Renovables (RER): Energía cuyas fuentes se presentan en la naturaleza de modo continuo y prácticamente inagotable, p. Ej. La hidráulica, la solar o la eólica (RAE, 2017).

18. Relleno Sanitario: Infraestructura y/o instalación destinada a la disposición sanitaria y ambientalmente segura de los residuos sólidos. Se ubican en la superficie o bajo tierra, y se basan en los principios y métodos de la ingeniería sanitaria y ambiental (OEFA, 2014).

19. Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN): Conjunto de líneas de transmisión y subestaciones eléctricas conectadas entre sí, así como los respectivos centros de despacho de carga, que permite la transferencia de energía eléctrica entre dos o más sistemas de generación, pertenecientes a los integrantes del Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional (COES-SINAC, 2015).

XII. ANEXOS

Anexo 1. Informe de Ensayo del Laboratorio SGS

- Bagazo

SGS		INFORME DE ENSAYO CO1703143	Página 1 de 1
Análisis solicitado por: INCOT S.A.C. CONTRATISTAS GENERALES CAL RENEE DESCARTES NRO. 320 URB. SANTA RAQUEL (EX CALLE 1 MZB LOT2). ATE - LIMA			
Solicitud de Ensayo:	219312-2	Cantidad Muestras:	1
Producto descrito como:	CEREALES PROCESADOS	Fecha de Recepción:	16/03/2017
Procedencia:	MUESTRA RECIBIDA -	Fecha de Ensayo:	17/03/2017
Observaciones Recep:	EN FRASCO DE PLÁSTICO	Fecha de Emisión:	21/03/2017
Ensayo	Método		
Proteína	COVENIN 1195.1980. Alimentos. Determinación de Nitrógeno Método de Kjeldahl.		
Resultados			
Identificación de la muestra	AFRECHO		
Ensayo			
Nitrógeno (%)	0.83		
 Juan Carlos Balbin Lavado CQP 594 Supervisor Lab Prod Orgánicos			
<small>Este documento es emitido por la Compañía bajo sus Condiciones Generales de Servicio, que pueden encontrarse en la página http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definida en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia, queda prohibida la reproducción parcial, salvo autorización escrita de SGS del Perú S.A.C. Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas.</small>			
Ultima Revisión Julio 2015		SGS del Perú S.A.C. Av. Elmer Faucett 3348 - Callao 1 t (51-1) 517 1900 www.sgs.pe <small>Miembro del Grupo SGS (Société Générale de Surveillance)</small>	

- Levadura

SGS		INFORME DE ENSAYO CO1703144		Página 1 de 1
<p>Análisis solicitado por: INCOT S.A.C. CONTRATISTAS GENERALES CAL RENEE DESCARTES NRO. 320 URB. SANTA RAQUEL (EX CALLE 1 MZB LOT2). ATE - LIMA</p>				
<p>Solicitud de Ensayo: 219312-2</p>		<p>Cantidad Muestras: 1</p>		
<p>Producto descrito como: LEVADURA</p>		<p>Fecha de Recepción: 16/03/2017</p>		
<p>Procedencia: MUESTRA RECIBIDA -</p>		<p>Fecha de Ensayo: 22/03/2017</p>		
<p>Observaciones Recep: EN FRASCO DE PLÁSTICO</p>		<p>Fecha de Emisión: 23/03/2017</p>		
<p>Ensayo Proteína</p>		<p>Método COVENIN 1195:1980. Alimentos. Determinación de Nitrógeno Método de Kjeldahl.</p>		
<p>Resultados</p>				
<p>Identificación de la muestra</p>		LEVADURA		
<p>Ensayo</p>				
<p>Nitrógeno (%)</p>		1.34		
<p><i>CBL</i></p>				
<p>Juan Carlos Balbín Lavado CQP 594 Supervisor Lab Prod Orgánicos</p>				
COD. 310	<p>Este documento es emitido por la Compañía bajo sus Condiciones Generales de Servicio, que pueden encontrarse en la página http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definida en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia, queda prohibida la reproducción parcial, salvo autorización escrita de SGS del Perú S.A.C.</p> <p>Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas.</p> <p>Ultima Revisión Julio 2015</p>			
		<p>SGS del Perú S.A.C. Av. Elmer Faucett 3348 - Callao 1 t (51-1) 517 1900 www.sgs.pe Miembro del Grupo SGS (Société Générale de Surveillance)</p>		

Anexo 2. Ficha Técnica Levadura Safale US-05



Levadura ale americana, que produce cervezas bien balanceadas, con baja concentración de diacetilo y un paladar final limpio, fresco y vivaz. Forma una capa superficial y se caracteriza por permanecer en suspensión durante la fermentación.

INGREDIENTES: Levadura (*Saccharomyces cerevisiae*), agente emulsionante E491

ÉSTERES TOTALES

40

ppm a 18°F y 20°C
en tubos EBC

ALCOHOLES SUPERIORES TOTALES

269

ppm a 18°F y 20°C
en tubos EBC

AZÚCARES RESIDUALES

11 g/l*

* 3g maltotriose/L
corresponde a un atenuación
aparente de 81%

FLOCULACIÓN

+/-

SEDIMENTACIÓN

Medio

FERMENTACIÓN: ideal 18-28°C (64-82°F)

DOSIS: 50 a 80 g/hl en la fermentación primaria

INSTRUCCIONES DE SIEMBRA:

Previamente a la inoculación, se debe rehidratar la levadura seca en un recipiente con agitación hasta formar una crema. El procedimiento consiste en esparcir la levadura seca en un volumen de agua estéril o mosto 10 veces superior a su propio peso, a una temperatura de 25 a 29°C (77°F to 84°F). Una vez que el peso total de la levadura se encuentre reconstituido en forma de crema (esta etapa lleva de 15 a 30 minutos) se mantiene la agitación suave por otros 30 minutos. Posteriormente se siembra la crema obtenida en los fermentadores. Alternativamente, se puede sembrar directamente levadura seca en el fermentador, asegurando que la temperatura del mosto supere los 20 °C (68 °F). Este procedimiento consiste en esparcir la levadura seca en forma progresiva sobre la superficie del mosto, asegurando que la misma cubra toda el área disponible, evitando la formación de grumos. Se deja en reposo por 30 minutos y luego se mezcla el mosto, por ejemplo, utilizando aireación.

ANÁLISIS TÍPICOS:

% peso seco:	94.0 – 96.5
Células viables al envasado:	> 6 x 10 ⁸ /g
Bacterias totales*:	< 5 / ml
Bacterias ácido acéticas*:	< 1 / ml
Lactobacilos*:	< 1 / ml
Pedococcus*:	< 1 / ml
Levaduras salvajes no <i>Saccharomyces</i> *:	< 1 / ml
Microorganismos patógenos:	en acuerdo a la regulación vigente

*Cuando la levadura seca es inoculada a una tasa de 100 g/hl o > 6 x 10⁸ células viables / ml

ALMACENAMIENTO

Durante el transporte: el producto puede ser transportado y almacenado a temperatura ambiente durante 3 meses, sin que sea afectada su performance.
A destino: Conservar en lugar fresco (< 10 °C / 50 °F) y ambiente seco.

VIDA ÚTIL

36 meses luego de la fecha de producción. Ver la fecha máxima recomendada para su impresión en el sachet.
Los sachet abiertos deben ser sellados y almacenados a 4°C (39°F) y utilizados dentro de los 7 días posteriores a su apertura. No utilizar los sachet blandos o dañados.

Se informa que cualquier cambio en el proceso fermentativo puede alterar la calidad final del producto. Por lo tanto, se sugiere realizar ensayos de fermentación antes de utilizar comercialmente nuestra levadura.

TECHNICAL DATA SHEET - SafAle™ US-05 - Rev : NOV2016

The obvious choice for beverage fermentation

Fermentis Division of S.I. Lesaffre - BP 3029 - 137 Rue Gabriel Péri - 59703 Maroquin-Barzeul Cedex - FRANCE - Tel. +33 (0)3 20 81 62 75 - Fax. +33 (0)3 20 81 62 70 - www.fermentis.com

Anexo 3. Informe fotográfico de la caracterización de residuos

a. Humedad y Sólidos Totales (ST)



Figura 23: Muestras de bagazo fresco.



Figura 24: Muestras de bagazo y levadura en la estufa a 105°C.



Figura 25: Muestras de bagazo y levadura después de 24 horas en la estufa.

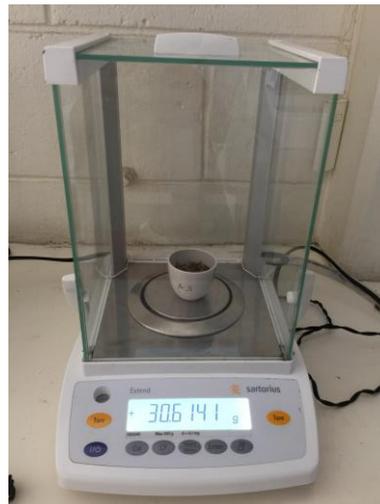


Figura 26: Muestra de bagazo siendo pesada en la balanza analítica.

b. Sólidos Volátiles (SV) o Materia Orgánica (MO)



Figura 27: Muestras de bagazo y levadura en la mufla a 550°C.



Figura 28: Muestras de bagazo y levadura luego de dos horas en la mufla.

Anexo 4. Resultados detallados de la caracterización de residuos

Tabla 14. Resultados detallados de la caracterización de residuos

HUMEDAD (Fracción evaporada)									
	Bagazo					Levadura			
	1	2	3	Promedio		1	2	3	Promedio
Peso crisol:	36,00	36,25	28,37		Peso crisol:	37,66	33,79	31,42	
Peso bagazo fresco (+crisol):	46,08	46,29	38,39		Peso levadura fresca (+crisol):	47,66	43,83	41,46	
	<i>Después de 24 horas a 105°</i>					<i>Después de 24 horas a 105°</i>			
Peso bagazo seco + crisol:	38,24	38,50	30,61		Peso levadura seca + crisol:	40,81	36,95	34,60	
Humedad (%)	77,72	77,52	77,58	77,61	Humedad (%)	68,51	68,50	68,32	68,44
SÓLIDOS TOTALES (Fracción remanente)									
	Bagazo					Levadura			
	1	2	3	Promedio		1	2	3	Promedio
Peso crisol:	36,00	36,25	28,37		Peso crisol:	37,66	33,79	31,42	
Peso bagazo fresco (+crisol):	46,08	46,29	38,39		Peso levadura fresca (+crisol):	47,66	43,83	41,46	
	<i>Después de 24 horas a 105°</i>					<i>Después de 24 horas a 105°</i>			
Peso bagazo seco + crisol:	38,24	38,50	30,61		Peso levadura seca + crisol:	40,81	36,95	34,60	
Sólidos Totales (%)	22,28	22,48	22,42	22,39	Sólidos Totales (%)	31,49	31,62	31,68	31,60
SÓLIDOS VOLÁTILES (Fracción evaporada)									
	Bagazo					Levadura			
	1	2	3	Promedio		1	2	3	Promedio
Peso crisol:	36,00	36,25	28,37		Peso crisol:	37,66	33,79	31,42	
Peso bagazo antes calcinación + crisol:	38,24	38,50	30,61		Peso levadura antes calcinación + crisol:	40,81	36,95	34,60	
	<i>Después de 02 horas a 550°</i>					<i>Después de 02 horas a 550°</i>			
Peso bagazo seco + crisol:	36,14	36,46	28,51		Peso levadura seca + crisol:	38,10	34,15	31,89	

Sólidos Volátiles (%)	20,87	20,39	20,96	20,74	Sólidos Volátiles (%)	27,13	27,90	26,94	27,32
-----------------------	-------	-------	-------	-------	-----------------------	-------	-------	-------	-------

SÓLIDOS FIJOS (Fracción remanente)

	Bagazo				Promedio		Levadura			
	1	2	3	Promedio			1	2	3	Promedio
Peso crisol:	36,00	36,25	28,37			Peso crisol:	37,66	33,79	31,42	
Peso bagazo antes calcinación + crisol:	38,24	38,50	30,61			Peso levadura antes calcinación + crisol:	40,81	36,95	34,60	
	<i>Después de 02 horas a 550°</i>						<i>Después de 02 horas a 550°</i>			
Peso bagazo seco + crisol:	36,14	36,46	28,51			Peso levadura seca + crisol:	38,10	34,15	31,89	
Sólidos Fijos (%)	6,3	9,3	6,5	7,4		Sólidos Fijos (%)	13,9	11,4	15,0	13,43

CARBONO ORGÁNICO (CO%)

	Bagazo				Promedio		Levadura			
	1	2	3	Promedio			1	2	3	Promedio
Materia Orgánica (%SV)	21%	20%	21%	21%		Materia Orgánica (%SV)	27,13%	27,90%	26,94%	27,32%
Factor de Conversión	1,84	1,84	1,84	1,84		Factor de Conversión	1,84	1,84	1,84	1,84
Carbono Orgánico (%)	11,34	11,08	11,39	11,27		Carbono Orgánico (%)	14,74	15,16	14,64	14,85

RELACIÓN C/N

	Bagazo				Promedio		Levadura			
	1	2	3	Promedio			1	2	3	Promedio
Carbono Orgánico (%)	11,34%	11,08%	11,39%	11,27%		Carbono Orgánico (%)	14,74%	15,16%	14,64%	14,85%
Nitrógeno (%)	0,83%	0,83%	0,83%	0,83%		Nitrógeno (%)	1,34%	1,34%	1,34%	1,34%
Relación C/N	13,67	13,35	13,72	13,58		Relación C/N	11,00	11,32	10,93	11,08

Anexo 5. Datos registrados diarios de los parámetros analizados

Tabla 15. Datos registrados diarios: Producción de biogás

Tratamiento	Descripción	Repetición	Registro Diario (mL)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	100 % bagazo	1	45,00	87,00	188,00	108,00	89,00	43,00	22,00	15,00	0,00	0,00
		2	34,00	89,00	178,00	122,00	78,00	36,00	15,00	8,00	0,00	0,00
		3	55,00	90,00	166,00	124,00	67,00	29,00	16,00	9,00	0,00	0,00
	Promedio		44,67	88,67	177,33	118,00	78,00	36,00	17,67	10,67	0,00	0,00
	SD		10,50	1,53	11,02	8,72	11,00	7,00	3,79	3,79	0,00	0,00
2	10 % levadura + 90 % bagazo	1	56,00	132,00	192,00	166,00	89,00	52,00	58,00	33,00	8,00	0,00
		2	67,00	148,00	208,00	194,00	110,00	87,00	47,00	25,00	2,00	0,00
		3	77,00	152,00	188,00	204,00	85,00	75,00	51,00	29,00	0,00	0,00
	Promedio		66,67	144,00	196,00	188,00	94,67	71,33	52,00	29,00	3,33	0,00
	SD		10,50	10,58	10,58	19,70	13,43	17,79	5,57	4,00	4,16	0,00
3	50 % bagazo + 50 % levadura	1	80,00	168,00	239,00	288,00	225,00	179,00	88,00	75,00	45,00	0,00
		2	97,00	196,00	228,00	325,00	208,00	189,00	93,00	78,00	45,00	0,00
		3	75,00	175,00	225,00	296,00	212,00	156,00	101,00	99,00	58,00	0,00
	Promedio		84,00	179,67	230,67	303,00	215,00	174,67	94,00	84,00	49,33	0,00
	SD		11,53	14,57	7,37	19,47	8,89	16,92	6,56	13,08	7,51	0,00
4	100 % levadura	1	146,00	224,00	298,00	286,00	255,00	225,00	189,00	144,00	76,00	15,00
		2	165,00	256,00	315,00	278,00	236,00	214,00	190,00	135,00	67,00	20,00
		3	155,00	264,00	305,00	268,00	246,00	220,00	167,00	143,00	54,00	8,00
	Promedio		155,33	248,00	306,00	277,33	245,67	219,67	182,00	140,67	65,67	14,33
	SD		9,50	21,17	8,54	9,02	9,50	5,51	13,00	4,93	11,06	6,03

Tabla 16. Datos registrados diarios: Calidad de biogás (%CH₄)

Tratamiento	Descripción	Repetición	Registro Diario (%)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	100 % bagazo	1	59%	71%	78%	81%	72%	69%	-	-	-	-
		2	66%	68%	74%	81%	67%	78%	-	-	-	-
		3	63%	70%	75%	73%	78%	-	-	-	-	-
	Promedio	62%	70%	76%	78%	73%	74%	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	
	SD	0.04	0,02	0,02	0,05	0,06	0,06	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	
2	10 % levadura + 90 % bagazo	1	56%	68%	75%	71%	66%	63%	68%	67%	-	-
		2	61%	65%	64%	75%	62%	58%	64%	-	-	-
		3	57%	66%	68%	69%	67%	60%	67%	-	-	-
	Promedio	58%	66%	69%	73%	64%	61%	66%	67%	#N/A	#N/A	
	SD	0.03	0,02	0,06	0,03	0,03	0,04	0,03	0,00	#N/A	#N/A	
3	50 % bagazo + 50 % levadura	1	68%	65%	60%	60%	60%	50%	50%	55%	49%	-
		2	75%	61%	56%	59%	61%	70%	69%	60%	67%	-
		3	83%	60%	65%	60%	63%	60%	51%	65%	54%	-
	Promedio	75%	62%	60%	60%	61%	60%	56%	60%	57%	#N/A	
	SD	0.05	0,03	0,03	0,01	0,01	0,14	0,13	0,03	0,12	#N/A	
4	100 % levadura	1	82%	67%	59%	54%	62%	55%	63%	60%	48%	-
		2	79%	58%	63%	62%	56%	54%	46%	57%	50%	-
		3	81%	63%	63%	58%	64%	63%	59%	58%	58%	-
	Promedio	81%	63%	61%	58%	61%	57%	56%	58%	52%	#N/A	
	SD	0.01	0,04	0,02	0,04	0,04	0,05	0,09	0,02	0,05	#N/A	

Tabla 17. Datos registrados diarios: Volumen de producción de CH₄

Tratamiento	Descripción	Repetición	Registro Diario (mL)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	100 % bagazo	1	26,55	61,77	146,64	87,48	64,08	29,67	-	-	-	-
		2	22,44	60,52	131,72	98,82	52,26	28,08	-	-	-	-
		3	34,65	63,00	124,50	90,52	52,26	-	-	-	-	-
	Promedio		27,88	61,76	134,29	92,27	56,20	28,88	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	SD		6,21	1,24	11,29	5,87	6,82	1,12	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
2	10 % levadura + 90 % bagazo	1	31,36	89,76	144,00	117,86	58,74	32,76	39,44	22,11	-	-
		2	40,87	96,20	133,12	145,50	68,20	50,46	30,08	-	-	-
		3	43,89	100,32	127,84	140,76	56,95	45,00	34,17	-	-	-
	Promedio		38,71	95,43	134,99	134,71	61,30	42,74	34,56	22,11	#N/A	#N/A
	SD		6,54	5,32	8,24	14,78	6,05	9,06	4,69	#N/A	#N/A	#N/A
3	50 % bagazo + 50 % levadura	1	54,40	109,20	143,40	172,80	135,00	89,50	44,00	41,25	22,05	-
		2	72,75	119,56	127,68	191,75	126,88	132,30	64,17	46,80	30,15	-
		3	62,25	105,00	146,57	177,60	133,56	93,60	51,51	64,35	31,32	-
	Promedio		63,13	111,25	139,22	180,72	131,81	105,13	53,23	50,80	27,84	#N/A
	SD		9,21	7,49	10,11	9,85	4,33	23,62	10,19	12,06	5,05	#N/A
4	100 % levadura	1	119,72	150,08	175,82	154,44	158,10	123,75	119,07	86,40	36,48	-
		2	130,35	148,48	198,45	172,36	132,16	115,56	87,40	76,95	33,50	-
		3	125,55	166,32	190,63	155,44	157,44	138,60	98,53	82,94	31,32	-
	Promedio		125,21	154,96	188,30	160,75	149,23	125,97	101,67	82,10	33,77	#N/A
	SD		5,32	9,87	11,49	10,07	14,79	11,68	16,07	4,78	2,59	#N/A

Tabla 18. Datos registrados diarios: Comportamiento de la temperatura

Tratamiento	Descripción	Repetición	Registro Diario (°C)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	100 % bagazo	1	25,00	24,90	25,80	25,10	25,10	25,30	26,10	26,80	25,80	25,70
		2	25,20	24,80	25,70	25,30	24,60	25,10	25,80	26,30	24,90	25,30
		3	25,40	24,80	25,40	24,90	24,70	25,10	26,40	26,70	25,20	25,30
	Promedio		25,20	24,83	25,63	25,10	24,80	25,17	26,10	26,60	25,30	25,43
	SD		0,20	0,06	0,21	0,20	0,26	0,12	0,30	0,26	0,46	0,23
2	10 % levadura + 90 % bagazo	1	25,00	24,90	26,20	25,80	24,90	25,10	26,00	26,80	25,70	25,30
		2	25,30	24,80	25,90	25,50	25,10	25,60	26,20	26,70	25,30	25,20
		3	25,60	24,80	25,90	25,30	24,80	24,90	26,10	26,70	25,60	25,50
	Promedio		25,30	24,83	26,05	25,65	24,93	25,35	26,10	26,73	25,53	25,25
	SD		0,30	0,06	0,21	0,21	0,15	0,35	0,14	0,06	0,21	0,07
3	50 % bagazo + 50 % levadura	1	25,70	25,10	25,80	25,80	25,30	24,90	25,80	26,80	25,30	25,00
		2	25,20	25,10	25,80	26,00	24,70	25,10	25,80	26,90	24,90	25,10
		3	25,50	24,80	25,40	25,70	24,70	24,90	26,00	26,70	25,80	25,60
	Promedio		25,47	25,00	25,67	25,83	24,90	24,97	25,87	26,80	25,33	25,23
	SD		0,25	0,17	0,23	0,15	0,35	0,12	0,12	0,10	0,45	0,32
4	100 % levadura	1	25,50	25,60	26,20	25,70	25,40	25,40	26,30	27,00	26,10	25,30
		2	26,20	25,30	25,70	25,40	25,10	25,00	26,20	26,60	26,10	25,60
		3	25,30	25,20	26,00	25,60	24,70	24,90	25,90	26,70	25,80	25,80
	Promedio		25,67	25,37	25,95	25,55	25,07	25,20	26,25	26,77	26,00	25,45
	SD		0,47	0,21	0,25	0,15	0,35	0,26	0,21	0,21	0,17	0,25

Tabla 19. Datos registrados diarios: pH

Tratamiento	Descripción	Repetición	pHi	pHf
T1	100 % bagazo	1	6,82	4,95
		2	6,76	5,12
		3	6,78	5,12
	Promedio		6,79	5,06
	SD		0,03	0,10
T2	10 % levadura + 90 % bagazo	1	6,62	5,21
		2	6,79	5,26
		3	6,73	5,21
	Promedio		6,71	5,23
	SD		0,09	0,03
T3	50 % bagazo + 50 % levadura	1	6,4	5,30
		2	6,36	5,35
		3	6,4	5,35
	Promedio		6,39	5,33
	SD		0,02	0,03
T4	100 % levadura	1	6,35	5,22
		2	6,36	5,24
		3	6,37	5,29
	Promedio		6,36	5,25
	SD		0,01	0,04

Anexo 6. Resultados análisis estadístico SPSS

Tabla 20. ANOVA por parámetros analizados

Día	Producción diaria de biogás <i>Sig.</i>	Producción de biogás acumulado <i>Sig.</i>	Calidad de biogás (% CH ₄) <i>Sig.</i>	Volumen de producción de metano <i>Sig.</i>	Volumen de producción de metano acumulado <i>Sig.</i>	Comportamiento de la temperatura <i>Sig.</i>
D1	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,369
D2	0,000	0,000	0,035	0,000	0,000	0,005
D3	0,000	0,000	0,004	0,001	0,001	0,147
D4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011
D5	0,000	0,000	0,019	0,000	0,000	0,736
D6	0,000	0,000	0,913	0,000	0,000	0,654
D7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,382
D8	0,000	0,000	0,014	0,000	0,000	0,563
D9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,128
D10	0,001	0,000	-	-	0,000	0,441

Tabla 21. ANOVA de pH inicial y pH final

Parámetro	<i>Sig.</i>
pHi Inter-grupos	0,000
pHf Inter-grupos	0,002

Tabla 22. Comparación de las medias para la producción diaria de biogás. Los tratamientos figuran en la columna 1: 100 % bagazo (T1), 90 % bagazo + 10 % levadura (T2), 50 % bagazo + 50 % levadura (T3) y 100 % levadura (T4); D representa el día de análisis.

Tratamiento	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
T1	44,67 ^a	88,67 ^a	177,33 ^a	118,00 ^a	78,00 ^a	36,00 ^a	17,67 ^a	10,67 ^a	0,00 ^a	0,00 ^a
T2	66,67 ^{ab}	144,00 ^b	196,00 ^a	188,00 ^b	94,67 ^a	71,33 ^b	52,00 ^b	29,00 ^a	3,33 ^a	0,00 ^a
T3	84,00 ^b	179,67 ^b	230,67 ^b	303,00 ^c	215,00 ^b	174,67 ^c	94,00 ^c	84,00 ^b	49,33 ^b	0,00 ^a
T4	155,33 ^c	248,00 ^c	306,00 ^c	277,33 ^c	245,67 ^c	219,67 ^d	182,00 ^d	140,67 ^c	49,33 ^b	14,33 ^b

La diferenciación de las medias se muestran con las letras al costado de los valores promedios.

Tabla 23. Comparación de las medias para la producción de biogás acumulada. Los tratamientos figuran en la columna 1: 100 % bagazo (T1), 90 % bagazo + 10 % levadura (T2), 50 % bagazo + 50 % levadura (T3) y 100 % levadura (T4); D representa el día de análisis.

Tratamiento	D10
T1	571,00 ^a
T2	845,00 ^b
T3	1414,33 ^c
T4	1854,67 ^d

La diferenciación de las medias se muestran con las letras al costado de los valores promedios.

Tabla 24. Comparación de las medias para la calidad diaria de biogás. Los tratamientos figuran en la columna 1: 100 % bagazo (T1), 90 % bagazo + 10 % levadura (T2), 50 % bagazo + 50 % levadura (T3) y 100 % levadura (T4); D representa el día de análisis.

Tratamiento	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
T1	0,58 ^a	0,70 ^b	0,76 ^b	0,78 ^b	0,72 ^b	0,49 ^a	0,00 ^a	0,00 ^a	0,00 ^a
T2	0,63 ^a	0,66 ^{ab}	0,69 ^{ab}	0,72 ^b	0,65 ^{ab}	0,60 ^a	0,66 ^b	0,22 ^{ab}	0,00 ^a
T3	0,75 ^b	0,62 ^a	0,60 ^a	0,60 ^a	0,61 ^a	0,60 ^a	0,57 ^b	0,60 ^b	0,57 ^b
T4	0,80 ^b	0,63 ^{ab}	0,62 ^a	0,58 ^a	0,61 ^a	0,57 ^a	0,56 ^b	0,58 ^b	0,52 ^b

La diferenciación de las medias se muestran con las letras al costado de los valores promedios.

Tabla 25. Comparación de las medias para la producción diaria de CH₄. Los tratamientos figuran en la columna 1: 100 % bagazo (T1), 90 % bagazo + 10 % levadura (T2), 50 % bagazo + 50 % levadura (T3) y 100 % levadura (T4); D representa el día de análisis.

Tratamiento	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
T1	27,88 ^a	61,76 ^a	134,29 ^a	92,27 ^a	56,20 ^a	19,25 ^a	0,00 ^a	0,00 ^a	0,00 ^a
T2	38,71 ^a	95,43 ^b	134,99 ^a	134,71 ^b	61,30 ^a	42,74 ^a	34,56 ^b	7,37 ^a	0,00 ^a
T3	63,13 ^b	111,25 ^b	139,22 ^a	160,75 ^{bc}	131,81 ^b	105,13 ^b	53,23 ^b	50,80 ^b	27,84 ^b
T4	125,21 ^c	154,96 ^c	188,30 ^b	180,72 ^c	149,23 ^b	125,97 ^b	101,67 ^c	82,10 ^c	33,77 ^b

La diferenciación de las medias se muestran con las letras al costado de los valores promedios.

Tabla 26. Comparación de las medias para la producción de CH₄ acumulada. Los tratamientos figuran en la columna 1: 100 % bagazo (T1), 90 % bagazo + 10 % levadura (T2), 50 % bagazo + 50 % levadura (T3) y 100 % levadura (T4); D representa el día de análisis.

Tratamiento	D9
T1	391,65 ^a
T2	549,80 ^b
T3	863,1 ^c
T4	1121,95 ^d

La diferenciación de las medias se muestran con las letras al costado de los valores promedios.

Tabla 27. Comparación de las medias para el comportamiento diario de la temperatura. Los tratamientos figuran en la columna 1: 100 % bagazo (T1), 90 % bagazo + 10 % levadura (T2), 50 % bagazo + 50 % levadura (T3) y 100 % levadura (T4); D representa el día de análisis.

Tratamiento	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
T1	25,20 ^a	24,83 ^a	25,63 ^a	25,10 ^a	24,80 ^a	25,17 ^a	26,10 ^a	26,60 ^a	25,30 ^a	25,43 ^a
T2	25,30 ^a	24,83 ^a	26,00 ^a	25,53 ^{ab}	24,93 ^a	25,20 ^a	26,10 ^a	26,73 ^a	25,53 ^a	25,33 ^a
T3	25,47 ^a	25,00 ^{ab}	25,67 ^a	25,83 ^b	24,90 ^a	24,97 ^a	25,87 ^a	26,80 ^a	25,33 ^a	25,23 ^a
T4	25,67 ^a	25,37 ^b	25,97 ^a	25,57 ^{ab}	25,07 ^a	25,10 ^a	26,13 ^a	26,77 ^a	26,00 ^a	25,57 ^a

La diferenciación de las medias se muestran con las letras al costado de los valores promedios.