

# Desarrollo y Aplicación de Indicadores de Sustentabilidad en el Tratamiento Pirolítco de Residuos Sólidos Urbanos

Holote, Cesar Christian<sup>\*(1)</sup>, Tavella, Marcelo<sup>(2)</sup>, Lambert, Jean-Marie<sup>(3)</sup>,  
Cova, Walter J.D<sup>(1)</sup>

(1) Grupo Proyectos y Servicios  
Facultad Regional La Rioja, Universidad Tecnológica Nacional.  
San Nicolás de Bari (O) 1100. La Rioja – Argentina.  
\*e-mail: christianholote@hotmail.com

(2) Centro de Investigación y Transferencia en Estrategias para el Desarrollo  
Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional.  
Maestro M. Lopez esq. Cruz Roja Argentina – Córdoba – Argentina

(3) Pontificia Universidade Católica de Goiás  
Avenida Engler, s/n - Jardim Mareliza – Goiás – R.F. Brasil

## RESUMEN

La generación de residuos es una consecuencia entrópica inevitable en la convivencia de grupos humanos. En núcleos urbanos la recolección, concentración y disposición final de las fracciones sólida y líquida de tales residuos plantea problemas tanto sociales como de sanidad y conservación ambiental, que deben ser atendidos con recursos económicos normalmente escasos.

En este trabajo se analiza el problema de control asociado a la gestión integral de residuos sólidos urbanos (RSU), en su triple vertiente social/institucional, económica y ambiental, poniendo en primer plano a la sustentabilidad, con el objeto de alcanzar una gestión económicamente equilibrada, protegiendo el ecosistema y mejorando simultáneamente la calidad de vida de los habitantes de la ciudad.

Tomando como punto de partida la implementación del tratamiento pirolítco de los RSU, se propone un conjunto de indicadores para ser utilizados como herramientas en el proceso de toma de decisiones relacionadas con la recolección, transporte y disposición final de RSU en la ciudad La Rioja. Se ha intentado alcanzar la formulación de un conjunto reducido de indicadores de alta expresividad con relación a los objetivos perseguidos por la política municipal en la materia.

La metodología adoptada ha sido la de realizar un análisis de caso y a partir de este, proponer una serie de indicadores básicos, específicos y transversales que permitan alcanzar resultados significativos para el control de gestión.

**Palabras Claves:** GIRSU, Indicadores.

## ABSTRACT

Waste generation is an inevitable entropic consequence of human coexistence. In urban areas the collection, concentration and disposal of solid and liquid fractions of such waste poses both social and environmental health and conservation problems that must be addressed with typically low budget.

In this paper the problem of control associated with the management of municipal solid waste (MSW) is analyzed in its social/institutional, economic and environmental aspects, putting the spotlight on sustainability, with the aim of achieving a balanced economic management, protecting the ecosystem and simultaneously improving the quality of life of city dwellers.

Taking as starting point the implementation of the pyrolytic treatment of MSW, a set of performance indicators to be used as tools in the process of decision making related to the collection, transportation and disposal of MSW in the city La Rioja is proposed, attempting to reach the formulation of a limited number of high-expressiveness indicators related to the objectives of the municipal policy in the field.

The methodology used has been to conduct a case study and from this, to propose a set of basic, specific and transversal indicators to achieve meaningful results for management control.

**Palabras Claves:** Municipal solid waste, performance indicators.

## 1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a la legislación vigente en nuestro País (Ley 25916/04), la gestión de los residuos sólidos generados en los conglomerados urbanos, es responsabilidad de las respectivas administraciones municipales. El manejo que se haga de los residuos posee inmediatas consecuencias y connotaciones sociales (salud pública, desarrollo humano), ambientales y económicas. En el presente trabajo se propone la aplicación del tratamiento pirolítico para la disposición final de la basura, y se analizan los resultados alcanzables mediante esta técnica.

La exposición se ha organizado de la manera siguiente: partiendo de la caracterización cuantitativa y cualitativa de los RSU que se lleva a cabo en la Sección 2, se analizan comparativamente en la Sección 3 diversos métodos de disposición final, destacándose las ventajas del procedimiento de pirolisis y su implementación en el caso en estudio (Municipalidad del Departamento Capital de La Rioja). La Sección 4 está dedicada al análisis y formulación de indicadores de gestión de RSU y su aplicación, haciendo especial hincapié en los conceptos de ecosustentabilidad y desarrollo social, mientras que la Sección 5 exponen algunas conclusiones alcanzadas.

## 2. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

### 2.1 Aspectos cuantitativos globales para América del Sur

La cantidad y calidad de residuos producidos por los conglomerados sociales humanos depende fundamentalmente de la cantidad y densidad de población, la cultura de consumo dominante y el nivel económico medio de sus integrantes. Así, en América del Sur, estudios conducidos por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) [1] han podido comprobar que en las áreas metropolitanas y ciudades de más de 2 millones de habitantes, sobre una muestra de 16 ciudades, el promedio de generación de RSU es de 0,97 kg/hab/día; en otras 16 ciudades grandes de 500.000 a 2 millones de habitantes ese promedio llega a 0,74; y en una muestra de 24 ciudades intermedias y pequeñas de menos de 500.000 habitantes el promedio es de 0,55 kg/hab/día. Por otra parte, a medida que crece la capacidad de consumo de la población, se incrementa la producción de RSU: según la Agencia de Cooperación Internacional de Japón, los índices de generación eran en 2006, en países de bajos ingresos 0,4 - 0,6 kg/hab/día; en países de ingresos medios 0,5 - 0,9 kg/hab/día y en países de altos ingresos 0,7 - 1,8 kg/hab/día, registrándose un incremento anual de la generación de residuos de 1 a 3% ligado al aumento del ingreso per cápita. Según datos demográficos del Banco Mundial [2], la población de América del Sur a finales de 2014, era –en números redondos– poco más de 400.000.000 de habitantes, y teniendo en cuenta la gran preponderancia de las áreas metropolitanas, si se toma como valor de referencia la generación promedio estimada de 0,92 kg/hab/día, se puede inferir que la población de esta región está produciendo algo más de 368.000 toneladas diarias de RSU. Al respecto véanse también [3] y [4].

### 2.2 Aspectos cualitativos en América del Sur

Una característica que hacen diferentes a los RSU de América del Sur en relación a los de los países desarrollados, es el mayor contenido de humedad que varía de 35 a 55% y el mayor peso específico que alcanza valores de 125 a 250 kg/m<sup>3</sup> cuando se mide en origen. Se observan valores de 375 a 550 kg/m<sup>3</sup> sobre camión compactador y de 700 a 1.000 kg/m<sup>3</sup> cuando se compacta en los rellenos sanitarios [5]. De acuerdo a estimaciones de la OPS [6] el contenido de materia orgánica biodegradable de los RSU en América Latina y el Caribe supera ligeramente el 50%, con un 15 a 25% de contenido correspondiente a papel y cartón.

Por lo que respecta a su origen, la mayor proporción (hasta 70%) de los RSU proviene de la generación domiciliar o residencial, originándose el resto en comercios, instituciones y pequeñas industrias radicadas en área urbana.

### 2.3 Los RSU en Argentina

Las cantidades de residuos sólidos generadas y recolectadas son de una importancia crítica para determinar el cumplimiento de los programas de gestión de residuos; para seleccionar equipamiento específico y para el diseño de los recorridos de recolección, instalaciones de clasificación y centros de disposición final. La Tabla 1 presenta la generación de RSU por provincia, tomando como base las estimaciones 2005 de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable perteneciente al Ministerio de Salud y Ambiente [7].

Tabla 1. Argentina, generación de RSU por provincia.  
Fuente: ENGIRSU 2005 – INDEC 2001 y proyecciones.

PROVINCIA	GPC Kg/hab/día	2005			2010			2015		
		Población	GEN Día	GEN Año	Población	GEN Día	GEN Año	Población	GEN Día	GEN Año
		Hab	Tn/Día	Tn/Año	Hab	Tn/Día	Tn/Año	Hab	Tn/Día	Tn/Año
Total País	0.85	38,592,150	34,394.92	12,554,146.54	40,518,951	36,036.39	13,153,282.19	42,403,087	37,631.06	13,735,337.97
Ciudad de Bs As	1.23	3,018,102	3,712.27	1,354,976.89	3,058,309	3,761.72	1,373,027.83	3,090,922	3,801.83	1,387,669.43
Bueno Aires	0.83	14,654,379	12,163.13	4,439,544.12	15,315,842	12,712.15	4,639,934.33	15,940,645	13,230.74	4,829,218.40
Catamarca	0.69	365,323	252.07	92,006.60	404,240	278.93	101,807.84	444,824	306.95	112,028.92
Córdoba	1.05	3,254,279	3,416.99	1,247,202.43	3,396,685	3,566.52	1,301,779.53	3,531,817	3,708.41	1,353,568.87
Corrientes	0.87	980,813	853.31	311,457.17	1,085,712	901.07	328,890.35	1,091,889	949.94	346,729.35
Chaco	0.61	1,024,934	625.21	228,201.56	1,071,141	653.40	238,489.54	1,119,667	683.00	249,295.86
Chubut	0.95	445,458	423.19	154,452.56	470,733	447.20	163,226.67	494,904	470.16	171,607.96
Entre Ríos	0.60	1,217,212	730.33	266,569.43	1,282,014	769.21	280,792.07	1,345,355	807.21	294,632.75
Formosa	0.65	517,506	336.38	122,778.30	55,694	361.20	131,838.40	597,418	388.32	141,737.42
Jujuy	0.71	652,577	463.33	169,115.33	698,474	495.92	181,009.54	744,560	528.64	192,952.72
La Pampa	0.98	321,653	315.22	115,055.28	341,456	334.63	122,138.81	360,694	353.48	129,020.24
La Rioja	0.77	320,602	246.86	90,105.19	355,350	273.62	99,871.12	391,614	301.54	110,063.11
Mendoza	1.15	1,675,309	1,926.61	703,210.95	1,765,685	2,030.54	741,146.28	1,852,017	2,129.82	777,384.14
Misiones	0.44	1,029,645	453.04	165,360.99	1,111,443	489.03	178,497.75	1,197,823	527.04	192,370.37
Neuquén	0.92	521,439	479.72	175,099.22	565,242	520.02	189,808.26	608,090	559.44	204,196.62
Río Negro	0.86	587,430	505.19	184,394.28	603,761	519.23	189,520.58	617,216	530.81	193,744.10
Salta	0.76	1,161,484	882.73	322,195.66	1,267,311	963.16	351,552.07	1,379,229	1,048.21	382,598.12
San Juan	0.96	666,446	639.79	233,522.68	715,052	686.45	250,554.22	762,857	732.34	267,305.09
San Luis	1.12	409,280	458.39	167,313.66	456,767	511.58	186,726.35	505,730	56.42	206,742.42
San Cruz	0.82	213,845	175.35	64,003.81	234,087	191.95	70,062.24	254,629	208.80	76,210.46
Santa Fe	1.11	3,177,557	3,527.09	1,287,387.22	3,285,170	3,646.54	1,330,986.63	3,386,133	3,758.61	1,371,891.78
Sgo del Estero	0.83	839,767	697.01	254,407.41	883,573	733.37	267,678.44	930,535	772.34	281,905.58
Tierra del Fuego	0.64	115,286	73.78	26,930.81	133,694	85.56	31,230.92	152,979	97.91	35,735.89
Tucumán	0.73	1,421,824	1,037.93	378,845.00	1,511,516	1,103.41	402,743.44	1,601,540	1,169.12	426,730.33

Por lo que hace a su contenido, se calcula que en promedio en Argentina (a nivel 2011) la composición de los residuos está dada de la siguiente manera: la participación de residuos orgánicos cubre el 51% del total de generación, y se pudo identificar un 5% de residuos de poda, como asimismo un 4% de residuos áridos. En conjunto, los materiales plásticos, papel, vidrio y metales alcanzan un 28% del total. Se observa finalmente en la composición un 13% de materiales varios, Figura 3.

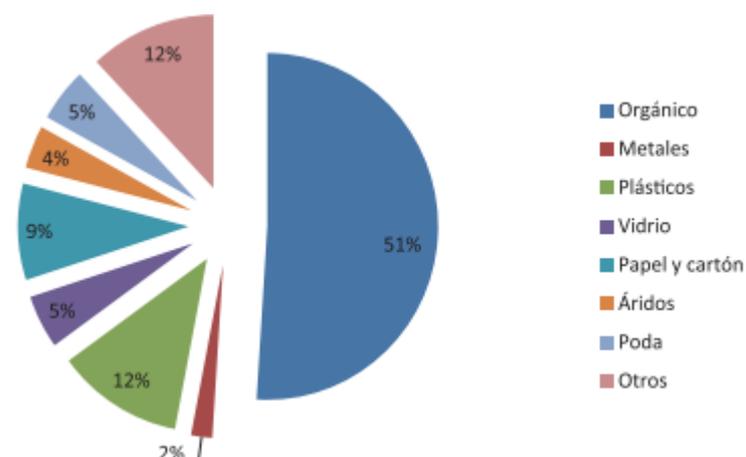


Figura 3. Composición porcentual de los RSU en Argentina  
Fuente: Grupo Arrayanes, "Proyecto Nacional para la Gestión Integral de RSU BIRF 7362AR", Observatorio Nacional de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos, Julio 2011.

En base a la composición de los Residuos Sólidos Urbanos precedentemente mencionada, se puede estimar el volumen de residuos reciclables (Tabla 2), proyectando en base a una población nacional de 40 millones de habitantes (2010) con una generación anual de 13,1 millones de toneladas de RSU.

Tabla 2. *Generación de RSU Reciclable en Argentina. Fuente: Grupo Arrayanes, Proyecto Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos BIRF 7362AR Nacional de Gestión de RSU, Julio 2011.*

Material	RSU (millones de Ton/año)
Papel y Cartón	2.227
Plásticos	1.834
Vidrio	655
Metales	262
<b>TOTAL</b>	<b>4.978</b>

#### 2.4 Los RSU en la ciudad capital de La Rioja

Se expondrán a continuación las características del caso de estudio, correspondientes al municipio del departamento Capital de provincia de La Rioja que incluye la ciudad de La Rioja. En números redondos, la ciudad a fines de 2014 contaba con 181.000 habitantes. Según estadísticas de la Secretaría de Servicios Públicos del Municipio de la Capital y de la Dirección de Estadística de la Provincia de La Rioja, se producen en la ciudad en promedio, 160 toneladas diarias de RSU (0,88 kg/hab/día), el 82% de los cuales son generados por los 55540 hogares que la constituyen y el 18% restante por los 6819 comercios y fábricas del parque industrial.

Con respecto de la composición de los RSU, al no contar el municipio con los datos correspondientes, se llevó a cabo un trabajo de campo [8] en coordinación con el personal del predio de disposición final de residuos, para determinar mediante muestreo, su composición aproximada. El trabajo consistió en la toma de 48 muestras a lo largo de los 12 meses del año 2014. Cada una la constituía un camión con 1 tonelada aproximadamente de RSU. Estos fueron esparcidos sistemáticamente en una zona preparada para ello y de manera manual, se procedió a la separación y pesado de cada uno de los elementos presentes. De este análisis, se determinó la composición promedio que se muestra en Tabla 3.

Tabla 3. *Composición RSU promedio en la ciudad de La Rioja. Fuente: Elaboración propia.*

Componente	%
Residuos Orgánicos	66.10
Metal/Hierros	7.70
Plásticos	13.50
Vidrio	2.40
Papel/Cartón	7.50
Aluminio	0.50
Otros	2.30

Plásticos	%
PET	13.33
P. Rígido	34.08
P. Flexible	52.59

### 3. DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RESIDUOS

Si bien los aspectos de separación en origen, recolección, transporte y concentración poseen una considerable importancia en la gestión integral de residuos sólidos, no serán tratados en el presente trabajo, concentrándose el enfoque en la disposición final de los mismos, puesto que constituye la etapa de mayor impacto sanitario, social, ambiental y económico.

#### 3.1 Diversos métodos de disposición: análisis comparativo

De entre el conjunto de métodos de disposición final existentes la Figura 4, brinda una síntesis de los méritos relativos de cuatro alternativas posibles (vertedero, compostaje, incineración y pirolisis). La implementación de alguno de estos métodos supone la eliminación de basurales incontrolados a cielo abierto.

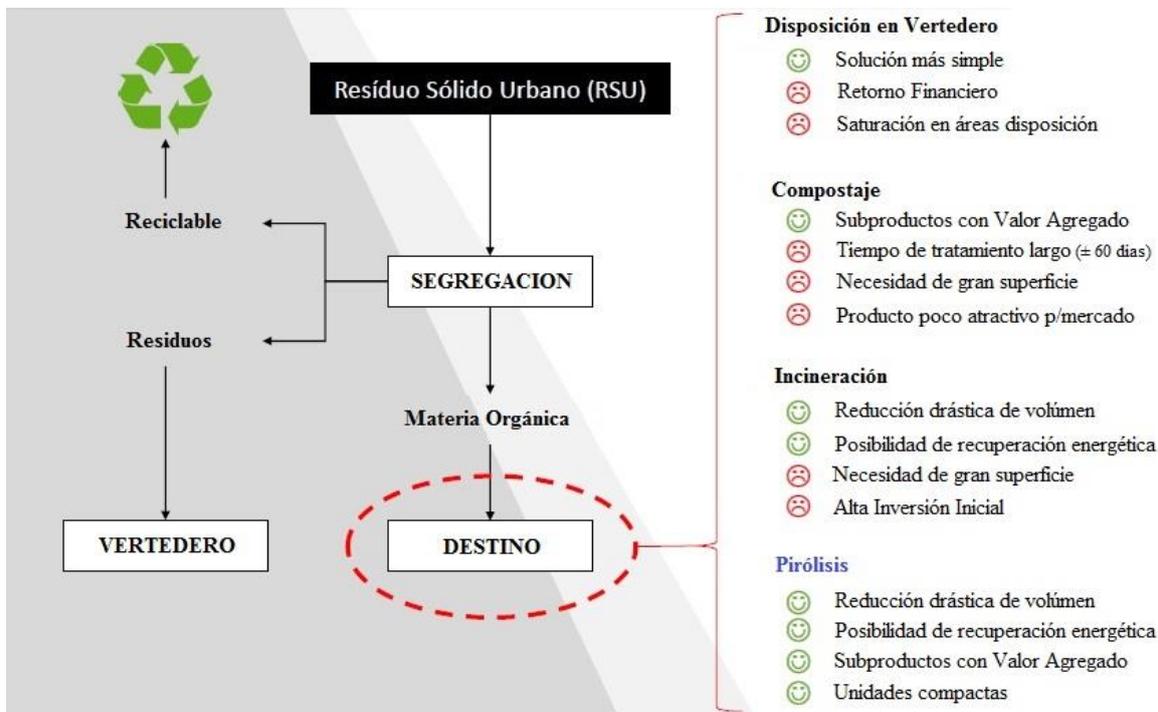


Figura 4. Ventajas y Desventajas de las alternativas de tratamiento de residuos orgánicos. Fuente: *Natureza Limpa - IDENTIFICAÇÃO DA OPORTUNIDADE/NEGÓCIO – Año 2014*

Debe observarse en la Figura 4 que todos los métodos presuponen una etapa previa de segregación (separación) de los materiales reciclables, lo que significa generación de puestos de trabajo de buena condición sanitaria para grupos sociales marginados que, de lo contrario, dirigirían su accionar a basurales incontrolados.

La investigadora brasileña Ana Lucia Marchezetti [9], de la Universidad de Paraná, en su tesis de maestría evalúa la Pirólisis en tercer lugar, tras el método de Enterramiento Sanitario y el Compostaje, como procedimiento de disposición final de RSU, empleando una matriz que pondera costo de instalación, emisión de contaminantes, subproductos generados, temperatura requerida e impacto ambiental.

Tabla 4. Evaluación de las alternativas tecnológicas disponibles para el tratamiento de los RSU. Fuente: *Marchezetti, 2009.*

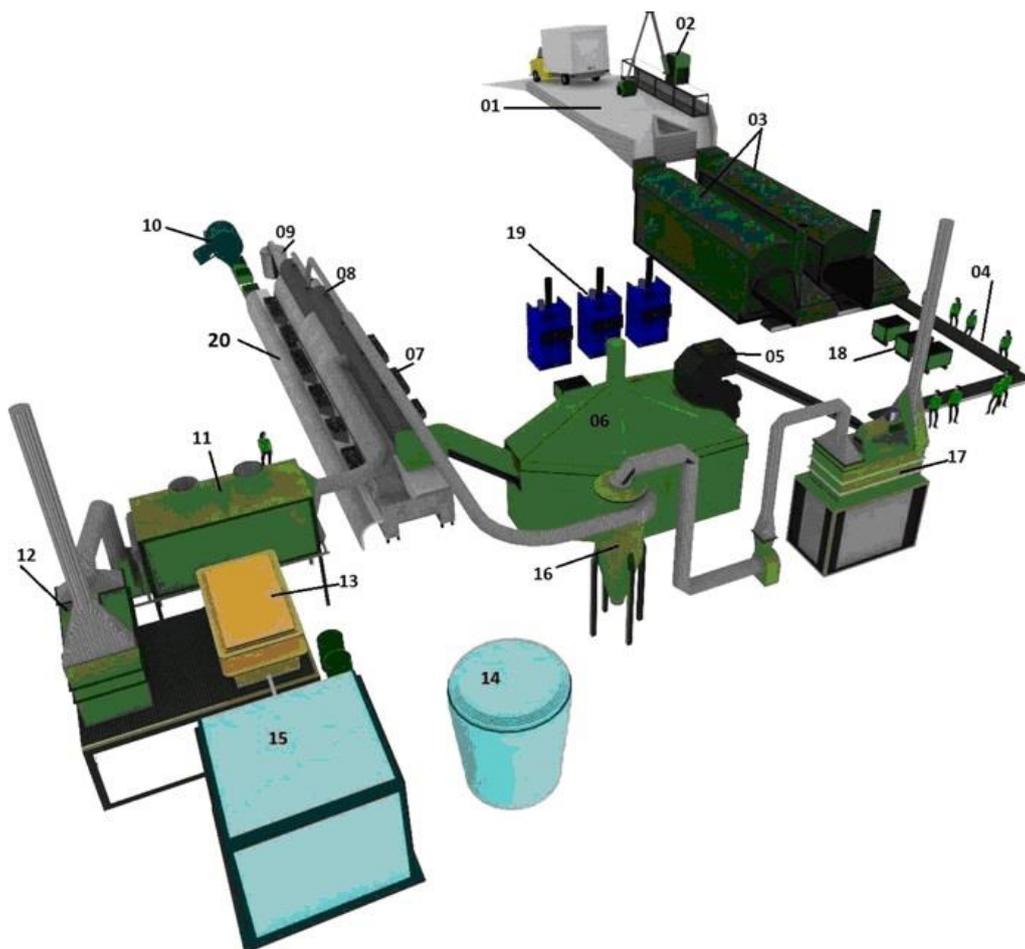
Tecnologías	Índice
Reciclado + Enterramiento Sanit.	3.488
Compostaje	1.859
Pirólisis	1.244
Plasma	1.179
Gasificación	1.105
Biodigestión	1.090
Incineración	0.904

Si bien por su bajo costo de instalación la tecnología de reciclado y enterramiento sanitario de residuos aparece en primer lugar en la Tabla 4, la misma investigadora destaca entre sus desventajas el bajo rendimiento de recuperación de materiales reciclables en comparación con otros métodos.

### Proceso Pirolítico.

El proceso de pirólisis es un tratamiento que consiste en la degradación térmica de residuos orgánicos en ausencia de oxígeno con la formación de una fracción rica en carbón sólido y una fracción volátil compuesta de gases y vapores combustibles con valor calorífico. Los gases generados, comprenden principalmente H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO y otros; líquidos: como alquitrán, acetona, ácido acético, metanol, hidrocarburos oxigenados complejos y sólidos, perteneciendo a este grupo el coque (carbono puro) y material inerte. La proporción de cada fracción varía con la temperatura de pirólisis, y aproximadamente se estima en 10 a 20 % de gases, 60 % de alquitrán y 20 a 30 %

de carbón. La Figura 5 muestra sintéticamente el layout de una planta de tratamiento pirolítico para RSU.



- |   |                                 |  |  |
|---|---------------------------------|--|--|
| 01 - Recepción de los residuos              | 06 - Tolva de los RSU orgánicos | 11 - Condensador                             | 16 - Exhaustor de humos                        |
| 02 - Brazo mecánico de suministro del túnel | 07 - Horno de deshidratación    | 12 - Lavador de gases pirolíticos (scrubber) | 17 - Lavador de gases del horno (scrubber)     |
| 03 - Túnel de secado                        | 08 - Hornos de Carbonización    | 13 - Filtro / prensa                         | 18 - Carros para transporte material reciclaje |
| 04 - Cintas de reciclaje                    | 09 - Sistema de tamizado        | 14 - Tanque de agua                          | 19 - Prensa de reciclaje                       |
| 05 - Cortador de restos orgánicos           | 10 - Briqueteadora              | 15 - Tratamiento de efluentes                | 20 - Túnel de secado                           |

Figura 5. Layout proceso de Carbonización Pirolítica - Fuente: Projeto Natureza Limpa. <http://naturezalimpa.com>

### 3.3 Implementación propuesta para el caso en estudio

La solución propuesta para el Municipio de La Rioja (Capital), consiste en la instalación de una planta con una capacidad de tratamiento de RSU brutos de 180 toneladas por día (7,5 tn/hora), en un proceso continuo con un uso mínimo de energía eléctrica, operando a baja temperatura (pirólisis suave), produciendo carbón con Poder Calorífico Inferior (PCI) = 4.500 Kcal / kg. El costo de la planta es de aproximadamente u\$s 2.500.000, que incluye la maquinaria y el sector de reciclaje donde se segrega, comprimen, acondicionan y envasan los productos que no son sometidos a carbonización para su posterior venta.

La tecnología disponible permite someter a carbonización pirolítica a todos los elementos que componen los RSU, a excepción de vidrio y metales. Sin embargo, aplicando un criterio de ecosustentabilidad con desarrollo social que trasciende el análisis estrictamente económico, se propone [8] la carbonización sólo del componente orgánico y la comercialización de los subproductos reciclables.

A partir de las 160 toneladas diarias de RSU generados en la ciudad de La Rioja, la aplicación del proceso propuesto conduce a los siguientes resultados calculados:

**Sector Segregación:** en este sector se realizan de manera manual la separación de vidrios, materiales ferrosos y papel/cartón, obteniendo de manera aproximada:

*Vidrio:* 3,84 toneladas, que es triturado para su comercialización (2,4% de los RSU Brutos).

*Materiales Ferrosos:* 3,84 toneladas, reducidas y almacenadas para su posterior venta. Se pierde parte de material en el proceso, siendo el peso neto final 3,68 toneladas (2,4% de los RSU Brutos).

*Papel y Cartón:* 12,00 toneladas, prensadas en la misma planta para su posterior comercialización (7,5 % de los RSU Brutos).

**Sector de Aprovechamiento:** en este sector se realizan de manera manual la separación de PET, plásticos rígidos, plásticos flexibles y aluminio, obteniendo de manera aproximada:

*Polietileno (PET):* 2,88 toneladas que son trituradas obteniéndose flakes de PET para su comercialización (1,8 % de los RSU Brutos).

*Plástico Rígido:* 7,36 toneladas que son trituradas, obteniéndose flakes de plástico rígido para su comercialización (4,6 %).

*Plástico Flexible:* 11,36 toneladas que son procesadas obteniéndose plástico flexible extruido para su comercialización (7,1 %).

*Aluminio:* 0,80 toneladas que son fundidos obteniéndose lingotes para su comercialización (representa el 0,5 % de los RSU Brutos).

**Sector de Pirólisis:** en este sector se realizan el proceso de carbonización de los componentes orgánicos de los RSU. De este proceso se obtiene:

*Carbón:* 50,72 toneladas de carbón en polvo de los cuales 15 toneladas aproximadamente son utilizadas en el propio proceso. El carbón generado representa el 31,7 % de los RSU brutos y el 47.95% de los Orgánicos.

*Gases de Pirólisis:* 6,40 toneladas de gases que son reconducidos al horno de secado de los RSU en bruto. Los mismos son tratados en su totalidad evitándose emisiones contaminantes a la atmósfera.

*Extracto Líquido y Agua:* 48,64 toneladas entre ambos líquidos. De su tratamiento se obtienen: 6,4 toneladas de líquido pirolítico con alto contenido graso y que es utilizado nuevamente en el proceso de pirólisis por su poder calorífico, como asimismo 42,42 toneladas de agua para uso interno y riego del predio.

**Sector de Recuperación Energética:** en este sector se posee una unidad de generación de energía eléctrica mediante la utilización de calderas que utilizan parte del carbón generado en el proceso al igual que el horno pirolítico de tratamiento continuo. La usina generaría 1,5 MW que cubrirían la demanda eléctrica total de la planta.

Por lo que respecta al recupero de la inversión, los cálculos realizados establecen que en un plazo de 5 años se produce el recupero a valores actualizados. Paralelamente se calcula que la instalación de tratamiento pirolítico de RSU producirá la creación de 156 puestos de trabajo directos. El impacto desde lo social para la ciudad será muy significativo, ya que contribuirá a reducir la tasa de desempleo, no sólo por los puestos de trabajo generados de manera directa en el proceso, sino que, adicionalmente, por los emprendimientos o cooperativas que podrían crearse para el tratamiento y revaloración de los subproductos generados.

#### 4. INDICADORES DE GESTIÓN

##### 4.1 Sustentabilidad y Ecoeficiencia

Según la Real Academia Española, "desarrollo sostenible" se define como: "desarrollo que, cubriendo las necesidades del presente, preserva la posibilidad de que las generaciones futuras satisfagan las suyas." El término "sustentabilidad" sufrió diferentes transformaciones a lo largo del tiempo hasta llegar al concepto moderno basado en los sistemas socioecológicos, para lograr una nueva configuración en las cuatro dimensiones centrales del desarrollo sustentable: la económica, la social, la ambiental y la político/institucional. Calvete [10] propone la siguiente definición: "Una sociedad en la cual el desarrollo económico, el bienestar social y la integración están unidos con un medioambiente de calidad. Esta sociedad tiene la capacidad de satisfacer sus necesidades actuales sin perjudicar la habilidad de que las generaciones futuras puedan satisfacer las suyas".

Según Berkes [11], el pensamiento estratégico orientado a la sustentabilidad se debe enfocar a lograr que los procesos de producción sean como mínimo sostenibles y que además sean robustos, resilientes y adaptativos. De este modo, que un proceso sea sostenible es una condición necesaria y fundamental pero no suficiente para asegurar la sustentabilidad.

Una de las maneras en que se plantea el proceso de avance de los países hacia un desarrollo industrial sostenible o al menos, más sostenible, es enfocando sus procesos en lo que se ha llamado la ecoeficiencia. La ecoeficiencia se apoya en dos pilares: reducir la sobre explotación de los recursos naturales (lograr un uso más sostenible) y disminuir la contaminación asociada a los procesos productivos. Pero apunta aún más allá: busca un incremento de la productividad de los recursos naturales, así como a reducir los impactos ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida de los productos [12]. La ecoeficiencia es la manera en que se mide la vinculación entre economía y medio ambiente en una perspectiva práctica de la sostenibilidad. En muchos casos, es

importante recalcarlo, el Estado se hace parte de una estrategia de ecoeficiencia, apoyándola e impulsándola, ya que sus promotores se transforman en aliados importantes de la acción pública de protección del medio ambiente y uso de los recursos naturales.

#### 4.2 Indicadores de Sustentabilidad

La comunicación es la principal función de los indicadores. Ésta exige simplicidad, y los indicadores han de poseer la capacidad de simplificar una realidad compleja. Así, un indicador es una medida, generalmente cuantitativa, que puede ser usada para ilustrar y comunicar un fenómeno complejo de manera simple, incluyendo tendencias y progresos a lo largo del tiempo. Para interpretar correctamente el concepto de indicador ambiental, es importante tener en cuenta que se trata de una variable o estimación ambiental que provee una información agregada, sintética, sobre un fenómeno, más allá de su capacidad de representación propia. Por ello, los dos propósitos más significativos de los indicadores medioambientales son:

- Servir de herramientas básicas en el suministro de información sobre el estado del medio ambiente de manera que contribuya a la concientización de los funcionarios públicos y de la población en general.
- Ser utilizados tanto en la elaboración como en la evaluación de las políticas ambientales y de la integración de aspectos ambientales en las políticas sectoriales.

Los indicadores se suelen agrupar en sistemas de indicadores. Un sistema de indicadores ambientales representa un conjunto ordenado de problemas ambientales, descrito mediante variables de síntesis cuyo objetivo es proveer una visión totalizadora de los intereses predominantes relativos al medioambiente. Existen diversos marcos o estructuras de análisis para la organización de un sistema de indicadores, siendo los basados en el marco causal los de mayor difusión internacional, ya que estudian las relaciones causa–efecto. Dos son los modelos usados que se basan en el principio de causalidad: el modelo PER (Presión – Estado – Respuesta) y el FPEIR (Fuerzas Motrices – Presión – Estado – Impacto – Respuesta).

Modelo PER (Figura 6): Este modelo supone que las actividades humanas ejercen una presión sobre el medio, que éste registra cambios de estado en función de ellas, y que la sociedad responde mediante la adopción de medidas que tratarían de mantener los equilibrios ecológicos que le parecen adecuados.

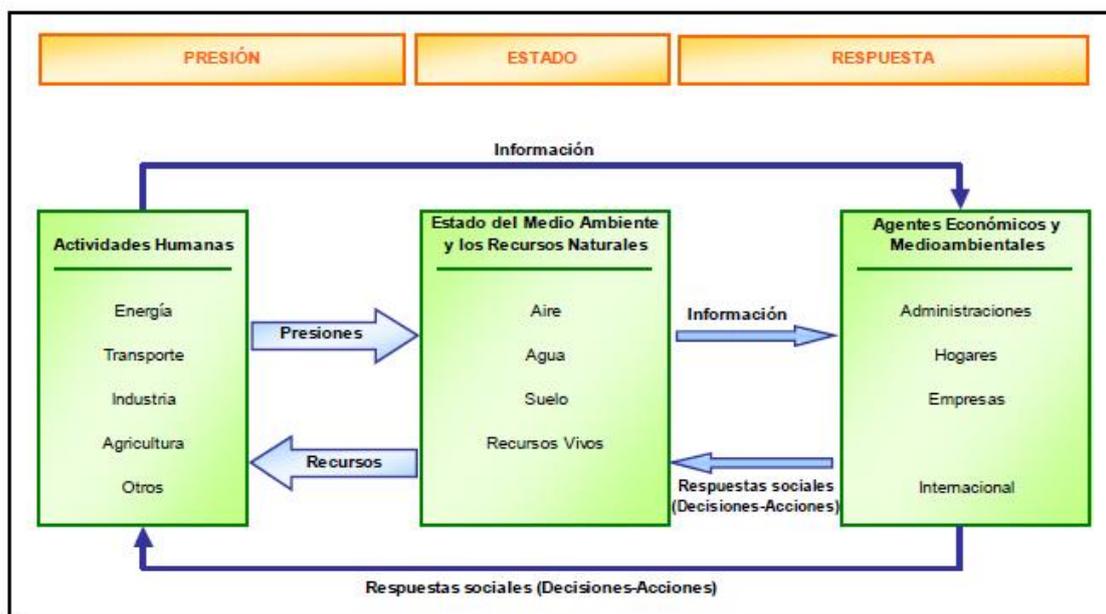


Figura 6. Modelo (Presión – Estado – Respuesta). Fuente: “OECD Core Set of Indicators for Environmental Performance Reviews”. Organisation for Economic Co-Operation and Development.

Modelo FPEIR (Figura 7): las actividades humanas (fuerzas motrices) ejercen presión sobre el medio físico, y como consecuencia su estado cambia, lo que produce impactos sobre la salud humana, los ecosistemas y los recursos. Esta situación da lugar a respuestas de las sociedades humanas, incidiendo en las fuerzas motrices, en las presiones, o en el estado o los impactos directamente. Para ello, se describen las distintas relaciones dinámicas, con atención a las diversas retroalimentaciones del sistema: Indicadores de Fuerzas Motrices, cambios en la producción y consumo, indicadores de Presión, indicadores de Estado: referidos a las medidas de calidad ambiental y cantidad de recursos naturales y por último, los indicadores de Respuesta cuya finalidad es describir los esfuerzos sociales y políticos para prevenir, compensar, aminorar o adaptarse a los cambios en el estado del medio.

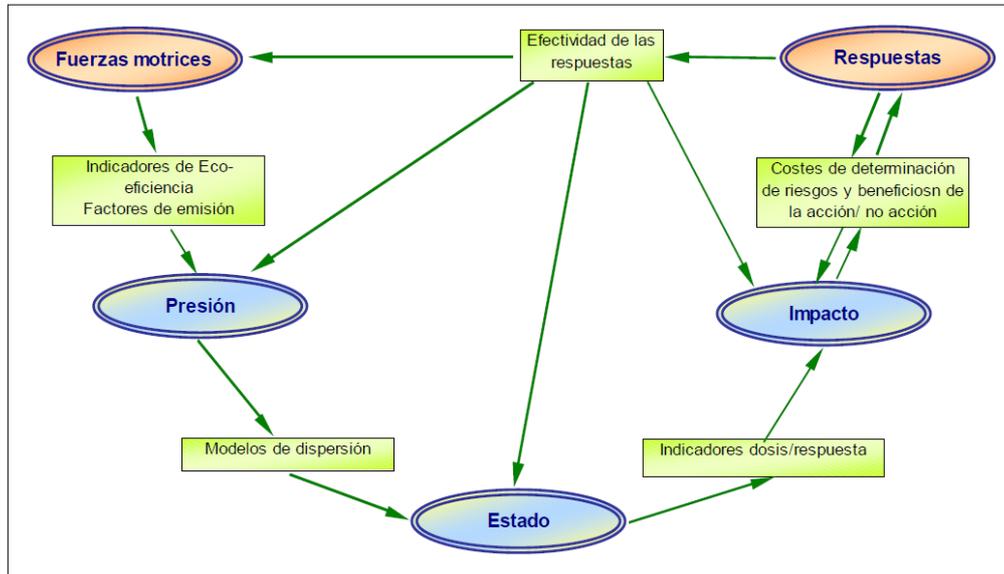


Figura 7. Indicadores y Relaciones Intermedias entre los elementos del Modelo FPEIR - Fuente: "National Monitoring to European Reporting: the EEA Framework for Policy-Relevant Environmental Indicators." Agencia Ambiental Europea 2003.

### 4.3 Sistema de Indicadores de Sustentabilidad del área RSU municipales - definiciones

Los sistemas de indicadores desarrollados y más utilizados en la actualidad, empleados casi exclusivamente en Municipios de ciudades europeas, donde el grado de desarrollo y estado del tratamiento de los RSU es muy superior al de América del Sur, se pueden agrupar en tres tipos: Básicos, Específicos y Transversales.

El Sistema de Indicadores Básicos, cuya finalidad es la de realizar una evaluación comparada, tiene como objetivo dar una visión general de la generación y gestión de las principales corrientes de RSU y permitir a su vez comparar su estado y evolución con el de otras ciudades.

El Sistema de Indicadores Específicos cuya finalidad es el seguimiento de políticas, se ha desarrollado con el fin de hacer el seguimiento de los objetivos planteados en las políticas de residuos desarrolladas por un municipio.

Por último, el Sistema de Indicadores Transversales, relaciona una serie de variables sociales y económicas con la generación de residuos. Este tipo de análisis es muy interesante, ya que la generación de RSU está ligada a una serie de variables sociales, como la población o el número de hogares, así como a variables económicas, como el nivel de producción y el consumo. En síntesis, el objetivo de un estudio transversal, es analizar la influencia de diversos factores económicos y sociales sobre la generación de estos residuos.

El desarrollo del sistema de indicadores transita por 4 etapas, de las cuales la Primera es la etapa de síntesis del propio sistema de indicadores, es decir, de selección de los que van a formar parte del conjunto en cumplimiento de los objetivos fijados. La Segunda etapa es el desarrollo del sistema, para lo cual es necesario realizar una búsqueda de las fuentes de los datos necesarios para el cálculo de los indicadores, como asimismo de los contenidos que se quieren mostrar junto a los datos para avalar al indicador y ayudar a su interpretación. La Tercera etapa es la de aplicación; en esta etapa se calculan los indicadores definidos con los datos que se han obtenido en la etapa anterior y se acompaña de la información necesaria para comprender la temática del indicador, su evolución temporal y restantes características. La Cuarta y última, es la etapa de interpretación de los resultados, en la que se resume cual es la evolución y el grado en el que se van cumpliendo los objetivos propuestos.

### 4.4 Sistema de Indicadores de Ecoeficiencia para la GIRSU en un Municipio

La evaluación de la gestión integral de RSU basada en Indicadores constituye una herramienta para una gestión municipal eficiente y sostenible de los residuos. Los indicadores propuestos y aplicables a la municipalidad de la Ciudad de La Rioja son los que a continuación se detallan. El cálculo de los mismos, se realizó tomando como base los datos obtenidos en la Tesis[8] durante el año 2014.

#### Indicadores Básicos:

**Indicador 1 - Generación de Residuos Urbanos:** este indicador analiza la generación de Residuos Urbanos generados por habitante y año en la Ciudad de La Rioja. Este indicador para el año 2014, fue estimado en 0.884 Kg/Hab/Año.

$$\text{Generación de RSU} = \frac{\text{Total de RSU}}{\text{Población Ciudad}}$$

(Kg/Hab/Año)

**Indicador 2 - Tasa de Reciclaje de Vidrio:** Con este indicador se pretende conocer la cantidad recuperada de vidrio en el ámbito del municipio. La reutilización y el reciclaje de vidrio, además de disminuir la cantidad de residuos a tratar, evita la utilización de nuevas materias primas (recursos minerales), disminuyen la energía necesaria para su transformación, reduciendo las emisiones de gases contaminantes y evitan la utilización de productos químicos en los procesos industriales y de los vertidos que se generan. Este indicador, fue calculado, considerando la total segregación de vidrio desde los RSU y tomando como base la producción de vidrio que se realiza en Argentina según Sector de la Industria del Vidrio [13]. El mismo es = 0.791 % del vidrio consumido en Arg

$$\text{Tasa de Reciclaje de Vidrio} = \frac{\text{Total Vidrio Segregado en una Ciudad}}{\text{Consumo de Vidrio en Argentina} \times \frac{\text{Hab. Ciudad}}{\text{Hab. Argentina}}}$$

(%)

**Indicador 3 - Tasa de Reciclaje de Papel/Cartón:** Con este indicador se pretende conocer la cantidad recogida de Papel / Cartón en el Municipio. La reutilización y el reciclaje de residuos de papel-cartón, además de disminuir la cantidad de residuos a tratar, evitan la utilización de nuevas materias primas, disminuyen la energía necesaria para su transformación, reduciendo las emisiones de gases contaminantes y evitan la utilización de productos químicos en los procesos industriales y de los vertidos que se generan. Este indicador, fue calculado, considerando la total segregación de papel/cartón desde los RSU y tomando como base la producción de vidrio que se realiza en Argentina según Sector de la Industria del Vidrio [14]. El mismo es = 0.668 % del papel/cartón consumido en Arg.

$$\text{Tasa de Reciclaje de Papel/Cartón} = \frac{\text{Total Papel/Cartón Segregado en la Ciudad}}{\text{Consumo Papel/Cartón en Argentina} \times \frac{\text{Hab. Ciudad}}{\text{Hab. Argentina}}}$$

(%)

**Indicadores Específicos:**

**Indicador 4 - Tasa de Reciclado de RSU:** Representa la recuperación de los subproductos obtenidos de los RSU (que por su naturaleza pueden ser recuperados o reutilizados) por habitante. Este indicador es = 23.875 % del total de RSU de LR

$$\text{Tasa de Reciclado de RSU} = \frac{\text{Total de Subproductos Segregados (Kg)}}{\text{Total de RSU Generados (Kg)}}$$

%

**Indicador 5 - Tasa de Valorización Energética de RSU:** Este indicador compara la cantidad de RSU valorizados en la planta de valorización energética respecto la cantidad de RSU generados. Dentro de los objetivos de la tasa se encuentra la optimización máxima de los procesos de recuperación de materiales por segregación con el fin de que solo se valoricen energéticamente los residuos que no pueden ser revalorizados por otros medios. En la escala de jerarquía de en la gestión de los RSU, la valorización energética se posiciona después de la segregación / reutilización y reciclaje, por lo tanto solo se valorizara energéticamente aquellos residuos que no sean reciclables ni reutilizables. Con la aplicación de la Tecnología de Carbonización Pirolítica, este indicador es = 66.1 % del total de RSU de LR.

$$\text{Tasa de Valorización Energética de RSU} = \frac{\text{Total de RSU dest a Valorización Energética (Kg)}}{\text{Total de RSU Generados (Kg)}}$$

(%)

#### Indicadores Transversales:

**Indicador 6 - Generación RSU Anual:** Cantidad de RSU se generan de manera anual en la ciudad. Este indicador, puede calcularse según conveniencia del municipio por zonas o circuitos de recolección para determinar de manera parcializada el comportamiento de generación de los habitantes que componen cada una de ellas. El valor de este indicador para la ciudad de La Rioja es 58700 toneladas/año.

$$\text{Generación de RSU anual} = \frac{\text{Total RSU generados en la ciudad}}{(\text{tn/año})}$$

**Indicador 7 - RSU por Hogar:** Cantidad de RSU se generan de manera anual por Hogar en la ciudad. Este indicador, puede calcularse según conveniencia del municipio por zonas o circuitos de recolección para determinar de manera parcializada el comportamiento de generación de los habitantes que componen cada una de ellas. El valor de este indicador para el año 2014, es = 1051,56 kg/hogar/año.

$$\text{Generación de RSU por Hogar} = \frac{\text{Total de RSU generados en la ciudad}}{\text{Total de Hogares de la ciudad}} \\ (\text{Kg/Hogares/Año})$$

**Indicador 8 - Poder Adquisitivo:** El indicador mide la relación entre el poder adquisitivo promedio de una ciudad o región a analizar y la cantidad de RSU generados por la misma.

$$\text{Impacto Poder Adquisitivo en la Generación} = \frac{\text{Poder Adquisitivo (miles de \$)}}{\text{RSU Generados (toneladas)}} \\ (\text{miles \$ / tn})$$

**Indicador 9 - Consumo:** El indicador mide la relación entre el consumo de una ciudad o región a analizar y la cantidad de RSU generados por la misma.

$$\text{Impacto Consumo en la Generación} = \frac{\text{Consumo (miles de \$)}}{\text{RSU Generados (toneladas)}} \\ (\text{miles \$ / tn})$$

**Indicador 10 - Tasa de Empleo de Segregadores:** Relación existente entre las personas que se desempeñan en trabajos formales de segregación, revaloración y reciclado con respecto a los segregadores informales en la ciudad.

$$\text{Tasa de Empleo de Segregadores} = \frac{\text{Empleos formales Reciclado}}{\text{Empleos informales Reciclado}} \\ \%$$

Los indicadores 8 y 9, no pudieron ser calculados, ya que la Dirección de Estadística de la provincia de La Rioja no los calcula. Sin embargo, fue planteado a este organismo la importancia y necesidad de hacerlo de manera de poder determinar estos indicadores tan sensibles al volumen de generación de RSU.

El indicador 10 no pudo ser determinado ya que no existe en el Municipio ni en la Dirección de Comercio de la provincia, un registro de segregadores y recicladoras que se encuentran trabajando en la ciudad. Por ello, dentro de las acciones sugeridas, se encuentra la creación de un registro municipal con la finalidad de relevar y generar los indicadores necesarios para monitorear de manera permanente esta actividad.

En términos generales, como objetivo, es conveniente que el Municipio defina políticas de manera de estabilizar el ratio de generación per cápita de RSU y de manera progresiva su disminución a partir del 2016 en un 1% anual, en consonancia con las tendencias de los países del primer mundo.

## 5. CONCLUSIONES

Se han expuesto las ventajas derivadas de la aplicación conjunta de segregación de reciclables y el tratamiento pirolítico de los restantes residuos, con un muy modesto impacto ambiental derivado de su aplicación. Justamente, la evaluación de impacto ambiental se ha convertido en una herramienta indispensable de políticas públicas, que permite conocer la situación ambiental actual, determinar el cambio a producirse por el desarrollo de las actividades humanas, evaluarlo, pronosticar las tendencias a futuro y proponer las medidas de prevención, corrección o mitigación. La GIRSU requiere de la toma de decisiones desde los gobiernos locales en el corto plazo, con un conocimiento cabal del estado de situación relativo a la gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) y por ello, la puesta en vigencia de un sistema de eco-indicadores para la GIRSU constituyen una herramienta prioritaria para monitoreo del sistema y su optimización operativa, como así también elemento de sustento para la aplicación de políticas públicas sobre la materia.

Como se analizó, existen diversos marcos o estructuras de análisis para la organización de un sistema de indicadores, siendo los basados en el marco causal los de mayor difusión internacional, ya que estudian las relaciones causa-efecto, analizando las Fuerza Motrices que ejercen presión sobre el medio, la intervención del estado, impacto y respuestas. Para evaluar lo expuesto, los indicadores constituyen una herramienta fundamental. Se han formulado una serie indicadores para el caso en estudio y queda pendiente el análisis de su evolución tras la implementación del procedimiento pirolítico propuesto.

## Referencias

- [1] SIMRU, 2006, '*Estudios sectoriales y del Sistema de Monitoreo de Residuos Urbanos*', OPS.
- [2] BM, 2014, '*Reporte Banco Mundial*', [Página web], Consultado el 04 de Febrero de 2015, <http://datos.bancomundial.org/region/LAC>
- [3] Wertz K, 1976, '*Economic factors influencing household's production of Refuse*', Journal of Environmental Economics and Management, vol. 2.
- [4] Richardson R y Havlicek J, 1978, '*Economic analysis of the composition of household solid waste*', Journal of Environmental Economics and Management, vol. 5.
- [5] DRSUAL, 1997, '*Diagnóstico de la Situación del Manejo de los Residuos Sólidos en América Latina y el Caribe*', Publicación Conjunta entre BID y OPS.
- [6] OPS, 2002. Organización Mundial de la Salud, Organización Panamericana de la Salud. Estudio "*Evaluación Regional de los Servicios de Manejo de Residuos Sólidos, 2002 – Argentina*". Comité Argentino para la Evaluación 2002.
- [7] ENGIRSU, 2005, '*Estrategia Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos*', Ministerio de Salud y Ambiente, Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable.
- [8] Holote L., Christian (2015). *Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos – Análisis de la Sustentabilidad de la Aplicación de la Tecnología de Carbonización Pirolítica. Análisis del Caso de la Municipalidad del Departamento Capital La Rioja – Argentina*. Tesis de Maestría en administración de negocios. UTN-FRM 2015. Inédito.
- [9] Marchezetti, Ana Lucia (2009). *Avaliação de Alternativas Tecnológicas para o Tratamento de Resíduos Sólidos Domiciliares pela Aplicação do Método AHP: Estudo de Caso da Região Metropolitana de Curitiba*. Tesis de Maestría Universidad de Paraná, Curitiba, R.F. de Brasil.
- [10] Calvente, Arturo M. (2007). '*El concepto moderno de sustentabilidad*', Ref. Socioecología y desarrollo sustentable. Universidad Abierta Interamericana, Centro de Altos Estudios Globales'. UAIS-SDS-100-002.
- [11] Berkes, Fikret; Colding, Johan, Folke, Carl, (2001). *Navigating Social-Ecological Systems: Building Resilience for Complexity and Change*. Cambridge University Press.
- [12] Leal, J, (2005). '*Ecoeficiencia: marco de análisis, indicadores y experiencias*'. Proyecto CEPAL/PNUD, División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos, Organización de las Naciones Unidas.
- [13] Oferta Exportable (2010). '*Sector de la Industria del Vidrio*'. Dirección de Oferta Exportable Dirección General de Estrategias de Comercio Exterior. Subsecretaría de Comercio Internacional de la República Argentina.
- [14] Oferta Exportable (2011). '*Sector de la Industria de Pasta de Madera, Papel y Cartón*'. Dirección de Oferta Exportable Dirección General de Estrategias de Comercio Exterior. Subsecretaría de Comercio Internacional de la República Argentina.