

ESTUDIO TÉCNICO DE APROVACHAMIENTO ENERGÉTICO DEL LODO DE AGUAS TRATADAS DE LA CIUDAD DE SALTA CAPITAL

P. Vicente¹, F. Albesa¹, M. Condorí¹.

¹Laboratorio de Termometría e Higrometría – Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO) Universidad Nacional de Salta (UNSa) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Av. Bolivia 5150 – A4408FVY Salta, República Argentina

Tel. 0387-4255325 - e-mail: pmv286@gmail.com

Recibido 25/07/17, aceptado 28/09/17

RESUMEN:

El continuo crecimiento de las poblaciones provoca que las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) generen mayor cantidad de lodos como consecuencia del propio tratamiento. Según datos de una EDAR ubicada al sur de la Ciudad de Salta, la misma genera una cantidad de lodo seco a una tasa del orden de 2.000 Tn/año aproximadamente. El objetivo de este trabajo fue valorizar energéticamente este tipo de residuo y evaluar si el tiempo de secado a la intemperie tiene algún efecto sobre su contenido energético. Se realizaron ensayos con bomba calorimétrica sobre muestras representativas de 5 períodos distintos de tiempo de secado a la intemperie. El mayor valor obtenido de $PCI_{b.h.}$ fue de 4,07 kJ/gr. Valor aceptable para considerar procesos termoquímico de aprovechamiento energético como alternativa económica para darle solución a la problemática ambiental de la disposición final de este tipo de residuos, cuya tasa de generación irá aumentando con el incremento poblacional previsto para la ciudad.

Palabras clave: lodo, procesos termoquímicos, poder calorífico, biomasa residual, planta depuradora de aguas residuales (EDAR).

INTRODUCCION

Junto con el crecimiento demográfico, es cada vez más notorio y preocupante el incremento de residuos y efluentes industriales y municipales. Paralelamente, su tratamiento se ha vuelto obligatorio a través de distintas normas para minimizar o evitar los impactos ambientales que dichos residuos tienen la potencialidad de generar (Giuffrè, 2003). El presente estudio se enfoca en los lodos que se generan en el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Dicho tratamiento consiste en la eliminación, mediante una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos, de la mayor parte de la contaminación, tanto disuelta como en suspensión, presente en dichas aguas. Como consecuencia de la aplicación de tales procesos se obtiene un residuo semisólido denominado lodos, fangos de depuración o biosólidos. Dicho residuo está constituido en más del 60% por materia orgánica, rico en nutrientes como el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el potasio (K). También presenta trazas de metales y pequeñas cantidades de otros productos químicos, así como diferentes microorganismos. Esta generación de lodos en exceso constituye el principal problema al que se enfrentan las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR). Aproximadamente entre el 0.5 y el 2% del agua tratada se transforma en lodos que son necesarios gestionar, con un costo que supera el 50% de los costos de operación de la EDAR (García & Perez, 2010).

Actualmente existe una diversidad de posibles usos o aprovechamientos de estos residuos, tanto energéticos como no energéticos. Respecto a este último caso, son numerosos los estudios sobre tratamientos de la fracción orgánica de los residuos urbanos para, por ejemplo, realizar compostaje, biodegradación edáfica del petróleo, el uso de barros de efluentes de curtiembres tánicas y el de barros

cloacales (lodos, biosólidos), como enmienda orgánica de suelos agrícolas, etc. (Page & Chang, 1994). En este sentido, existen experiencias realizadas en la provincia de Santa Fe donde se utilizaron lodos provenientes de una EDAR post tratamiento anaeróbico y seco, con el objeto de mejorar las condiciones físicas y químicas edáficas, incrementando la producción vegetal (Pilatti, et al., 2011). Por otro lado, existen actualmente diversos procesos que permiten el aprovechamiento energético de los lodos. Estos procesos se pueden dividir en dos grandes grupos: biológicos y termoquímicos. Dentro del primero se encuentra, por ejemplo, la digestión anaeróbica o fermentación; dentro del segundo grupo se puede mencionar la combustión, la pirolisis y la gasificación. Además de posibilitar el aprovechamiento energético, estos procesos presentan una solución al tratamiento y disposición final de los lodos ya que se reduce o se elimina la presencia de organismos patógenos.

En cuanto a la gasificación, este proceso presenta la ventaja que el gas producido puede ser utilizado para diversos fines: producción de energía eléctrica, energía térmica (de manera limpia), o puede ser usado para mejorar el contenido energético de gases combustibles provenientes de otros procesos, como el biogás. Por ejemplo, existe una experiencia en Mannheim, Alemania, donde se instaló una planta piloto de gasificación de lodos y el gas producido se mezcla con biogás proveniente de la fermentación de los mismos lodos. Esta mezcla gaseosa se emplea de dos maneras alternativamente; se inyecta en un motor a gas para producción de energía eléctrica, o se quema para producción de energía térmica. Además de esta planta piloto, es un hecho que en Alemania en general, el tratamiento térmico de lodos está cobrando creciente interés principalmente porque el contenido energético remanente en los lodos secos luego de su fermentación es relativamente alto, entre 7 y 12 kJ/gr, mientras que el gas producido presenta un poder calorífico inferior (PCI) de entre 3 y 5 MJ/m³ (Judex, et al., 2012).

La valorización energética y agronómica de los citados residuos constituye uno de los principales retos científico-técnicos que se le plantean a la comunidad científica para hacer posible el concepto de desarrollo sostenible. En este sentido, el presente trabajo expone los resultados de la determinación de contenido energético sobre muestras de lodos provenientes de una EDAR instalada en el sur de la ciudad de Salta Capital, provincia de Salta, Argentina, con vistas a su aprovechamiento energético mediante procesos termoquímicos. Dicha ciudad se desarrolla a ambas orillas del Río Arenales, el cual la divide en zona norte y zona sur. La Planta Depuradora Sur se encuentra ubicada en un predio de 18,64Ha en la zona sur de la ciudad de Salta, sobre la margen derecha del río Arenales (Figura 1).



Figura 1: Ubicación de la EDAR "Aguas del Norte" en relación a la Ciudad de Salta.

El sistema Sur brinda el servicio al resto de la ciudad y a un sector del Departamento Cerrillos. Se considera una cobertura de servicio del 87% aproximadamente. Es una planta convencional equipada con sistema de desbaste, sedimentación primaria, tratamiento biológico mediante lechos percoladores, sedimentación secundaria o clarificación y desinfección final mediante la adición de gas cloro.

La estabilización de los barros, provenientes de los sedimentadores primarios, se realiza mediante un sistema de digestores anaeróbicos de alta carga, con calefacción de los barros mediante el uso del biogás generado en el proceso. Se trata de un proceso de digestión mesofílica en dos etapas que permiten mineralizar los barros reduciendo la cantidad de materia volátil de los mismos. Para ello se dispone de 4 digestores primarios y 4 secundarios, los cuales funcionan en tándem de a pares. El tratamiento se completa con la deshidratación de los barros digeridos en un sistema consistente en 72 piletones, los cuales suman una superficie total de 12.000 m² (cada uno mide 30 m de largo por 6 m de ancho). En estos se produce la deshidratación de los barros provenientes de los digestores secundarios, generándose barros secos (biosólidos) y un lixiviado que se retorna a cabeza de planta.

Los piletones son llenados de a uno a la vez y cada uno toma un promedio de 10 días en llenarse. De esta manera, y a medida que transcurre el tiempo, los lodos cuentan con distintos tiempo de exposición al a intemperie según del piletón que se considere. Cuando un piletón cumple aproximadamente 6 semanas de haber sido llenado, el lodo es extraído y trasladado a un sitio despejado en el sector nor-oeste de la planta, donde se van conformando montículos de lodo, el cual, en esta instancia presenta un contenido de humedad mínimo. En promedio se generan 2.000 Tn/año de lodo seco, valor que irá aumentando con el incremento poblacional previsto para la ciudad.

METODOLOGÍA

Se tomaron muestras de lodo de la playa de secado con el objetivo de representar los distintos periodos de tiempo de secado del lodo a la intemperie. En total se tomaron muestras representativas de 5 períodos de tiempo distintos: 2 semanas; 5 semanas; 14 semanas; 12 meses y 36 meses (Figura 2).

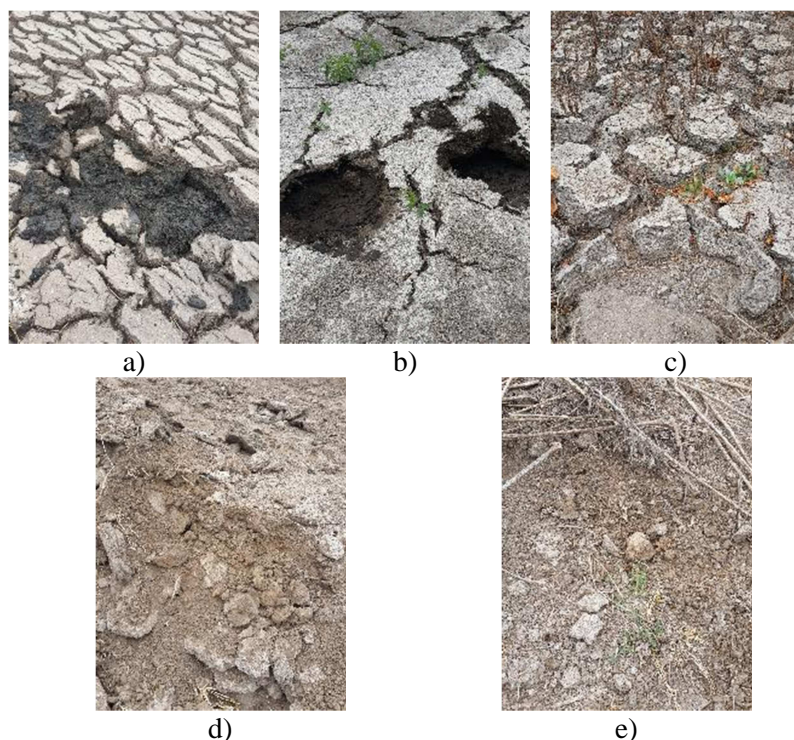


Figura 2: Lodo en piletones con distintos tiempos de secado a la intemperie: a) 2 semanas; b) 5 semanas; c) 14 semanas; d) 12 meses; e) 36 meses.

Para cada caso se realizaron ensayos de laboratorio, por duplicado, para determinar contenido de humedad en base húmeda y poder calorífico superior (PCS). Para la determinación del contenido de humedad las muestras fueron secadas en estufa a 105° durante 24 horas, registrando el peso inicial y final (Figura 3).



Figura 3: Muestra N°1 antes (izq.); y después (der.) del secado.

El PCS se define como la cantidad de calor generado por la combustión completa de una unidad de masa de la muestra, bajo condiciones estándar (25 °C y 760 mm Hg.). Esta magnitud se determina experimentalmente utilizando una bomba calorimétrica, la cual se enfría luego de finalizada la reacción y esto provoca la condensación del vapor de agua. Por lo tanto, el calor liberado en dicha condensación (calor latente de vaporización), se incluye en el cálculo del calor resultante. El vapor de agua proviene de la humedad contenida en la muestra y del agua que se forma durante el proceso de combustión. Para el presente estudio, se utilizó una bomba calorimétrica marca Parr. La bomba calorimétrica propiamente dicha es un recipiente cilíndrico de gruesas paredes de acero resistente a la corrosión. En el interior de este recipiente queda ubicada la muestra, a la que se le da forma de pastilla cilíndrica de aproximadamente 15 mm. de largo y 10 mm. de diámetro mediante el uso de una prensa pastilladora (Figura 4). Además de los elementos mencionados, el equipo de la bomba calorimétrica se completa con: alambre de constantan, unidad de ignición, cronómetro, recipiente para agua, tubo de oxígeno, termómetro, y recipiente adiabático con agitador.

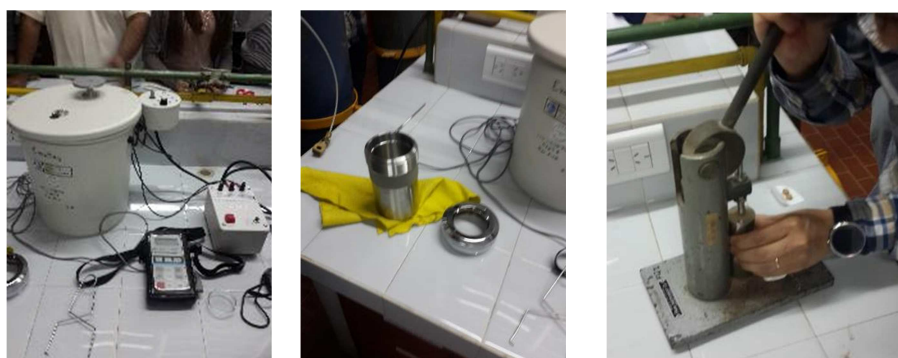


Figura 4: Bomba calorimétrica cerrada (izq.); recipiente de acero interior (centro); prensa pastilladora (der.).

Procedimiento experimental.

Una masa conocida de muestra se coloca en el recipiente de acero y una vez cerrado herméticamente se le inyecta oxígeno a presión (20 a 30 atm) y se sumerge en una cantidad conocida de agua (2 kg). La combustión de la muestra dentro de la bomba se inicia mediante el paso de una pequeña corriente eléctrica a través del alambre conductor fusible de constantan en contacto con la misma (Figura 5). La reacción ocurre rápidamente en una atmósfera de oxígeno y el calor liberado es absorbido por el agua y la bomba calorimétrica, con lo que se produce un aumento de temperatura, cuya variación es precisamente lo que se registra cada 15 segundos mediante un termómetro ubicado en el agua circundante al cilindro de acero.



Figura 5: Pastilla de lodo antes (izq.) y después (der.) de la combustión.

Gracias al diseño especial de la bomba calorimétrica, se puede considerar a ésta, y el agua donde se sumerge, como un sistema aislado, al menos durante el tiempo en el que se realizan las mediciones. Por lo tanto, para las distintas muestras de lodo, se determinó experimentalmente dicho salto térmico (ΔT) del agua, con lo que se procedió a calcular la variación de energía interna (ΔU) por unidad de masa, es decir, el PCS. Para estos cálculos se utiliza la siguiente ecuación:

$$PCS = \frac{(m_{agua} \cdot Ce + Co) \Delta T_{corr.}}{m_{muestra}}$$

Donde:

- PCS = Poder Calorífico Superior por unidad de masa.
- $m_{muestra}$ = Masa de la muestra de lodo (dato conocido).
- m_{agua} = Masa del agua (dato conocido).
- Ce = Calor específico del agua (4.186 kJ/kg · °C).
- Co = Capacidad calorífica de la bomba calorimétrica (se determina experimentalmente).
- $\Delta T_{corr.}$ = Variación de temperatura (se determina experimentalmente y luego se corrige mediante método gráfico).

Para los fines prácticos, considerando un contexto externo al del laboratorio, por ejemplo el de actividades productivas como la agricultura o la silvicultura, el vapor de agua generado durante la combustión de la biomasa residual se escapa al ambiente por lo que esa energía no es aprovechable. En consecuencia, es necesario conocer el poder calorífico inferior (PCI), el cual se diferencia del anterior en que no considera el calor latente de vaporización. Partiendo del PCS, se puede obtener el PCI mediante dos métodos: experimental y matemático. El primero requiere conocer la masa de agua condensada para descontar el calor latente de vaporización correspondiente (597 kcal/kg de vapor de agua condensada). El método matemático, el cual se empleó en el presente trabajo, se vale de la siguiente expresión, que según la norma UNE 164001 permite calcular el PCI en función de la humedad en base húmeda y del PCS en base seca (Manrique, 2015).

$$PCI_{b.h.} = \frac{(PCS_{b.s.} * 1.000 * (1 - W_{b.h.}) - 11,27 * (W_{b.h.} * 100) - 1.322)}{1.000}$$

Donde,

- $PCI_{b.h.}$: Poder Calorífico Inferior en base húmeda.
- $PCS_{b.s.}$: Poder Calorífico Superior en base seca.
- $W_{b.h.}$: Humedad en base húmeda de la muestra, expresado en forma centesimal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la siguiente tabla figuran los parámetros analizados sobre las muestras de lodo: contenido de humedad en base húmeda, poder calorífico superior en base seca ($PCS_{b.s.}$), poder calorífico inferior en

base húmeda ($PCI_{b.h.}$) y contenido de cenizas, todos los cuales son parámetros básicos para evaluar la viabilidad de gasificación (Tabla 1).

Muestra N°	Secado a la intemperie (semanas)	Humedad Base Húmeda (%)	PCS b.s. (kJ/gr.)	PCI b.h. (kJ/gr.)	Cenizas (% peso seco)
1	2	68,16	5,82	-0,24	66,69
2	5	63,16	6,11	0,22	75,01
3	14	36,43	6,53	2,42	56,77
4	48	7,52	5,52	3,70	65,20
5	144	4,24	5,68	4,07	62,65
Promedios		36,64	5,93	N/A	65,26

Tabla 1: Muestras de lodo, contenido de humedad y poder calorífico.

En primer lugar, se puede observar que el valor de $PCS_{b.s.}$ varía muy poco, con una desviación estándar ($\pm 0,4$) que representa solo el 7% del valor promedio. Esto indica que el tiempo de secado a la intemperie no tiene un efecto significativo sobre el contenido energético del lodo.

Por otro lado, se puede observar como el contenido de humedad disminuye con el tiempo de secado a la intemperie, lo que lógicamente produce un aumento del $PCI_{b.h.}$, ambas variables interrelacionadas, hasta un valor máximo de 4,07 kJ/gr. correspondiente a la muestra N°5 con un tiempo de secado de 144 semanas (equivalente a 3 años) (Figura 6).

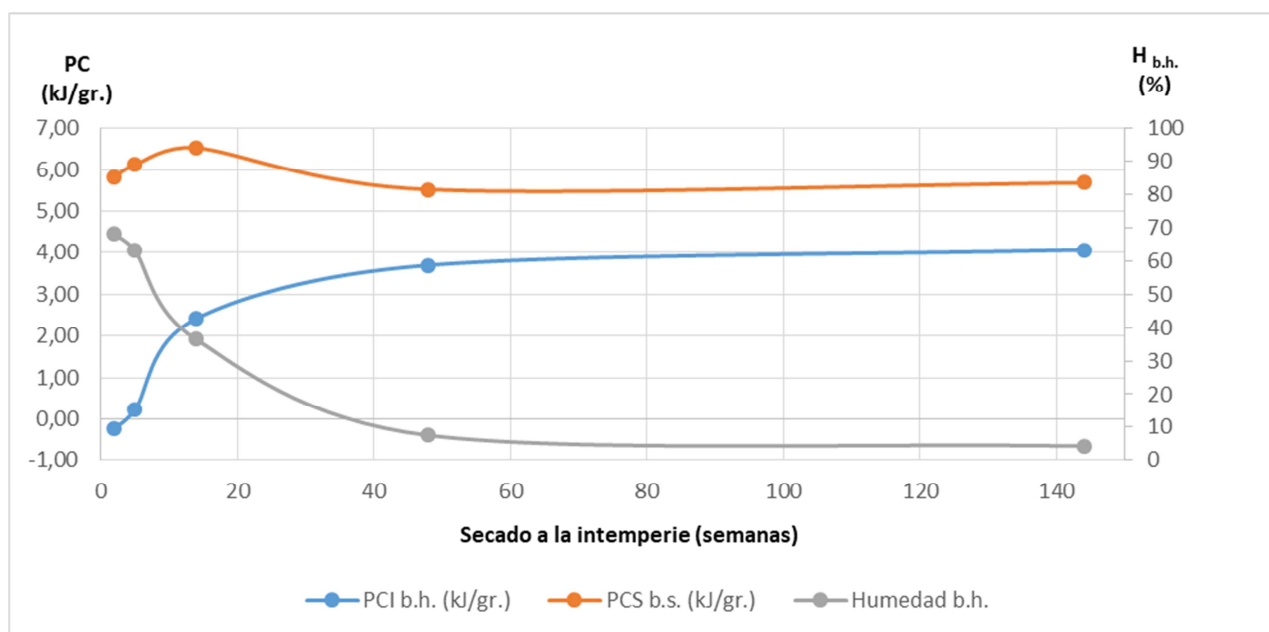


Figura 6: Variación PC en relación al tiempo de secado a la intemperie.

Con el objeto de tener una idea de la magnitud del mencionado valor de poder calorífico (PC), se lo puede comparar con materiales biomásicos tradicionalmente utilizados como fuente de energía como por ejemplo la madera de quebracho colorado (*Schinopsis balansae*) con un $PCI_{b.h.} = 6,55$ kJ/gr., o la madera de Eucalipto (*Eucalyptus grandii*), con un $PCI_{b.h.} = 6,29$ kJ/gr. (en ambos casos considerando un contenido de humedad en base húmeda del 20%). Con esta comparación, el valor de PCI correspondiente a la muestra N°5 puede considerarse relativamente elevado. La contraparte es el prolongado tiempo de secado a la intemperie (3 años) necesario para obtener un lodo con bajo contenido de humedad (4,24 %). Para contrarrestar esta situación se podría optar por recurrir a los lodos con un menor tiempo de secado, de 48 semanas, como el representado por la muestra N°4; opción que iría en detrimento del poder calorífico. En este punto es importante aclarar que los procesos termoquímicos de conversión energética requieren que el contenido de humedad de la

biomasa a utilizar sea menor al 10%. Dicho requisito presenta una limitante a tener en cuenta en el caso de utilizar lodos con menor tiempo de secado los cuales presentan progresivamente un mayor contenido de humedad.

Una segunda alternativa sería acelerar el proceso de secado, reemplazando el método pasivo de secado a la intemperie, por un sistema activo con aprovechamiento de fuentes renovables de energía, como podrían ser la solar y la de biomasa en forma conjunta. Por esta vía no solo se reducirían los tiempos de secado, sino que también se dispondría de un material con un contenido de humedad prácticamente nulo, con el consiguiente aumento del PC aprovechable, incluso cercano al promedio obtenido de PCS_{b,s.}, el cual es de 5,93 kJ/gr (Tabla 1).

CONCLUSIONES

El mayor PCI se presenta en las muestras de lodo con menor contenido de humedad en base húmeda (4,24 %), el cual es de 4,07 kJ/gr. Valor relativamente elevado si se lo compara con materiales biomásicos tradicionalmente utilizados como fuente de energía como por ejemplo la madera de quebracho colorado (*Schinopsis balansae*) con un PCI_{b,h.}= 6,55 kJ/gr., o la madera de Eucalipto (*Eucalyptus grandii*), con un PCI_{b,h.}= 6,29 kJ/gr. (en ambos casos con un contenido de humedad en base húmeda del 20%).

Además de su PC, los lodos analizados pueden considerarse una interesante fuente de energía renovable debido a su alta tasa de generación, que según estimaciones de la EDAR, alcanza valores de 2.000 Tn/año.

Si bien se requieren períodos de tiempo de secado a la intemperie demasiado prolongados (3 años aproximadamente), para obtener lodos con un mínimo contenido de humedad, existe la posibilidad de realizar un proceso activo de secado mediante fuentes renovables de energía. Un ejemplo de esto sería la implementación de forma complementaria de energía solar y de biomasa. De esta forma, no solo se reducirían los tiempos de secado, sino que también se dispondría de un material biomásico con un contenido de humedad prácticamente nulo, con el consiguiente aumento del PC aprovechable, incluso cercano al promedio obtenido de PCS_{b,s.}, el cual es de 5,93 kJ/gr (Tabla 1).

Los procesos termoquímicos de aprovechamiento energético se presentan como una alternativa económica y ambientalmente sustentable para dar solución a la problemática del tratamiento y disposición final de lodos provenientes de las EDAR.

REFERENCIAS

- Asadullah, M., 2014. Biomass gasification gas cleaning for downstream applications: A comparative critical review.. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, Volumen 40, pp. 118-132.
- García, K. & Perez, M., 2010. Codigestion de estiércol vacuno y lodos de depuradora: influencia de las condiciones de temperatura.. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Volumen 14, pp. 111-115.
- Giuffrè, L., 2003. *Impacto ambiental en agrosistemas.* 2da ed. Buenos Aires: Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires.
- Hilbert, J. A., 2013. *Manual para la producción de biogas.* Buenos Aires: INTA Castelar.
- Jayaraman, K. & Gökalp, I., 2015. Pyrolysis, combustion and gasification characteristics of miscanthus and sewage sludge. *Energy Conversion and Management*, Volumen 89, pp. 83-91.

Judex, J. W., Gaiffi, M. & Burgbacher, H. C., 2012. Gasification of dried sewage sludge: Status of demonstration and pilot plant.. *Waste Management*, 32(4), pp. 719-723.

Manrique, S. M., 2015. *Biomasa con fines energéticos*. 1ra ed. Buenos Aires: edUTecNe.

Page, A. L. & Chang, A. C., 1994. Overview of the past 25 years: technical perspective.. En: *Sewage Sludge: Land Utilization and the Environment*.. Madison: American Society of Agronomy.

Panepinto, D., Fiore, S., Genon, G. & Acri, M., 2016. Thermal valorization of sewer sludge: Perspectives for large wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, Volumen 137, pp. 1323-1329.

Pérez, J. F., Melgar, A. & Benjumea, P. N., 2012. Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study. *Fuel*, pp. 487-496.

Pilatti, M. A., Alesso, A., Gasparotti, E. & Felli, o., 2011. Uso de lodos de depuradora sobre suelos de baja productividad en Santa Fe.. *Cátedra de Edafología, Dpto. Ciencias del Ambiente, Fac. de Ciencias Agrarias - Universidad Nacional del Litoral*, p. 14.

Speidel, M., Kraaij, G. & Wörner, A., 2015. A new process concept for highly efficient conversion of sewage sludge by combined fermentation and gasification and power generation in a hybrid system consisting of a SOFC and a gas turbine. *Energy Conversion and Management*, Issue 98, p. 259-267.

Wang, Q. y otros, 2017. Technologies for reducing sludge production in wastewater treatment plants: State of the art. *Science of the Total Environment*, Volumen 587-588, pp. 510-521.

ABSTRACT

The continuous growth of populations causes wastewater treatment plants (WWTP) to generate more sludge as a result of the treatment itself. According to data from a WWTP located south of the City of Salta, a dried sludge generation of 20,000 Tn/year is estimated. Its energy use represents an economic alternative to address the environmental problematic of its final disposal. The objective of this work was to determine the energy content and to evaluate the effect of the drying time spent at an outdoor installation on samples of sludge. Duplicate tests were performed with calorimetric bomb on representative samples of 5 different periods of drying time. An average $PCI_{b,h} = 4.12 \text{ kJ / gr.}$ was obtained, which is an acceptable enough value as to consider thermochemical processes of energy utilization, although its moisture content would have to be reduced.

Keywords: Sludge, thermochemical processes, heating power, residual biomass, wastewater treatment plants (WWTP).