



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTADES DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA
PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES
AND
TH KÖLN - UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
INSTITUTE FOR TECHNOLOGY AND RESOURCES MANAGEMENT IN THE TROPICS AND SUBTROPICS

**MODELOS DE PREDICCIÓN DE GENERACIÓN DE BIOGÁS:
ANÁLISIS CRÍTICO Y APLICACIÓN AL CASO DE TUCUMÁN, ARGENTINA.**

THESIS TO OBTAIN THE DEGREE OF
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES
DEGREE AWARDED BY UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
AND
MASTER OF SCIENCE
NATURAL RESOURCES MANAGEMENT AND DEVELOPMENT
DEGREE AWARDED BY TH KÖLN – UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

PRESENTS:

MARTÍN MIGUEL RODRÍGUEZ MARAT

CO-DIRECTOR OF THESIS PMPCA
DR. ALFREDO ÁVILA GALARZA
CO-DIRECTOR OF THESIS ITT
DR. JOHANNES HAMHABER

ASSESSOR:
DR. LUIS ARMANDO BERNAL JACOME

Proyecto realizado en:

PMPCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA SAN LUIS POTOSÍ

Con el apoyo de:

Deutscher Akademischer Austausch Dienst (DAAD)

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

LA MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO A TRAVÉS DEL

PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS (PNPC - CONACYT)

Erklärung / Declaración

Name / Nombre: Martín Miguel Rodríguez Marat

Matri.-Nr. / N° de matrícula: 11103513 (TH Köln); 242743 (UASLP)

Ich versichere wahrheitsgemäß, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht.

Aseguro que yo redacté la presente tesis de maestría independientemente y no use referencias ni medios auxiliares a parte de los indicados. Todas las partes, que están referidas a escritos o a textos publicados o no publicados son reconocidas como tales.

Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden.

Hasta la fecha, un trabajo como éste o similar no ha sido entregado como trabajo de tesis.

San Luis Potosí den /el: 06/08/2016

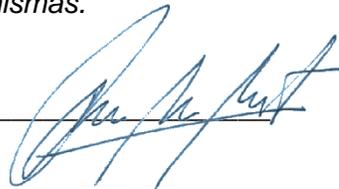
Unterschrift / Firma: _____



Ich erkläre mich mit einer späteren Veröffentlichung meiner Masterarbeit sowohl auszugsweise, als auch Gesamtwerk in der Institutsreihe oder zu Darstellungszwecken im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des Institutes einverstanden.

Estoy de acuerdo con una publicación posterior de mi tesis de maestría en forma completa o parcial por las instituciones con la intención de exponerlos en el contexto del trabajo de investigación de las mismas.

Unterschrift / Firma: _____



**MODELOS DE PREDICCIÓN DE GENERACIÓN DE BIOGÁS:
ANÁLISIS CRÍTICO Y APLICACIÓN AL CASO DE TUCUMÁN, ARGENTINA.**

Tabla de contenido

Índice de tablas	10
Índice de figuras.....	12
Capítulo 1: Introducción.....	16
1.1. Aprovechamiento de residuos sólidos urbanos: rellenos sanitarios y biogás.	16
1.2. RSU: aspectos inherentes a los países en vías de desarrollo y experiencias en países industrializados.	19
1.3. Modelado de biogás en rellenos sanitarios: importancia y antecedentes.	22
1.4. Objetivos del trabajo.....	25
1.5. Metodología y base de datos utilizada: el Mecanismo de Desarrollo Limpio.....	25
1.6. Organización de este documento.....	27
Capítulo 2: Modelado de biogás generado en rellenos sanitarios.....	29
2.1. Rellenos sanitarios: conceptos básicos	29
2.2. Generación de biogás a partir de residuos	34
2.3. Factores que afectan la generación de biogás.....	37
2.4. Modelos de generación de biogás.....	41
2.5. Modelo de la Agencia de Protección Ambiental de los EEUU: LandGEM.....	45

2.6. Modelo del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático	49
2.7. LandGEM vs IPCC: comparación de los modelos	56
2.8. La eficiencia de recolección	61
Capítulo 3: La experiencia del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).....	63
3.1. El MDL: breve historia.....	63
3.2. La base de datos del MDL	65
3.3. La metodología ACM0001 para rellenos sanitarios	70
3.4. Selección de casos de estudio y recopilación de información.....	72
Capítulo 4: Análisis crítico de los modelos utilizando la información del MDL.....	76
4.1. Desempeño de los modelos utilizados para la evaluación de los rellenos sanitarios: una primera aproximación.....	76
4.2. Cantidades de biogás efectivamente obtenidas por los proyectos de la muestra.....	84
4.3. Ajustes a la eficiencia de recolección.....	94
4.4. ¿Por qué fallan los modelos?	98
4.5. Conclusiones: resultados a utilizar en el análisis económico de la generación de biogás a partir de los residuos de la provincia de Tucumán.	100
Capítulo 5: Aspectos generales y normativos de la provincia de Tucumán.....	102

5.1. Información básica de la provincia.....	102
5.2. Legislación argentina en materia de residuos sólidos urbanos.....	108
5.3. RSU: legislación de orden provincial y municipal.....	111
5.4. Gestión de RSU en el área metropolitana de San Miguel de Tucumán.....	114
5.5. El Mercado Eléctrico Mayorista de Electricidad y las energías renovables en Argentina: historia de un potencial no explotado.....	117
5.6. Experiencias de rellenos sanitarios con aprovechamiento energético en Argentina	121
Capítulo 6: Aprovechamiento del biogás disponible en el relleno sanitario de Overa Pozo, Tucumán.....	123
6.1. Modelado de biogás disponible en Overa Pozo y escenarios de aprovechamiento.....	123
6.2. Premisas del análisis económico.....	125
6.3. Indicadores considerados.....	140
6.4. Resultados.....	143
6.5. Costo unitario por MWh.....	146
6.6. Escala adecuada para la generación de electricidad a partir del biogás de rellenos sanitarios en Argentina.....	149
6.7. Principales variables que inciden en los resultados.....	152

6.8. Conclusiones para el análisis del potencial eléctrico del biogás de Overa Pozo.....	158
Capítulo 7: Resumen y conclusiones.....	161
7.1. Objetivos y organización del trabajo.....	161
7.2. Validación de los modelos de biogás utilizados por la industria: predicción ex-ante y realidad ex-post.....	162
7.3. El caso de Overa Pozo en la provincia de Tucumán y la escala adecuada para el aprovechamiento de biogás en Argentina.....	163
7.4. Comentarios finales y líneas de investigación futura.....	166
Apéndice A. Estimación del número mínimo de años con disponibilidad de biogás para justificar la inversión en capacidad adicional de generación.....	171
Bibliografía	174

Índice de tablas

Tabla 2.1. Valores por defecto para DOC_j y k_j	51
Tabla 2.2. Valores por defecto para principales parámetros en el modelo del IPCC.	52
Tabla 2.3. Generación total de CH_4 para un mismo relleno hipotético, utilizando las ecuaciones (2.3) y (2.4).....	56
Tabla 3.1. Proyectos MDL por tecnología y tasa de éxito ex ante/ ex post a nivel mundial.	69
Tabla 3.2. Proyectos seleccionados del grupo con tasa de éxito entre 30% y 80%.	73
Tabla 3.3. Proyectos seleccionados del grupo con tasa de éxito mayor a 80%.	74
Tabla 4.1. Créditos de carbono esperados (ex-ante) por rellenos sanitarios con recuperación de biogás.....	77
Tabla 4.2. Tasa de éxito media en rellenos sanitarios MDL por región.	82
Tabla 4.3. Tasa de éxito media en rellenos sanitarios MDL en América Latina, por país.	83
Tabla 4.4. Tasa de éxito media en rellenos sanitarios MDL sin componente energético, por región.	84
Tabla 4.5. Razón CH_4 capturado sobre CH_4 modelado para proyectos seleccionados.....	87
Tabla 4.6. Eficiencias de recolección re-calibradas para casos de estudio seleccionados.....	96
Tabla 4.7. Eficiencias de recolección re-calibradas: resumen por grupos y tipo de modelo.	97

Tabla 6.1. Composición de los residuos que llegan al relleno sanitario de Overa Pozo.	124
Tabla 6.2. Recepción de residuos durante la vida útil del relleno sanitario Overa Pozo.....	134
Tabla 6.3. Inversión en equipos y obras civiles según eficiencia de recolección (ER).	135
Tabla 6.4. Gastos varios.....	136
Tabla 6.5. Financiamiento del proyecto.....	138
Tabla 6.6. Cuadro de ingresos del proyecto.....	139
Tabla 6.7. Resultados de la evaluación financiera del proyecto.	144
Tabla 7.1. Resumen de los supuestos principales y resultados del análisis económico.	165

Índice de figuras

Figura 2.1. Esquema de un relleno sanitario. Reimpreso de Robayo Avellaneda (2012).	31
Figura 2.2. Pozos de extracción vertical y zanjas para extracción horizontal	33
Figura 2.3. Fases de la descomposición de la materia orgánica de los residuos.....	37
Figura 2.4. Factores que afectan la producción de biogás.	40
Figura 2.5. Generación de biogás en un relleno hipotético que recibe residuos entre 2009 y 2030, según el modelo LandGEM, para distintos valores del parámetro k	47
Figura 2.6. Generación de biogás en un relleno hipotético según el modelo LandGEM para distintos valores del parámetro L_0	48
Figura 2.7. Generación de biogás para un relleno hipotético, de acuerdo a las condiciones climáticas.	53
Figura 2.8. Contribución absoluta de cada tipo de residuo a las emisiones totales de CH_4 en un relleno hipotético (clima tipo: d).....	54
Figura 2.9. Contribución relativa de cada tipo de residuo a las emisiones totales de CH_4 en un relleno hipotético (clima tipo: d).....	54
Figura 2.10. Comparación entre las predicciones de LandGEM e IPCC en clima boreal y templado seco / boreal templado húmedo para distintos niveles de materia orgánica (MO) en los residuos.	59

Figura 2.11. Comparación entre las predicciones de LandGEM e IPCC en clima tropical (seco y húmedo) para distintos niveles de materia orgánica (MO) en los residuos.	60
Figura 3.1. Ciclo de un proyecto MDL y tasa de éxito.	66
Figura 3.2. Representación esquemática de los principales parámetros monitoreados por los proyectos que utilizan la metodología ACM0001.	71
Figura 4.1. Frecuencia absoluta de las tasas de éxito en rellenos sanitarios MDL.	80
Figura 4.2. Diagrama de dispersión para generación de CH ₄ modelada (ex-ante) y real (ex-post).	86
Figura 4.3. Generación esperada y real para los proyectos de la muestra. Grupo con tasas de éxito entre 30% y 80%.	90
Figura 4.4. Generación esperada y real para los proyectos de la muestra. Grupo con tasas de éxito del 80% o más.	92
Figura 5.1. Ubicación de la provincia de Tucumán.	104
Figura 5.2. Gran San Miguel de Tucumán.	105
Figura 5.3. Relieve y ambientes naturales de Tucumán.	106
Figura 5.4. Mapa de climas de la provincia de Tucumán.	107
Figura 5.5. Ubicación de San Felipe y Overa Pozo (Monte Redondo) en la provincia de Tucumán, Argentina.	115

Figura 5.6. Relleno sanitario Overa Pozo (Tucumán, Argentina).	117
Figura 6.1. Generación de biogás a partir de los residuos recibidos en el relleno sanitario Overa Pozo.....	125
Figura 6.2. Captura prevista de biogás de acuerdo al límite inferior del intervalo de confianza de la eficiencia de captura y capacidad instalada	131
Figura 6.3. Captura prevista de biogás de acuerdo al límite medio del intervalo de confianza de la eficiencia de captura y capacidad instalada.	131
Figura 6.4. Captura prevista de biogás de acuerdo al límite superior del intervalo de confianza de la eficiencia de captura y capacidad instalada	132
Figura 6.5. Ingresos y costos operativos para el escenario de captura mínima.	145
Figura 6.6. Ingresos y costos operativos para el escenario de captura media.....	145
Figura 6.7. Ingresos y costos operativos para el escenario de captura máxima.....	146
Figura 6.8. Relación precio de venta de la electricidad y VPN para distintas eficiencias de captura.	147
Figura 6.9. Relación precio de venta de la electricidad y VPN para distintas tasas de interés bancarias.....	148

Figura 6.10. Escala mínima (en t/d) para la rentabilidad económica de un proyecto de generación eléctrica a partir de biogás de un relleno sanitario (para un precio de 180 USD/MWh).	151
Figura 6.11. Escala mínima (en t/d) para la rentabilidad económica de un proyecto de generación eléctrica a partir de biogás de un relleno sanitario (para un precio de 124 USD/MWh).	151
Figura 6.12. Factores que inciden en los resultados del análisis económico del aprovechamiento del biogás de un relleno sanitario.....	157

Capítulo 1: Introducción.

1.1. Aprovechamiento de residuos sólidos urbanos: rellenos sanitarios y biogás.

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son todos aquellos desechos que proceden de actividades humanas y de animales que se descartan tras su uso. Si bien la categorización varía de acuerdo a la legislación de cada país, normalmente se excluyen de esta definición únicamente a los residuos peligrosos (tóxicos, explosivos, radioactivos, etc.).

El manejo de los RSU es un aspecto fundamental de la sustentabilidad de las actividades socio-económicas modernas, tanto en las ciudades como en las zonas interurbanas ubicadas en algún punto del gradiente urbano-rural. La disposición de los residuos sin un tratamiento adecuado puede generar impactos negativos en el ambiente -ya sea en el suelo, el agua o el aire- e incluso, de manera directa o indirecta, en la salud humana (Giusti, 2009).

Los residuos representan un costo doble para las sociedades. Por un lado, el de la recolección y disposición final de los mismos, máxime cuando se contempla que ésta se realice de una manera

Modelos de predicción de generación de biogás: análisis crítico y aplicación al caso de Tucumán, Argentina.

que no perjudique al ambiente; por el otro lado, el costo de oportunidad que resulta de la pérdida de materiales que aún podrían tener algún valor de uso. Este problema doble es, precisamente, el que se pretende atacar mediante “las 3Rs del ambiente”: reducir, reutilizar, reciclar.

Una de las formas de re-utilización de los residuos consiste en aprovecharlos como combustibles para la generación de energía, lo que puede lograrse de dos maneras. La primera involucra un proceso de combustión que convierte los residuos en energía (ya sea *térmica*, como en el caso de industrias como la cementera; o *eléctrica*, como sucede en las centrales de incineración de residuos). La segunda vía de aprovechamiento consiste en la captura y la utilización del gas que se genera a partir del proceso de descomposición de los residuos en los sitios de disposición final, los rellenos sanitarios.

Un *relleno sanitario* es el lugar físico donde se depositan los residuos en capas delgadas y compactadas, sobre la superficie del terreno, para luego ser recubiertos por una capa de tierra u otro material similar, con el propósito de minimizar el impacto al ambiente (SEDESOL, s.f., pág. 2.1). Es aquí donde se produce la descomposición que da origen al “*biogás*”, combustible natural cuyo principal componente es el metano (CH_4), que le aporta valor calorífico o energético. El uso de alguna variante de relleno sanitario constituye el método más económico de disposición de los residuos, y, pese a sus numerosos problemas, el más sostenible desde el punto de vista ambiental (Tchobanoglous y Kreith, 2002).

El término “relleno sanitario” ha sido utilizado de manera amplia, refiriéndose a sitios construidos bajo circunstancias y con características muy diferentes, por lo que puede abarcar desde tiraderos al aire libre -sin ningún tipo de manejo o cobertura- hasta rellenos que incluyen complejos sistemas de monitoreo ambiental y aprovechamiento energético. En algunos países, la legislación define

Modelos de predicción de generación de biogás: análisis crítico y aplicación al caso de Tucumán, Argentina.

exactamente lo que se entiende por “relleno sanitario”: en México, por ejemplo, la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT establece expresamente lo que se puede considerar como “relleno sanitario”, diferenciándolo de otras categorías como “sitios controlados” (rellenos sin adecuada impermeabilización) y “sitios no controlados” (rellenos sin impermeabilización ni cobertura periódica de residuos) (SEMARNAT). Como se discute más adelante, en Argentina no existe, a la fecha, una normativa equivalente en el orden nacional, dejándose el establecimiento y el control de los requisitos a merced de las provincias y/o de las respectivas municipalidades. Para evitar ambigüedades, a lo largo de esta tesis el término “relleno sanitario” será utilizado para referirse a aquellos sitios que dispongan de la ingeniería adecuada para la disposición de los residuos, el control de los gases y los líquidos peligrosos que allí se generen¹.

El aprovechamiento del biogás proveniente de rellenos sanitarios como combustible para la generación de electricidad permite reducir la dependencia de los combustibles fósiles, una fuente de energía más costosa y a priori más contaminante. En los últimos años, numerosos proyectos de captura y utilización de biogás han sido puestos en marcha en todo el mundo. La tecnología involucrada, sin embargo, aún es objeto de investigación y desarrollo.

Uno de los retos principales es, precisamente, la predicción confiable de la cantidad de biogás que se obtendrá a partir de un influjo de residuos en un relleno sanitario. Un *modelo de generación de biogás* es una expresión matemática que intenta cuantificar la cantidad aprovechable de dicho recurso a partir de una serie de variables explicativas como el tipo de relleno, la temperatura y la

¹ En inglés, estos sitios reciben el nombre “*sanitary landfills*”.

humedad en la celda, el tipo de suelo y de material de cubierta utilizado en el sitio, el tipo de residuos recibido, etc. De esta manera, se trata de reducir un proceso químico complejo a una serie de explicaciones “simples” que permitan obtener predicciones “útiles”; esto es, que resulten en una cantidad razonablemente similar a la que ocurrirá en la realidad.

Otro tipo de modelos utilizan esta información como insumo para realizar predicciones sobre el desempeño de los rellenos sanitarios en otro ámbito: el económico. Dado que el biogás puede aprovecharse energéticamente, su comportamiento incide de manera directa sobre la viabilidad económica de los rellenos.

El presente trabajo aborda la temática de la generación de biogás a partir de rellenos sanitarios, enfocándose específicamente en: a) los modelos que intentan predecir la generación de dicho combustible a partir del conocimiento de determinadas variables explicativas (tipo de residuos, condiciones meteorológicas, etc.); y b) los modelos utilizados para el análisis de la viabilidad económica de los rellenos, para los cuales la disponibilidad de biogás constituye un insumo o parte de las “variables explicativas”.

1.2. RSU: aspectos inherentes a los países en vías de desarrollo y experiencias en países industrializados.

El desarrollo económico y el crecimiento poblacional están unidos de manera inexorable a una generación cada vez mayor de residuos. Algunos aspectos específicos de los países en vías de desarrollo imprimen cierta especificidad a la temática del manejo de RSUs en dichas regiones.

Capítulo 1: Introducción.

El primero de estos aspectos tiene que ver con el rápido crecimiento de las ciudades, principalmente hacia la segunda mitad del siglo XX y la primera del siglo XXI (Cohen, 2004; Marshall y Farahbakhsh, 2013; Tacoli, 2012). Esta vertiginosa expansión impuso dificultades en términos de infraestructura y de planificación de uso de suelos, lo que condiciona la capacidad de acción de los gobiernos a nivel municipal, provincial y nacional al momento de proveer los servicios de recolección y disposición de RSU (Marshall y Farahbakhsh, 2013). En muchos casos, esto se refleja en la falta de legislación y políticas para el planeamiento de largo plazo en materia de RSU (Johannessen y Boyer, 1999), que será discutida -para el caso de Argentina y Tucumán- más adelante en este trabajo.

Otro elemento común es la frecuente disrupción entre recursos y responsabilidades que recaen sobre las municipalidades, que deben hacerse cargo de los aspectos más urgentes de la temática pese a no contar con el personal, el equipo o los fondos necesarios para su implementación y monitoreo. Esta problemática se menciona, por ejemplo, en el trabajo de Noguera y Olivero (2010), que realizan un inventario de los principales rellenos sanitarios en operación en Colombia.

Así mismo, la diversidad de grupos sociales y étnicos -frecuente en ciudades con rápidos niveles de crecimiento poblacional- puede limitar el margen de acción de las municipalidades para implementar estrategias de manejo de RSU, sumado al hecho de que el contexto socio económico y cultural afecta la composición misma de los residuos (Marshall y Farahbakhsh, 2013).

A nivel mundial, los rellenos sanitarios constituyen el método más utilizado para la disposición final de RSU (Tchobanoglous y Kreith, 2002). Giusti (2009), por ejemplo, recopila datos acerca del destino de los residuos en la Unión Europea y los EEUU. En 1999, un 57% de los RSU de Europa Occidental fueron depositados en rellenos sanitarios (en comparación con el 67%

Modelos de predicción de generación de biogás: análisis crítico y aplicación al caso de Tucumán, Argentina.

registrado en 1995, lo que se explica por el avance del compostaje, el reciclado y la incineración). Los EEUU, por su parte, llevaron a rellenos sanitarios un 54% de sus RSU, incineraron un 14% y reciclaron o enviaron a compostaje el 32% restante de los desechos correspondientes al año 2006 (Giusti, 2009, pág. 2229–2230).

En marcado contraste, se estima que sólo un 30% de los RSU generados en países de América Latina recibe una disposición ambientalmente adecuada, mientras que el resto se destina a tiraderos sin manejo apropiado (Savino, 2008). En el caso de Brasil, las proporciones son: 38.6% en rellenos sanitarios, 31.8% en tiraderos controlados y un 26.6% en tiraderos a cielo abierto; en Argentina, un 45% de los RSU termina en rellenos sanitarios (Savino, 2008). En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático estiman que un 60.54% llega a “rellenos sanitarios y sitios controlados”, mientras que un 15.93% se deposita en tiraderos a cielo abierto; se desconoce dónde se deposita el 2.07% restante (SEMARNAT y INECC, 2013)². De estas cifras es posible inferir la existencia de un margen para la expansión de la participación de los rellenos sanitarios en América Latina, al igual que el de actividades como el reciclaje y la combustión.

² No se dispone de cifras confiables acerca del reciclaje, pese a que estas actividades se realizan, en distintas escalas, en la casi totalidad de los países latinoamericanos.

1.3. Modelado de biogás en rellenos sanitarios: importancia y antecedentes.

Un modelo es una representación abstracta de un elemento, un concepto o un proceso, utilizado principalmente con el propósito de mejorar el entendimiento del fenómeno estudiado y de realizar predicciones válidas sobre su comportamiento futuro (Lamborn, 2010). La esencia de un modelo es la reducción de un fenómeno complejo a un número manejable de relaciones y parámetros. El presente trabajo involucra dos modelos: el primero de ellos predice la cantidad de biogás obtenido a partir de los residuos almacenados en un relleno sanitario, mientras que el segundo analiza la viabilidad del aprovechamiento económico de dicho combustible.

Una de las diferencias esenciales entre las energías renovables y las energías convencionales es la predictibilidad. Una planta térmica que utiliza combustibles fósiles puede conocer la energía que obtendrá a partir de una cierta cantidad de insumo y dar por descontada su disponibilidad. Las energías renovables, en cambio, presentan un grado mucho mayor de incertidumbre, tanto en cuanto a la disponibilidad efectiva de recursos como a la cantidad de producto que se obtiene por unidad de insumo. Una central eólica, por ejemplo, puede disponer de una estimación de la cantidad de viento esperable a lo largo de un año, y de la electricidad que se puede generar a partir de una determinada cantidad de viento, dada una cierta velocidad y dirección. Sin embargo, los rangos de incertidumbre (sobre todo en el primer caso) suelen ser amplios y nada garantiza un determinado nivel de operación. Algo similar ocurre con las centrales hidroeléctricas, especialmente en las hidroeléctricas de pasada, que carecen de reservorios de regulación: un período de uno o dos años particularmente secos puede tener un impacto negativo significativo en el flujo de fondos de una central de estas características.

Al igual que en los proyectos hidroeléctricos, eólicos, geotérmicos y solares, los rellenos sanitarios no conocen a priori y con certeza la disponibilidad de su insumo, sino que deben *estimarlo*. Si bien, los flujos entrantes de residuos por período de tiempo pueden ser conocidos, muchas variables adicionales que inciden en el proceso de descomposición que ocurre en sus celdas son en mayor o menor medida inciertas: la composición de los residuos (y por ende, el porcentaje de materia orgánica), la temperatura, las precipitaciones, la eficacia del equipo de recolección del biogás, etc. El modelado de la generación de biogás a partir de los desechos depositados en rellenos sanitarios, y su aprovechamiento económico son los temas principales de este trabajo.

Existen varios modelos matemáticos que se encargan de la estimación de la producción de biogás a partir de los residuos depositados en rellenos sanitarios. Las variantes más utilizadas son los modelos de descomposición de primer orden, que incluyen un número manejable de parámetros y cuya principal variable explicativa es el paso del tiempo. Los modelos más populares dentro de esta categoría son: el del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático y el de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los EEUU; ambos ampliamente utilizados tanto por la industria como por entidades gubernamentales. Existen modelos más complejos que reproducen de manera más realista las reacciones químicas complejas que se producen en las celdas de un relleno sanitario, así como el desplazamiento de gases y líquidos durante el proceso de descomposición de la materia orgánica; el problema con estos modelos es que su aplicabilidad se limita a escalas de laboratorio y requieren un mayor número de parámetros, muchos de los cuáles no se encuentran disponibles para los operadores de los sitios de disposición final (Lamborn, 2010).

Diversos trabajos realizaron aplicaciones de distintos modelos a sitios específicos (ver por ejemplo (Aguilar-Virgen et al., 2014a; de Souza et al., 2014); sin embargo, no existe una revisión integradora de la forma en que estos modelos han sido aplicados, así como de la calidad de sus resultados (es decir, el éxito de sus predicciones) y el impacto de éstos últimos en la evaluación económica de la viabilidad de los rellenos sanitarios.

El grado de incertidumbre detrás de las estimaciones de biogás está ampliamente documentado por la literatura (Aguilar-Virgen et al., 2014b, pág. 413), por lo que se espera un alto grado de variabilidad en los resultados del modelado por parte de distintos rellenos sanitarios. Sin embargo, si el modelo predictivo es insesgado, esta alta variabilidad *debería producirse alrededor del valor real*. Si los modelos sistemáticamente subestiman o sobreestiman la generación de biogás real, el sesgo necesariamente afectará el posterior análisis de la viabilidad económica de un relleno.

Si bien existen estudios que analizan predicciones realizadas para rellenos específicos (Lamborn, 2010; Strachan et al., 2008), en esta tesis el problema se aborda de una manera más amplia, al considerar numerosos sitios localizados en diversos países en vías de desarrollo. Las conclusiones obtenidas de este análisis se aplican a un caso puntual -el de los rellenos sanitarios de Tucumán, Argentina- luego de lo cual se discute la medida en que el mismo puede ser considerado “representativo” o extrapolable a otras regiones de Argentina o incluso de Latinoamérica.

1.4. Objetivos del trabajo.

El objetivo general de este trabajo es el de validar los modelos de generación de biogás, aplicando estos resultados para cuantificar la disponibilidad de dicho recurso en los rellenos sanitarios de la provincia de Tucumán (Argentina) y analizar la viabilidad económica de su aprovechamiento.

Con el fin de alcanzar el objetivo general anteriormente indicado, se establecieron los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar la diferencia entre las cantidades de biogás predicho y biogás efectivamente obtenido en rellenos sanitarios similares de países en vías de desarrollo.
2. Estimar el potencial de generación eléctrica de los residuos en Tucumán, específicamente los depositados en el relleno sanitario Overa Pozo, a partir de un modelo ajustado por el sesgo detectado empíricamente.
3. Realizar un análisis económico-financiero de la viabilidad de la generación eléctrica en dichos sitios, cuantificando el riesgo y sus determinantes (a la luz del sesgo detectado en los casos analizados) mediante un análisis de sensibilidad y de punto de equilibrio.
4. Discutir la representatividad de las conclusiones y su aplicabilidad a proyectos similares en Argentina y Latinoamérica.

1.5. Metodología y base de datos utilizada: el Mecanismo de Desarrollo Limpio.

Este documento analiza los resultados obtenidos por rellenos sanitarios localizados en diversos países en vías de desarrollo. A efectos de constituir una base de datos homogénea, se recurrió a la

información suministrada por los proyectos registrados dentro del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) de las Naciones Unidas. De manera resumida, el MDL abarca a todos aquellos proyectos que reducen emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en países en vías de desarrollo de una manera transparente y cuantificable. Los proyectos registrados dentro del MDL reciben un tipo de compensación denominado “Certificado de Reducción de Emisiones” (CER, por sus siglas en inglés), que se cuantifica en toneladas de CO₂ equivalentes y que puede ser vendido a aquellos países con metas de reducción de emisiones. De este modo, el mecanismo funciona como una fuente de financiamiento adicional para proyectos “limpios”.

Los tipos de proyectos que pueden registrarse dentro de este sistema son numerosos, y entre ellos los de energías renovables han sido los predominantes. Debido a la gran relevancia de dicho mecanismo para los objetivos del trabajo, el mismo se discute en el capítulo 3. Como se verá más adelante, la base de datos del MDL constituye una fuente de información abundante, aunque, por esta misma razón, dispersa. A efectos de este trabajo, se partió de un total de 40 casos de estudio, de entre los cuáles se eligieron aquellos con información disponible y comparable dentro del MDL. En cada caso, se recopilaron los principales parámetros que inciden en los resultados de sus predicciones, así como también las mediciones ex-post tomadas tras la implementación de los respectivos proyectos; esto permitió la comparación entre lo “esperado” y lo “efectivamente obtenido”. Antes de utilizar los datos, éstos debieron ser homogeneizados para permitir la comparación entre proyectos y a través del tiempo.

Una vez que se obtuvo un modelo “re-calibrado”, el mismo se aplicó a los datos de residuos generados en la provincia de Tucumán, con el fin de estimar la generación potencial de biogás en sus rellenos. La viabilidad del aprovechamiento económico se evalúa considerando costos estándar

para este tipo de tecnología, y tomando en cuenta el marco regulatorio y de incentivos disponibles en Argentina. Este segundo modelo permite responder cuestiones como la determinación de una tarifa mínima para la rentabilidad de proyecto, o la escala mínima necesaria para que los ingresos sean iguales o superiores a los egresos, lo que en economía se conoce como “análisis de punto de equilibrio”.

1.6. Organización de este documento.

El presente documento se divide en siete capítulos. La introducción discute aspectos generales relacionados con los RSU y presenta un primer acercamiento a la temática. El capítulo 2 presenta la temática del modelado de biogás extraído de rellenos sanitarios, incluyendo una breve discusión del proceso de descomposición de los residuos en las respectivas celdas, así como una revisión teórica de algunos de los principales modelos utilizados por la industria. El MDL, junto con algunos datos preliminares de esta base de datos son el tema del capítulo 3. Los resultados de este primer gran eje temático (el modelado de biogás) se presentan en el capítulo 4.

El capítulo 5 introduce a la provincia de Tucumán en el contexto de la República Argentina. Adicionalmente a información general de la provincia y el marco regulatorio nacional y provincial, se discuten los intentos previos de aprovechamiento energético de biogás. El capítulo 6 se nutre de la información presentada en los capítulos anteriores para realizar el modelado económico-financiero de un proyecto hipotético de generación de electricidad, utilizando los desechos almacenados en el principal relleno sanitario de la provincia. A la luz de este caso concreto es posible analizar el impacto que el sesgo en el modelado del biogás tendrá sobre el modelado de la viabilidad económica.

Capítulo 1: Introducción.

La tesis concluye en el capítulo 7, que repasa los resultados principales del estudio y sus implicancias. Adicionalmente, se discuten futuras líneas de investigación y la posibilidad de extrapolar las conclusiones a otras regiones e incluso otros países de características similares.

Capítulo 2: Modelado de biogás generado en rellenos sanitarios.

2.1. Rellenos sanitarios: conceptos básicos

Los sitios de disposición final se clasifican en las siguientes categorías, de acuerdo a IPCC (2006):

1. Rellenos anaeróbicos con manejo: la disposición de los residuos se realiza de manera controlada, existe control de incendios, y al menos una de los siguientes elementos: (i) material de cobertura, (ii) compactación mecánica o (iii) nivelación de los desechos.
2. Rellenos semi-aeróbicos con manejo: incluyen disposición controlada de los residuos y las siguientes estructuras para introducir aire al interior de las celdas: (i) cobertura permeable, (ii) sistema de drenaje de lixiviados, (iii) estanques de regulación, y (iv) sistemas de ventilación de gases.
3. Sitios no manejados profundos: los sitios que no cumplen los requisitos de las categorías anteriores, pero cuya profundidad es mayor o igual a cinco metros de altura.

4. Sitios no manejados superficiales: los sitios que no cumplen los requisitos de las categorías anteriores, pero cuya profundidad es menor a cinco metros de altura.
5. Sitios no categorizados

En el presente trabajo se consideran, específicamente, los rellenos sanitarios en los que existen claras condiciones anaeróbicas, así como un manejo adecuado de los desechos que allí ingresan. Un relleno sanitario comprende las obras de ingeniería necesarias para la disposición final de residuos sólidos sobre la superficie del suelo, de manera tal que se minimice el impacto en el ambiente. En particular, se busca reducir la proliferación de vectores y de olores, así como el control del gas combustible (originado por la descomposición de los residuos) y los jugos tóxicos (llamados *lixiviados*, que se originan por el contacto del agua de lluvia con los residuos) que se acumulan en el interior de las celdas de los rellenos.

El relleno sanitario puede realizarse a nivel superficial (método de área) o subterráneo (método de trincheras), e incluye una capa de impermeabilización en el fondo. La misma consta de alguna combinación de suelo arcilloso, una o más láminas de una membrana sintética de baja permeabilidad o “*geomembrana*”, y una capa de amortiguamiento, sobre la cual se extienden los residuos para ser recubiertos con tierra al término de cada jornada de trabajo. Esta cobertura diaria consiste, por lo general, del mismo suelo excavado para la construcción de las secciones del relleno. Adicionalmente, la cobertura final (es decir, la que cierra definitivamente la sección) incluye material vegetal, que contribuye a la estabilización del suelo; la base de cada sección posee una inclinación que facilita la recolección de los lixiviados mediante un sistema de tuberías. Los lixiviados no sólo constituyen un riesgo para las aguas subterráneas, sino también para los sistemas

Capítulo 2: Modelado de biogás obtenible en rellenos sanitarios.

de extracción de biogás; por ejemplo, al atascar las tuberías. Por estas razones, algunos rellenos cuentan con sistemas de extracción y tratamiento de lixiviados *in situ*.

La Figura 2.1 presenta los principales componentes de un relleno sanitario.

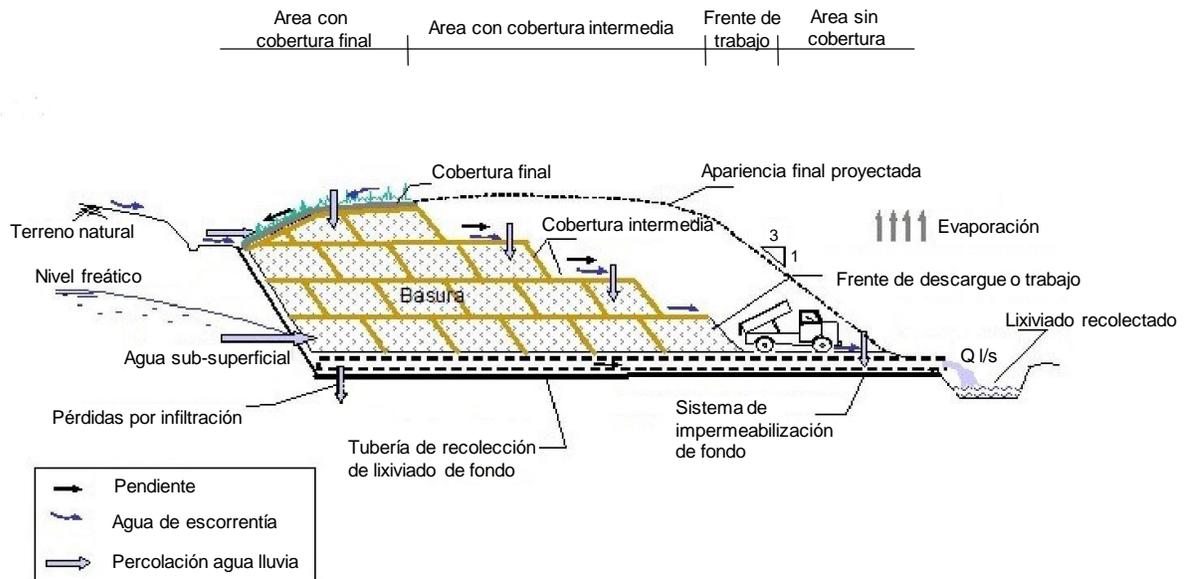


Figura 2.1. Esquema de un relleno sanitario. Reimpreso de Robayo Avellaneda (2012).

La descomposición de los residuos da origen a diversos gases, principalmente metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Por su carácter inflamable y combustible, el metano es un gas peligroso que debe ser monitoreado y sujeto a control. Para ello se utilizan tuberías de recolección, ya sea para venteo a la atmósfera o para combustión. Por su alto valor calorífico, entre 25.4 y 100 TJ/Gg de acuerdo a IPCC (2006), el biogás puede aprovecharse con fines energéticos, ya sea para la producción de electricidad, de calor o incluso para su procesamiento y envasado como gas natural.

Debido al proceso de formación de biogás, la presión en el interior del relleno es por lo general mayor a la presión atmosférica, lo que genera un gradiente en virtud del cual el gas del sitio tenderá

a moverse hacia el exterior. Mediante la instalación de senderos de menor permeabilidad es posible aprovechar este movimiento natural para conducir al gas en la dirección deseada, lo que se conoce como “control pasivo” del biogás.

Un sistema de “recolección activa”, en cambio, consiste en controlar el flujo del biogás mediante el uso de vacíos inducidos (Tchobanoglous y Kreith, 2002). Para ello, se utilizan pozos de extracción vertical u horizontal, rellenos con grava, dentro de los cuáles se coloca una tubería plástica -por lo general, de policloruro de vinilo (PVC) o de polietileno de alta densidad (HDPE)- con perforaciones que permiten el paso del gas. Ambas variantes se ilustran en la Figura 2.2.

Los pozos verticales se utilizan en áreas cuyo relleno ha sido completado. Están compuestos por la tubería, el relleno de grava, un tapón de bentonita (un material arcilloso que impide el paso de aire al interior del pozo, colocado alrededor de la parte superior de la tubería) y un cabezal de pozo (que permite controlar el vacío aplicado y tomar muestras de la temperatura, presión y composición del biogás) (GMI y U.S. EPA, 2012).

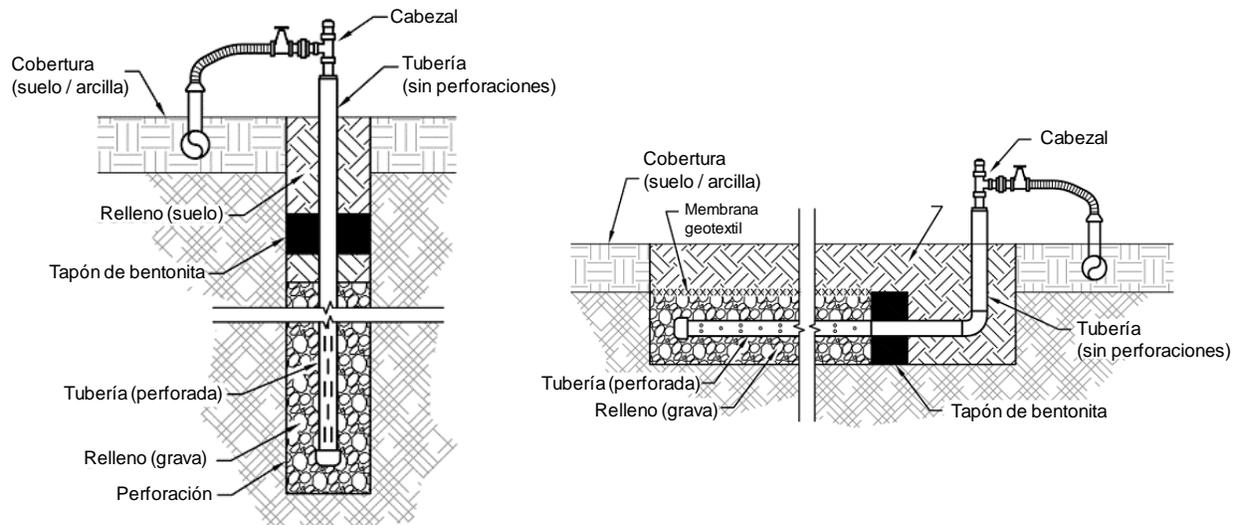


Figura 2.2. Pozos de extracción vertical (izq.) y zanjas para extracción horizontal (der.). Reimpreso de GMI y U.S. EPA (2012).

Los pozos horizontales pueden ser instalados en zonas que continúan recibiendo residuos, o en sitios antiguos donde la cantidad de lixiviado en el fondo de las celdas dificulte el uso de pozos verticales (Terraza et al., 2007). La zanja es cavada con una retroexcavadora, luego de lo cual se introduce la tubería plástica y se rellena con grava. Nuevamente, se utiliza un tapón de bentonita para aislar la zanja. Es recomendado el uso de una membrana geotéxtil para su recubrimiento, teniendo en cuenta que en la parte superior podrán colocarse residuos adicionales (GMI y U.S. EPA, 2012).

2.2. Generación de biogás a partir de residuos

Los rellenos sanitarios funcionan como reactores bioquímicos cuyos insumos son los residuos sólidos y el agua, y los productos obtenidos son el biogás y los lixiviados (Tchobanoglous y Kreith, 2002).

La mayor parte del biogás³ se genera por la descomposición bacteriana de la materia orgánica presente en residuos como comida, desechos de jardinería, papel, madera y algunos textiles (ATSDR, 2001). El biogás se compone principalmente de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua, hidrógeno (H_2) y otros gases; las participaciones de cada componente varían de acuerdo a la etapa de la descomposición. La literatura clasifica el proceso de descomposición en cinco fases, de acuerdo a los gases que se producen en cada una de ellas, y cuya evolución se resume de manera esquemática en la Figura 2.3.

Durante la primera fase (“fase de ajuste”), la descomposición es realizada por bacterias aeróbicas provenientes principalmente de la cobertura diaria, los propios residuos o la recirculación de lixiviados. Los rellenos modernos, al utilizar técnicas de compactación al disponer los residuos, facilitan la salida del oxígeno, por lo que el stock de este gas se agota en unas pocas semanas. Durante la etapa aeróbica, el carbono se convierte en dióxido de carbono y agua por medio de un proceso conocido como “hidrólisis”. Las bacterias aeróbicas consumen oxígeno mientras descomponen las cadenas moleculares complejas de carbohidratos, proteínas y lípidos que

³ Otros procesos que contribuyen a la formación de biogás son la volatilización de compuestos orgánicos en los residuos o las reacciones químicas de compuestos químicos presentes en los residuos.

conforman los residuos (ATSDR, 2001). Si el relleno sanitario continúa llenándose, algunas áreas estarán en la etapa aeróbica, aun cuando el resto del sitio haya pasado a la fase anaeróbica.

En la fase II (transición), la hidrólisis deja lugar a un proceso llamado “acidogénesis”, donde se generan ácidos grasos volátiles e hidrógeno (H_2). Conforme el relleno sanitario se vuelve anaeróbico, los nitratos y sulfatos son reducidos a nitrógeno gaseoso y ácido sulfhídrico. En la fase III (fase ácida), el proceso dominante es el de “acetogénesis”. Las bacterias anaeróbicas (llamadas “acidógenos”) convierten los compuestos creados por las bacterias de las fases anteriores en ácidos acéticos, lácticos y fórmicos, así como en alcoholes como metanol y etanol. El relleno se torna altamente ácido, por lo que aún no hay formación de metano. La acidez del medio combinada a la humedad presente en los residuos provoca la disolución de ciertos nutrientes y genera disponibilidad de fósforo y nitrógeno para las diversas especies de bacterias presentes. Los subproductos de esta fase son dióxido de carbono, hidrógeno y amoníaco (Lamborn, 2010; Tchobanoglous y Kreith, 2002).

Durante la fase IV (de fermentación de metano) se vuelve predominante otro grupo de microorganismos, que convierten el ácido acético y el gas hidrógeno de la fase anterior en metano y dióxido de carbono. Se trata de la fase crucial para el potencial aprovechamiento energético de los residuos: si las condiciones no son favorables para la proliferación de las bacterias metanogénicas, el sitio se volverá cada vez más ácido por la acumulación de ácidos grasos volátiles, lo que a su vez repercutirá en la acidez del lixiviado. Sin embargo, en la mayoría de los rellenos sanitarios (con suficiente tamaño, profundidad y la cobertura adecuada para impedir el ingreso de aire y otros elementos), la actividad metanogénica transcurre con normalidad y el metano alcanza su máxima participación como porcentaje del total de biogás, entre 50% y 60%.

El tiempo requerido para alcanzar esta fase dependerá de las características del sitio, la disposición de los residuos, el microclima y el contenido de humedad. La mayoría de los rellenos alcanzan esta etapa entre seis y doce meses después de la recepción de los desechos, luego de lo cual la composición de los gases se estabiliza por un período que puede durar unos 20 a 30 años (Lamborn, 2010). Si bien, la fase IV es el período de la descomposición que es “capturado” por los modelos matemáticos que intentan predecir la generación de biogás, es importante tener en cuenta que ésta será afectada por el resultado de las fases que la preceden.

Por último, en la fase V (fase de maduración), las tasas de producción de metano y dióxido de carbono comienzan a decrecer conforme el lixiviado se pierde en el fondo del relleno, llevándose nutrientes y dejando sustratos de degradación lenta.

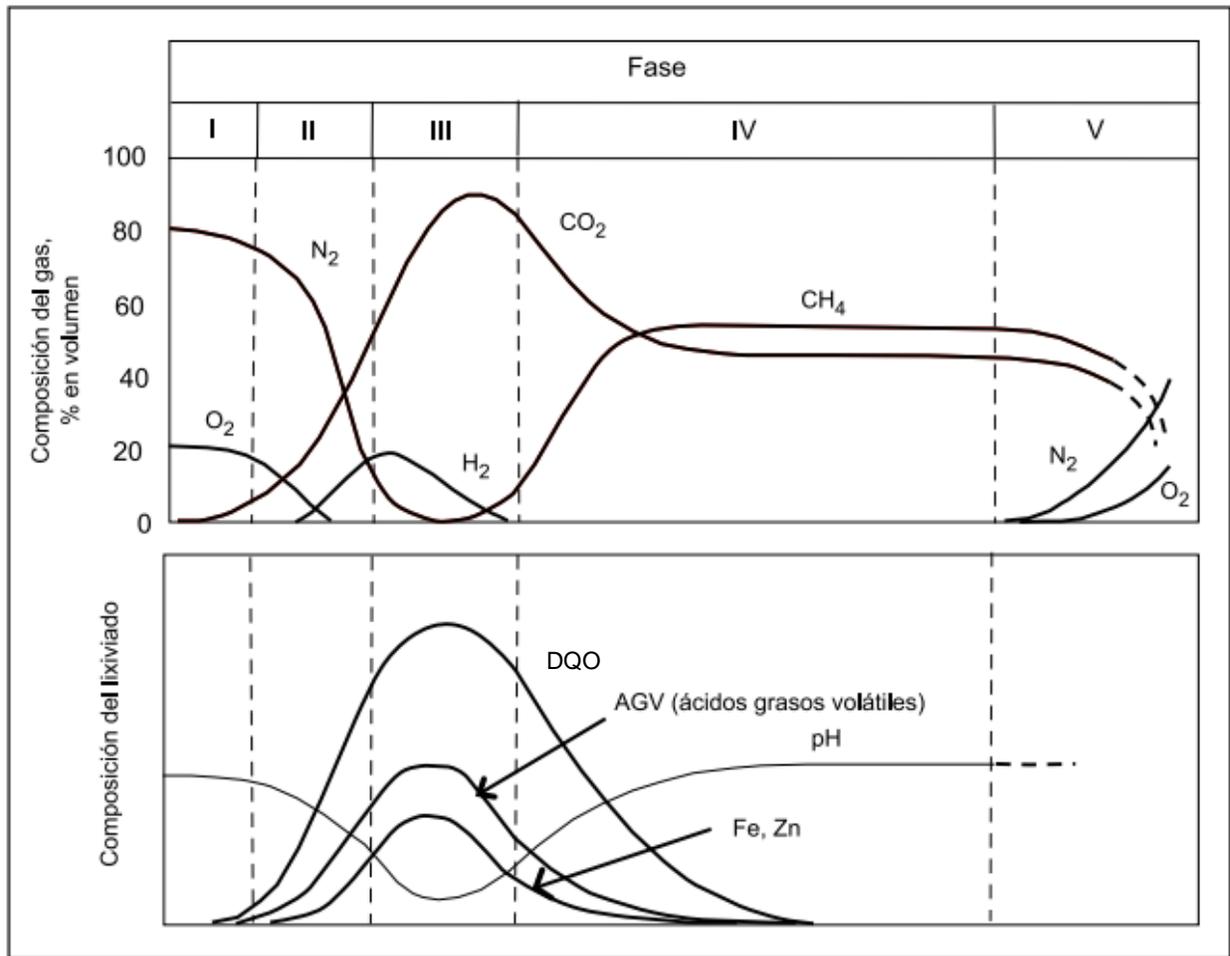


Figura 2.3. Fases de la descomposición de la materia orgánica de los residuos. Reimpreso de Tchobanoglous y Kreith (2002).

2.3. Factores que afectan la generación de biogás

La generación de biogás es un proceso sumamente complejo, dependiendo de un amplio número de factores, muchos de los cuales no se encuentran bajo el control de los diseñadores / operadores de los rellenos sanitarios. Lamborn (2010) discute los principales determinantes de la generación de biogás, que se resumen a continuación. La Figura 2.4 los presenta de manera esquemática.

1. *Composición de los desechos*: Afecta tanto la cantidad total como la tasa de generación de metano en un relleno. Si los desechos contienen un porcentaje bajo de materiales de rápida degradabilidad, se obtendrán bajos flujos de biogás con menores concentraciones de CH₄. La celulosa es uno de los principales proveedores de carbono para la generación de metano.
2. *Temperatura*: La temperatura dentro de la celda atraviesa grandes cambios hasta tanto se alcanza la fase metanogénica, y afecta el tipo de bacteria que controla el proceso de generación de biogás. Las bacterias responsables por la generación de metano, llamadas *mesofílicas* y *termofílicas*, necesitan temperaturas entre los 30 y los 60 °C. Los desechos almacenados en secciones con una profundidad mayor a cinco metros quedan aislados de la temperatura ambiente y sus variaciones a lo largo del día y la temporada. Christensen et al. (1996) reportan que la generación de metano ocurre a temperaturas más altas dentro del relleno.
3. *Contenido de humedad*: Es uno de los principales determinantes ya que cumple numerosas funciones dentro de las celdas. La humedad provee el medio de transporte de bacterias y nutrientes a lo largo del relleno, al tiempo que permite diluir toxinas como metales pesados y ácidos.
4. *Niveles de pH*: La actividad de todas las bacterias está afectada por el nivel de acidez del entorno, y el rango óptimo para la generación de metano se encuentra en niveles de pH entre 6 y 8. Niveles fuera de este rango pueden deberse a la presencia de desechos industriales, ácidos, alcalinos o una elevada concentración de ácidos grasos volátiles de la fase III.
5. *Nutrientes*: Las distintas bacterias que intervienen en el proceso de descomposición requieren carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, entre otros. La falta de

homogeneización de los desechos puede generar insuficiencia local de algunos nutrientes, perjudicando alguna de las fases de la degradación.

6. *Tamaño de las partículas:* Los desechos triturados pueden tener un efecto positivo en la generación de biogás, debido al incremento de la fracción de superficie disponible para interacción con las bacterias que realizan la descomposición. La densidad de compactación también puede modificar el potencial de absorción de agua, aunque es importante tener en cuenta que una menor compactación también disminuye la capacidad de almacenamiento del sitio.
7. *Microclima:* Se refiere a las condiciones de temperatura y presión en el área donde se produce la descomposición. El grado en el que la misma se ve afectada por la temperatura ambiente estará determinado por la profundidad de la sección del relleno. Sin embargo, la mayoría de los sitios tienen una profundidad mayor a diez metros, lo que aísla los procesos de cambios en la temperatura exterior. Respecto a la presión, la presencia de grietas en la cobertura permitirá que el biogás se escape a la atmósfera (o, incluso, por las paredes laterales).
8. *El sistema de extracción:* El mismo equipo de extracción de biogás puede afectar el proceso de generación de metano si se intenta extraer más biogás del que se genera. Esto ocurre cuando el vacío aplicado es excesivo o ante una falla en el pozo de extracción, lo que podría conducir oxígeno de la superficie hacia el interior del relleno, interrumpiendo así la formación de metano.

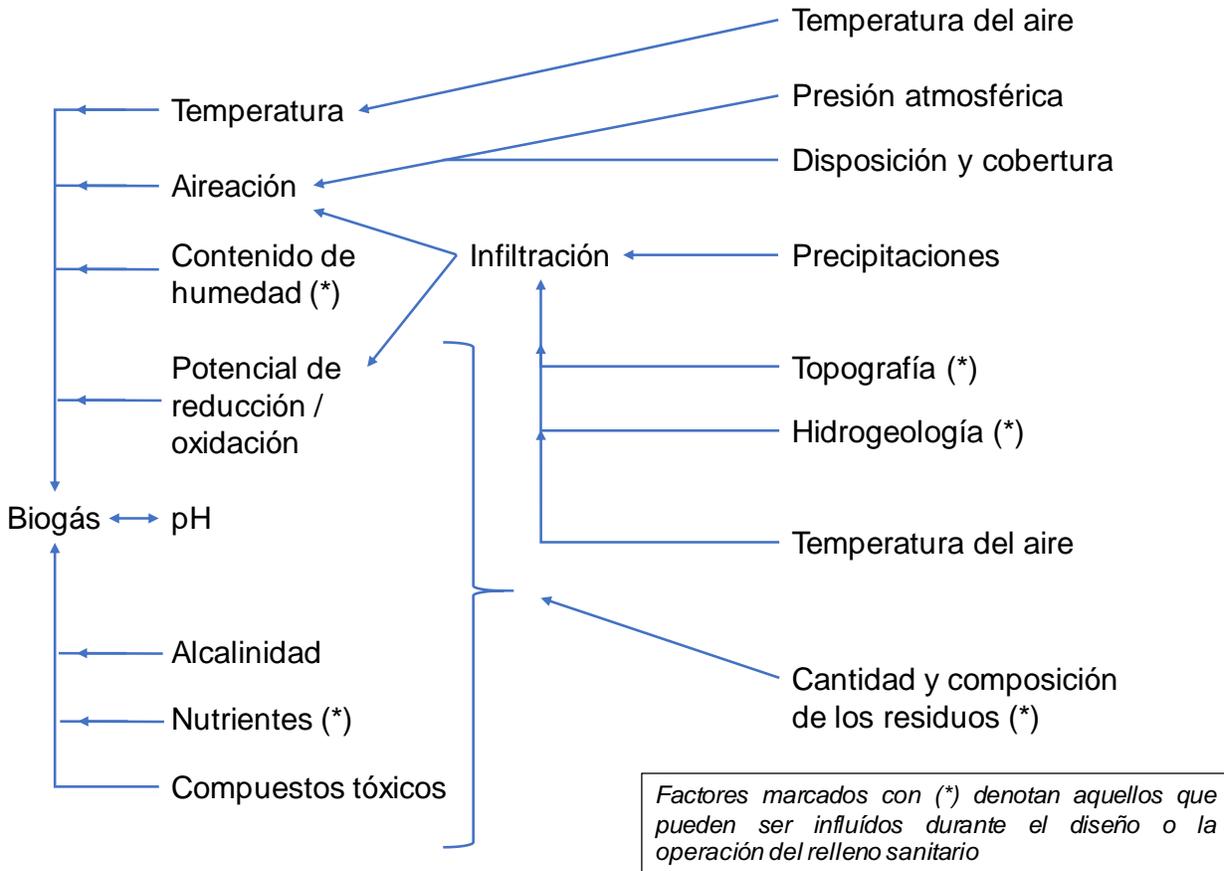


Figura 2.4. Factores que afectan la producción de biogás. Reimpreso de Lamborn (2010).

Es importante tener presente la complejidad de este proceso. Muchos de los factores tienen un impacto cuya magnitud no se conoce por completo o no se produce de manera lineal. En algunos casos, el hecho de que un factor desencadene otros efectos (que a su vez pueden incidir sobre la velocidad de la generación o la cantidad total generada) impide conocer incluso el sentido del impacto final. La variedad de factores que afectan la generación de metano tiene por consecuencia que el biogás de cada relleno sea “único”, lo que a su vez dificulta la construcción de modelos precisos y de aplicación universal.

2.4. Modelos de generación de biogás.

Un balance completo de la generación de biogás en un relleno sanitario considera los siguientes elementos (Spokas et al., 2006):

$$\begin{aligned} \text{Gas generado} = & \text{Gas recolectado} + \text{gas emitido a través de la} & (2.1) \\ & \text{cubierta} + \text{gas oxidado} + \text{gas migrado} + \Delta \text{ gas} \\ & \text{almacenado en el sitio} \end{aligned}$$

El cociente entre gas recolectado y gas generado es lo que se conoce como “eficiencia de recolección”, un parámetro clave que discutiremos en mayor profundidad en este capítulo. Dicho cociente es menor que uno, lo que señala que los demás términos en la ecuación (2.2) son positivos. Una parte del biogás se escapa a la atmósfera a través de la cubierta (“gas emitido a través de la cubierta”) o a través de las paredes laterales del sitio (“gas migrado”). Una parte se oxida en la cubierta por acción de unos organismos denominados *metanotrofos* (“gas oxidado”), y por último, otra parte puede pasar a formar parte del “stock” de biogás almacenado en el sitio (“ Δ gas almacenado en el sitio”).

De todos estos términos, el único que puede ser medido con precisión es el gas recolectado, por lo que no se puede conocer con exactitud la generación total o, de manera similar, la eficiencia de recolección⁴.

⁴ Existen sin embargo *estimaciones* acerca de la magnitud de estos otros términos. Ver por ejemplo Spokas et al. 2006.

Como se vio en la sección anterior, la generación de biogás es función de muchos parámetros que inciden en la operación de diversos tipos de bacterias y procesos, la mayoría de los cuales no dependen del operador del sitio y/o se desconocen con anterioridad a la implementación del relleno. Un modelo funciona de manera análoga a un “mapa”, que simplifica algún aspecto de un fenómeno complejo, reduciéndolo a una serie de relaciones de causa/efecto más sencillas con el propósito de realizar predicciones “útiles”. Los modelos matemáticos de predicción de biogás buscan representar la cantidad de metano generado y capturado en un relleno sanitario como función de una serie de parámetros conocidos o estimables, como la cantidad de residuos, su composición, o algunas características del sitio o su entorno.

A grandes rasgos, los modelos matemáticos de producción de biogás pueden clasificarse en dos grupos. Por un lado, los utilizados por la industria para rellenos sanitarios de “escala real”, basados en datos sencillos y de fácil acceso (cantidades de residuos, condiciones climáticas, etc.). El segundo grupo abarca los modelos utilizados en escala de laboratorio, que requieren grandes cantidades de parámetros (los que, a una escala real, serían de muy difícil o imposible acceso) pero permiten realizar una caracterización más precisa de la generación del biogás, de los lixiviados y del movimiento de éstos dentro del sitio. Debido a que el propósito de esta tesis es el impacto de los modelos en el análisis económico de la viabilidad de generar energía a partir de biogás de

rellenos sanitarios, se discutirán únicamente los modelos utilizados por la industria “en campo”, esto es, en casos reales a escala completa⁵.

La mayoría de los modelos comúnmente utilizados en la industria utilizan funciones empíricas simples para estimar la tasa de metanogénesis, esto es, la fase IV del proceso de descomposición de materia orgánica descrito anteriormente (Lamborn, 2010). Los aspectos básicos de un modelo de generación de biogás incluyen la generación total de biogás (“cuánto” metano se genera) y el momento del tiempo en que éste se genera (“cuándo” se produce el metano). Terraza y Willumsen (2009) clasifican los modelos “de escala real” en los siguientes grupos:

1. *Modelos de orden cero*: Consideran a la cantidad de biogás como un monto constante y proporcional a la cantidad de residuos disponibles en el sitio. Permiten realizar estimaciones generales o globales de la cantidad de emisiones a escala nacional o regional en un año dado, pero al no considerar el paso del tiempo en el modelado, no se consideran una alternativa útil para la evaluación de rellenos específicos (Terraza y Willumsen, 2009).
2. *Modelos de primer orden con fase única*: Basados en una ecuación que asume que la cantidad total de residuos se descompone de manera exponencial, emitiendo una cantidad dada de metano por kilogramo de residuos o, equivalentemente, de materia orgánica. De esta manera, cada lote o camada de residuos genera una cantidad decreciente de biogás

⁵ El lector interesado en profundizar sobre modelos matemáticos utilizados a escala de laboratorio puede referirse al trabajo de Lamborn (2010).

conforme pasan los años (y la basura depositada se va degradando). El modelo LandGEM de la Agencia de Protección Ambiental de los EEUU pertenece a esta categoría.

3. *Modelos de primer orden multifase*: Similar a la categoría anterior, excepto en que se establecen varias categorías o tipos de residuos, a los cuales se les asigna una tasa de descomposición y de generación de metano diferente. El modelo del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) pertenece a esta categoría.

La validación de un modelo consiste en analizar el grado en el que éste constituye una representación precisa del fenómeno estudiado (Thacker et al., 2004). Como se mencionó anteriormente, un modelo puede ser utilizado para incrementar el entendimiento de un proceso o bien para realizar predicciones útiles para la toma de decisiones. La validación de los modelos presentada en esta tesis vendrá dada por la comparación de sus predicciones contra datos de la realidad.

Antes de presentar la validación empírica, las subsecciones siguientes discuten con mayor detenimiento los dos modelos principales utilizados por la industria: LandGEM (de primer orden, monofásico) y el modelo del IPCC (multifase). Los rellenos sanitarios para los cuáles se ha reunido información utilizan alguna versión de uno de estos dos modelos⁶.

⁶ Otros modelos citados en la literatura incluyen el modelo Scholl Canyon, el modelo Sherlon-Arleta, el de cinética de Palos Verdes, GasSim, EPER, y Afvalzorg, entre muchos otros. El lector puede referirse a los trabajos de Scharff y Jacobs, 2006 y Lamborn, 2010.

2.5. Modelo de la Agencia de Protección Ambiental de los EEUU: LandGEM

El modelo LandGEM fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los EEUU (US EPA, por sus siglas en inglés) con el propósito de estimar las emisiones de diversos gases - principalmente metano- en sitios de Norteamérica; sin embargo, ha sido empleado de manera extensa a nivel mundial, convirtiéndose en el modelo más utilizado por la industria (Lamborn, 2010; GMI y U.S. EPA, 2012). El mismo aplica un modelo de primer orden monofásico, calculando el flujo (o la masa) de biogás disponible por unidad de tiempo de acuerdo a la cantidad de residuos recibidos por el sitio y dos parámetros cuyos valores dependerán de las condiciones específicas del sitio: una tasa de descomposición de los residuos (o, equivalentemente, de generación de metano), k , y el potencial de generación de metano por unidad de masa de los residuos, L_0 . La generación viene dada por la siguiente expresión:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}} \quad (2.2)$$

donde:

Q_{CH_4}	=	Generación de metano en el año del cálculo para todo el sitio (m ³ /año)
i	=	Incrementos de tiempo de un año
n	=	(año del cálculo) – (año en el que se comienzan a recibir residuos)
j	=	Incremento de tiempo igual a 0.1 de un año
k	=	Tasa de descomposición de los residuos (año ⁻¹)
L_0	=	Generación potencial de metano (m ³ /ton)
M_i	=	Cantidad de residuos aceptados en el año i -ésimo de operación del relleno

t_{ij} = Edad de la sección j -ésima de los residuos M_i aceptados en el año i -ésimo de operación del relleno (años decimales, por ejemplo: 3.2 años)

El modelo LandGEM considera que los residuos generan biogás al inicio del año posterior al momento en que el sitio comienza a recibir residuos. Esto equivale a decir que la totalidad de los desechos depositados en un año ingresan al relleno exactamente en la mitad de dicho período, con las primeras emisiones de biogás ocurriendo el primero de enero del año posterior, es decir, seis meses después que los residuos fueran colocados en el sitio.

El valor del parámetro k indica la velocidad a la que se genera metano en el relleno sanitario. Cuanto más alto sea este valor, más marcado será el incremento interanual de la generación de biogás en los primeros años, y más brusca será la caída luego de llegar al pico máximo (Figura 2.5). De acuerdo al grado de humedad, la constante k podrá tomar un valor entre 0.01 (muy seco) y 0.7 (biorreactores) (U.S. EPA, 2005).

La Figura 2.5 muestra la curva de biogás correspondiente a diversos valores de k para una misma serie de residuos. En el ejemplo, el relleno sanitario hipotético recibe desechos en el período que va desde 2009 hasta 2030, con un valor inicial de 100,000 toneladas, creciendo a un ritmo de 2.5% anual. Nótese que un valor mayor de k no sólo aumenta la pendiente de las respectivas curvas (es decir, la aceleración en la generación del biogás), sino también la cantidad total de biogás generado a lo largo de la vida útil del sitio (esto es, el área bajo cada una de las curvas).

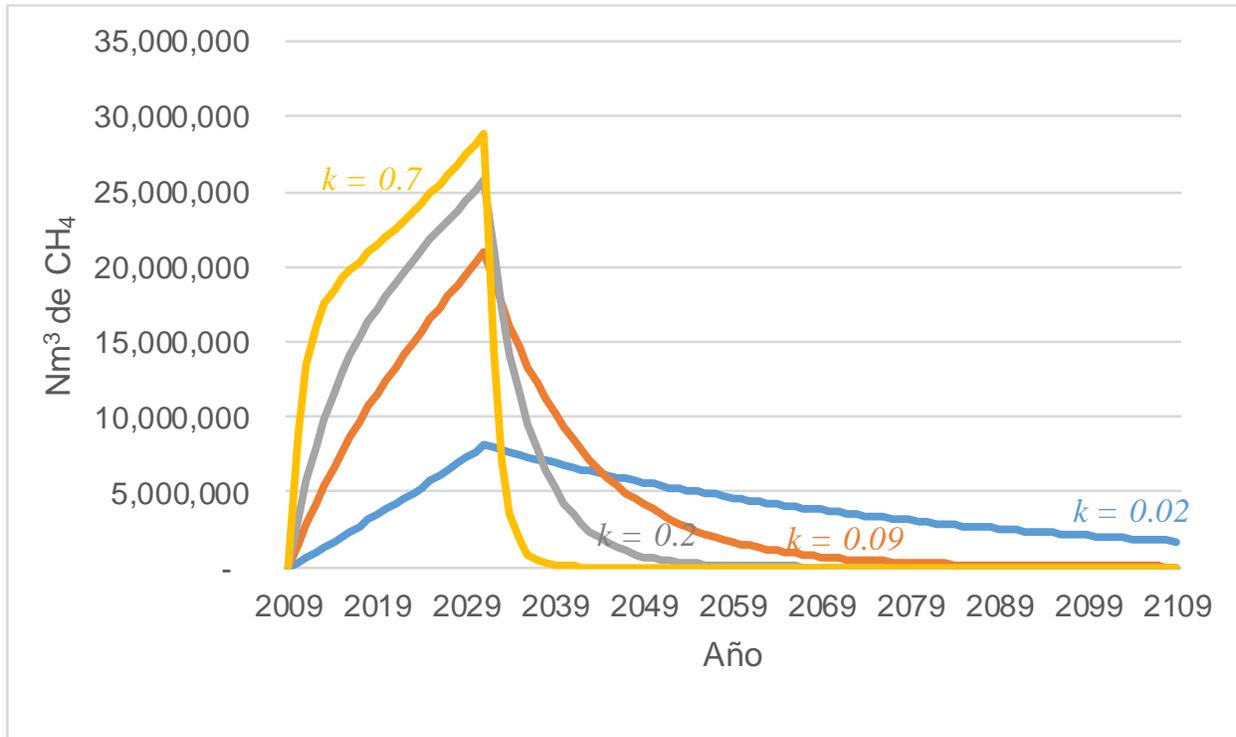


Figura 2.5. Generación de biogás en un relleno hipotético que recibe residuos entre 2009 y 2030, según el modelo LandGEM, para distintos valores del parámetro k .

El parámetro L_0 (generación potencial de metano) en la ecuación (2.2) representa la cantidad de biogás que se obtiene por unidad de masa de residuos; los valores para esta constante dependen del tipo de desechos y de las condiciones climáticas. Los biorreactores (condiciones de mayor humedad) presentan valores por defecto menores y los sitios de las zonas áridas reciben cifras más elevadas, siendo el rango entre 69 a 214 m^3/ton (U.S. EPA, 2009). La respuesta del mismo relleno hipotético de la figura anterior, para distintos valores plausibles de L_0 se presentan en la Figura 2.6.

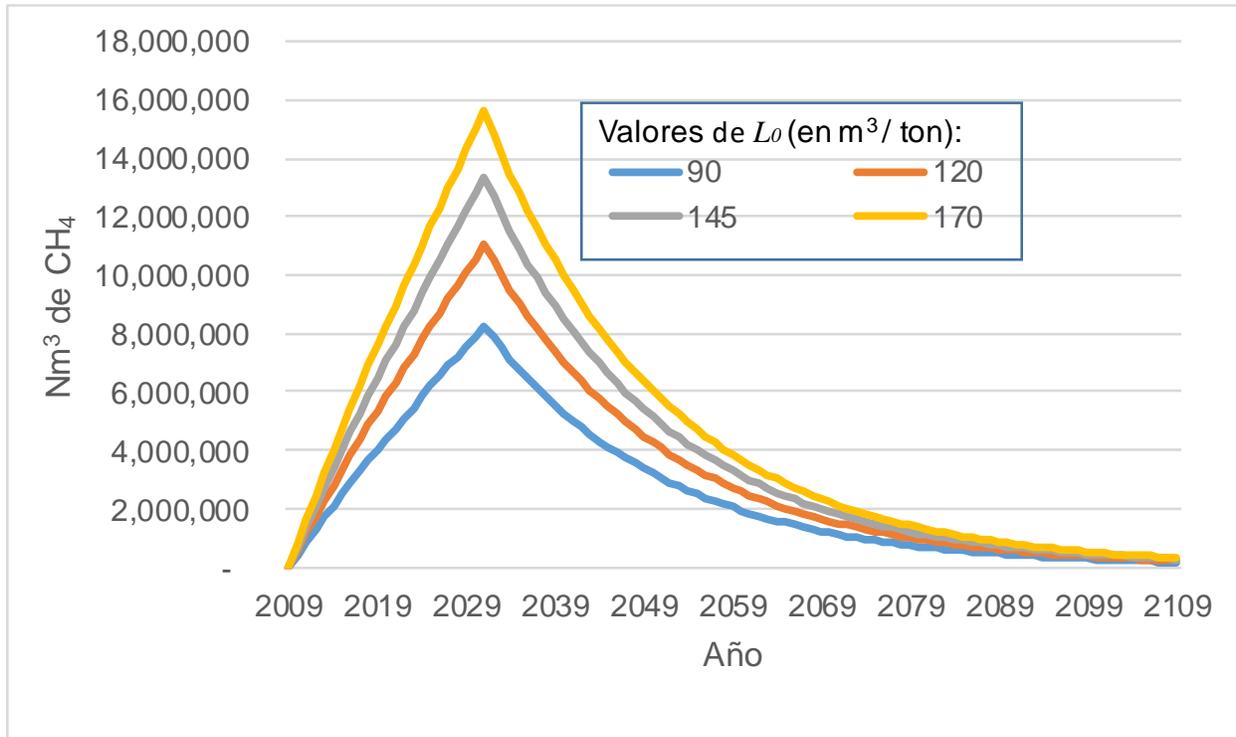


Figura 2.6. Generación de biogás en un relleno hipotético según el modelo LandGEM para distintos valores del parámetro L_0 .

En general, todos los modelos de primer orden presentan la máxima generación en el año posterior al último período en el que se reciben residuos (esto es, el último año en el que se agrega biogás de un nuevo lote de residuos). Una vez que todos los residuos ya se encuentran dispuestos en el sitio y han producido su primer año de emisiones, la curva de generación total del sitio es decreciente⁷, como se observa en las gráficas presentadas en esta sección.

⁷ En general, este comportamiento se registrará siempre que la cantidad de residuos anuales sea no-decreciente.

2.6. Modelo del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático elabora metodologías destinadas a calcular los inventarios de gases de efecto invernadero a nivel país. Su primera edición data del año 1994, mientras que una revisión -que introdujo sustanciales mejoras- se publicó en 1996 (IPCC, 1996). El primer modelo del IPCC, incluido con dicha revisión, considera una ecuación similar a la que utiliza el software LandGEM, discutido en la sección anterior. Una versión ligeramente modificada de esta misma expresión se publicó con la revisión del año 2000 (IPCC, 2000). En 2006, la misma institución optó por un modelo multifase, es decir, que acepta distintos tipos de residuos, en lugar de sólo uno, considerado “representativo”. Adicionalmente, la edición del 2006 introdujo una revisión conceptual respecto al momento en el que las emisiones comienzan a generarse (IPCC, 2006; Santos et al., 2015). Los modelos del IPCC del año 1996 y del 2000 consideran ecuaciones que calculan emisiones desde el mismo año en el que el sitio comienza a recibir residuos. El modelo del IPCC (2006) asume un rezago de un año entre la primera recepción de desechos y la primera emisión de biogás⁸.

La herramienta metodológica de UNFCCC para el cálculo de emisiones de rellenos sanitarios (UNFCCC 2015ba), utilizada por la mayoría de los proyectos en la base de datos de esta investigación, se basa en el enfoque multifase del modelo más reciente del IPCC (2006). A finales

⁸ Adicionalmente, IPCC (2006) abandona el uso explícito del parámetro L_0 (ver discusión en la sección 2.7)

Capítulo 2: Modelado de biogás obtenible en rellenos sanitarios.

de 2015, la versión más reciente de la herramienta de UNFCCC (UNFCCC 2015a) utiliza la siguiente ecuación⁹:

$$E_y = \varphi_y \cdot (1/\rho_{CH_4,y})(1 - OX) \frac{16}{12} F \cdot DOC_{f,y} \cdot MCF_y \sum_{x=1}^y \sum_j W_{j,x} \cdot DOC_j \cdot e^{-k_j(y-x)} (1 - e^{-k_j}) \quad (2.3)$$

con $y \geq x \geq 1$, y donde:

- E_y = Emisiones generadas en el año y -ésimo desde que el sitio recibe residuos, con $y = 1$, siendo el primer período en el que se reciben residuos (Nm^3)
- φ_y = Factor de corrección del modelo
- $\rho_{CH_4,y}$ = Densidad del metano en condiciones normales ($0^\circ C$ y 1 atm)
- OX = Factor de oxidación de la cubierta
- F = Fracción de CH_4 en el LFG
- $DOC_{f,y}$ = Fracción degradable del contenido orgánico de los residuos en el año y
- MCF_y = Factor de corrección de metano en el año y
- $W_{j,x}$ = Cantidad de residuos de la categoría j -ésima depositados en el año x
- DOC_j = Fracción de contenido orgánico de los residuos de la categoría j -ésima
- k_j = Tasa de descomposición de los residuos del tipo j -ésimo ($año^{-1}$)
- y = Año de evaluación de las emisiones (medido en años, iniciando con la recepción de los residuos)¹⁰;
- x = Período de tiempo que va desde $x=1$ hasta el año en el que se realiza la evaluación $x=y$.

⁹ Se modificó la ecuación original para expresar los resultados en Nm^3 , en lugar de tCO_2e .

¹⁰ Si $y = 1$, se tiene que $x = y = 1$ entonces $W_x = W_y = W_1$, es decir, y no mide año vencido sino año adelantado.

La Tabla 2.1 presenta los valores por defecto previstos en IPCC (2006), de acuerdo a las condiciones climáticas de cada región (temperatura media anual, precipitaciones y evapotranspiración potencial). Los parámetros restantes se resumen en la Tabla 2.2.

Tabla 2.1. Valores por defecto para DOC_j y k_j .

Tipo de residuo (j)	DOC_j	k_j			
		a.	b.	c.	d.
1. Madera	43%	0.02	0.03	0.025	0.035
2. Papel y cartón	40%	0.04	0.06	0.045	0.07
3. Alimentos y similares	15%	0.06	0.185	0.085	0.4
4. Textiles	24%	0.04	0.06	0.045	0.07
5. Desechos de jardinería	20%	0.05	0.1	0.065	0.17
6. Vidrio, plástico, metal y otros inertes	0%	0	0	0	0

Nota. Valores presentados en IPCC (2006). Clima tipo a. Boreal y templado seco ($MAT \leq 20^\circ C$; $(MAP/PET < 1)$); b. Boreal y templado húmedo ($MAT \leq 20^\circ C$; $MAP/PET > 1$); c. Tropical seco ($MAT > 20^\circ C$; $MAP < 1000$ mm) d. Tropical húmedo ($MAT > 20^\circ C$; $MAP > 1000$ mm).

MAT = Temperatura media anual ($^\circ C$)

MAP = Precipitaciones medias anuales (mm)

PET = Evapotranspiración potencial (mm)

Tabla 2.2. Valores por defecto para principales parámetros en el modelo del IPCC.

Parámetro	Notación	Valor	Unidad
Factor de corrección del modelo (ajuste por incertidumbre)	ϕ	0.75	-
Fracción del CH ₄ capturado y quemado en el sitio previo a la instalación del sistema actual de captura, si lo hubiera.	f	0	-
Densidad del CH ₄ en condiciones normales.	ρ_{CH_4}	0.0007168	tCH ₄ /Nm ³
Factor de oxidación de la cobertura.	OX	0.1	-
Fracción de CH ₄ en el biogás.	F	0.5	-
Fracción del contenido orgánico que puede descomponerse.	$DOC_{f,default}$	0.5	-
Factor de corrección del metano (para ajustar por descomposición aeróbica previo al establecimiento de condiciones anaeróbicas).	$MCF_{default}$	1	-

Nota: La densidad se evalúa a 0°C y 1 atm. El factor de corrección del metano ($MCF_{default}$) puede variar si las condiciones de manejo del sitio no son adecuadas.

La Figura 2.7 presenta la curva de emisión de metano correspondiente a una misma serie de residuos bajo distintas condiciones climáticas del sitio en el que se depositen. Nuevamente, las condiciones húmedas (en la figura, representadas por el escenario d) aseguran un crecimiento más acelerado y, en definitiva, una mayor disponibilidad total de biogás. En tanto, la Figura 2.8 y la Figura 2.9 muestran la participación relativa de cada tipo de residuo en el total de emisiones (en Nm³ y como porcentaje del total, respectivamente), siempre para el mismo relleno hipotético. Dependiendo del valor de k y DOC_j de cada categoría j , su participación cambiará más rápido o más lento conforme pasen los años.

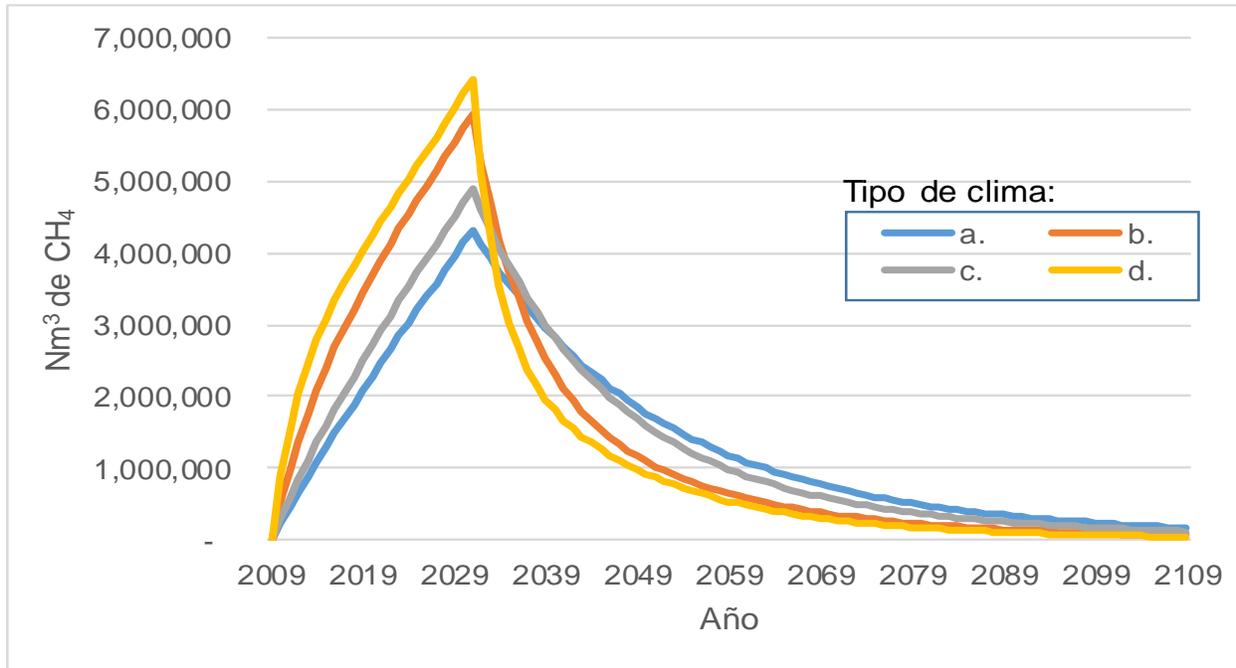


Figura 2.7. Generación de biogás para un relleno hipotético, de acuerdo a las condiciones climáticas: *Clima tipo a. Boreal y templado seco (MAT ≤ 20°C; (MAP/PET < 1); b. Boreal y templado húmedo (MAT ≤ 20°C; MAP/PET > 1); c. Tropical seco (MAT > 20°C; MAP < 1000 mm) d. Tropical húmedo (MAT > 20°C; MAP > 1000 mm).*

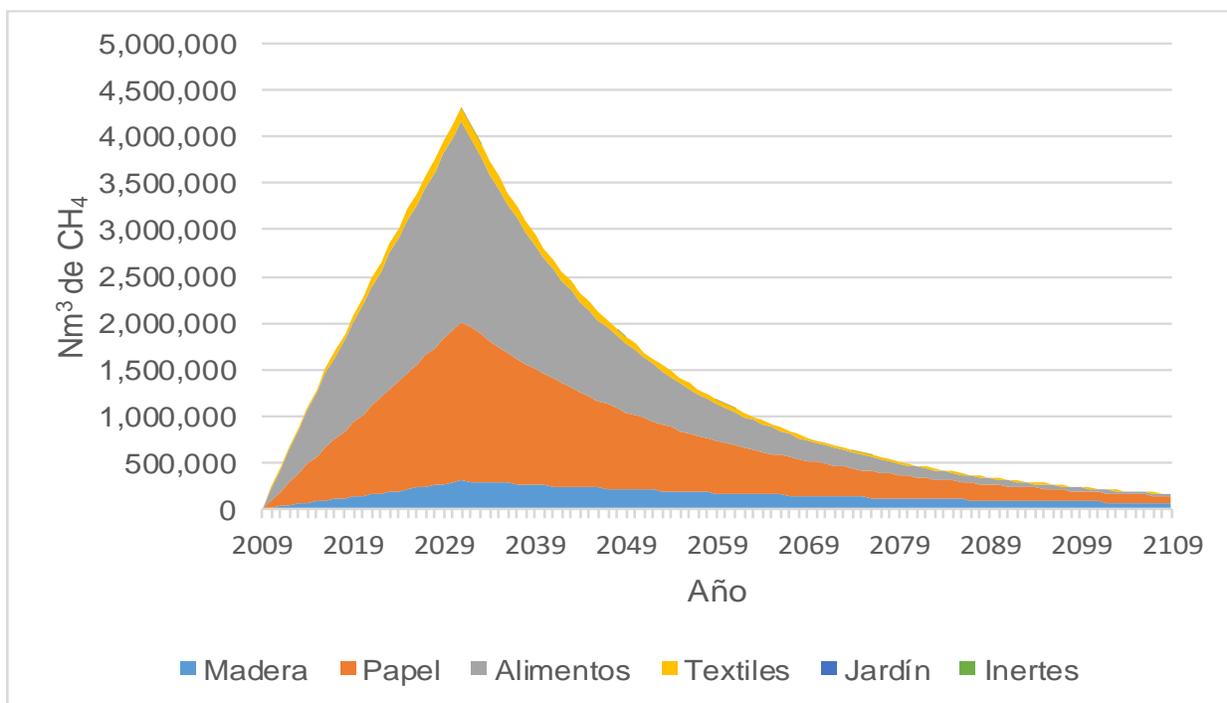


Figura 2.8. Contribución absoluta de cada tipo de residuo a las emisiones totales de CH₄ en un relleno hipotético (clima tipo: d).

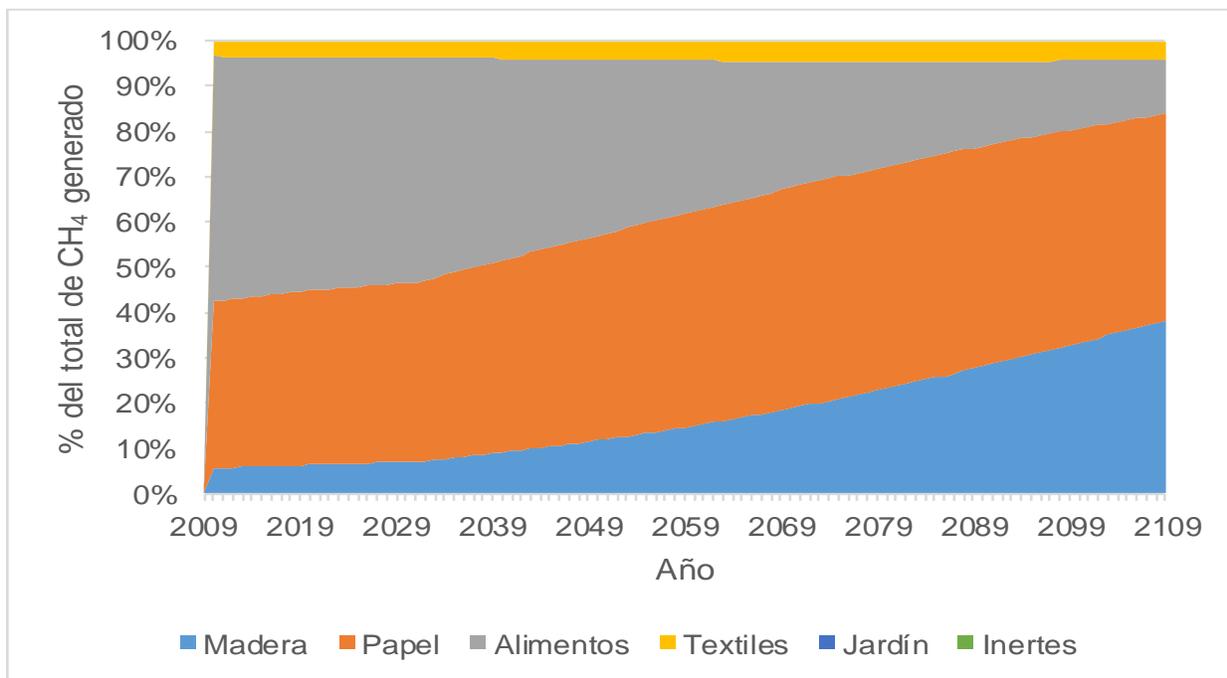


Figura 2.9. Contribución relativa de cada tipo de residuo a las emisiones totales de CH₄ en un relleno hipotético (clima tipo: d).

Como lo demuestran Santos et al. (2015), la herramienta del MDL considera una ecuación que prevé emisiones en el primer año de operaciones del relleno, esto es, en la línea de las versiones antiguas de los modelos del IPCC. Santos et al. (2015) demuestran que esta ligera variación tiene un impacto importante en el cálculo de emisiones de los primeros años, aun cuando el total de emisiones en el largo plazo sea muy similar utilizando cualquiera de los dos enfoques. Este resultado es de gran relevancia para el presente trabajo, ya que: a) la base de datos considerada se compone de sitios con tres a ocho años de información histórica, de acuerdo a la disponibilidad; b) los datos parecen sugerir una sobreestimación por parte de los modelos para este período inicial y de una magnitud similar a la reportada en el trabajo de Santos; y c) los resultados de los primeros años de operación son críticos en la determinación de la rentabilidad de los sitios.

Santos et al. (2015) sugieren la siguiente expresión (análoga a la ecuación (2.3) y con la misma interpretación para cada uno de sus parámetros), que resulta en un equivalente a la idea original de la metodología del IPCC (2006):

$$Ey = \varphi_y \cdot \rho_{CH_4,y} (1 - OX) \frac{16}{12} F \cdot DOC_{f,y} \cdot MCF_y \sum_{x=1}^y \sum_j W_{j,x} \cdot DOC_j \cdot e^{-k_j(y-x)} (e^{k_j} - 1) \quad (2.4)$$

con $y \geq x+1$

Utilizando el mismo relleno sanitario hipotético de la sección anterior es posible reproducir las conclusiones de Santos et al. (2015) con respecto a la comparación de las ecuaciones (2.3) y (2.4). La Tabla 2.3 muestra la generación total de biogás que resulta de la ecuación original y la ecuación corregida, lo que arroja una diferencia despreciable en el volumen total de biogás (<1% si se toman los 100 primeros años), contra una diferencia muy importante, considerando períodos “cortos” (de entre siete a diez años, con diferencias entre 32.5% y 21.5%, respectivamente). Un plazo de esta

magnitud puede ser considerado “corto” en relación al proceso de generación total de biogás en un relleno (en ocasiones, mayor a 50 años), pero el resultado de los diez primeros años de un proyecto puede tener una incidencia determinante en su análisis económico. Esto se discutirá con mayor profundidad cuando se evalué la rentabilidad del relleno sanitario de la provincia de Tucumán.

Tabla 2.3. Generación total de CH_4 para un mismo relleno hipotético, utilizando las ecuaciones (2.3) y (2.4).

Plazo	ΣE_y		Diferencia (%)
	Ecuación (2.3), en Nm^3	Ecuación (2.4), en Nm^3	
7 años	6,101,705	4,606,457	32.5%
10 años	11,768,781	9,685,391	21.5%
30 años	79,413,420	76,467,156	3.9%
100 años	141,463,236	141,297,229	0.1%

Nota. El sitio hipotético considera clima boreal y templado (definido según IPCC (2006)), con valores por defecto correspondientes a unos residuos compuestos en un 44.9% por alimentos, 30.7% material inerte, 17.1% papel o cartón, 4.7% madera, 2.6% textiles y 0% jardín.

Una vez compilada la base de datos con los rellenos elegidos como casos de estudio, se analizará el tipo de ecuación utilizada y el impacto de esta elección en la eficacia de las predicciones.

2.7. LandGEM vs IPCC: comparación de los modelos

El uso de terminología similar y el hecho de que ambos modelos sigan una cinética de primer orden puede prestarse a confusiones. Sin embargo, las ecuaciones de LandGEM y el IPCC son diferentes y llevan a resultados potencialmente muy distintos. La primera diferencia radica en el hecho de que mientras que el modelo del IPCC considera varios tipos de residuos, la ecuación de LandGEM no distingue categorías. Sin embargo, como podrá verse en esta sección, aun

Modelos de predicción de generación de biogás: análisis crítico y aplicación al caso de Tucumán, Argentina.

controlando por el tipo de residuos y buscando parámetros “equivalentes”, los modelos siguen arrojando resultados diferentes.

Una fuente de confusión está en los parámetros k y L_0 de la expresión (2.2), correspondiente a LandGEM. El primero de éstos se utiliza considerando la misma notación y con la misma interpretación (“tasa de generación de metano”) en las expresiones (2.3) y (2.4), ambas correspondientes al IPCC (ver, por ejemplo Scharff y Jacobs (2006), Vatzaki y Lazaridis (n.d.) y Chaudhary y Garg (2014)). Sin embargo, la simple comparación de las respectivas ecuaciones permite observar que k no actúa de la misma manera en cada una de ellas¹¹, por lo que aún utilizando valores equivalentes de dicho parámetro no se obtendrán las mismas predicciones.

La comparación de L_0 es menos directa, ya que el modelo del IPCC carece de dicho parámetro de manera explícita. Sin embargo, el propio IPCC indica el método para calcular una cifra equivalente (IPCC, 2006)¹²:

$$L_0 = DOC_j \cdot DOC_f \cdot MCF \cdot F \cdot \frac{16}{12} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.5)$$

Sin embargo, mientras que el L_0 del IPCC debe ser interpretado como metros cúbicos por unidad de masa del *contenido orgánico degradable*, el mismo parámetro en el modelo LandGEM

¹¹ En la ecuación (2.2), k multiplica a la cantidad de residuos (M_i), lo que no ocurre en las ecuaciones (2.3) y (2.4).

¹² Se agregó la densidad para expresar los valores en Nm³/ton.

representa los metros cúbicos por unidad de masa *de los residuos* depositados. Así, ambas cifras no son directamente comparables.

Utilizando la equivalencia (2.5) y utilizando promedios ponderados para obtener un valor único para k y DOC_j , se compararon las predicciones de ambos modelos, en cada uno de los cuatro tipos de clima previstos en IPCC (2006). Adicionalmente, la comparación se realizó tomando en cuenta dos escenarios: desechos con “alta” proporción de materia orgánica (70%) y residuos con “baja” proporción de materia orgánica (30%), cubriendo de este modo el rango de climas¹³ y tipos de desechos posibles. Los resultados se presentan en la Figura 2.10 y la Figura 2.11.

¹³ Clima tipo a. Boreal y templado seco (MAT \leq 20°C; (MAP/PET < 1); b. Boreal y templado húmedo (MAT \leq 20°C; MAP/PET > 1); c. Tropical seco (MAT > 20°C; MAP < 1000 mm) d. Tropical húmedo (MAT > 20°C; MAP > 1000 mm).

MAT = Temperatura media anual (°C)

MAP = Precipitaciones medias anuales (mm)

PET = Evapotranspiración potencial (mm)

Capítulo 2: Modelado de biogás obtenible en rellenos sanitarios.

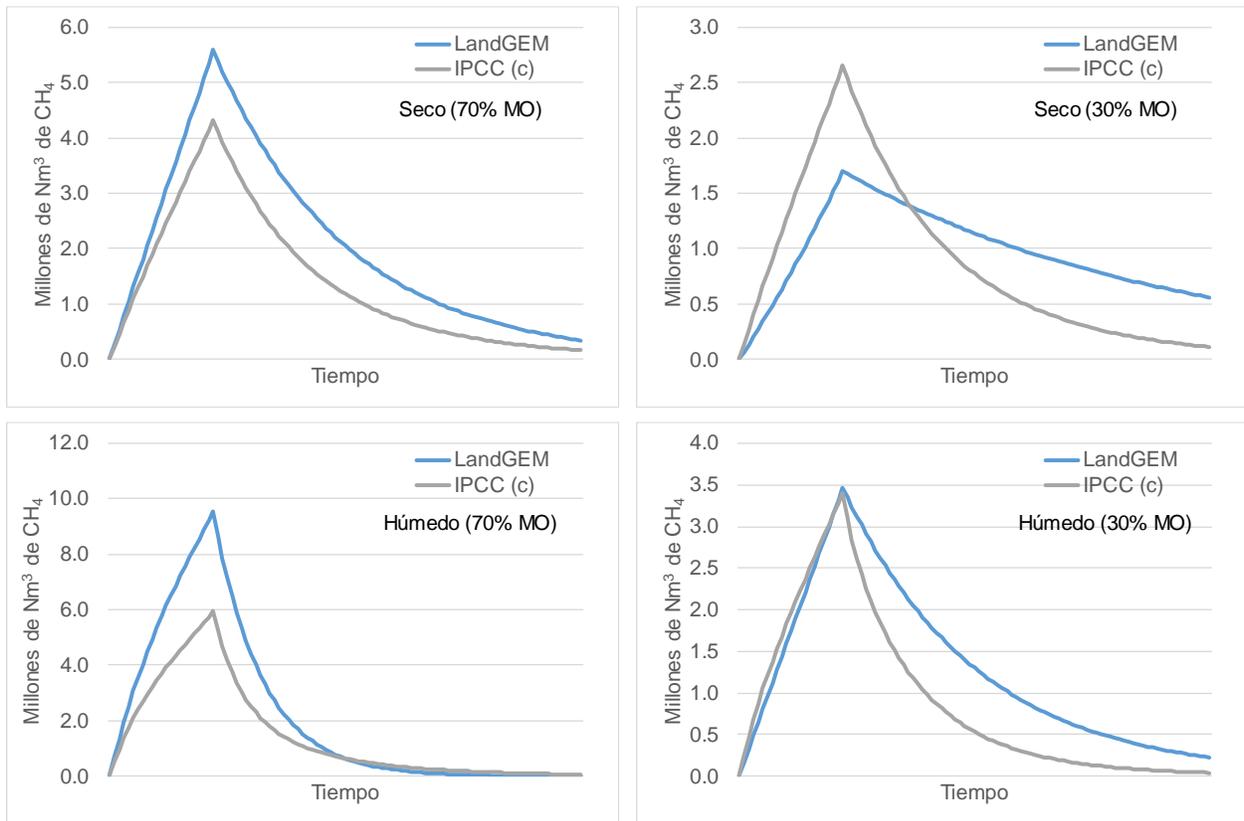


Figura 2.10. Comparación entre las predicciones de LandGEM e IPCC en clima boreal y templado seco / boreal templado húmedo para distintos niveles de materia orgánica (MO) en los residuos.

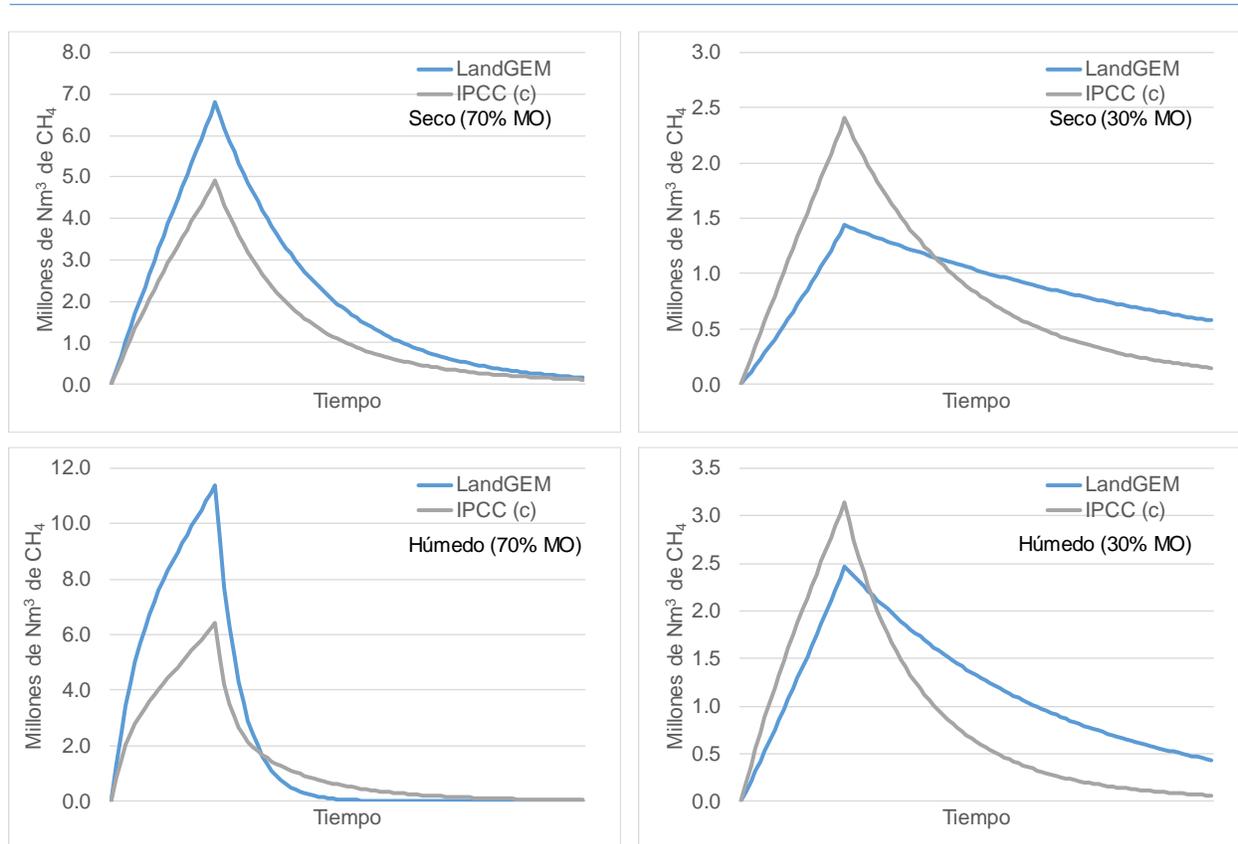


Figura 2.11. Comparación entre las predicciones de LandGEM e IPCC en clima tropical (seco y húmedo) para distintos niveles de materia orgánica (MO) en los residuos.

La comparación muestra que, a valores equivalentes de k y L_0 , el modelo LandGEM arroja estimaciones más elevadas en la mayoría de los climas y para ambos contenidos de materia orgánica (“bajo” y “alto”), siendo el escenario de clima boreal templado seco con bajo nivel de MO, el único caso en el que el modelo del IPCC arroja cifras mayores.

Si bien este ejercicio es útil para analizar el comportamiento de los modelos en un rango de climas diferentes (y bajo distintas composiciones posibles de los residuos), la validez de uno u otro dependerá de la eficacia con la que puedan predecir la generación de biogás en rellenos sanitarios

reales. Este análisis empírico se dará en el Capítulo 4, donde se analizarán las predicciones de los modelos respectivos, a la luz de la información de los rellenos de la base de datos del MDL.

2.8. La eficiencia de recolección

Los modelos presentados hasta aquí estiman la generación *total* de biogás en un sitio dado, esto es, el lado izquierdo de la ecuación (2.2). Sin embargo, a efectos del análisis económico, el término relevante es el biogás *recolectado*, que, como se mencionó, será necesariamente una fracción del total producido en el relleno. La dificultad para medir con precisión el biogás que se escapa por las paredes o la cobertura del sitio, así como el que se almacena dentro de las celdas del relleno, impide conocer la proporción del total que se está efectivamente capturando (la “eficiencia de recolección”).

La guía de buenas prácticas emitidas por la *Global Methane Initiative* y la *U.S. Environmental Protection Agency* establece algunos lineamientos generales para el modelado de la eficiencia de recolección, la cual dependerá de las prácticas de manejo del sitio, la profundidad y el tamaño de las celdas, el tipo de cobertura superior y de geomembrana de aislamiento inferior, la compactación de los residuos y el manejo de los lixiviados. Con el fin de obtener estimaciones de las eficiencias de recolección, Spokas et al. (2006) realizaron aproximaciones de todos los términos de la ecuación (2.2) para tres rellenos sanitarios que operan en condiciones diversas. Los resultados de esta investigación indicaron un 35% de eficiencia para una celda operativa con sistemas de recolección activos; 65% para una celda con recolección activa y cobertura temporaria, 85% para las que tienen cobertura final arcillosa y un 90% para los rellenos que utilizan una geomembrana como parte de

la cobertura superior. Por su parte, IPCC (2006) reporta rangos mucho más amplios, entre 9% y 90%.

En el presente trabajo, las series de tiempo con información de los casos de estudio seleccionados permitirán la estimación de una eficiencia “empírica” de recolección, para lo cual se comparará la cantidad de biogás efectivamente obtenida con la cantidad “total” predicha por los modelos matemáticos respectivos. Estos valores, a su vez, permitirán un mejor ajuste de las predicciones teóricas de los modelos a los resultados obtenidos en la realidad.

Capítulo 3: La experiencia del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

3.1. El MDL: breve historia

El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) es un instrumento creado por el Protocolo de Kyoto, sancionado en 1997 para facilitar el cumplimiento de las metas de reducción de emisiones de los países firmantes, los llamados “países del Anexo I del Protocolo de Kyoto”. Al mismo tiempo, el MDL produce una transferencia de tecnología –y de fondos- de estos países a otros en vías de desarrollo (los llamados “países fuera del Anexo I del Protocolo de Kyoto”). Si bien, el MDL está definido en el texto original del Protocolo de Kyoto, los reglamentos operativos se cristalizaron recién en el año 2001, como parte de los Acuerdos de Marrakech (Lecocq y Ambrosi, 2007). En diciembre de 2015, el mecanismo cumplió dieciocho años de existencia.

Para efectos de este trabajo, bastará con entender al MDL como un régimen en virtud del cual los proyectos que reducen o evitan emisiones de gases de efecto invernadero en países en vías de

desarrollo reciben fondos provenientes de países desarrollados. Los proyectos MDL generan un tipo de crédito llamado “**Certificado de Reducción de Emisiones**” (CER por sus siglas en inglés).

Desde los inicios del MDL, la suerte económica de los CERs –y, con ella, la del mecanismo como un todo- ha estado virtualmente atada a su valor dentro del Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea (EU-ETS) ya que éste impone un límite de emisiones de GEI a numerosas actividades industriales dentro de su territorio. Tales actividades pueden optar por reducir sus emisiones “en la propia planta”, o bien por financiar reducciones de emisiones en países en vías de desarrollo. De esta manera, el EU-ETS ha sido, históricamente, el comprador principal de CERs (WB y Ecofys, 2015) y, como tal, el factor más relevante a la hora de explicar las variaciones de su precio, que han sido muchas y fuertes.

El EU-ETS se organizó en distintas “fases”, cada una caracterizada por variaciones ligeras en las reglas que determinan su funcionamiento, con el consiguiente impacto en los precios de los derechos de emisión admitidos en el esquema. La primera fase del EU-ETS abarcó de enero de 2005 a diciembre de 2007 y fue incluso anterior al período de compromisos derivados del Protocolo de Kyoto. La segunda fase abarcó de enero de 2008 a diciembre de 2012. La tercera inició en enero de 2013 y culminará en diciembre de 2020. El límite de emisiones de esta tercera fase es un 21% menor al de la primera, lo que debería haber sido una buena noticia para los proyectos MDL ya que obliga a los países del Anexo I a realizar esfuerzos más importantes en materia de reducción de GEI. Contrariamente a esto; sin embargo, el tercer período del EU-ETS ha puesto al MDL en un profundo coma. Los CERs, que vieron su período de gloria entre enero de 2005 y el primer trimestre de 2006 con valores cercanos a los 30 USD/tCO₂, se negociaron en 2015 alrededor de 0,40 USD/tCO₂ (WB y Ecofys, 2015, pág. 37).

Una de las razones de mayor peso detrás de esta caída estrepitosa fue la exclusión de los CERs como créditos elegibles en el EU-ETS para los proyectos registrados después de diciembre de 2012. En términos de los proyectos MDL, este cambio en la regulación tuvo dos efectos opuestos. Por un lado, la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC por sus siglas en inglés) recibió un número record de 3269 solicitudes de registro en 2012, de acuerdo a la base de datos compilada por Fenhann y Schletz (2015). Por otro lado, luego de este pico, el número de solicitudes se desplomó de manera espectacular, con sólo 221 en 2013, 120 en 2014 y únicamente cuatro entre enero y febrero de 2015. El pico y la posterior contracción se deben fundamentalmente a que los proyectos post-2012 no son elegibles dentro del EU-ETS.

3.2. La base de datos del MDL

A lo largo de su historia, el MDL reunió un enorme cúmulo de información y experiencias acerca de tecnologías limpias. Para tener una idea de la magnitud de la base de datos generada en el marco del mecanismo, primero es necesario revisar lo que se conoce como **el ciclo de un proyecto MDL** (Figura 3.1), el cual se refiere a los diversos pasos que un proyecto debe seguir hasta poder reunirse finalmente con sus créditos.



Figura 3.1. Ciclo de un proyecto MDL y tasa de éxito.

Los proyectos que reduzcan emisiones de gases de efecto invernadero en un país en desarrollo pueden registrarse dentro del MDL para certificar dichas reducciones y así poder comercializarlas. Por la cantidad de datos disponibles sobre los proyectos registrados, el MDL constituye una poderosa (y a menudo ignorada) herramienta de investigación que incluye información detallada de proyectos eólicos, hidroeléctricos, de tratamientos de residuos sólidos y líquidos, de reemplazo de combustibles y eficiencia energética, entre muchos otros.

El ciclo de vida de un proyecto MDL puede ser dividido en dos. La primera parte abarca **desde el diseño hasta la implementación**; salvo casos excepcionales, los proyectos se registran dentro del MDL en algún momento dentro de esta etapa, previa a su puesta en marcha. Para dicho registro, los proyectos candidatos deben presentar información detallada que a menudo incluye, incluso, la evaluación económica completa del proyecto. La segunda etapa del ciclo de vida de un proyecto MDL corresponde al **proyecto en marcha**. En esta fase, los desarrolladores deben presentar reportes periódicos acerca del funcionamiento del proyecto ya implementado; tales documentos

reciben el nombre de “**reportes de monitoreo**”. Así, durante la primera etapa se origina información *ex-ante* del proyecto, mientras que en la segunda se publica información *ex-post* (Figura 3.1). Con dicha información es posible comparar el comportamiento “real” de un proyecto respecto a su comportamiento “previsto”. La información provista al sistema por los propios desarrolladores es valiosa ya que recibe sendas auditorías (por parte de una entidad independiente y por el propio personal de Naciones Unidas) y es de libre acceso, pudiendo ser consultada en el sitio www.unfccc.int.

La definición y caracterización de los escenarios de línea de base -utilizados para cuantificar la reducción de emisiones- se realiza de acuerdo a unos documentos estándares llamados “**metodologías de línea de base y monitoreo**”, que varían según el tipo de proyecto. Existen más de 100 metodologías aprobadas, divididas en un total de 15 categorías¹⁴, y los desarrolladores pueden proponer otras nuevas (UNFCCC, 2015a).

Respecto a la confiabilidad del contenido de los reportes de monitoreo, es importante mencionar un aspecto más de la dinámica del ciclo de proyectos MDL. A lo largo del ciclo, la comunicación entre los desarrolladores y el UNFCCC no se realiza de manera directa sino a través de un intermediario, las **Entidades Operacionales Designadas** (o “DOEs”, por sus siglas en inglés). Éstas son instituciones independientes y acreditadas que realizan auditorías de toda la información presentada por los desarrolladores, verificando que la misma se ajuste a los requisitos

¹⁴ Las principales categorías incluyen: producción de energía, distribución, reducción de demanda, industrias manufactureras, industrias químicas, construcción, transporte, minería, forestación, agricultura, entre otras.

metodológicos de UNFCCC. Además, todos los documentos –sumados a sus respectivas bitácoras de validación- son elevados a la Junta Ejecutiva de dicha organización para una revisión final. De este modo, el expediente completo de cada proyecto es auditado en dos oportunidades.

Al primero de enero de 2015 existían 7589 proyectos MDL registrados a nivel mundial (Fenhann y Schletz, 2015), recordando que los países elegibles para albergar este tipo de proyectos son únicamente los que están en vías de desarrollo. En Latinoamérica operan 976 proyectos, de los cuales 190 se encuentran en México y 44 en Argentina. La Tabla 3.1 se construyó a partir de datos del CDM Pipeline (Fenhann y Schletz, 2015) y presentan los tipos de proyectos registrados a nivel global y regional. Las energías renovables son las que registran el mayor número de proyectos: en Latinoamérica, se registraron 250 centrales hidroeléctricas y 152 parques eólicos, Otros proyectos populares en la región han sido los de captura de metano, ya sea de desecho de animales o procesos industriales, (con unos 205 proyectos) o de rellenos sanitarios (141 proyectos). La tabla presenta, además, el cociente de créditos recibidos sobre créditos esperados, lo que se define como la “**tasa de éxito**”. En la sección 4.1 se utilizará este mismo indicador, aplicado específicamente a rellenos sanitarios, como una primera estimación de la eficacia de los modelos de biogás, utilizados en dichos proyectos.

Tabla 3.1. *Proyectos MDL por tecnología y tasa de éxito ex ante/ ex post a nivel mundial.*

Tipo de proyecto	Mundo		Latinoamérica	
	Cantidad	Tasa de éxito media	Cantidad	Tasa de éxito media
Eólicos	2414	84%	152	77%
Hidroeléctricas	2056	84%	250	108%
Biomasa	643	81%	109	92%
Reducción de metano	634	68%	205	57%
Solar	368	94%	18	n.d.
Rellenos sanitarios	362	58%	141	58%
Eficiencia energética (generación propia)	313	78%	8	109%
N ₂ O	104	93%	12	82%
Sustitución de combustibles fósiles	99	70%	10	86%
Eficiencia energética (industria)	93	88%	7	73%
Eficiencia energética (oferta energética)	65	59%	9	50%
Reforestación	45	116%	15	165%
Geotérmicas	33	92%	7	65%
Transporte	28	46%	13	26%
Aforestación	10	71%	4	56%
Otros	322	n.d.	16	n.d.
Total	7589	80%	976	79%

Nota. Adaptada del CDM/JI Pipeline Analysis and Database por J. Fenhann y M. C. Schletz, 2015, disponible en línea en <http://cdmpipeline.org> (comprobado el 7 de abril de 2016).

3.3. La metodología ACM0001 para rellenos sanitarios

Como se mencionó anteriormente, una metodología de línea de base y monitoreo es un documento que establece un método estándar mediante el cual se presenta información acerca de un proyecto, su línea de base y la forma en que se estimará o medirá la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Para los rellenos sanitarios, la metodología es la ACM0001, “*Uso o quema de biogás de rellenos sanitarios*” (UNFCCC, 2015c), la cual utiliza el modelo de descomposición de primer orden elaborado del IPCC presentado en el capítulo anterior.

Adicionalmente a las previsiones para el cálculo ex-ante de las emisiones de biogás, la metodología incluye los lineamientos mínimos para el monitoreo del proyecto en marcha. La Figura 3.2 representa de manera esquemática los principales parámetros sobre los cuales cada proyecto recaba información. Esto incluye los flujos de biogás extraído (totales y parciales, en caso que exista más de un destino para el biogás), el porcentaje de humedad, la presión y la temperatura. Algunos parámetros se monitorean de manera continua (por ejemplo, los flujos de biogás), mientras otros pueden medirse con cierta periodicidad o utilizando técnicas de muestreo (por ejemplo, el contenido de metano en el biogás). La disponibilidad de esta información es la que nos permitirá realizar comparaciones homogéneas entre distintos proyectos, o para un mismo proyecto a lo largo del tiempo.

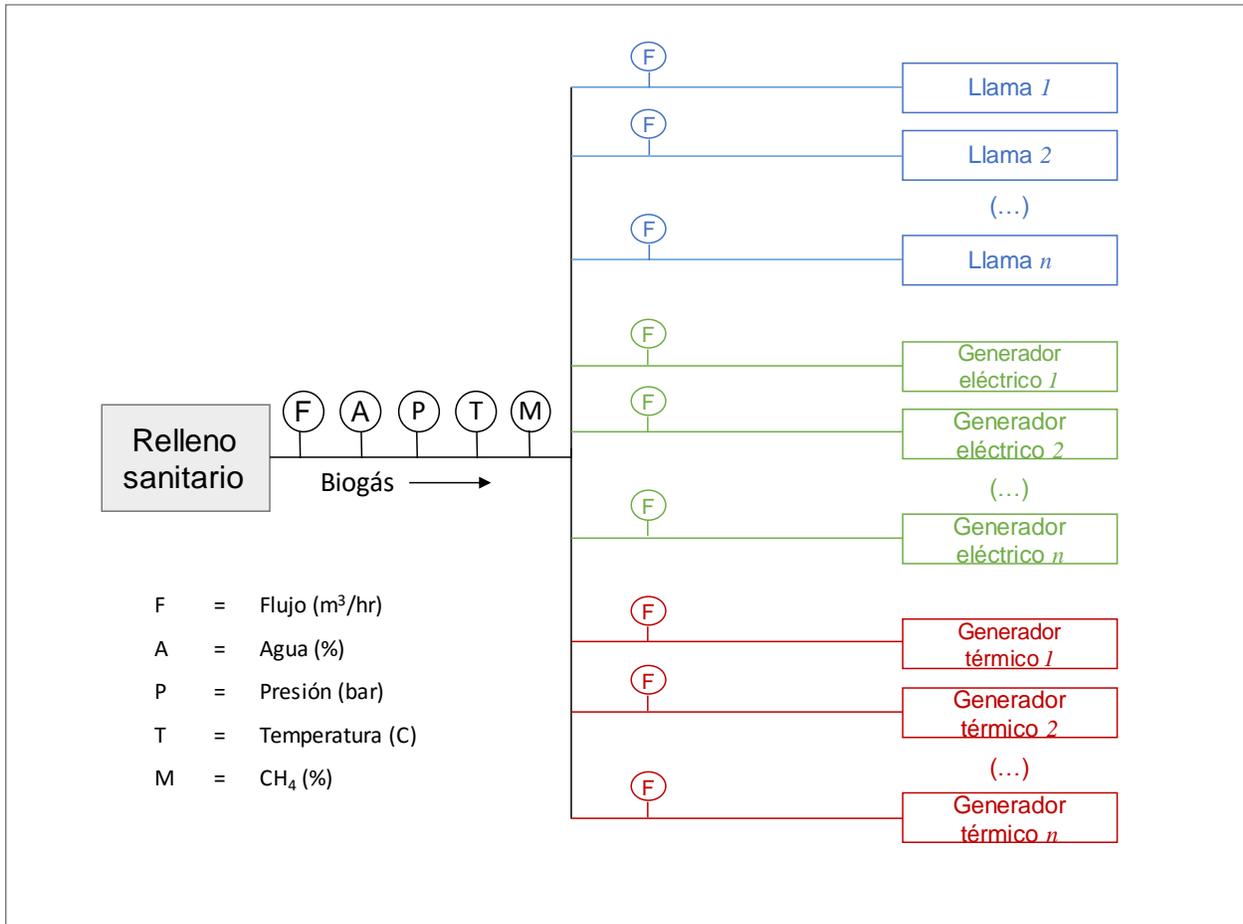


Figura 3.2. Representación esquemática de los principales parámetros monitoreados por los proyectos que utilizan la metodología ACM0001.

3.4. Selección de casos de estudio y recopilación de información.

Con el propósito de analizar la eficacia de los modelos bajo estudio, se recopiló información acerca de las cantidades de biogás esperadas de acuerdo a los cálculos ex-ante y las que efectivamente se alcanzaron tras la implementación del proyecto.

Como primer paso para la selección de los casos de estudio, se consideraron todos los proyectos MDL que utilizan la metodología ACM0001 (en cualquiera de sus versiones), aunque descartando aquellos en los que aún no se dispone de información ex-post. Esto resultó en un total de 109 casos, de entre los cuales finalmente se consideró un total de 40. A su vez, se estableció que los casos se dividieran en tres categorías, de acuerdo al cociente entre la cantidad de créditos efectivamente recibidos y los esperados (la “tasa de éxito”). Las categorías comprenden proyectos con tasas de éxito menor o igual a 30% (los proyectos a los que les fue “particularmente mal”), con tasas de éxito entre 30 y 80% (los proyectos con un desempeño “regular”), y con tasas de éxito mayores o iguales a 80% (los proyectos con un desempeño “bueno”). Del primer grupo se eligieron diez proyectos (sobre un total de 36), del segundo se tomaron veinte casos (sobre 48) y diez proyectos en el tercer grupo (sobre un máximo de 25). Todos los proyectos en esta primera selección se determinaron de manera aleatoria.

Como segundo paso, se descartaron del grupo de 40 aquellos casos con menos de tres años de información disponible, lo que implicó remover de la totalidad de los casos del grupo con tasas de éxito menores al 30%. Adicionalmente, se eliminaron de la muestra los proyectos que incluían más de un sitio, cuando los datos no permitieran la individualización de los residuos recibidos en cada uno de ellos y/o el biogás capturado. Los proyectos remanentes, para los cuales fue posible recabar información, son los siguientes:

Modelos de predicción de generación de biogás: análisis crítico y aplicación al caso de Tucumán, Argentina.

Tabla 3.2. *Proyectos seleccionados del grupo con tasa de éxito entre 30% y 80%.*

Código	Título original del proyecto	País
1240	Hasars Landfill Gas Project	México
3958	CTR Candeias Landfill Gas Project	Brasil
1123 (*)	Ciudad Juarez Landfill Gas to Energy Project	México
856 (*)	Wuxi Taohuashan Landfill Gas to Electricity	China
147 (*)	Hiriya Landfill Project	Israel
164 (*)	Bandeirantes Landfill Gas to Energy Project (BLFGE)	Brasil
425	Aguascalientes – EcoMethane Landfill Gas to Energy Project	México
296	Anding Landfill Gas Recovery and Utilization Project	China
4359	Mare Chicose Landfill Gas Project	Mauricio
171 (*)	Caieiras landfill gas emission reduction	Brasil
2513	Luoyang Landfill Site LFG Recovery to Electricity Project	China
1413 (*)	Jaroensompong Corporation Rachathewa Landfill Gas to Energy Project	Tailandia
933	Jinan Landfill Gas to Energy Project	China
2509	Gikoko-Bekasi-LFG Flaring Project	Indonesia
1247	URBAM/ARAUNA - Landfill Gas Project (UALGP)	Brasil
2487 (*)	Reduction of Methane Emissions from Ruseifeh Landfill	Jordania
260 (*)	Landfill gas recovery at the Norte III Landfill, Buenos Aires, Argentina.	Argentina

Nota. El proyecto 260 se agregó a posteriori a efectos de contar en la muestra con casos de Argentina. Los proyectos marcados con (*) participaron del ejercicio de re-calibración de la eficiencia de recolección.

Tabla 3.3. *Proyectos seleccionados del grupo con tasa de éxito mayor a 80%.*

Código	Título original del proyecto	País
851 (*)	Daegu Bangcheon-Ri Landfill Gas CDM Project	Corea del Sur
887 (*)	Shenzhen Xiaping Landfill Gas Collection and Utilization Project	China
2554 (*)	Doña Juana landfill gas-to-energy project	Colombia
1664	Mianyang Landfill Gas Utilisation Project	China
167 (*)	Landfill Gas to Energy Facility at the Nejapa Landfill Site, El Salvador	El Salvador
3995	El Guacal Landfill Gas Flaring Project	Colombia
2467 (*)	Landfill Gas Recovery and Utilization at Bukit Tagar Sanitary Landfill, Hulu Selangor in Malaysia	Malasia
1133 (*)	Terrestre Ambiental Landfill Gás Project	Brasil
799 (*)	Santa Marta Landfill Gas (LFG) Capture Project.	Chile
3462	Bangkok Kamphaeng Saen East: Landfill Gas to Electricity Project	Tailandia
1134 (*)	ESTRE Pedreira Landfill Gas Project (EPLGP)	Brasil
1219	Coronel landfill gas capture project	Chile
1506	Proactiva Tijuquinhas Landfill Gas Capture and Flaring project	Brasil
648 (*)	Central de Resíduos do Recreio Landfill Gas Project (CRRLGP)	Brasil
928 (*)	Methane recovery and effective use of power generation project Norte III-B Landfill.	Argentina
431 (*)	Puente Gallego Landfill gas recovery project, Gallego, Rosario, Argentina.	Argentina

Nota. Los proyectos 928 y 431 se agregaron a posteriori a efectos de contar en la muestra con casos de Argentina. Los proyectos marcados con (*) participaron del ejercicio de re-calibración de la eficiencia de recolección.

El listado final de proyectos incluyó un total de $17 + 16 = 33$ casos de estudio. Con el propósito de conformar la base de datos filtrada y homogeneizada, se recopilaron un total de 1.425 archivos (más de 7 GB de datos) del sitio web de UNFCCC, disponible en <http://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html>. Se homogeneizaron y recopilaron los siguientes datos:

1. Ubicación del relleno (país, región, etc.).
2. Cantidad de residuos recibidos (en toneladas por día).
3. Status del sitio (abierto, cerrado o fecha esperada de cierre).

4. Tipo de aprovechamiento (quema / generación de electricidad).
5. Modelo utilizado para la predicción ex-ante de emisiones de biogás, así como los principales supuestos.
6. Cambios post-registro en la implementación del proyecto.
7. Otros datos de interés (por ejemplo, inconvenientes destacados por los desarrolladores).
8. Cantidades de biogás ex-ante (en m^3 normalizados¹⁵ por año): total teórica, total a recolectar, contenido de metano.
9. Cantidad de biogás ex-post (en Nm^3 por año): total recolectada y contenido de metano.
10. Electricidad generada (ex-post) y electricidad prevista (ex-ante).

Los proyectos marcados con (*) fueron elegidos para el ejercicio de re-calibración de las eficiencias de recolección, descrito en el siguiente capítulo. Para estos casos, se recopiló adicionalmente la cantidad y la composición de residuos recibidos por cada sitio (en toneladas por año, durante toda la vida útil de las respectivas celdas), así como la información climática necesaria para el modelado del biogás.

¹⁵ Considerando los flujos a una temperatura de 0°C (273.15 K, 32°F) y una presión de 1 atm (101.325 kPa).

Capítulo 4: Análisis crítico de los modelos utilizando la información del MDL.

4.1. Desempeño de los modelos utilizados para la evaluación de los rellenos sanitarios: una primera aproximación.

Los proyectos MDL¹⁶ publican información sobre su rendimiento “esperado” al momento del diseño, y el rendimiento “real” que se observa tras la implementación, lo que permite validar los modelos utilizados como herramientas para su concepción y diseño. Dependiendo del proyecto, el “rendimiento” podrá estar dado en términos de producción, reducción de emisiones, ahorro energético, etc.

Los rellenos sanitarios del MDL presentan datos sobre la cantidad esperada y efectivamente obtenida de biogás, lo que permitiría validar directamente los modelos de biogás presentados en

¹⁶ Es importante resaltar que para el MDL son elegibles únicamente proyectos en países en vías de desarrollo.

el capítulo 2. Sin embargo, si bien esta información se encuentra usualmente en la documentación, la misma no se recopila ni se presenta de una manera estandarizada. En cambio, las cantidades de créditos de carbono (CERs) recibidos por un proyecto MDL se publican de manera sistemática, homogénea y concisa para todos los proyectos.

Los CERs que recibe un relleno sanitario están determinados principalmente por la cantidad de biogás capturado, ya sea para uso energético o para su combustión sin aprovechamiento (UNFCCC, 2015c). Así, es plausible pensar que un proyecto que recibe un 20% más de créditos respecto a lo esperado, lo hace debido a un aumento similar en la cantidad de biogás capturado. De manera similar, un proyecto que recibe un 30% *menos* de créditos respecto a su estimación *ex-ante*, posiblemente se explique por una caída similar en la cantidad de biogás capturada.

Tabla 4.1. *Créditos de carbono esperados (ex-ante) por rellenos sanitarios con recuperación de biogás.*

Componente	CDM #5657		CDM #4598		CDM #2186	
	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%	tCO ₂ e	%
(I) CH ₄ capturado	44,569	87.1%	187,035	89.4%	209,887	93.1%
(II) CO ₂ desplazado por aprovechamiento energético del biogás	6,572	12.9%	22,242	10.6%	15,436	6.9%
(III) Emisiones generadas por el proyecto	0	0.0%	3	0.0%	0	0.0%
(IV) = (I) + (II) – (III) (Reducciones netas)	51,141	100.0%	209,274	100.0%	225,323	100.0%

Nota. Proyecto #5657: “Anyang Tanggou MSW landfill site LFG recovery to power project” (China); #4598: “Monterrey I LFG to Energy Project” (México); #2186: “Monterrey II LFG to Energy Project” (México). Información de los proyectos disponible en www.unfccc.int

La Tabla 4.1 presenta datos que ilustran la relación entre créditos de carbono y biogás. Los datos corresponden a tres rellenos sanitarios -tomados a modo de ejemplo- y que utilizan el biogás

capturado para la generación de electricidad. Estos proyectos desplazan emisiones de GEI por dos vías: por un lado, capturan el metano que, en ausencia de un sistema de recolección y combustión, sería emitido a la atmósfera; por otro lado, el uso del biogás como un combustible para la producción de electricidad “desplaza” la generación a partir de combustibles fósiles de la red eléctrica¹⁷. Por último, para llegar a las reducciones netas se contabilizan las emisiones ocasionadas por el proyecto (por ejemplo, por el uso de combustibles fósiles para los vehículos que operan en el sitio); dichas emisiones se restan para obtener la reducción *net*a de GEI, que se expresa en toneladas de CO₂ equivalentes (tCO₂e).

Los datos de la Tabla 4.1 capturan el hecho de que el principal determinante de la reducción neta de emisiones (es decir, la cantidad de créditos que recibe un proyecto) es, en efecto, la cantidad de biogás capturado: la misma representa entre el 87% al 93% del total de CERs recibidos. Esta participación incrementará en aquellos proyectos sin un componente de generación de energía, esto es, aquellos que se limiten a quemar el metano.

Debido a que la cantidad de biogás y la cantidad de CERs están fuertemente correlacionadas, se puede tener una primera idea del funcionamiento de los modelos de biogás, simplemente comparando las cantidades de créditos recibidos por los respectivos rellenos sanitarios con la

¹⁷ El principio detrás de esta afirmación es que el uso del biogás (factor de emisión: $B = 0$ tCO₂/MWh) “demora” la llamada a despacho de centrales en la red eléctrica (con factor de emisión $F \geq 0$ tCO₂/MWh). De este modo, el uso del biogás genera una reducción de emisiones igual a $F - B = F \geq 0$ tCO₂/MWh.

cantidad de créditos esperados al momento del registro. El cociente entre dichas cantidades se conoce como “tasa de éxito” de un proyecto MDL.

La Figura 4.1 presenta la distribución de frecuencia de la tasa de éxito en términos de CERs para los 109 proyectos MDL que ya disponen de información ex-post y que utilizan la metodología ACM0001 (presentada en el capítulo 3.3). Los datos considerados para este análisis se obtuvieron del CDM Pipeline, que incluye información de la totalidad de los proyectos MDL hasta el 01/01/2015, inclusive (Fenhann y Schletz, 2015).

Una tasa de éxito de 1 (o 100%) indica que el cálculo ex-ante ha coincidido con el cálculo ex-post; si el modelo utilizado en el cálculo ex-ante arroja predicciones correctas, el histograma debería acumular casos alrededor del 100%. Los resultados, en cambio, indican que la mayoría de los casos se encuentran debajo de dicho valor.

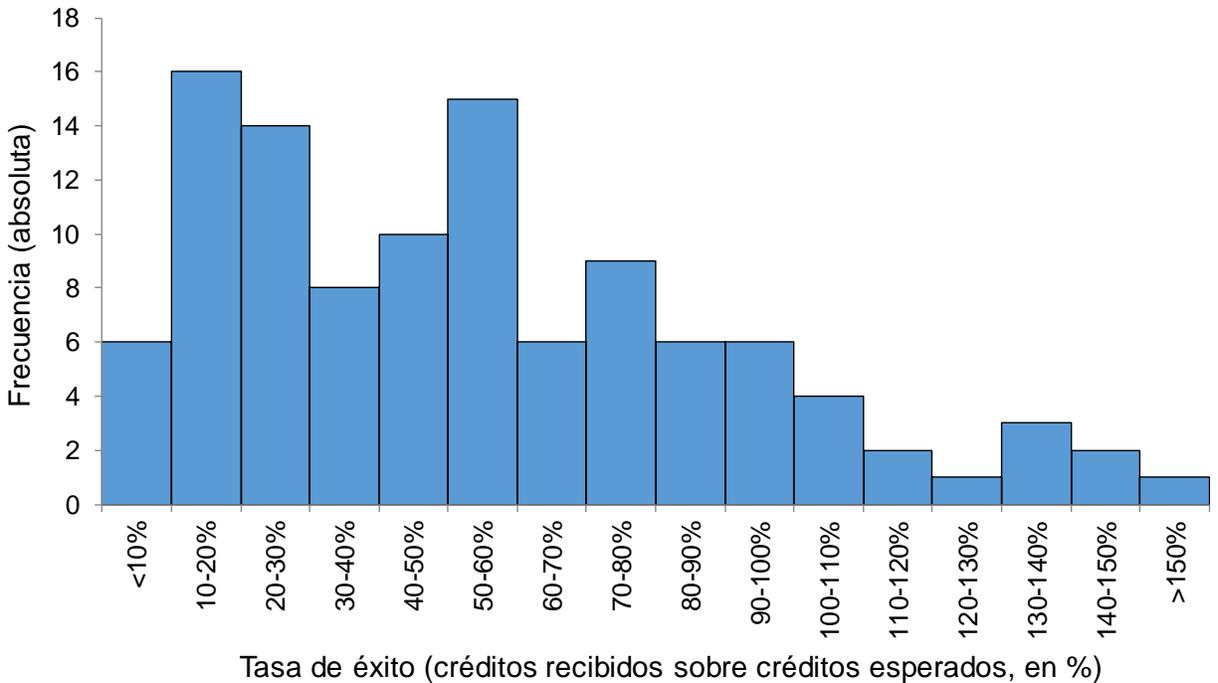


Figura 4.1. Frecuencia absoluta de las tasas de éxito en rellenos sanitarios MDL. Basada en datos de Fenhann y Schletz (2015). $N = 109$.

Si se considera la “tasa de éxito muestral” (denotada por \bar{x}) como un estimador de la tasa de éxito de la totalidad de los rellenos sanitarios en países en vías de desarrollo (denotada por μ), es posible realizar algunas inferencias estadísticas sencillas¹⁸. Si se define la hipótesis nula $H_0: \mu = 100\%$ contra la alternativa $H_1: \mu < 100\%$, y para un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, el valor del estadístico T cae claramente en la zona de rechazo de H_0 ($T < -t_{\alpha, n-1}$). Estos resultados sugieren que los modelos sobreestiman la cantidad de biogás que los proyectos son efectivamente capaces de

¹⁸ Asumiendo que la tasa de éxito de la población sigue una distribución normal.

capturar una vez que son implementados; adicionalmente, el sesgo reviste una magnitud considerable (>55% en promedio).

Tabla 4.2. Tasa de éxito media en rellenos sanitarios MDL por región.

Región	# de proyectos	Tasa de éxito media
África	7	20.70 %
Asia y Pacífico	41	54.08 %
Europa y Asia Central	2	28.83 %
Latinoamérica	54	59.56 %
Medio Oriente	5	66.49 %
Total general	109	54.76%
$-t_{\alpha, n-1} (\alpha = 0.05; n = 109)$	-1.6591	-
T	-12.3482	-

Nota. Adaptada del *CDM/JI Pipeline Analysis and Database* por J. Fenhann y M. C. Schletz, 2015, disponible en línea en <http://cdmpipeline.org> (comprobado el 7 de abril de 2016).

El caso de Latinoamérica (Tabla 4.3) es interesante debido al elevado número de proyectos incluidos. Nuevamente se rechaza la hipótesis nula de $\mu = 100\%$; sin embargo, se observan casos como el de Brasil y Colombia, con tasas de éxito por encima de la media y cercanas al 80%, con un número importante de proyectos en ambos casos (19 en el caso de Brasil contra 4 de Colombia); El Salvador registra un único proyecto, para el cual la tasa de éxito se acerca al 100%. En México, se registran un total de 10 proyectos, con una tasa de éxito promedio del 48%.

Tabla 4.3. Tasa de éxito media en rellenos sanitarios MDL en América Latina, por país.

País	# de proyectos	Tasa de éxito media
Argentina	3	72.60 %
Brasil	19	71.80 %
Chile	11	56.64 %
Colombia	4	77.85 %
Cuba	1	11.28 %
República Dominicana	1	18.17 %
Ecuador	1	10.39 %
El Salvador	1	96.76 %
México	10	47.82 %
Perú	2	38.05 %
Uruguay	1	9.00 %
Total general	54	59.56 %
$-t_{\alpha, n-1} (\alpha = 0.05; n = 54)$	-1.6741	-
T	-6.9209	-

Nota. Adaptada del CDM/JI Pipeline Analysis and Database por J. Fenhann y M. C. Schletz, 2015, disponible en línea en <http://cdmpipeline.org> (comprobado el 7 de abril de 2016).

El hecho de que las tasas de éxito medidas en términos de *créditos* (en lugar de *biogás*) indiquen valores cercanos al 55-60% sugiere que los modelos sobreestiman el desempeño real de los proyectos. Sin embargo, es posible que el sesgo sea inferior al que resulta de comparar el cociente de CERs recibidos a CERs esperados. Por ejemplo, un proyecto que esperaba utilizar el gas para generar electricidad podría descartar o posponer, por alguna razón, el componente energético al momento de su implementación; tal proyecto recibiría menos créditos de lo esperado aun cuando la cantidad de biogás generada sea *exactamente* igual a la cantidad modelada. Suponiendo un proyecto A que espera recibir 100 créditos, 80 provenientes de la captura del metano y 20 provenientes del desplazamiento de combustibles fósiles de la red eléctrica por la generación de energía a partir del biogás. Si el proyecto no implementa el componente energético por alguna

razón, limitándose a quemar el biogás, la tasa de éxito reflejará un valor de $80/100 = 80\%$, aun cuando la predicción coincida exactamente con la realidad.

Para evitar este problema, se filtra una vez más la base de datos, dejando únicamente los proyectos que queman el biogás capturado *sin* generación de energía. Esto reduce el tamaño de la muestra de 109 a 49 casos; sin embargo, como se observa en la **Tabla 4.4**, el sesgo en los resultados sigue resultando estadísticamente significativo, esto es, se sigue rechazando la hipótesis nula $H_0: \mu = 100\%$. De este modo, los datos confirman que los modelos han sobreestimado la captura de biogás que sucede en los rellenos sanitarios.

Tabla 4.4. Tasa de éxito media en rellenos sanitarios MDL sin componente energético, por región.

Región	# de proyectos	Tasa de éxito media
África	6	22.12%
Asia y Pacífico	5	35.59%
Europa y Asia Central	1	47.63%
Latinoamérica	35	59.83%
Medio Oriente	2	49.72%
Total general	49	52.08%
$-t_{\alpha, n-1} (\alpha = 0.05; n = 49)$	-1.6772	-
T	-7.5897	-

Nota. Adaptada del CDM/JI Pipeline Analysis and Database por J. Fenhann y M. C. Schletz, 2015, disponible en línea en <http://cdmpipeline.org> (comprobado el 7 de abril de 2016).

4.2. Cantidades de biogás efectivamente obtenidas por los proyectos de la muestra

La siguiente sección analiza con detalle la generación de metano en sitios de disposición final, comparándola contra las predicciones modeladas previo al inicio de los respectivos proyectos. De este modo, no se utiliza una “aproximación” -como en la sección anterior- sino que se observa directamente el indicador de interés. Adicionalmente, se analizará la eficacia de los dos principales

modelos reseñados en el capítulo 2: el LandGEM y el del IPCC (adaptado por la metodología ACM0001), ambos de uso extendido en el MDL.

A efectos de este trabajo, se seleccionó una muestra de proyectos para los cuales se recopiló información detallada y comparable. Como se explicó en la sección 3.4 (ver Figura 4.1) se establecieron tres grupos, de acuerdo a su tasa de éxito en términos de CERs (en adelante, denominada “ TE_{CERs} ”). Los grupos en cuestión fueron: i) los de proyectos que tuvieron un desempeño particularmente malo ($TE_{CERs} \leq 30\%$); ii) los que estuvieron alrededor de la media ($30\% < TE_{CERs} < 80\%$); y iii) los que estuvieron por encima de ella ($TE_{CERs} \geq 80\%$). Si bien todos los casos del grupo i) se descartaron por tratarse de proyectos de los que se carece de al menos tres años de datos¹⁹, se recopiló información para un total de 33 casos de estudio, correspondientes al segundo y al tercer grupo. La Figura 4.2 muestra las estimaciones (eje horizontal) y las cifras efectivamente alcanzadas (eje vertical) por los proyectos del grupo ii) (paneles a. y b.), y del grupo iii) (paneles c. y d.).

Si los modelos entregaran estimaciones perfectas, cada par ordenado de datos en la Figura 4.2 se ubicaría sobre la línea diagonal punteada; o bien, si la estimación fuera insesgada, la nube de puntos debería encontrarse a ambos lados de ésta. Sin embargo, los puntos se ubican, casi exclusivamente, del lado derecho de la línea diagonal, lo que permite confirmar las conclusiones preliminares de la sección anterior: los modelos han sobreestimado de manera sistemática la

¹⁹ Al carecer de una serie lo suficientemente larga de datos (al menos tres años), no es posible descartar que el bajo rendimiento de estos proyectos sea un fenómeno temporal. Por ende, los mismos fueron descartados del análisis por no considerarse representativos.

generación real de biogás. La misma conclusión se obtiene observando los datos individuales de los proyectos, presentados de la Figura 4.3 a la Figura al final de esta sección.

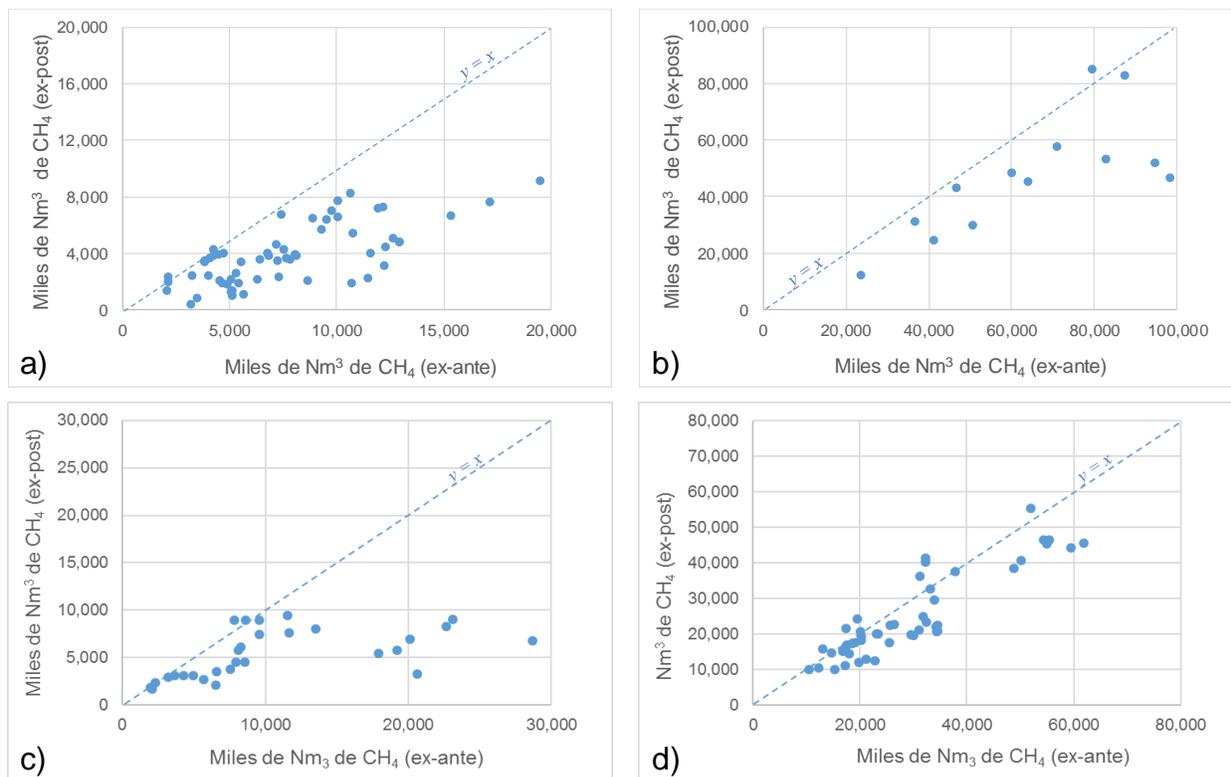


Figura 4.2. Diagrama de dispersión para generación de CH_4 modelada (*ex-ante*) y real (*ex-post*). Paneles a) y b) corresponden a casos del grupo con $30\% < TE_{CERs} < 80\%$; los paneles c) y d) al grupo de casos con $TE_{CERs} \geq 80\%$.

En línea con lo previsto, las mayores tasas de éxito (en términos de créditos alcanzados) se trasladan directamente al modelado del metano; de este modo, los casos del grupo iii), presentados en la Figura 4.4 y Figura , presentan mejores estimaciones que las de su contraparte del grupo ii) (Figura 4.3 y Figura). A pesar de que el grupo iii) muestra mejores resultados en términos de las respectivas predicciones, es importante resaltar que incluso en estos casos existe un sesgo importante en la estimación.

Tabla 4.5. Razón CH_4 capturado sobre CH_4 modelado para proyectos seleccionados.

Grupo ii) ($30\% < TE_{CERs} < 80\%$)	n ($N=48$)	Tasa de éxito en términos de CH_4 (TE_{CH_4})		
		Mínimo	Máximo	Media
IPCC	11	38.3%	88.5%	62.2%
LandGEM	5	32.6%	44.9%	38.6%
Todos	16	32.6%	88.5%	54.8%
IPCC (corregido)	5	44.9%	98.7%	65.2%
IPCC (UNFCCC)	5	44.9%	88.5%	63.1%
Grupo iii) ($TE_{CERs} > 80\%$)	n ($N=25$)	Tasa de éxito en términos de CH_4 (TE_{CH_4})		
		Mínimo	Máximo	Media
IPCC	10	33.0%	111.2%	79.0%
LandGEM	6	58.6%	94.1%	74.3%
Todos	16	33.0%	111.2%	77.2%
IPCC (corregido)	7	70.1%	106.4%	91.8%
IPCC (UNFCCC)	7	63.9%	92.4%	82.4%

Nota. La corrección introducida en el modelo IPCC es la propuesta por Santos et al. (2015)

La Tabla 4.5 resume los principales resultados de esta sección. En el grupo ii) se consideró una muestra de 16 casos, de un total de 48. La tasa de éxito en términos de CH_4 (TE_{CH_4}) para el promedio de esta muestra fue del 54.8%. De este grupo, unos 11 proyectos utilizan el modelo del IPCC, adaptado de acuerdo a la metodología ACM0001 del MDL. Los desarrolladores que utilizaron este modelo observaron una tasa de éxito del 62.2%, superior a la de los proyectos que emplearon LandGEM ($TE_{CH_4} = 38.6\%$). Adicionalmente, se tomó una sub-muestra de 5 casos para los que se evaluó el modelo corregido sugerido por Santos et al. (2015) (discutido en la sección 2.6), en comparación con el modelo tradicional utilizado por UNFCCC (2015b). La TE_{CH_4} fue ligeramente superior para los proyectos que introdujeron la corrección: 65.2% versus 63.1% del modelo sin corregir.

Las conclusiones son similares observando la muestra del grupo iii), que presenta una TE_{CH_4} del 77.2% (ligeramente menor al 80% de la tasa de éxito en términos de CERs). En este grupo, aquellos proyectos que utilizaron el modelo del IPCC lograron una tasa de éxito similar al de los que usaron LandGEM (79.0% contra 74.3%). Nuevamente, la corrección de Santos et al. (2015) mejora los resultados de las predicciones del IPCC/UNFCCC, cuando se la compara contra los mismos proyectos utilizando la ecuación sin corregir (ésta pasa de 82.4% a 91.8%).

Es importante realizar una aclaración acerca de los resultados de la Tabla 4.5 que compara las cantidades de metano efectivamente capturadas contra las cantidades modeladas de acuerdo a los supuestos²⁰ adoptados *por los respectivos responsables de los sitios de disposición final*. La Tabla 4.5 no permite extraer conclusiones acerca de la validez de los valores utilizados por cada desarrollador en aquellos casos en que la metodología les conceda cierto margen de elección. La idea implícita en las conclusiones de este trabajo es que, si hubiera un error en el modelado en “algunos” casos puntuales dentro de la base de datos, éste debería afectar las estimaciones de manera *aleatoria*, lo que se reflejaría en la Figura 4.2 con algunos puntos por encima y otros por

²⁰ Por ejemplo, mientras que el modelo LandGEM sugiere un amplio rango de valores para sus principales parámetros (dentro del cual el desarrollador del proyecto debe escoger una cifra), el modelo del IPCC/UNFCCC es más taxativo al sugerir valores puntuales de acuerdo a la composición de los residuos y las condiciones climáticas del sitio. Adicionalmente, ninguno de los modelos brinda prescripciones concretas acerca de las eficiencias de captura que podrían esperarse en un sitio determinado (sección 2.8), por lo que la persona realizando el modelado elegirá esta cifra con cierta discrecionalidad.

debajo de la línea punteada, algo que no se observa en los datos. En la sección 4.3 se discutirá una sencilla propuesta para reducir este sesgo estructural en el modelado.

Capítulo 4: Análisis crítico de los modelos utilizando la información del MDL.

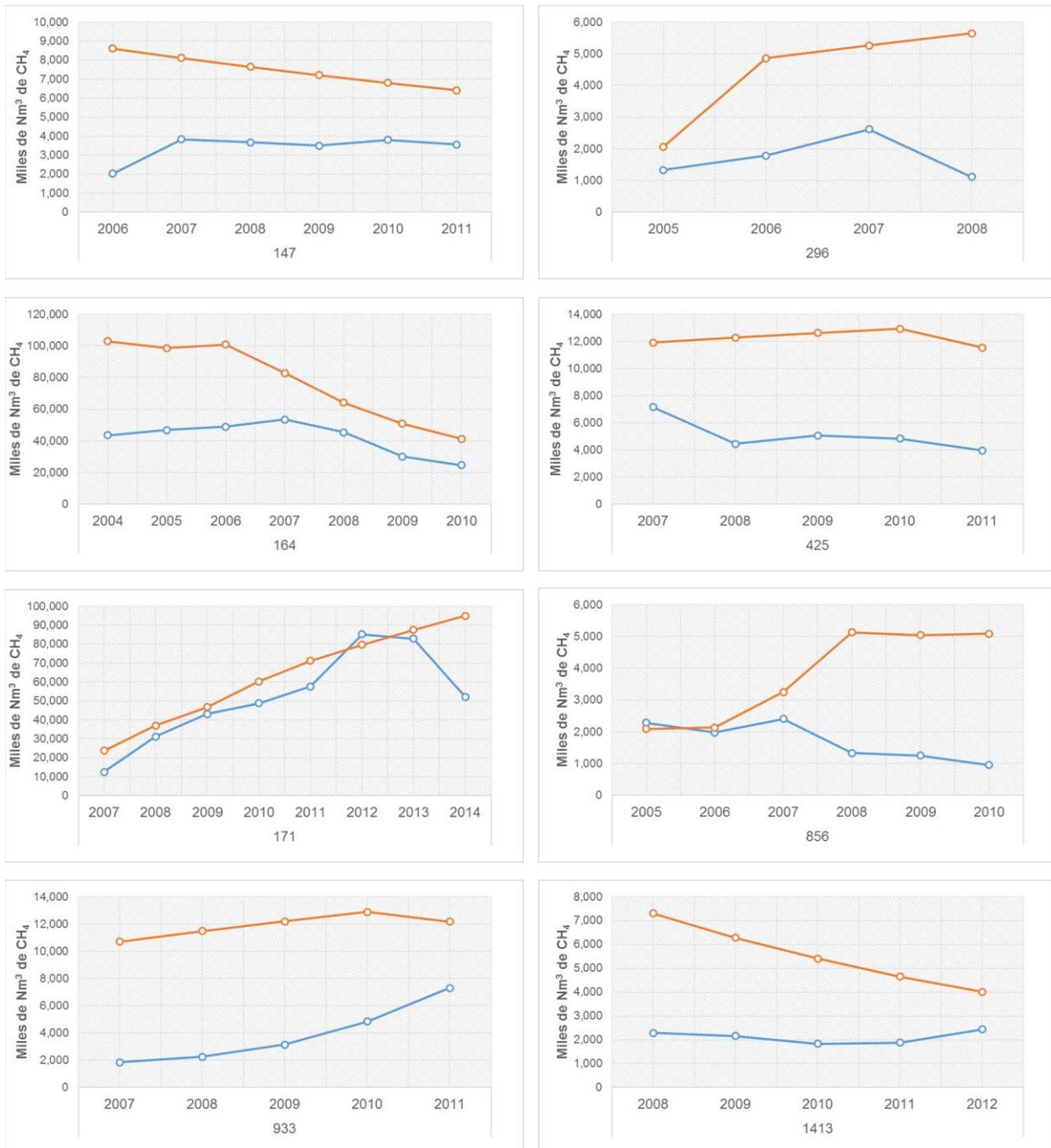


Figura 4.3. Generación esperada (curva color naranja) y real (azul) para los proyectos de la muestra. Grupo con tasas de éxito entre 30% y 80%.

Capítulo 4: Análisis crítico de los modelos utilizando la información del MDL.

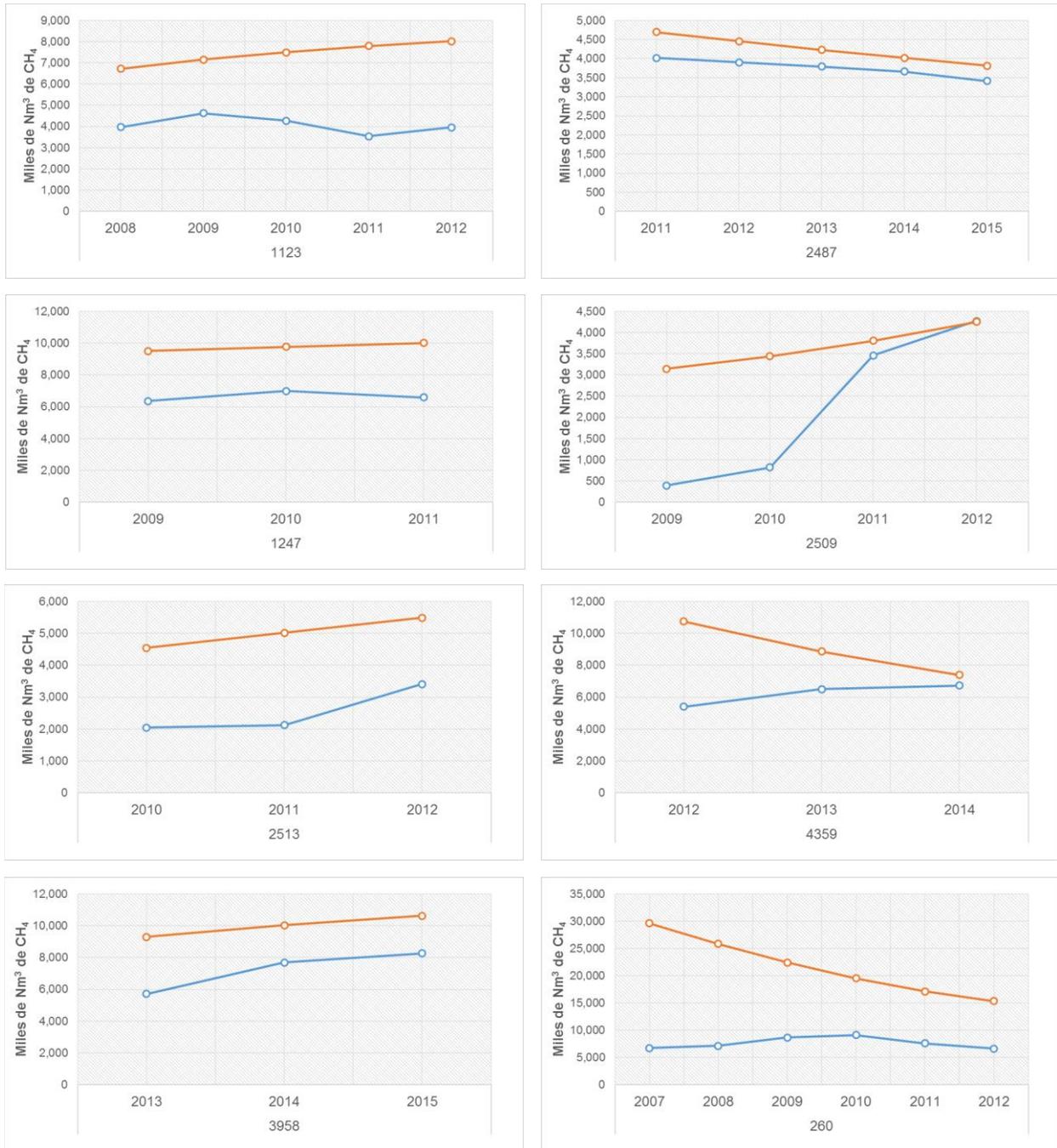


Figura 4.3. Continuación.

Capítulo 4: Análisis crítico de los modelos utilizando la información del MDL.

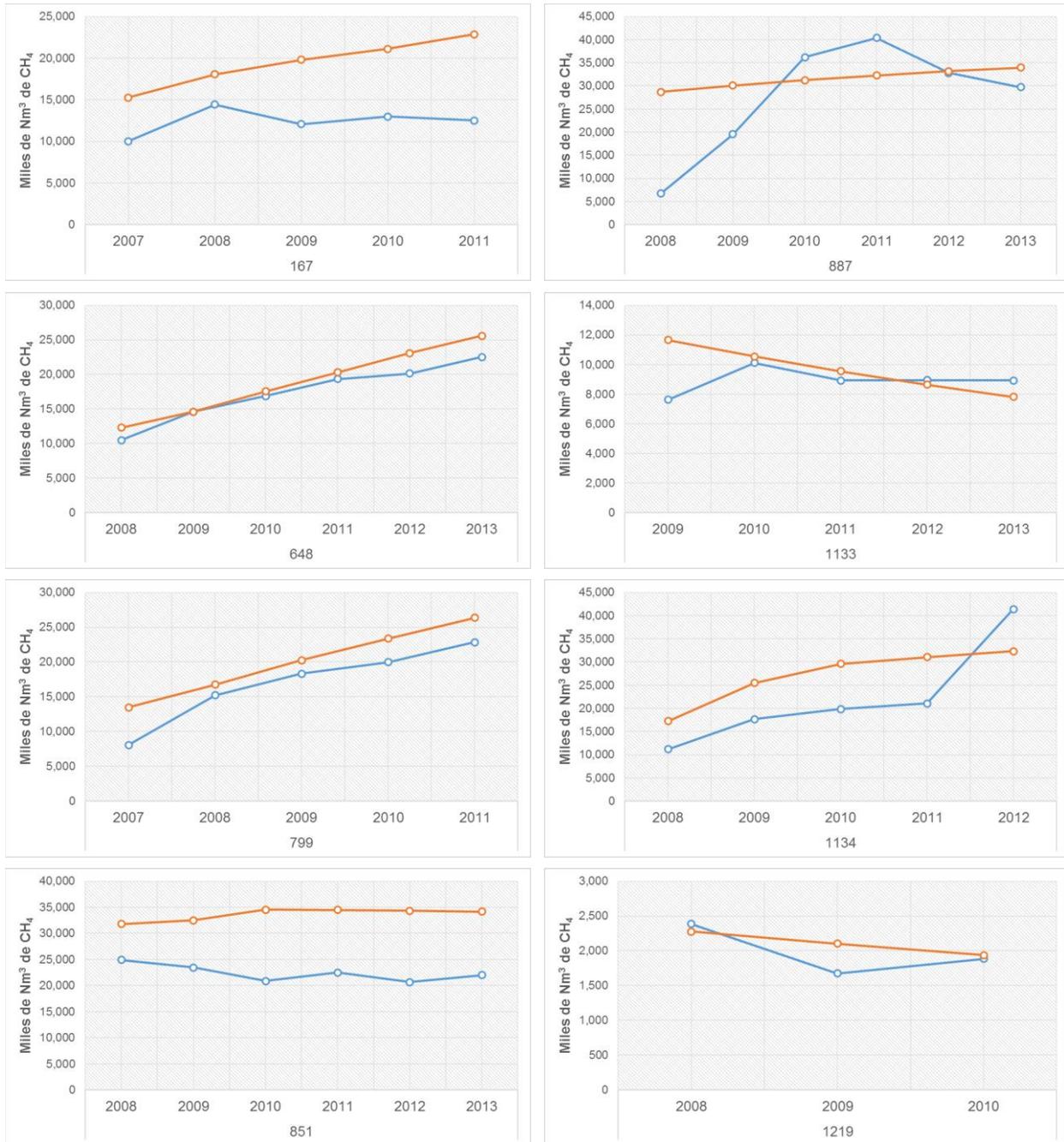


Figura 4.4. Generación esperada (curva color naranja) y real (azul) para los proyectos de la muestra. Grupo con tasas de éxito del 80% o más.

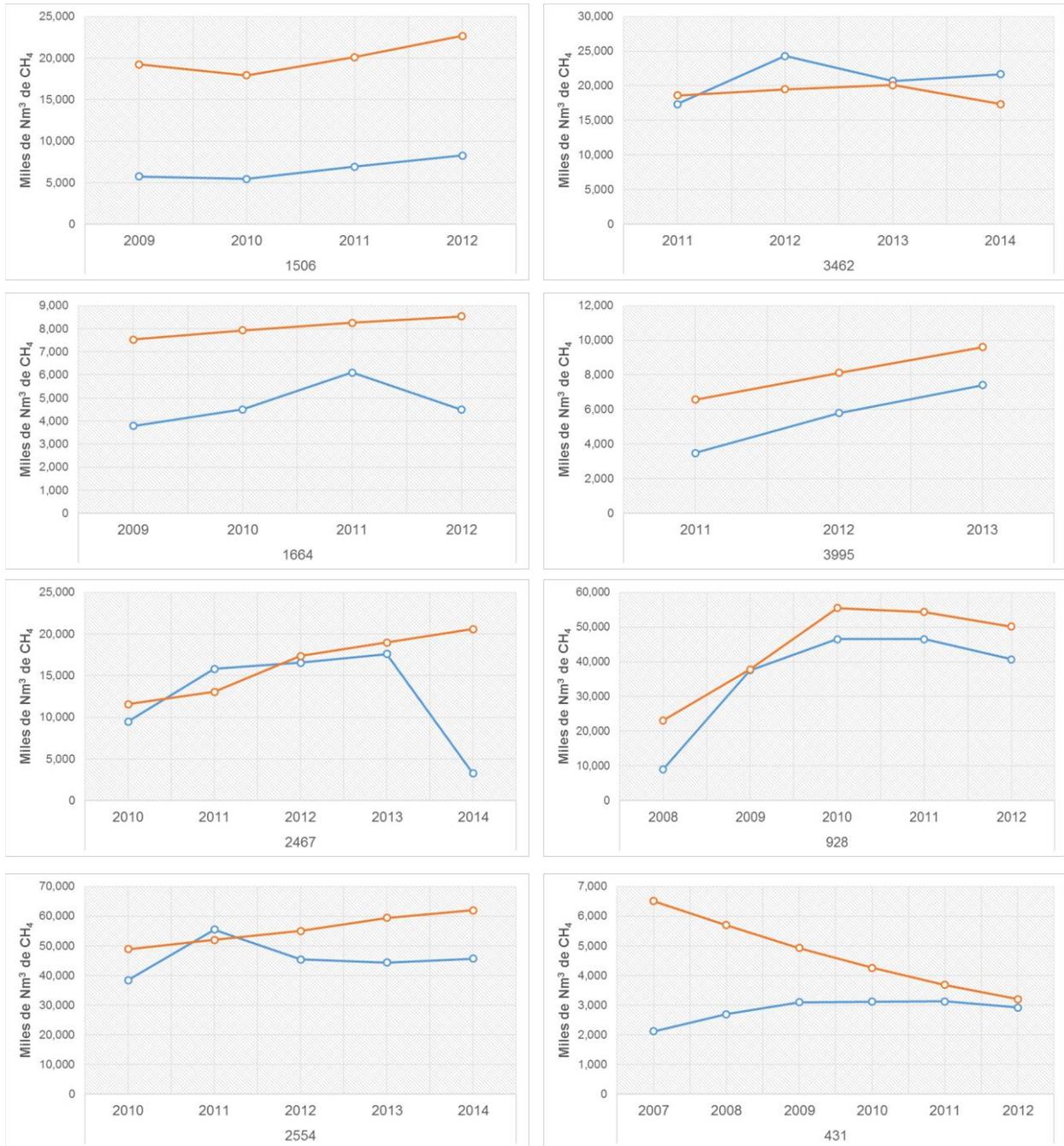


Figura 4.4. Continuación.

4.3. Ajustes a la eficiencia de recolección.

La siguiente sección ensaya algunas correcciones posibles a los modelos estudiados en este trabajo. Existen muchas formas de “ajustar” o calibrar los resultados de la modelación, tanto para LandGEM como para el modelo del IPCC. El primero, por ejemplo, depende de los parámetros k y L_0 (respectivamente, la tasa de descomposición de los residuos y el potencial de generación de metano por unidad de masa de los residuos), mientras que el modelo del IPCC depende del valor de k asignado a cada categoría de residuos, al igual que de otros parámetros como el factor de oxidación, la fracción del contenido orgánico (y la fracción *degradable* dentro del contenido orgánico), etc. Sin embargo, ambos modelos tienen una característica en común, que es el hecho de aproximar la cantidad de metano (y de biogás) *total* generado en el sitio, independientemente de la cantidad que efectivamente se recupera. Dicho de otro modo, ninguno de los dos modelos cuenta con predicciones precisas acerca de la fracción del total de metano que efectivamente puede ser capturada. Según Scharff y Jacobs (2006), dicho parámetro puede tomar valores entre el 35% y el 90%; el IPCC (2006) sugiere un rango incluso más amplio, entre 9% y 90%.

El enfoque tradicional para la estimación de la eficiencia de recolección (seguido por ejemplo en el estudio de Scharff y Jacobs) consiste en realizar un balance, mediante la estimación de cada uno de los componentes en la expresión (2.2). En esta tesis, en cambio, se siguen los siguientes pasos:

1. Se toma el dato de la generación total de biogás modelada para cada sitio;
2. Se consideran las cantidades de metano efectivamente recolectadas (obtenidas de la base de datos del MDL y presentadas en la sección anterior);
3. Se calcula el cociente entre la cantidad de biogás capturado (medida por los respectivos sitios y publicada en la base de datos del MDL) y la cantidad de biogás total modelada.

Así, se calcula una “eficiencia de recolección empírica”, que servirá para ajustar el modelado del biogás que surge de los modelos (y, en el caso de esta tesis, para estimar el biogás que puede ser capturado en los sitios de disposición final de la provincia de Tucumán). El rango de valores de esta eficiencia empírica permitirá acotar el análisis económico del aprovechamiento del biogás.

La Tabla 4.6 presenta la eficiencia empírica para tres modelos: LandGEM, el modelo de IPCC (de acuerdo a la metodología ACM0001 de UNFCCC) y el modelo basado en el IPCC que incluye las correcciones de Santos et al. (2015). La misma tabla muestra cuán extendido ha sido el error de considerar que la generación ocurre en el mismo año en que se comienzan a generar residuos (discutido en la sección 2.6). De esta sub-muestra, un total de 12 casos de estudio incurrieron en este error, incluso cuando el modelo utilizado era LandGEM (cuya fórmula matemática, aplicada de manera estricta, no considera emisiones durante el primer año). Como se observó en la sección 2.6, la ausencia del rezago en la generación del biogás lleva a sobreestimaciones en el corto plazo (7 a 10 primeros años del proyecto), aun cuando no tengan consecuencias en un plazo más largo (50 años o más).

La Tabla 4.7 resume los resultados medios para toda la muestra, considerada como un todo o dividida en grupos. Los proyectos con mayor tasa de éxito en términos de CERs presentan una eficiencia de recolección mayor, entre 61%-66% (para el modelo IPCC sin la corrección y con la corrección, respectivamente). Los casos del grupo ii), previsiblemente, reportan una eficiencia menor (47%). La eficiencia al considerar la totalidad de los casos en la muestra se ubica entre el 55% y el 58%, dependiendo que se considere la versión original o la versión corregida de la

ecuación del IPCC. Debido a que el modelo LandGEM resulta, en general, en estimaciones más altas, la eficiencia empírica para este último es menor a la del IPCC.

Tabla 4.6. Eficiencias de recolección re-calibradas para casos de estudio seleccionados.

ID #	Grupo (tasa de éxito)	Ubicación	Clima	Error (Santos et al., 2015)	Datos (N°. de años)	Eficiencia de recolección calibrada		
						LandGEM	IPCC	IPCC (corr.)
171	31% a 80%	Brasil	b.	Sí	8	55%	91.4%	109.0%
164	31% a 80%	Brasil	d.	Sí	7	38%	68.8%	62.3%
147	31% a 80%	Israel	c.	Sí	6	21%	27.3%	25.7%
856	31% a 80%	China	c.	Sí	6	8.4%	16.7%	17.2%
1123	31% a 80%	México	b.	No	5	25.5%	37.7%	39.0%
1413	31% a 80%	Tailandia	d.	No	5	n.d	52.0%	46.8%
2487	31% a 80%	Jordania	a.	Sí	5	n.d.	33.7%	32.0%
260	31% a 80%	Argentina	b.	No	6	22%	49.9%	44.7%
648	81% o más	Brasil	b.	Sí	6	62%	91.6%	106.3%
851	81% o más	Corea del Sur	b.	No	6	39%	102.0%	109.3%
887	81% o más	China	d.	Sí	6	43%	78.6%	80.2%
167	81% o más	El Salvador	d.	Sí	5	13%	16.2%	17.8%
799	81% o más	Chile	a.	No	5	38%	74.8%	90.3%
1133	81% o más	Brasil	d.	Sí	5	47%	26.7%	30.6%
1134	81% o más	Brasil	d.	Sí	5	62%	22.8%	28.0%
2467	81% o más	Malasia	d.	Sí	5	n.d	47.5%	52.5%
2554	81% o más	Colombia	b.	Sí	5	n.d	61.0%	63.9%
928	81% o más	Argentina	b.	No	5	52%	62.5%	64.6%
431	81% o más	Argentina	b.	No	6	45%	88.6%	78.9%

Nota. Clima tipo a. Boreal y templado seco ($MAT \leq 20^{\circ}C$; $MAP/PET < 1$); b. Boreal y templado húmedo ($MAT \leq 20^{\circ}C$; $MAP/PET > 1$); c. Tropical seco ($MAT > 20^{\circ}C$; $MAP < 1000$ mm) d. Tropical húmedo ($MAT > 20^{\circ}C$; $MAP > 1000$ mm).

MAT = Temperatura media anual ($^{\circ}C$)

MAP = Precipitaciones medias anuales (mm)

PET = Evapotranspiración potencial (mm)

Una nota importante tiene que ver con la muestra seleccionada. Si bien se eligieron tres grupos (que, por la disponibilidad de datos, terminaron siendo dos), debe destacarse que, en el total de la población de proyectos MDL, el grupo ii) es mucho más “representativo”, esto es, tiene un número

mayor de casos²¹. Por ende, es estadísticamente más probable que los valores “reales” para la población total de rellenos sanitarios de países en vías de desarrollo se ubiquen más cerca de los del grupo ii) que los del grupo iii). Consecuentemente, el escenario base en el modelado de emisiones de los rellenos de la provincia de Tucumán considerará estos valores.

Tabla 4.7. Eficiencias de recolección re-calibradas: resumen por grupos y tipo de modelo.

Indicador	Todos			31% a 80%			80% o más		
	Land GEM	IPCC	IPCC (corr.)	Land GEM	IPCC	IPCC (corr.)	Land GEM	IPCC	IPCC (corr.)
Mínima	8%	16%	17%	8%	17%	17%	13%	16%	18%
Máxima	62%	102%	109%	55%	91%	109%	62%	102%	109%
Media	38%	55%	58%	28%	47%	47%	45%	61%	66%
Desvío estándar	16.9%	27.5%	30.7%	16.3%	24.0%	28.6%	14.6%	29.5%	31.1%
<i>n</i>	15	19	19	6	8	8	9	11	11
Int. Conf. (+/- @ 95% confianza)	8.5%	12.4%	13.8%	13.0%	16.7%	19.8%	9.5%	17.4%	18.4%
Límite inferior	30%	43%	44%	15%	31%	27%	35%	44%	47%
Límite superior	47%	68%	72%	41%	64%	67%	54%	79%	84%

Nota. Las correcciones al modelo del IPCC/UNFCCC corresponden a las sugeridas por Santos et al. (2015)

Por último, es importante destacar el elevado valor del desvío estándar de los resultados, lo que implica que existe un alto grado de incertidumbre respecto al valor de la media *poblacional*. En la Tabla 4.6 es posible observar casos prácticamente en la totalidad del rango que va de 0% a 100%; por ende, pese a que es posible calcular una medida de tendencia central -como la media-, no se puede concluir que ésta sea representativa de la “población”. Se necesitará analizar un número

²¹ De un total de 109 casos con datos en la población del MDL, 48 pertenecen al grupo ii), contra 25 del grupo iii).

mucho más grande de casos para poder “delimitar” una distribución de probabilidad confiable a la hora de realizar predicciones.

Con los datos de la muestra, se estimó para cada caso un intervalo de confianza para la eficiencia de recolección media, al 95% de significancia estadística. Estos resultados (reportados en las tres últimas filas de la Tabla 4.7) se utilizarán en el análisis económico de la generación de electricidad a partir de los residuos de la provincia de Tucumán; en particular, el rango obtenido servirá para el análisis de sensibilidad de los resultados del modelo económico.

4.4. ¿Por qué fallan los modelos?

En las secciones anteriores se demostró que los modelos matemáticos que intentan predecir la generación de biogás en rellenos sanitarios -al menos, en países en vías de desarrollo- presentan una marcada tendencia a la sobreestimación de los valores reales.

Terraza et al. (2007) discuten esta misma problemática a la luz de seis casos de estudio que se analizaron en profundidad durante un taller organizado por el Banco Mundial en el año 2007. Durante el mismo, se resaltaron los siguientes aspectos que podrían explicar la brecha entre el rendimiento esperado y el desempeño real de los rellenos sanitarios del MDL, en términos de generación y captura de biogás:

1. *Operación de los sitios:* Muchos de los rellenos sanitarios de países en vías de desarrollo corresponden a sitios antiguos que no estuvieron pensados, diseñados ni operados para la implementación de un sistema activo de recolección de biogás, aspecto confirmado por la

muestra de casos considerados para esta tesis. De acuerdo a Terraza et al. (2007), es común que los sitios no apliquen cobertura de manera diaria, lo que permite el acceso de aire que ententece el proceso anaeróbico de descomposición. El uso de suelo común no compactado (en lugar de arcilla y/o suelo con un alto grado de compactación) en la cobertura final es otra de las causas de bajos rendimientos. Adicionalmente, el manejo inadecuado de lixiviados genera un fuerte impacto en la captura del biogás, ya que el líquido puede acumularse en las celdas y bloquear los pozos de extracción de gas. De acuerdo al reporte de Terraza, los sitios que instalaron bombas de extracción de lixiviados en celdas particularmente problemáticas lograron hasta duplicar la captura efectiva.

2. *El modelado del biogás:* Como se mencionó anteriormente, es difícil conocer la cantidad total del biogás generado en un sitio, ya que lo que se captura es apenas una fracción del total (ver ecuación (2.2) en el capítulo 2). Adicionalmente, la calibración de los modelos requiere años de información proveniente de numerosos sitios implementados en condiciones comparables, lo que dificulta el surgimiento de versiones más precisas de las herramientas de predicción. Por último, los modelos proveen estimados genéricos que no suelen adecuarse a las condiciones locales específicas de cada uno de los respectivos pozos de extracción²². El número elevado de factores que pueden incidir en la generación de biogás (resumido en la Figura 2.4) dificulta la emisión de pronósticos

²² Esto es particularmente cierto en el caso del modelo LandGEM, donde los valores de los parámetros L_0 y k asumen un determinado contenido de materia orgánica en los residuos. Dicho contenido puede variar de acuerdo a la región, con importantes consecuencias en los valores aplicables de los respectivos parámetros.

basados en unos pocos parámetros sencillos. Los resultados de este trabajo apoyan esta conclusión, específicamente, al observar la elevada variabilidad de las eficiencias empíricas de recolección calculadas en la sección 4.3.

3. *Operación de la planta de biogás:* Es importante advertir que la planta de biogás requiere cuidados adicionales al de la operación del relleno propiamente dicho, especialmente cuando el sitio de disposición continúa recibiendo residuos. El trabajo armonioso en el relleno y la recolección de biogás implica evitar la reconexión frecuente de pozos para permitir el trabajo de las máquinas y el personal, lo que requiere planificación y coordinación por parte de los responsables de ambas actividades (que no siempre pertenecen a la misma compañía). Adicionalmente, el informe de Terraza detecta algunos faltantes en los equipos técnicos necesarios para la operación de la planta de biogás (específicamente, se mencionan sitios carentes de moduladores que permitan regular el flujo de biogás, u otros ejemplos donde no se dispuso de un analizador de gas a lo largo de buena parte de un año de operaciones).

4.5. Conclusiones: resultados a utilizar en el análisis económico de la generación de biogás a partir de los residuos de la provincia de Tucumán.

A efectos de la evaluación económica del caso de estudio de esta tesis, se considerarán los siguientes puntos:

- a. La eficiencia de recolección que se utilizará en el escenario base será la del grupo ii), por considerarse más representativa de la población de rellenos sanitarios en

países en vías de desarrollo (y más “conservadora” en términos de generación de ingresos).

- b. Se utilizará la ecuación del IPCC, considerando un año de rezago entre la primera cohorte de residuos y la generación de biogás.
- c. En vistas de la elevada incertidumbre en la disponibilidad de biogás, el proyecto de aprovechamiento estará diseñado en módulos, lo que permitirá ajustar su capacidad en caso que el combustible disponible resulte mayor o menor a lo que predicen los cálculos ex-ante.

Antes de presentar el análisis económico propiamente dicho (disponible en el capítulo 6), el siguiente capítulo introduce algunos aspectos generales de la provincia de Tucumán y del marco normativo relevante para los proyectos de generación de electricidad mediante energías renovables.

Capítulo 5: Aspectos generales y normativos de la provincia de Tucumán.

5.1. Información básica de la provincia

El presente capítulo introduce algunos aspectos básicos de la provincia de Tucumán, donde se localiza el sitio de disposición final cuyas emisiones de biogás serán estimadas utilizando las herramientas presentadas en el capítulo 2. Debido al interés en el aprovechamiento energético de este recurso, se resumen además las principales normas aplicables a estas actividades, con una breve descripción del mercado eléctrico mayorista de Argentina.

La República Argentina consta de 24 entidades: 23 provincias y una ciudad autónoma (la Ciudad de Buenos Aires, sede del gobierno federal). La provincia de Tucumán es una de las más pequeñas de Argentina, pero al mismo tiempo una de las de mayor densidad habitacional: 64.29 habitantes por km² de acuerdo a datos del último censo, correspondiente al año 2010 (INDEC, s.f.), superada únicamente por la Capital Federal.

Capítulo 5: Aspectos generales y normativos de la provincia de Tucumán.

La provincia se sitúa entre los entre los paralelos 26° y 28° de latitud sur, y los meridianos de 64° 30' y 66° 30' de longitud oeste, en el centro del noroeste de la República Argentina. Posee una superficie de 22,524 km², que representa el 4.79% de la región Noroeste y 0.6% del país (Gobierno de la Provincia de Tucumán., 2014). Conocida como “el Jardín de la República”, pertenece a la Región del Norte Grande Argentino y su posición geográfica la convierte en el núcleo de comunicaciones de la región Noroeste. Limita con las provincias de Santiago del Estero (SE), Salta (N) y Catamarca (SO) (Figura 5.1).



Figura 5.1. *Ubicación de la provincia de Tucumán. Reimpreso de Ruíz de Toro y Toro (2014).*

Cada provincia argentina se divide en departamentos; el departamento capital de la provincia de Tucumán recibe el nombre de San Miguel de Tucumán. Adicionalmente, la provincia tiene otros 16 departamentos, cada uno de los cuales posee un *municipio*, su órgano gubernamental. En los

casos donde no existe municipio, el territorio departamental se divide administrativamente en *comunas rurales*. A efectos analíticos, es común estudiar conjuntamente el área formada por el departamento capital y fracciones de Cruz Alta, Yerba Buena, Tafí Viejo y Lules. A esta área se la conoce como el “Gran San Miguel de Tucumán” o “área metropolitana” (Figura 5.2).

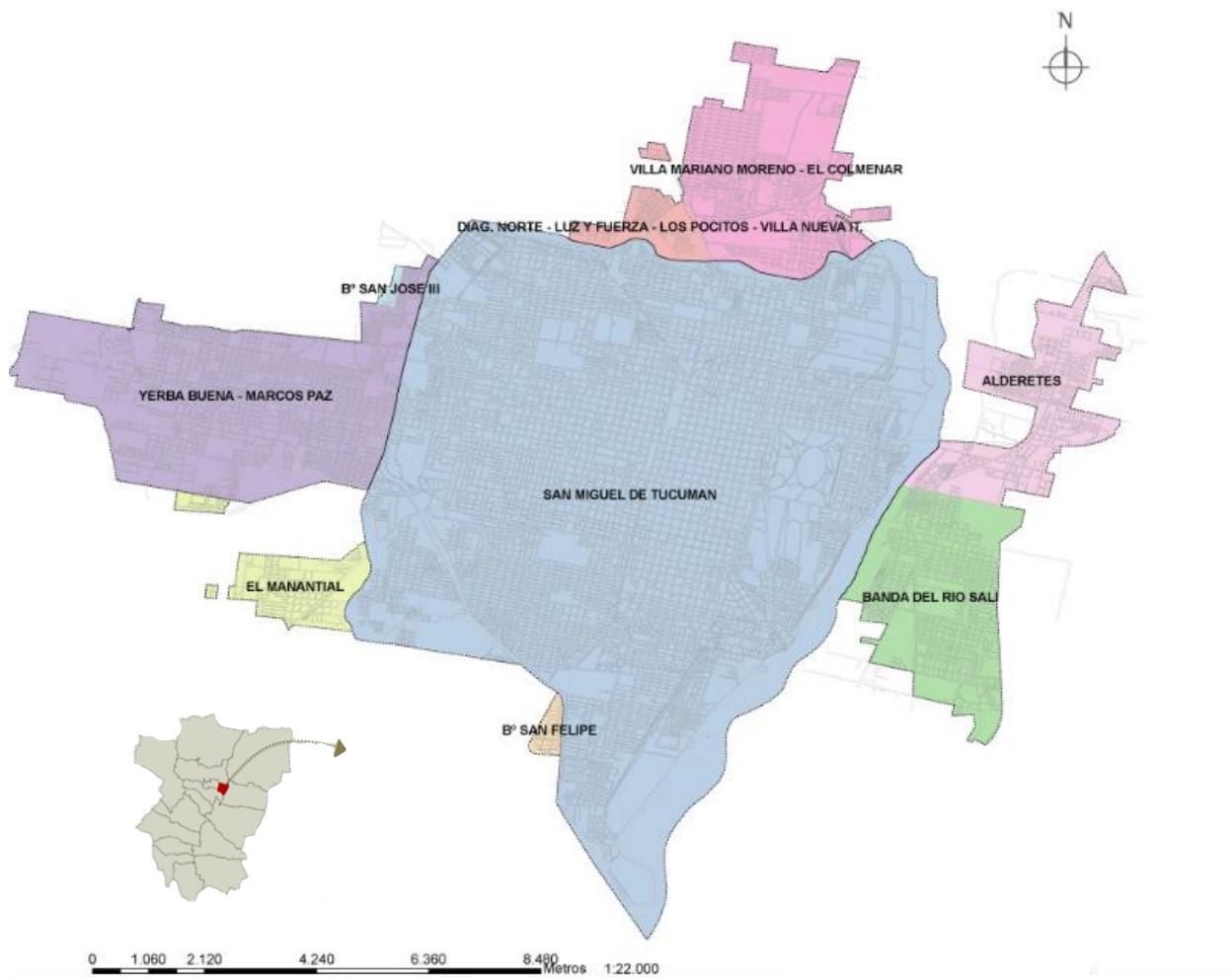


Figura 5.2. Gran San Miguel de Tucumán. Adaptado de Dirección de Estadística de Tucumán (2006).

Capítulo 5: Aspectos generales y normativos de la provincia de Tucumán.

En cuanto al relieve de la provincia de Tucumán (Figura 5.3), se distinguen tres áreas principales: al este, una zona de llanuras (las pampas de Tucumán); al oeste, tres cadenas montañosas (Cumbres Calchaquíes, al norte; cadena del Aconquija, al sur; sierras de El Cajón, en el extremo noroeste); al noreste, las Sierras Subandinas, de menor elevación.

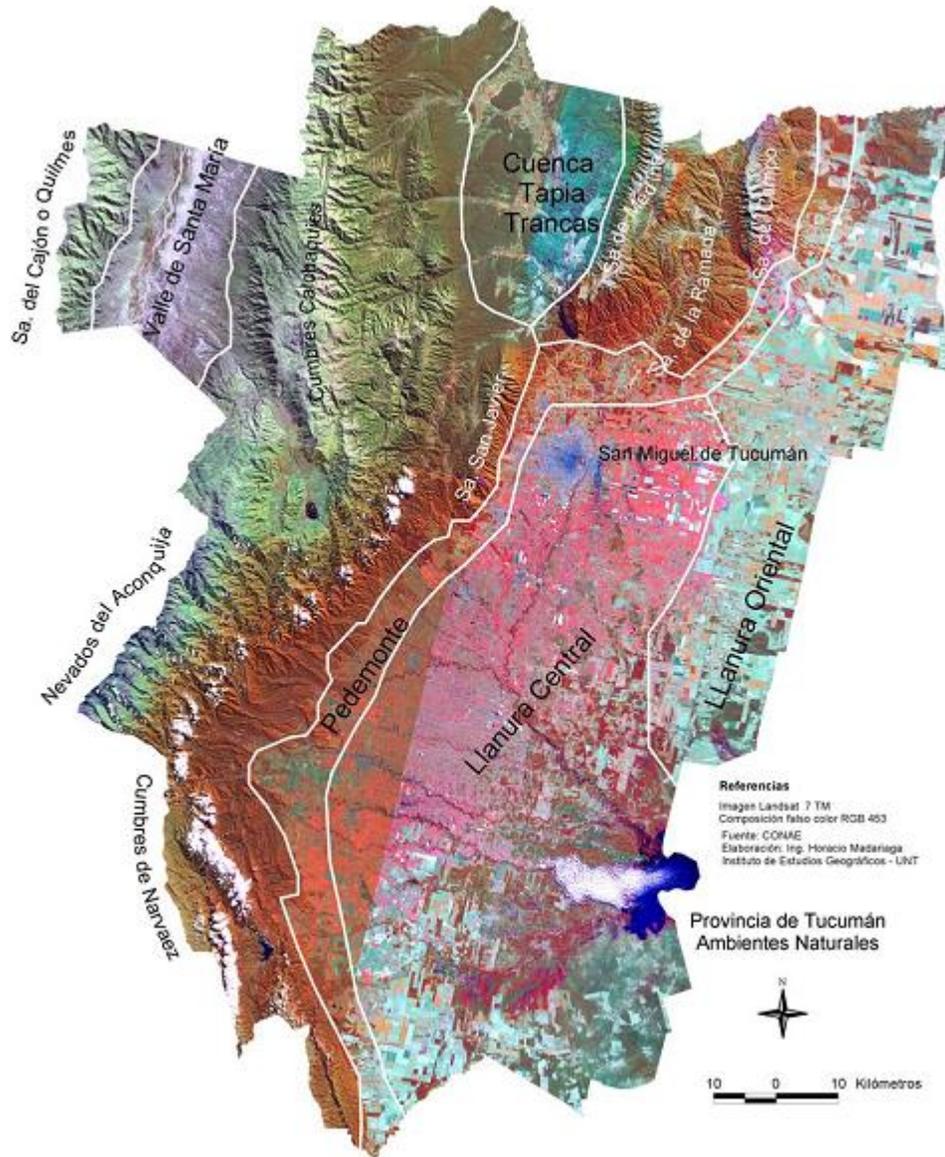


Figura 5.3. Relieve y ambientes naturales de Tucumán. Reimpreso de Ruíz de Toro y Toro (2014).

Tucumán presenta un clima *Cwa* de acuerdo a la clasificación de Köppen: subtropical con estación seca -el invierno- y verano cálido, con temperaturas medias superiores a los 22 ° C (Figura 5.4). Sin embargo, debido a su relieve, existen una gran variedad de microclimas. Las temperaturas más elevadas se encuentran en la zona este y sudeste, con veranos de hasta 45°C; los valores más bajos, en tanto, se localizan en las cumbres del oeste (Ruíz de Toro y Toro, 2014).

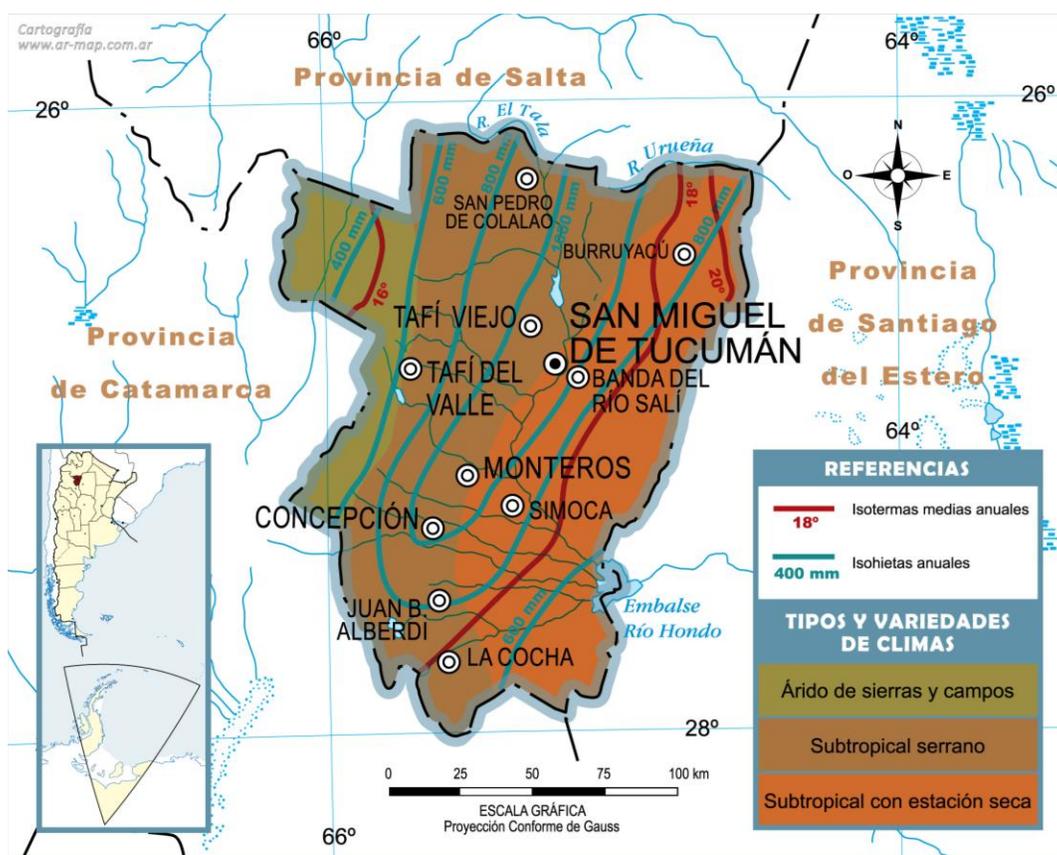


Figura 5.4. Mapa de climas de la provincia de Tucumán. Reimpreso de educ.ar (2011).

La característica principal en relación al régimen de precipitaciones en la provincia es la marcada estacionalidad: en sólo cuatro meses suele registrarse más del 90% de las lluvias. La estación más lluviosa, el verano, presenta promedios de hasta 242 mm al mes, mientras que en julio (invierno),

el nivel de precipitaciones desciende a unos 13 mm (Ruíz de Toro y Toro, 2014). Los cordones montañosos actúan en el área como barrera física a los vientos húmedos del sudeste, provenientes del Atlántico, determinando el régimen de lluvias y conformando las cuencas hidrográficas, características que en conjunto originan escalonamiento climático y dan lugar a la alta diversidad de eco-regiones mencionada anteriormente (Pérez Miranda C. et al., 2001).

Por último, en cuanto a la hidrología, el territorio de Tucumán se extiende sobre parte de tres cuencas hidrográficas: la cuenca del río Salí, que abarca casi el 80% del territorio provincial; la cuenca del río Santa María, en el noroeste de la provincia (6 %); y la cuenca de los ríos Tajamar-Urueña en el noreste (13 %) (Ruíz de Toro y Toro, 2014). El sistema hídrico principal lo constituye la Cuenca Hidrográfica del Río Salí, región superior de la Cuenca Salí - Dulce, una de las cuencas endorreicas más grandes de Sudamérica, cuyas características la posicionan entre las ecorregiones más importantes en biodiversidad de América Latina (Pérez Miranda C. et al., 2001).

5.2. Legislación argentina en materia de residuos sólidos urbanos.

La Constitución Nacional argentina (reformada por última vez en el año 1994) establece en su artículo 41 que *“Todos los habitantes gozan del derecho a un ambiente sano, equilibrado, apto para el desarrollo humano y para que las actividades productivas satisfagan las necesidades presentes sin comprometer las de las generaciones futuras (...) Corresponde a la Nación dictar las normas que contengan los presupuestos mínimos de protección, y a las provincias, las necesarias para complementarlas, sin que aquéllas alteren las jurisdicciones locales”*. Asimismo, los Artículos 121 y 124, disponen que las provincias son las titulares de dominio de los recursos

naturales existentes en su territorio y, por lo tanto, les cabe el ejercicio de todos los derechos relacionados con esa titularidad, incluso los relativos a su uso (Constitución de la Nación Argentina, 1994).

En materia de residuos, los presupuestos mínimos de lo que se considera un ambiente “sano, equilibrado y apto para el desarrollo humano” vienen dados en tres leyes mutuamente excluyentes, a saber, la Ley N° 25916 de “Protección Ambiental para la Gestión Integral de Residuos Domiciliarios” (2004); la Ley N° 25612 de “Gestión Integral de Residuos Industriales y de Actividades de Servicios” (2002) y la Ley N° 24051 de “Residuos Peligrosos – Generación, manipulación, transporte y tratamiento” (1992). Los residuos caen necesariamente bajo la jurisdicción de una de ellas, y, a diferencia de otros países, no existe una norma “marco” que funcione como nexo entre lo establecido por la constitución y las leyes mencionadas.

La ley relevante a los efectos de este trabajo es la N° 25916, que en su artículo 2° incluye la siguiente definición de residuos domiciliarios: *“Denomínese residuo domiciliario a aquellos elementos, objetos o sustancias que, como consecuencia de los procesos de consumo y desarrollo de actividades humanas, son desechados y/o abandonados”*. El término “domiciliarios” no debe entenderse en cuanto al origen de los residuos sino en cuanto a sus características: un residuo “de características domiciliarias” puede ser de *“origen residencial, urbano, comercial, asistencial, sanitario, industrial o institucional, con excepción de aquellos que se encuentren regulados por normas específicas”* (art. 1°), lo que en la literatura se conoce como “Residuos Sólidos Urbanos”, o RSU. Las demás “normas específicas” a las que hace mención la ley son las de residuos industriales y las de residuos peligrosos.

Adicionalmente, la normativa presenta las siguientes definiciones: “*Se entiende por residuo industrial a cualquier elemento, sustancia u objeto en estado sólido, semisólido, líquido o gaseoso, obtenido como resultado de un proceso industrial, por la realización de una actividad de servicio, o por estar relacionado directa o indirectamente con la actividad, incluyendo eventuales emergencias o accidentes, del cual su poseedor productor o generador no pueda utilizarlo, se desprenda o tenga la obligación legal de hacerlo*” (Ley N° 25612 de 2002, Art. 2°). Por su parte, “*se entiende por proceso industrial, toda actividad, procedimiento, desarrollo u operación de conservación, reparación o transformación en su forma, esencia, calidad o cantidad de una materia prima o material para la obtención de un producto final mediante la utilización de métodos industriales. Se entiende por actividad de servicio, toda actividad que complementa a la industrial o que por las características de los residuos que genera sea asimilable a la anterior, en base a [sic] los niveles de riesgo que determina la presente*” (Ley N° 25612 de 2002, Art. 1°). Por su parte, la Ley 24051 establece en su Anexo I el listado de residuos peligrosos, a los que hay que agregar cualquier residuo que posea alguna de las características enumeradas en su Anexo II²³.

Volviendo a los residuos domiciliarios, la Ley 25916 establece dos tipos de generadores: los generadores especiales son aquellos que “*producen residuos domiciliarios en calidad, cantidad y condiciones tales que, a criterio de la autoridad competente, requieran de la implementación de programas particulares de gestión, previamente aprobados por la misma*”. Los generadores individuales, en tanto, son los “*que, a diferencia de los generadores especiales, no precisan de*

²³ A saber: componentes explosivos, líquidos y sólidos inflamables, sustancias susceptibles de combustión espontánea, oxidantes, peróxidos orgánicos, tóxicos (sólidos, líquidos o gaseosos), sustancias infecciosas, y corrosivos.

programas particulares de gestión” (art. 12). Así, la distinción entre “especiales” e “individuales” queda a criterio de las autoridades competentes, determinadas por las jurisdicciones locales (provincias), de acuerdo al artículo 5° de la misma ley.

La legislación a nivel nacional es relativamente vaga en materia de manejo y disposición final de residuos. Existen sendas normas ajustadas a distintos tipos de residuos, aunque sin una norma “marco” que encuadre a todas las demás y delimite de manera clara las responsabilidades de la Nación, las provincias y los municipios, tal como es el caso de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos en México (LGPGIR, 2003). No existe un punto focal coordinador ni un sistema legislativo que integre las funciones del Gobierno Nacional sobre la totalidad de residuos, y no se cuenta con regulaciones precisas de orden federal (por ejemplo) acerca de los tipos de tratamiento o formas de disposición aceptadas y prohibidas. Es por ello que, históricamente, no existió un manejo uniforme a lo largo de la Argentina en materia de RSU, recayendo muchas de las responsabilidades sobre los municipios locales.

5.3. RSU: legislación de orden provincial y municipal.

La provincia de Tucumán, al igual que la mayoría de las provincias argentinas, delega a los municipios múltiples funciones. La Constitución Provincial incluye entre las áreas de competencia municipal las obras y servicios públicos, tanto como la atención de las materias de higiene, salubridad y la protección al medio ambiente (Constitución de la Provincia de Tucumán de 06/06/2006, artículo 134). De este modo, la gestión de los RSU recae sobre los respectivos municipios que conforman la provincia.

La provincia de Tucumán ha sido una de las pioneras al establecer un sistema legislativo propio que define con más claridad algunos roles y responsabilidades. En el año 2005 se aprobó la ley 7622, que utiliza el término “residuos sólidos urbanos”, delimita las áreas de responsabilidad de la provincia y de los municipios (y comunas rurales), permite la “zonificación” (creación de zonas intermunicipales para la gestión de RSU) y establece plazos para su implementación en toda la provincia y el cierre de los basurales a cielo abierto.

La ley 7622 fue reformada un año más tarde mediante la ley 7874, que extendía estos plazos y brindaba mayor claridad al rol de la provincia en el marco de los RSU. Así, por ejemplo, la provincia quedaba expresamente encargada de las estaciones de transferencia, y el rol de los municipios se acotaba al transporte de los residuos hasta la estación de transferencia más cercana (ley 7874 de 2007, artículo 6°). Adicionalmente, la reforma otorga a los municipios y comunas rurales libertad para la creación de consorcios, entre sí y con la provincia, para la gestión de los RSU. En relación a este trabajo, este aspecto es importante ya que la escala de un relleno sanitario deja de estar atada al tamaño de los municipios respectivos.

En diciembre de 2005 se creó la “Unidad Ejecutora Provincial para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos”, con la función de preparar, ejecutar y administrar un plan integral sobre los RSU, siendo además la autoridad de aplicación de la ley (Decreto 4.388/2005, 2005). En el mismo año se publicó el Plan Provincial de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU), elaborado por la empresa consultora “Cooprogetti Engineering & Consulting”. El plan, que incluye un relevamiento de la situación y una serie de propuestas a futuro, forma parte de la Estrategia Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (impulsada por la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación), y del Proyecto Nacional para la Gestión

Integral de Residuos Sólidos Urbanos. Este último cuenta con el financiamiento del Banco Interamericano de Desarrollo y brinda asistencia técnica y económica a modo de incentivo para que las provincias y sus municipios puedan elaborar sus propios planes y sistemas de gestión de residuos. Entre otros puntos, el GIRSU incluye estimaciones del potencial de biogás de cada uno de los sitios de disposición final, aunque no se contempla un aprovechamiento de este recurso (Cooprogetti, 2005).

En abril de 2009, la provincia publicó una ley nueva que derogaba las normas anteriores hasta entonces vigentes. Así, la ley 8177 pasó a reemplazar a las leyes 7622 y 7874. Entre los principales cambios que se introdujeron se pueden enumerar los siguientes:

1. Los municipios y comunas rurales pasan a ser responsables de la gestión de los RSU en todas las etapas, desde la recolección hasta la disposición final (Ley 8177 de 2009, artículo 5°), pudiendo solicitar asistencia técnica a la provincia en cualquiera de las instancias de la gestión (artículo 9°)²⁴.
2. Se establece el requisito de elaborar un Plan de Gestión Integral de RSU para cada municipio o comuna rural (artículo 5°).
3. Los municipios determinan cuáles residuos –por calidad, cantidad u otro criterio- estarán sujetos a un “régimen de manejo especial”.

Al momento de redacción de este trabajo, la ley 8177 se encuentra en plena vigencia.

²⁴ Las normas derogadas, en cambio, hacían responsables a los municipios únicamente del transporte hasta los sitios de transferencia, lugar desde el cual la gestión de los RSU pasaba a ser jurisdicción de la provincia.

5.4. Gestión de RSU en el área metropolitana de San Miguel de Tucumán

Se estima que la provincia de Tucumán genera un total de 1.053 toneladas de RSU por día, de las cuales 731 pertenecen al área metropolitana o Gran San Miguel de Tucumán (Cooprogetti, 2005).

El primer consorcio intermunicipal para el manejo de RSUs se creó en agosto de 2009, conformado por los municipios del Gran San Miguel de Tucumán, que incluye al departamento capital y los municipios Alderetes, Banda del Río Salí, Yerba Buena, Las Talitas y Tafí Viejo. Por tratarse del área metropolitana, este consorcio abarca la fracción más grande de los residuos generados en la provincia.

Desde el año 2012, los residuos del consorcio son depositados en el relleno de Overa Pozo, donde se estima que se reciben un total de 800 toneladas de RSU por día (La Gaceta, 2014). Previa a la conformación del consorcio, el departamento capital –el principal generador de la provincia– depositaba sus residuos en el relleno Los Vázquez, que operó desde febrero de 1996 hasta diciembre de 2004, recibiendo en promedio unas 400 ton/día de RSU. La clausura tuvo lugar aproximadamente tres años después de la fecha dictada por la capacidad del relleno (Vanney et al., 2005).

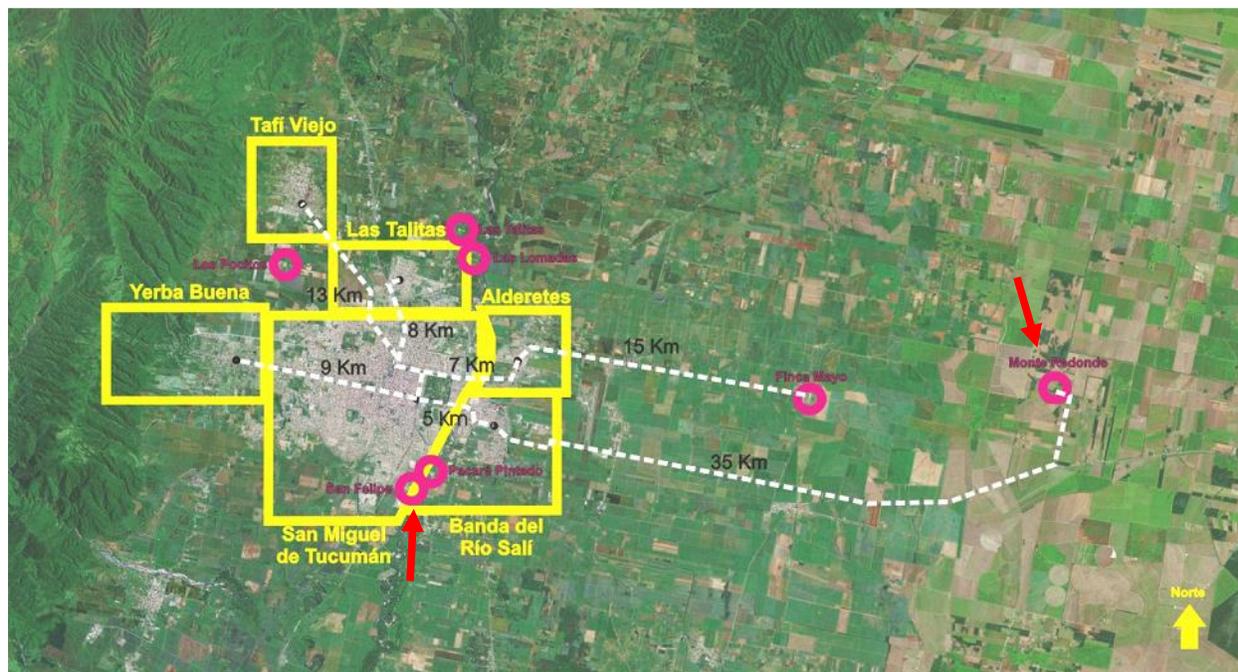


Figura 5.5. Ubicación de San Felipe y Overa Pozo (Monte Redondo) en la provincia de Tucumán, Argentina. Reimpreso de Cooprogetti (2005).

A grandes rasgos, los residuos del área metropolitana de San Miguel de Tucumán siguen el circuito ilustrado en la Figura 5.5. Los camiones se dirigen a la planta de transferencia de San Felipe, sobre el sur de la ciudad de San Miguel de Tucumán. Se trata de un área cercada de una superficie próxima a 3000 m², dentro de la cual las tareas de reclasificación y enfardado se realizan en un galpón cerrado. Es importante destacar que en la provincia de Tucumán, la gestión de los RSU no incluye una recolección diferenciada a separación en origen que facilite el reciclado. A abril de 2016, la separación (principalmente plásticos, aluminio y cartón) la realiza una cooperativa de aproximadamente 40 personas, directamente en la planta de transferencia.

Los residuos para disposición final se transportan en camiones pesados hasta Overa Pozo (Figura 5.6), predio de unas 100 hectáreas ubicado a unos 35 km de distancia al este del centro de la capital

provincial (Cooprogetti, 2005). En diciembre de 2015, dicho sitio contaba con tres celdas: dos de 300 metros de largo por 100 metros de ancho y cinco metros de profundidad (con doce metros de elevación sobre la superficie), y la más reciente, de 180 metros de largo y 150 metros de ancho y 16 metros de profundidad. Las celdas están recubiertas por una membrana de dos mil micrones a efectos de preservar las napas subterráneas y cuenta con un sistema de cañerías colectoras de lixiviados, que se tratarán en una planta in situ que se encuentra en etapa de diseño y planeación (La Gaceta, 2014; Lanoticiaya.com, 2015). Se prevé que el sitio tenga una vida útil de 30 años (Bionersis y Ably Carbon, 2011), aunque otras estimaciones indican entre 40 y 50 años (La Gaceta, 2015). Por tratarse del relleno más grande de la provincia, se considerará el sitio de Overa Pozo como el caso de estudio de este trabajo. Las emisiones de este sitio (y su potencial aprovechamiento energético) se discuten en el capítulo 6.



Figura 5.6. Relleno sanitario Overa Pozo (Tucumán, Argentina).

5.5. El Mercado Eléctrico Mayorista de Electricidad y las energías renovables en Argentina: historia de un potencial no explotado.

El mercado eléctrico mayorista (MEM) de Argentina abarca la totalidad del país a través del sistema interconectado nacional (llamado “SADI”, Sistema Argentino de Interconexión). Con base en datos de la Compañía Administradora del Mercado Mayorista (CAMMESA), actualizados a marzo de 2016, el SADI cuenta con 32,631 MW de capacidad instalada, de los cuales 11,320 MW (35%) corresponden a energías renovables. De éstas, la gran mayoría proviene de fuentes hidroeléctricas de gran escala. De los 11,108 MW de capacidad hidroeléctrica, sólo 290.9 MW corresponden a escalas menores a 30 MW (CAMMESA, 2016).

Para poner la capacidad renovable de Argentina en perspectiva, se analiza la potencia disponible en otros países de América Latina. Uruguay contó, en el año 2014, con 481 MW de capacidad eólica (Ministerio de Industria, Energía y Minería, 2015), contra 187 MW en Argentina. Países con mucha menor superficie, como Nicaragua o Costa Rica, igualan o superan a Argentina en capacidad eólica instalada, con 186.2 MW y 196.5 MW, respectivamente (CEPAL, 2015); resultados similares se observan para las fuentes geotérmicas, solares y de aprovechamiento de biogás.

Una de las causas detrás de la falta de desarrollos relacionados con energías renovables es el bajo precio de la electricidad mayorista. De acuerdo a datos del año 2014 publicados en un informe del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), la tarifa monómica²⁵ promedio de Argentina se ubica 50 sobre un total de 55 naciones analizadas, con valores por debajo de los 50 USD/MWh y, por ende, de las tarifas mínimas que vuelven rentables a energías como la eólica, la solar y el biogás (BID y Bloomberg New Energy Finance 2016, pág. 13).

Los orígenes de este retraso en el precio de la energía mayorista (comparado con otros países) se remontan a la crisis socio-económica argentina del año 2001, tras la cual se produjeron cambios radicales en las políticas gubernamentales. Las tarifas de electricidad fueron convertidas de su valor original en dólares estadounidenses a moneda local a un tipo de cambio menor al de mercado; se revocaron las disposiciones relativas a ajustes de precio y los mecanismos de indexación por

²⁵ La tarifa monómica se define como el total de ingresos generados por una central eléctrica (incluyendo pagos por potencia y por generación), dividido en la generación total provista en el mismo período.

inflación de las concesiones de las empresas de servicios públicos (incluyendo los servicios de distribución y transmisión de electricidad), con quienes se renegociaron los contratos; por último, se determinó que el precio spot de la electricidad en el MEM se calcule sobre la base del precio del gas natural. Estas medidas, combinadas con la fuerte devaluación de la moneda doméstica y los altos índices de inflación, tuvieron como resultado la pronunciada caída en términos reales del precio del MWh percibido por los generadores (Pampa Energía, 2015), tal como se refleja en el informe del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Bloomberg New Energy Finance (2016).

Algunas iniciativas tuvieron por objeto corregir esta problemática, en particular en lo que refiere a energías renovables. La Ley N° 26190 estableció el objetivo de alcanzar una participación del ocho por ciento de energías renovables de pequeña y mediana escala en el abastecimiento de la demanda nacional de electricidad hasta el año 2016, meta que no sería alcanzada: los últimos datos publicados (correspondientes al 2014), reportan una participación media de este segmento de renovables del 1.3% (CMMESA, 2015)²⁶.

Por su parte, la Ley 25019 introdujo incentivos para las energías solares y eólicas; en particular, esta norma estableció beneficios impositivos y asignó un pago adicional por MWh producido. Sin embargo, este último no fue suficiente para despertar el interés de los inversores. Por ejemplo, se estimaba un precio total a los generadores del orden de los 32.50 USD/MWh (para proyectos

²⁶ Las estadísticas publicadas en Argentina, incluidos los reportes anuales de CMMESA, reportan la energía hidráulica mayor a 30 MW por separado de las demás energías renovables.

nuevos, incluyendo pago extra), muy por debajo del costo por MWh de energías renovables como la eólica, estimado en el rango de 100 y 120 USD/MWh (Guinle, 2014).

La resolución 712/2009 de la Secretaría de Energía tuvo por objeto mejorar las condiciones de contratación de nuevos generadores renovables -especialmente, relajando ciertos requisitos para participar del mercado, reduciendo cargos por interconexión y barreras administrativas para la contratación. En el marco de dicha resolución, en el año 2009, el gobierno nacional llamó a licitación pública para la contratación de energía de fuentes renovables y origen privado mediante un proceso competitivo, en lo que se conoció como el programa GENREN. Se suscribieron contratos por un total de 895 MW, incluyendo eólicos, fotovoltaicos, de biocombustibles y mini-hidráulicos, con precios fijos denominados en dólares estadounidenses; sin embargo, la mayoría de estos proyectos encontraron dificultades en su implementación efectiva, principalmente por problemas crediticios, por lo que la mayoría no habían sido implementados a diciembre de 2014 (Guinle, 2014).

En otro esfuerzo por incentivar la generación a partir de fuentes renovables, la resolución 108/11 de la Secretaría de Energía otorgó libertad a CAMMESA para la firma de contratos de abastecimiento y para la determinación discrecional de los precios respectivos. En el marco de esta norma, se contrataron proyectos con tarifas de hasta 240 USD/MWh para energía solar fotovoltaica, 120 USD/MWh para eólica y 180 USD/MWh para biomasa; sin embargo, la resolución 108/11 fue suspendida en febrero de 2016, dejando a los desarrolladores en un nuevo limbo en materia de regulación. Se espera que los nuevos proyectos de energías renovables obtengan su tarifa a partir de un proceso licitatorio competitivo por tipo de energía (energiaestrategica.com).

La Ley N° 27191 (B.O. 21/10/2015) introdujo medidas nuevas para la promoción del sector. En particular, esta ley pospone para el año 2017 la meta del 8% establecida por la Ley N° 26190, y establece un objetivo de mediano plazo en el orden del 20% para el 2025. Para ello, los consumidores con demandas de 300 kW o más quedan obligados a cubrir una fracción de su consumo con energías renovables, desde un 8% a diciembre de 2017 hasta un 20% a finales de 2025. Adicionalmente, la norma crea un “Fondo Fiduciario de Energías Renovables”, (que otorgará préstamos, avales y aportes de capital a desarrollos en el sector), y asigna beneficios fiscales para estas inversiones (puntualmente, amortización acelerada de activos y exención de impuestos a las importaciones para bienes de capital).

La generación de electricidad mediante el biogás de los rellenos sanitarios se encuadra dentro del alcance de la Ley N° 27191, vigente al momento de la redacción de esta tesis. El tema de los incentivos y su impacto en la rentabilidad de los proyectos se abordará nuevamente en el capítulo 6, cuando se evalúe la viabilidad económica del aprovechamiento energético del biogás en la provincia de Tucumán.

5.6. Experiencias de rellenos sanitarios con aprovechamiento energético en Argentina

En Argentina, existen unos once rellenos sanitarios registrados dentro del MDL (Fenhann y Schletz, 2015). A nivel nacional existen únicamente dos centrales de generación eléctrica a partir de biogás proveniente de rellenos sanitarios, por un total de 16.6 MW de capacidad (CAMMESA, 2016). Los RSU de la Ciudad de Buenos Aires y una treintena de partidos del área metropolitana de la Provincia de Buenos Aires (conocido en Argentina como el “Conurbano bonaerense”) se

depositan en el “Complejo Ambiental Norte III”, a cargo de la empresa “Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado” (CEAMSE). Por sus dimensiones y las distintas etapas de apertura y cierre, el complejo está dividido en tres rellenos sanitarios: Norte III A, Norte III B (ambos en etapa de post-cierre) y Norte III C, que recibe casi diez mil toneladas de residuos por día (CEAMSE, 2014).

La central San Miguel (11.5 MW) utiliza como insumo energético el biogás del módulo Norte IIIC; la segunda es la central San Martín (5.1 MW instalados, sobre un total de 7.1 MW proyectados), que utiliza el biogás del módulo Norte IIIA. Ambas centrales están conectadas a la red de 13.2 kV de la empresa distribuidora de la zona centro del país (CEAMSE, 2014).

En Tucumán, la empresa “Bionersis Argentina S.A.” inició un proyecto de captura del biogás del relleno sanitario de Overa Pozo, en el marco del MDL. El proyecto preveía la instalación de 2 MW en 2012 y 4 MW en 2020 (Bionersis y Ably Carbon, 2011); sin embargo, a mayo de 2016 el proyecto no ha sido implementado. La viabilidad económica de generar electricidad a partir del biogás de este sitio es el objeto del capítulo siguiente.

Capítulo 6: Aprovechamiento del biogás disponible en el relleno sanitario de Overa Pozo, Tucumán.

6.1. Modelado de biogás disponible en Overa Pozo y escenarios de aprovechamiento.

El primer paso en el análisis económico del aprovechamiento energético del biogás del relleno sanitario de Overa Pozo (caracterizado en el capítulo 5.4) consiste en modelar la cantidad del recurso que se espera obtener. Para ello, se utilizará el modelo del IPCC presentado en el capítulo 2 de este trabajo (en la versión corregida por Santos et al., 2015), ajustado por las eficiencias de recolección empíricas que surgen de la base de datos de proyectos del MDL (discutidas en el capítulo 4.3). El uso de este modelo se justifica por su mayor efectividad a nivel empírico, de acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 4.5.

El relleno sanitario Overa Pozo recibe residuos desde el año 2010, a un ritmo estimado de 880 toneladas por día (La Gaceta, 2012), lo que equivale a 321,200 toneladas en el primer año. Según datos del plan integral de manejo de residuos de la provincia de Tucumán, la composición de los

mismos viene dada de acuerdo a la Tabla 6.1. A efectos prácticos, se prevé que la cantidad de residuos recibida crezca a la misma tasa de la población del área metropolitana tucumana, estimada en 0.83% de acuerdo a datos censales (INDEC, s.f.). Las condiciones climáticas en el área del relleno pueden ser clasificadas dentro de la categoría “boreal y templado húmedo” del IPCC (Bionersis y Ably Carbon, 2011; Zuccardi y Fadda, 1985).

Tabla 6.1. *Composición de los residuos que llegan al relleno sanitario de Overa Pozo.*

Tipo de residuo	Participación
1. Madera y derivados	0.4%
2. Pulpa, papel y cartón	8.8%
3. Alimentos, bebidas y tabaco	46.5%
4. Textiles	14.5%
5. Jardín	9.2%
6. Vidrio, plástico, metal y otros inertes	20.6%

Nota. Adaptado de Cooprogetti (2005).

Con los datos climáticos, la información acerca de la generación anual de residuos, su composición y la proyección a futuro, es posible estimar las emisiones totales de biogás en el relleno de Overa Pozo. De este total generado, solamente podrá ser capturada una fracción: en línea con los resultados del capítulo 4.3, la eficiencia de colección se ubicará entre un 30% y un 70%. Asumiendo un contenido de metano del 50% del total de biogás generado, el modelo del IPCC predice la curva de producción indicada en la Figura 6.1. La generación de CH₄ llega a su punto máximo en año posterior al cierre del sitio (esperado en el 2030, de acuerdo a Bionersis y Ably Carbon, 2011).

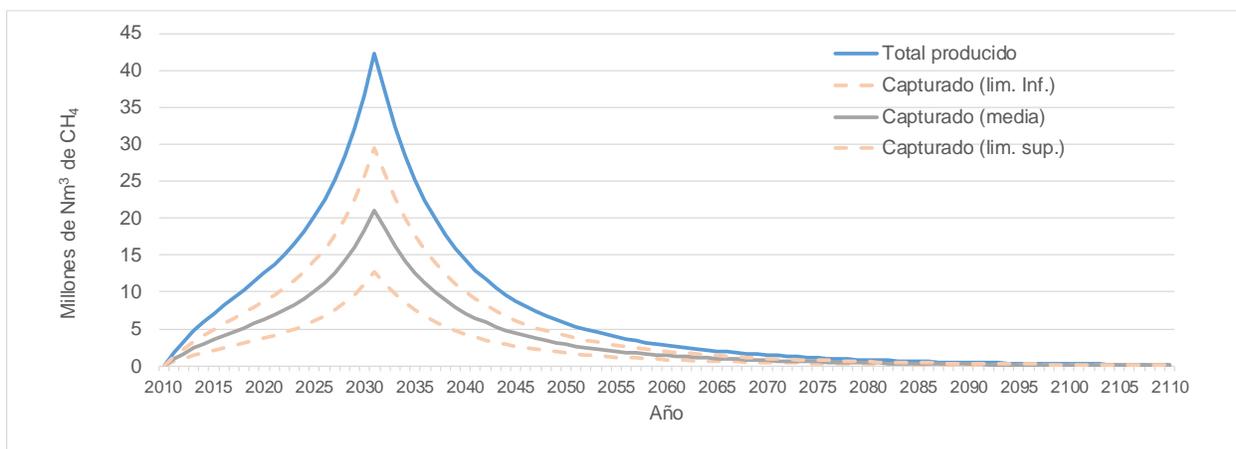


Figura 6.1. Generación de biogás a partir de los residuos recibidos en el relleno sanitario Overa Pozo.

Estos datos servirán de base para estimar la producción potencial de energía eléctrica en el sitio. Los supuestos adicionales necesarios para realizar el análisis se presentan en la siguiente sección.

6.2. Premisas del análisis económico.

El primer aspecto relevante consiste en la definición del proyecto propiamente dicho. En este sentido es importante aclarar que el presente análisis abarca únicamente la captura y el aprovechamiento del biogás generado en un relleno sanitario *existente*. De este modo, no se incluyen ingresos o egresos relacionados con la gestión, la recepción y el almacenamiento de los residuos, así como de la remediación del sitio luego del cierre.

Adicionalmente a las cantidades almacenadas de residuos, su composición y las condiciones climáticas del sitio de estudio, se necesita una serie de supuestos adicionales para llevar a cabo el análisis económico, a saber:

Tipo y tamaño de aprovechamiento:

Existen varias formas de aprovechar el biogás capturado por un relleno sanitario. El biocombustible puede ser utilizado directamente en calderas ubicadas en el sitio (por ejemplo, para evaporar lixiviados), o ser vendido a industrias vecinas para su uso directo en secadoras, hornos, u otras cámaras térmicas. Otro uso posible involucra purificar el biogás hasta obtener metano puro, que puede exportarse a las líneas comerciales, ya sea como gas natural comprimido o como gas natural líquido.

Para generar energía eléctrica existen varias alternativas. La más común -considerada en este trabajo- es el uso de motores de combustión interna, tecnología utilizada por más del 75% de los proyectos que generan electricidad en los EEUU (LMOP, 2015). Otras alternativas más costosas incluyen el uso de turbinas a gas, a vapor, de ciclo combinado o sistemas de cogeneración (GMI y U.S. EPA, 2012).

Específicamente, el diseño considerado abarca los siguientes sistemas:

- *Equipos de extracción:* incluye los pozos y las tuberías, con sus respectivos componentes (cabezales, bombas para extracción de lixiviados acumulados, etc.).
- *Equipos de bombeo y limpieza:* principalmente, sopladores (aunque también pueden utilizarse compresores), sistemas de regulación y limpieza que permiten reducir la humedad del biogás y su contenido de partículas.
- *Antorcha:* Se utiliza para la quema del biogás que no se aproveche en los sistemas de generación, e incluye los componentes asociados de regulación y control.

- *Equipos de generación:* Se consideran motores de combustión interna modulares, ya que otorgan mayor flexibilidad para realizar expansiones al sistema (Terraza y Willumsen, 2009).

Para la conceptualización de la planta de generación de energía eléctrica se consideraron tres escenarios, de acuerdo al límite inferior, medio y superior de la eficiencia de recolección (por simplicidad, redondeadas a 30%, 50% y 70%, respectivamente). Cada uno de estos escenarios resultará en una configuración distinta para la planta, debido a la mayor o menor disponibilidad del biocombustible. En todos los casos, la puesta en marcha del proyecto se asume a partir del año 2020, por lo que la construcción debería iniciar en 2019, con espacio para algunos trabajos preliminares en 2018.

Los siguientes principios -establecidos en Conestoga-Rovers & Associates (2004)- se utilizaron para la conceptualización de las alternativas de aprovechamiento:

- (i) Para determinar el tamaño del sistema de colección, se consideró el flujo *máximo* posible de biogás. Dicho componente representa una fracción relativamente pequeña del total a invertir, pero constituye un factor limitante para el aprovechamiento del biogás.
- (ii) Por el contrario, para el equipo de generación se considera el flujo *mínimo* de biogás disponible. Los componentes de este sistema se instalan en forma modular, por lo que su expansión es sencilla en caso de que la disponibilidad de combustible así lo permita.

- (iii) El requisito para la instalación de módulos de generación adicionales es que la disponibilidad de biogás permita ocupar los equipos durante un número de años suficiente para amortizar su inversión (ver Apéndice A).

De acuerdo a lo anterior, se preparó un algoritmo sencillo capaz de optimizar la capacidad instalada de la planta de acuerdo a la disponibilidad del biogás. La generación y la potencia nominal para una cantidad dada de CH₄ vendrán dadas por las siguientes expresiones:

$$EG_y = \frac{HC_{CH_4}}{f} F_y (1 - p) \eta_y \quad (6.1)$$

$$CAP_y = \frac{HC_{CH_4}}{f \cdot 8760} F_y \quad (6.2)$$

donde:

- EG_y = Generación de electricidad en el año y (en MWh/año)
- HC_{CH_4} = Valor calorífico del CH₄ (35,739 BTu/m³ de CH₄), (U.S. EPA, 2014)
- F_y = Flujo de CH₄ disponible (en m³/año)
- f = Requisito calorífico del generador (11,250,000 BTu/MWh; incluye la eficiencia del equipo) (U.S. EPA, 2014).
- α = Consumo parasitario del generador (7%) (U.S. EPA, 2014)
- η_y = Factor planta en el año y (93%) (U.S. EPA, 2014)
- CAP_y = Capacidad disponible en el año y (MW)

La capacidad instalada que el proyecto tendrá en cada período se obtiene de la secuencia siguiente:

1. La curva de generación de biogás (Figura 6.1) permite determinar, para cada año del período bajo análisis, la capacidad máxima posible utilizando la ecuación (6.2).
2. La capacidad “teórica” obtenida en el paso anterior resulta en cambios continuos en la potencia instalada del proyecto, por lo que debe ajustarse para reflejar cambios discretos en la capacidad nominal. El bloque mínimo de generación que puede ser agregado se establece en 0.8 MW.
3. Para que agregar un bloque de capacidad adicional sea económicamente viable, se deberá disponer de combustible suficiente para operarlo durante un período de al menos n años. El valor de n dependerá principalmente del costo del equipo, del precio de la energía producida, de los gastos de operación y mantenimiento, y de la tasa de descuento temporal²⁷. El cálculo de este parámetro se presenta en el Apéndice A.

Siguiendo esta lógica, cada combinación de parámetros (cantidad de residuos, composición, tasa de descuento de capital propio, precio de la energía, costos de los equipos, etc.) resultará en un

²⁷ Por ejemplo, si el valor de la energía es lo suficientemente alto (en relación al costo del equipo), bastará con un solo año de disponibilidad de biogás para que se justifique llevar adelante la inversión (incluso cuando los años restantes no hubiera suficiente biogás y el generador quedara sin usarse el resto de su vida útil). Conforme el precio del MWh disminuya, se requerirán más años de disponibilidad de biogás para que se pueda recuperar el costo de adquirir e instalar los equipos.

escalado “óptimo” de la planta, que incluye (para cada escenario) la capacidad total a instalar y el momento en el que cada módulo de generación deberá ser instalado.

En los escenarios previstos para Overa Pozo, el tamaño del proyecto queda definido como se observa en las figuras 6.2, 6.3 y 6.4. La primera de ellas corresponde a una eficiencia de captura en el límite inferior del rango estimado (30%). Los primeros cinco años el proyecto presenta una capacidad de 1.36 MW, a los que se agrega 0.84 MW adicional en el sexto año y 0.88 MW en el noveno (para un total de 3.08 MW). El biogás que no logra ser aprovechado en los generadores es quemado en la antorcha, ya que no se justifica la inversión en un módulo de generación adicional que solamente dispondría de combustible suficiente para operar por un período corto de años.

Las figuras 6.3 y 6.4 corresponden, respectivamente, a los límites medios y superior de la eficiencia de recolección. En el primer caso, la capacidad pasa de un total de 2.27 MW (primer año) a 3.31 MW (quinto año), 4.57 MW (octavo año) y finalmente 5.83 MW (año 10); en el segundo, la disponibilidad de biogás justifica una capacidad inicial de 3.18 MW que recibe incrementos sucesivos hasta alcanzar un total de 8.16 MW en el décimo año de operaciones.

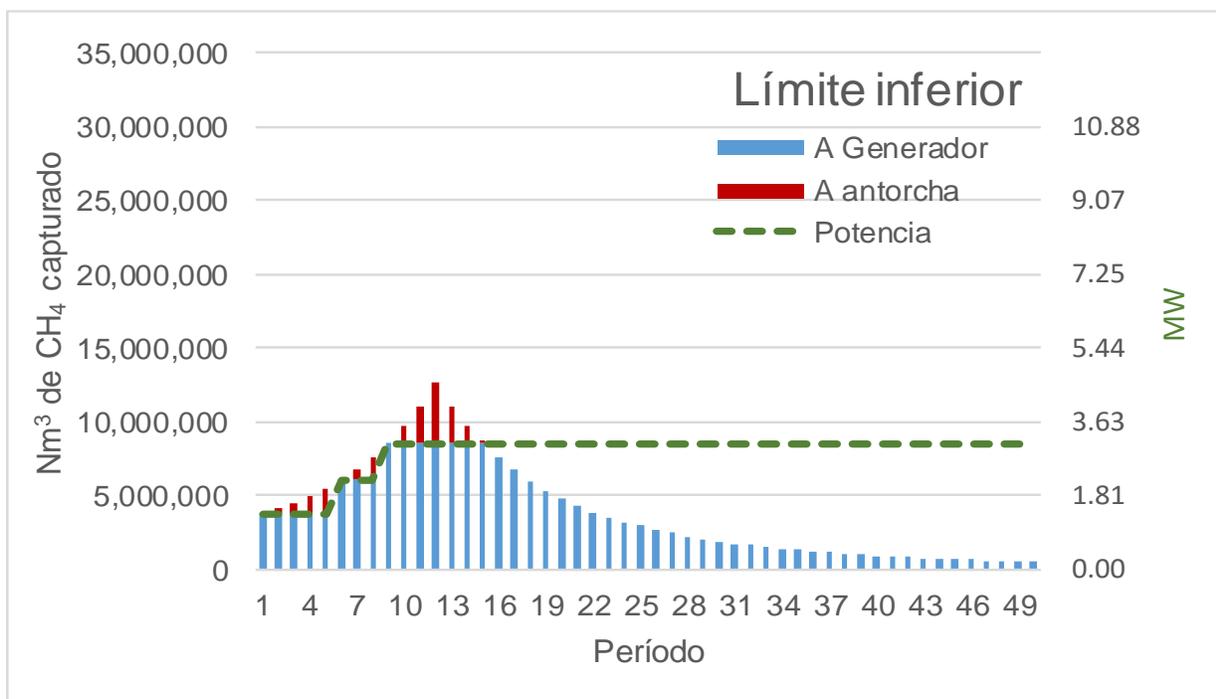


Figura 6.2. Captura prevista de biogás de acuerdo al límite inferior del intervalo de confianza de la eficiencia de captura (eje izq.) y capacidad instalada (eje der.).

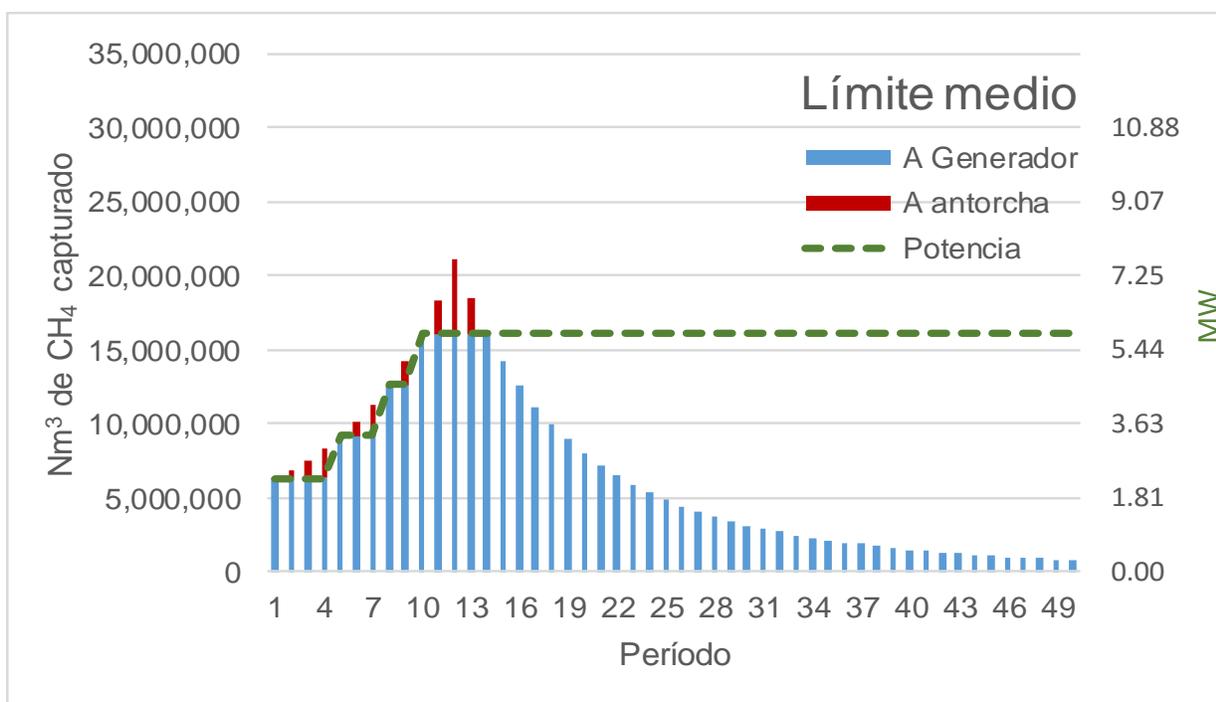


Figura 6.3. Captura prevista de biogás de acuerdo al límite medio del intervalo de confianza de la eficiencia de captura (eje izq.) y capacidad instalada (eje der.).

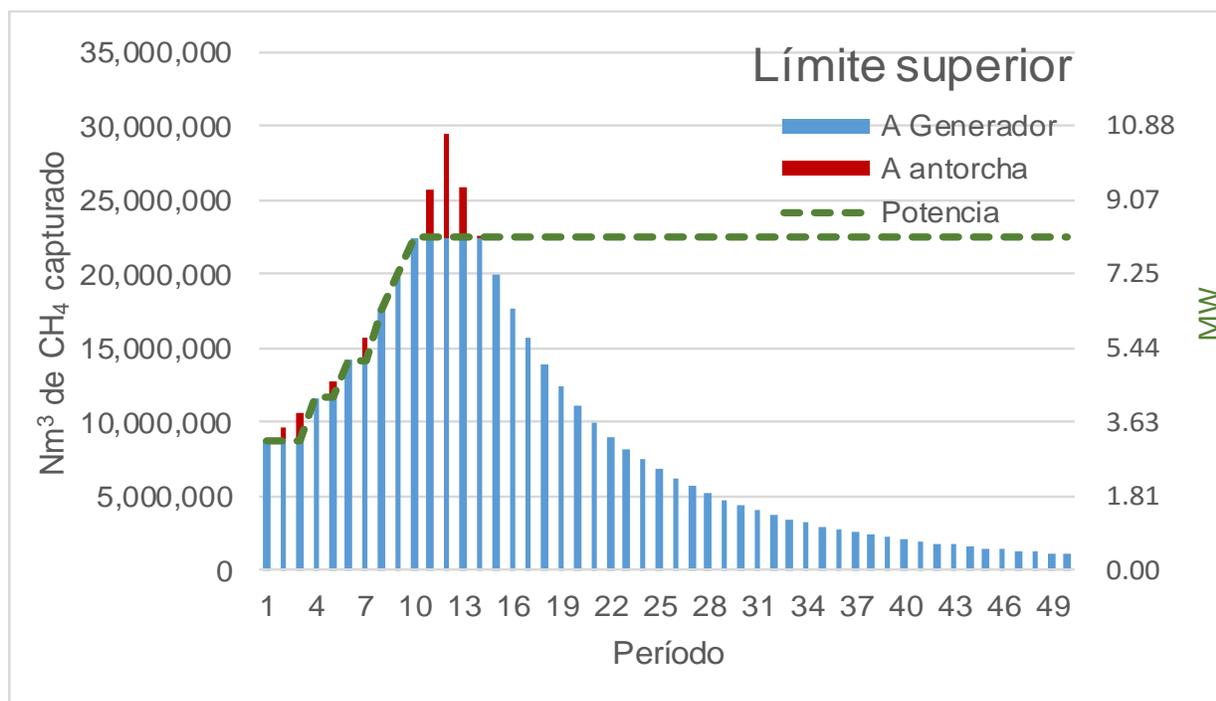


Figura 6.4. Captura prevista de biogás de acuerdo al límite superior del intervalo de confianza de la eficiencia de captura (eje izq.) y capacidad instalada (eje der.).

Inversión en equipos y obras civiles:

Terraza y Willumsen (2009) reportan rangos con costos estándar para cada uno de los sistemas que integran un proyecto de biogás a partir de rellenos sanitarios. Se eligió el rango superior en todos los casos, ya que estos se aproximan a las cifras utilizadas por el software LFGcost-Web de la Agencia de Protección Ambiental de los EEUU (U.S. EPA, 2014).

Otro aspecto importante tiene que ver con el momento en que se realizan las distintas inversiones. Una particularidad de este proyecto radica en el hecho de que la operación comercial de la planta generadora inicia *antes* de que se culmine la totalidad de las obras de ingeniería y la instalación de los respectivos equipos comprendidos dentro del proyecto. Esto se debe a que el operador del

Modelos de predicción de generación de biogás: análisis crítico y aplicación al caso de Tucumán, Argentina.

relleno sanitario irá cubriendo paulatinamente la superficie en la cual se dispondrán los residuos, por lo que las obras de recolección del biogás sólo podrán realizarse de manera gradual. Similarmente, la disponibilidad de dicho combustible determinará la potencia adicional, que se instalará de manera escalonada.

De acuerdo a las fuentes consideradas para este trabajo, el monto a invertir en los sistemas de captura dependerá de la superficie del sitio, mientras que los sistemas de bombeo y antorchas dependerán del flujo de biogás (Terraza y Willumsen, 2009). Overa Pozo cuenta con un total de 100 hectáreas, que serán cubiertas a lo largo de su vida útil (recordando que su cierre se espera para el año 2030). El modelo utilizado prorrotea las hectáreas de acuerdo al porcentaje de llenado del sitio (Tabla 6.2). Al momento de iniciar operaciones, en el año 2020, se estima que el proyecto tendrá ocupadas unas 30 hectáreas, por lo que la inversión inicial en los sistemas de captura únicamente considera dicha superficie. Las inversiones pendientes se irán llevando a cabo conforme se proceda al llenado de las celdas adicionales; de este modo, los tres escenarios inician operaciones en el año 2020, pero las obras de infraestructura en el sitio continúan hasta 2030.

Tabla 6.2. *Recepción de residuos durante la vida útil del relleno sanitario Overa Pozo.*

Año	Residuos recibidos	% de llenado del relleno	Hectáreas ocupadas	Hectáreas agregadas
2010	321,200	2.2%	2.21	2.21
2011	323,866	4.4%	4.45	2.23
2012	329,264	6.7%	6.72	2.27
2013	337,531	9.0%	9.04	2.33
2014	348,878	11.4%	11.45	2.40
2015	363,598	14.0%	13.95	2.51
2016	382,086	16.6%	16.59	2.63
2017	404,845	19.4%	19.38	2.79
2018	432,521	22.4%	22.36	2.98
2019	465,924	25.6%	25.57	3.21
2020	506,072	29.1%	29.06	3.49
2021	554,243	32.9%	32.88	3.82
2022	612,037	37.1%	37.10	4.22
2023	681,466	41.8%	41.79	4.70
2024	765,070	47.1%	47.07	5.27
2025	866,059	53.0%	53.04	5.97
2026	988,516	59.9%	59.85	6.81
2027	1,137,653	67.7%	67.69	7.84
2028	1,320,157	76.8%	76.79	9.10
2029	1,544,654	87.4%	87.44	10.65
2030	1,822,328	100.0%	100.00	12.56

Nota. La información de generación se obtuvo de La Gaceta (2012), ajustada por la tasa de crecimiento vegetativa obtenida de INDEC (s.f.).

Las cifras para cada componente de la inversión en equipos y obras civiles se presentan en la Tabla 6.3. Cabe destacar que los montos reportados corresponden a las cifras totales, independientemente del momento en el que esa inversión efectivamente sea llevada a cabo.

Tabla 6.3. *Inversión en equipos y obras civiles según eficiencia de recolección (ER).*

Concepto	Costo por unidad	Escenario: ER = 30%	Escenario: ER = 50%	Escenario: ER = 70%
Sistemas de captura	50,000 USD/ha	5,000,000 USD (100 ha)	5,000,000 USD (100 ha)	5,000,000 USD (100 ha)
Sistemas de bombeo	200 USD/m ³ hora	674,311 USD (3371 m ³ /hora)	674,311 USD (3371 m ³ /hora)	674,311 USD (3371 m ³ /hora)
Antorcha	80 USD/m ³ hora	269,724 USD (3371 m ³ /hora)	269,724 USD (3371 m ³ /hora)	269,724 USD (3371 m ³ /hora)
Sistemas de generación	1700 USD/kW	5,242,182 USD (3.08 MW)	9,902,699 USD (5.83 MW)	13,863,779 USD (8.16 MW)
Sub-Total (USD)		11,186,217	15,846,734	19,807,814

Nota. Los costos unitarios se obtuvieron de Terraza y Willumsen (2009).

Por su parte, el costo total de los equipos de generación variará de acuerdo al escenario: el de eficiencia de recolección mínima considera una potencia máxima de 3.08 MW (alcanzada en el noveno año); el de eficiencia media alcanza hasta 5.83 MW (décimo año) y el de máxima, 8.16 MW (décimo año de operaciones). Se consideró un costo estándar por kW, de acuerdo a los valores reportados en la literatura (Terraza y Willumsen, 2009), correspondientes a módulos tipo contenedores (ofrecidos bajo la modalidad llave en mano) y que incluyen todos los equipos auxiliares necesarios (alternadores, ventilación, atenuación de ruido, cuarto de control, etc.).

Otros gastos de capital:

Adicionalmente a los equipos y las obras de infraestructura, la puesta en marcha requiere de una serie de gastos complementarios cuya magnitud no es despreciable; los mismos se presentan en la Tabla 6.4. Terraza et al. (2007) y U.S. EPA (2014) incluyen dentro de este grupo erogaciones como estudios previos, pruebas de bombeo (cuya importancia se discute más adelante), el registro dentro

del MDL y la supervisión de la obra. Adicionalmente, se agregaron otros componentes no contemplados en la literatura que se tomó como base (gastos legales, intereses durante la construcción y comisiones bancarias), ya que los mismos podrían resultar significativos en el contexto de Argentina. Para estas partidas se consideraron estimaciones propias.

Por último, los proyectos de energías renovables están exentos del pago de impuestos a las importaciones (Ley 27191, 2015), por lo que dicha partida se estableció en cero.

Tabla 6.4. *Gastos varios.*

Concepto	Escenario: ER = 30%	Escenario: ER = 50%	Escenario: ER = 70%
Estudios previos ⁽¹⁾	20,000	20,000	20,000
Pruebas de bombeo ⁽¹⁾	55,000	55,000	55,000
Registro MDL ⁽¹⁾	50,000	50,000	50,000
Supervisión y estudios de diseño ⁽¹⁾	458,845	613,107	767,369
Administrativos y legales ⁽²⁾	114,711	153,277	191,842
Intereses durante la construcción ⁽²⁾	563,279	744,558	931,893
Comisiones bancarias ⁽²⁾	21,336	28,203	35,299
Impuestos a las importaciones ⁽²⁾	0	0	0
Contingencias ⁽²⁾	229,423	306,554	383,685
Sub-total	1,512,594	1,970,699	2,435,089

Nota. Las cifras indicadas con (1) se obtuvieron de Terraza y Willumsen (2009); valores marcados con (2) son estimaciones propias.

Duración de la construcción y período analizado:

El “período de construcción” mencionado aquí se refiere al plazo de tiempo necesario para la puesta en funcionamiento de la planta de generación y los sistemas de captura. Sin embargo, es importante recalcar que esto no incluye la *totalidad* de las obras y sistemas, muchos de los cuales

se irán instalando conforme las sucesivas celdas del relleno se ocupen y el incremento en el flujo del biogás justifique la instalación de potencia adicional.

Como se mencionó anteriormente, todos los escenarios asumen que el proyecto se pone en marcha a partir del año 2020, por lo que la construcción debe iniciar en 2019, con algunos trabajos preliminares en 2018. Este último constituye el período “cero”²⁸ en el presente análisis económico. El análisis se extiende hasta el año 2069, para un total de 50 años de operación. No se considera un valor residual de la inversión debido a que el estudio contempla la totalidad de la vida útil de los equipos y las obras civiles.

Financiamiento:

El financiamiento se resume en la Tabla 6.5. Un 30% del valor del proyecto se financia con un crédito bancario. Sin embargo, es importante resaltar que el monto financiado incluye las erogaciones necesarias para la puesta en marcha del proyecto, es decir, la inversión que ocurre en el período 2018-2019. Esto equivale a asumir que los montos a invertir en períodos posteriores se consideran financiados 100% con recursos propios²⁹.

²⁸ El período cero es el momento en el cual se evalúa el valor presente neto.

²⁹ Esto explica por qué los escenarios dos y tres reciben la misma cantidad de financiamiento bancario pese a tener costos globales totales diferentes. Ambas variantes requieren el mismo aporte de fondos para su puesta en marcha incluso cuando el escenario tres requiera más inversiones una vez que el proyecto se encuentra en operaciones.

El plazo de la deuda se estima en 15 años, contra una tasa de interés bancaria del 11%. La misma presenta un valor elevado debido al riesgo percibido por los inversores para aportar fondos en Argentina. De manera similar, se estimó el retorno exigido para el capital propio, también en una cifra considerablemente elevada (si se compara con retornos obtenidos en otros países), en un 20.33%. Esta cifra se obtuvo del sitio Norte III.C (Buenos Aires), el último relleno sanitario argentino registrado en el MDL (Iezzi et al., 2011)³⁰.

Tabla 6.5. Financiamiento del proyecto.

Concepto	Escenario: ER = 30%	Escenario: ER = 50%	Escenario: ER = 70%
Costo total del proyecto (USD)	12,698,811	17,817,433	22,242,903
Costo total del proyecto en el período “cero” (USD)	6,101,049	8,101,773	10,108,783
Aporte bancario	4,267,262 (70%)	5,640,588 (70%)	7,059,799 (70%)
Aporte de capital propio	1,833,786 (30%)	2,461,185 (30%)	3,048,984 (30%)
Plazo de la deuda	15	15	15
Tasa de interés bancaria	11%	11%	11%
Retorno exigido al capital propio	20.25%	20.25%	20.25%

Nota. Condiciones de financiamiento de acuerdo a la experiencia del autor. Tasa de interés de acuerdo a energiaestrategica.com (2016).

³⁰ Las guías metodológicas de UNFCCC sugieren valores por defecto para las tasas de retorno exigidas por los inversionistas. En el caso de Argentina, la misma sería de 14.5% (en términos reales), y 17.1% (incluyendo la inflación del 2.3%).

Entorno económico:

La moneda considerada para el análisis es el dólar norteamericano (USD). Los últimos cambios en la legislación (discutidos en el capítulo 5.5) utilizan esta divisa para la valoración de los contratos, lo que permite otorgar mayor estabilidad a los precios acordados, reduciendo el riesgo cambiario. Sin embargo, las tarifas acordadas en Argentina no contemplan indexación por inflación (energiaestrategica.com), por lo que la misma no ha sido considerada. Los costos, por otra parte, se ajustan de acuerdo a la inflación esperada de los EEUU (2.30% basada en cifras del sitio web statista (2016)).

Ingresos:

El cuadro de ingresos se detalla en la Tabla 6.6. Se consideran las ventas de energía eléctrica y las reducciones de emisiones de CO₂. Se tomaron los últimos precios reportados en proyectos de características similares (energiaestrategica.com; WB y Ecofys, 2015).

Tabla 6.6. Cuadro de ingresos del proyecto.

Concepto	Escenario: ER = 30%	Escenario: ER = 50%	Escenario: ER = 70%
MWh / año (media)	9,595	16,616	23,625
USD/MWh ⁽¹⁾	180	180	180
tCO ₂ e reducidas / año (media) ⁽²⁾	73,751	123,228	172,700
USD/ tCO ₂ e ⁽³⁾	0.30	0.30	0.30

Nota. (1) Precio establecido en los contratos basados en la Resolución 180 de la Secretaría de Energía para proyectos de biomasa; (2) Considerando 1 tCH₄ = 25 tCO₂e; Factor de emisiones de la red eléctrica: 0.497 tCO₂e/MWh (Iezzi et al., 2011); (3) Precio establecido en base a WB y Ecofys (2015).

Operación y mantenimiento:

En línea con Terraza y Willumsen (2009), los gastos anuales de operación y mantenimiento corresponden a un 10% del costo total para un proyecto de generación de electricidad a partir de biogás. La base sobre la cual se realiza el cálculo se actualiza conforme se agregan nuevas inversiones al proyecto; adicionalmente, los costos se actualizan por inflación.

Beneficios fiscales:

Se consideraron los beneficios fiscales reportados en el capítulo 5.5 (depreciación acelerada, y exención de impuestos a las importaciones).

6.3. Indicadores considerados

Para la evaluación de los proyectos se consideraron los siguientes indicadores económicos:

Valor presente neto (VPN).

Se trata del indicador más utilizado para el análisis de viabilidad económica de proyectos (Brealey et al., 2008; Sapag Chain, 2011). El valor presente neto considera todos los flujos de fondos que genera un proyecto, castigando los más lejanos en el tiempo con una ponderación menor. Dicha ponderación utiliza el costo de oportunidad del capital de la empresa, que no es otra cosa que la rentabilidad que la firma obtendría en el mejor proyecto alternativo. De este modo, los flujos positivos (ingresos netos) que genera el proyecto se cotejan con el flujo negativo (la inversión) que

los origina. Los flujos netos llevan una ponderación cada vez menor conforme se alejan en el tiempo. Específicamente, el VPN viene dado por:

$$VPN = F_0 + \frac{F_1}{(1+r)} + \frac{F_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+r)^n} \quad (6.3)$$

donde:

VPN = Valor presente neto

F_i = Cada uno de los flujos generados por el proyecto.

r = Tasa de descuento o costo de capital. Representa el rendimiento que obtendría la empresa en la mejor inversión alternativa.

Una inversión es deseable en la medida que su VPN sea positivo, es decir, cuando los ingresos netos “descontados” sean superiores a la inversión inicial. Entre dos inversiones alternativas, la mejor será la que tenga el mayor VPN.

Tasa interna de retorno (TIR).

La segunda medida de rentabilidad más utilizada es la tasa interna de retorno (TIR). En la ecuación del VPN se incluyó una tasa r que representa la rentabilidad que la empresa obtiene para su capital. Nótese que cuanto más grande sea esta tasa de descuento, más difícil será que el VPN sea positivo. Conforme la tasa suba, sólo los mejores proyectos tendrán un valor presente mayor a cero. La TIR captura, precisamente, el punto crítico en el que el VPN pasa de positivo (rentable) a negativo (no rentable), es decir, es la tasa que hace que el VPN sea igual a cero. En general, todo proyecto será económicamente viable cuando su TIR sea mayor a la tasa de descuento utilizada.

Sin embargo, la TIR presenta una serie de deficiencias como indicador (Sapag Chain, 2011):

1. Entrega un resultado que conduce a la misma regla de decisión que la obtenida con el VPN.
2. No permite comparar proyectos, por cuanto una TIR mayor no es necesariamente “mejor” que una menor³¹.
3. Algebraicamente, existirán tantas TIRs como cambios de signo se observen en el flujo de fondos. Si un proyecto presenta más de un cambio de signo, habrá múltiples TIRs y no será posible determinar cuál de todas es la “correcta” o darles una interpretación válida. Este fenómeno será común en proyectos donde existan inversiones significativas en los períodos en los que la empresa ya se encuentra en marcha (precisamente, el caso de los escenarios que se evalúan en este trabajo).
4. No es adecuada para la comparación de alternativas en proyectos que impliquen únicamente un costo (es decir, para buscar la opción que cueste menos).

Un flujo de fondos “bien comportado” consta de uno o más valores iniciales negativos, luego de lo cual la actividad comienza a “recuperar” la inversión y se obtienen valores positivos. De este modo, existe un único cambio de signo en el flujo de fondos y por ende una única TIR. En los escenarios analizados en el contexto de este trabajo, en cambio, existen numerosos cambios de signo debido al momento en el que se realizan las inversiones y la naturaleza variable del recurso a explotar. Esto implica que existirá más de una TIR por cada escenario, sin que exista una

³¹ Que un proyecto con una TIR mayor sea “mejor” desde el punto de vista de la rentabilidad dependerá de la tasa de descuento contra la que se evalúe.

interpretación válida para cada una de ellas, por lo que dicho indicador se descarta en el ámbito de este trabajo.

Período de recuperación del capital

Es el número de años que se requieren hasta recuperar la inversión. Nótese sin embargo que, entre dos proyectos, el mejor será el que tenga mayor VPN incluso si su período de recuperación de capital es más largo. Este indicador se considera complementario y se incluye en los resultados del presente trabajo.

6.4. Resultados

Los resultados del análisis económico se presentan en la Tabla 6.7. Todos los escenarios tienen un VPN positivo, lo que justifica proseguir con la evaluación de los proyectos a un nivel de factibilidad. Es importante destacar que el escenario de mínima eficiencia de recuperación de biogás tiene VPN positivo, lo que sienta un nivel mínimo para las expectativas del proyecto. Si, en efecto, la recolección de biogás se ubicara entre el 50%-70%, los resultados mejoran considerablemente.

La Tabla 6.7 muestra dos indicadores adicionales de suma importancia. El primero es el precio de equilibrio, que por su relevancia se discute en la sección 6.5. El segundo es el período de cierre del proyecto que, como su nombre indica, señala el momento en el que es más rentable cerrar la planta de generación que seguir operándola.

Existen varios aspectos de interés a destacar en relación al “período de cierre del proyecto”. En primer lugar, el hecho inusual de cerrar una planta cuya vida útil aún no ha sido completamente agotada. Sin embargo, esto se explica por una serie de factores: el primero es la naturaleza decreciente del biogás (una vez que el sitio deja de recibir residuos); a esto debe agregársele que los costos operativos escalan al ritmo de la inflación, mientras que el precio del MWh permanece constante. Esto puede visualizarse en las figuras 6.5 a 6.7, que muestran, en cada caso, una curva de costos creciente a la par de una curva de ingresos que llega a un máximo y luego comienza a decrecer. Una vez que los costos igualan a los ingresos (esto es, el punto en el que se cruzan las curvas de las figuras), la operación de la planta no se justifica desde un punto de vista económico³².

Tabla 6.7. *Resultados de la evaluación financiera del proyecto.*

Concepto	Escenario: ER = 30%	Escenario: ER = 50%	Escenario: ER = 70%
Costo total del proyecto (USD)	12,698,811	17,817,433	22,242,903
Valor Presente Neto (USD)	471,938	3,350,954	6,337,010
Período de recuperación del capital (años)	7	3	3
Precio de equilibrio (USD/MWh)	169	131	114
Período de cierre del proyecto (años desde primer período de operaciones)	22	24	25

Nota. Elaboración propia en base a las premisas presentadas en la sección 6.2.

³² Sin embargo, continuar la operación (al menos, de la antorcha), puede estar justificado desde el punto de vista ambiental o de seguridad.

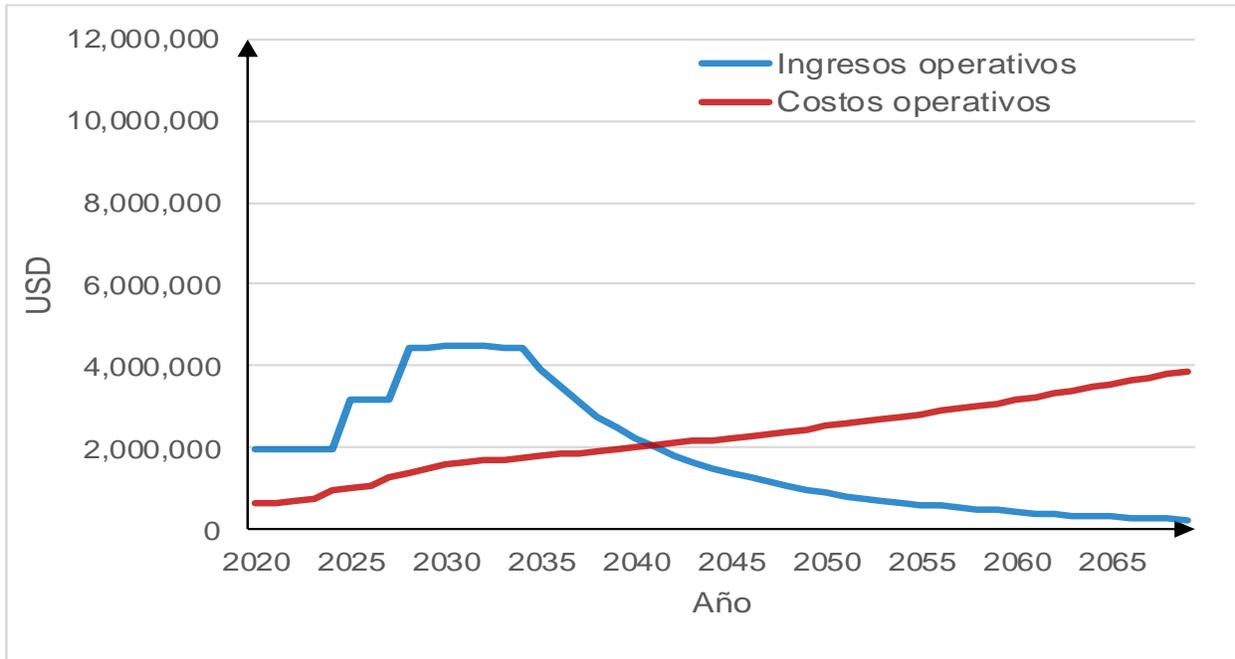


Figura 6.5. Ingresos y costos operativos para el escenario de captura mínima.

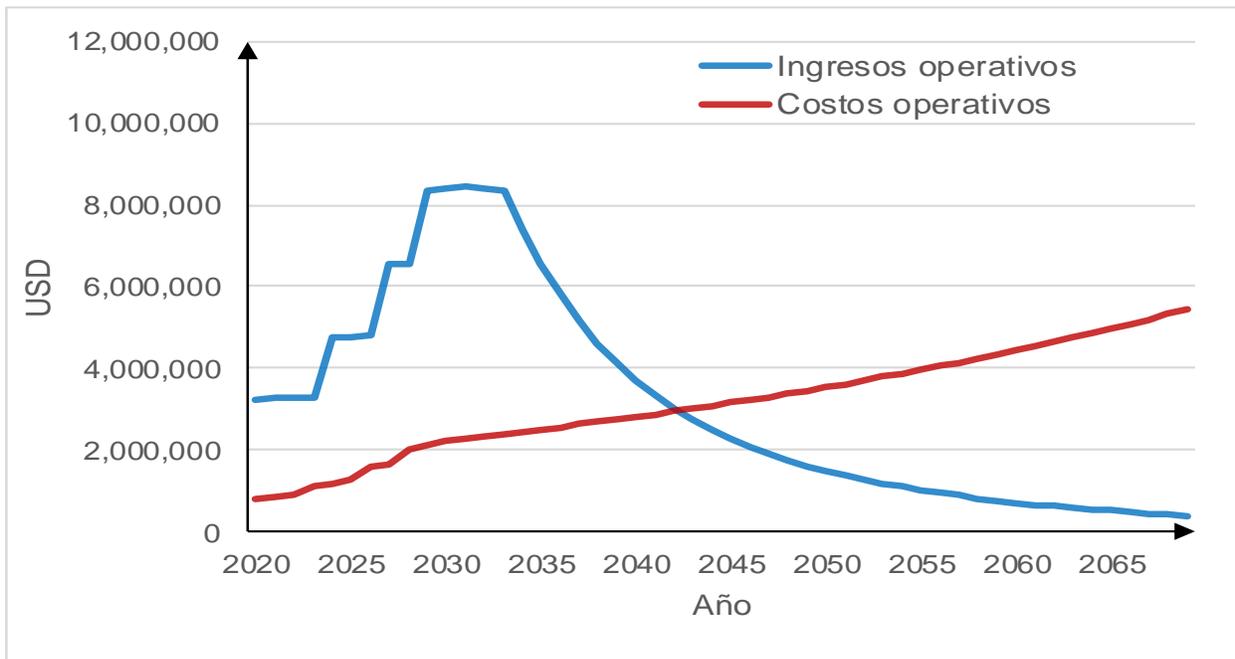


Figura 6.6. Ingresos y costos operativos para el escenario de captura media.

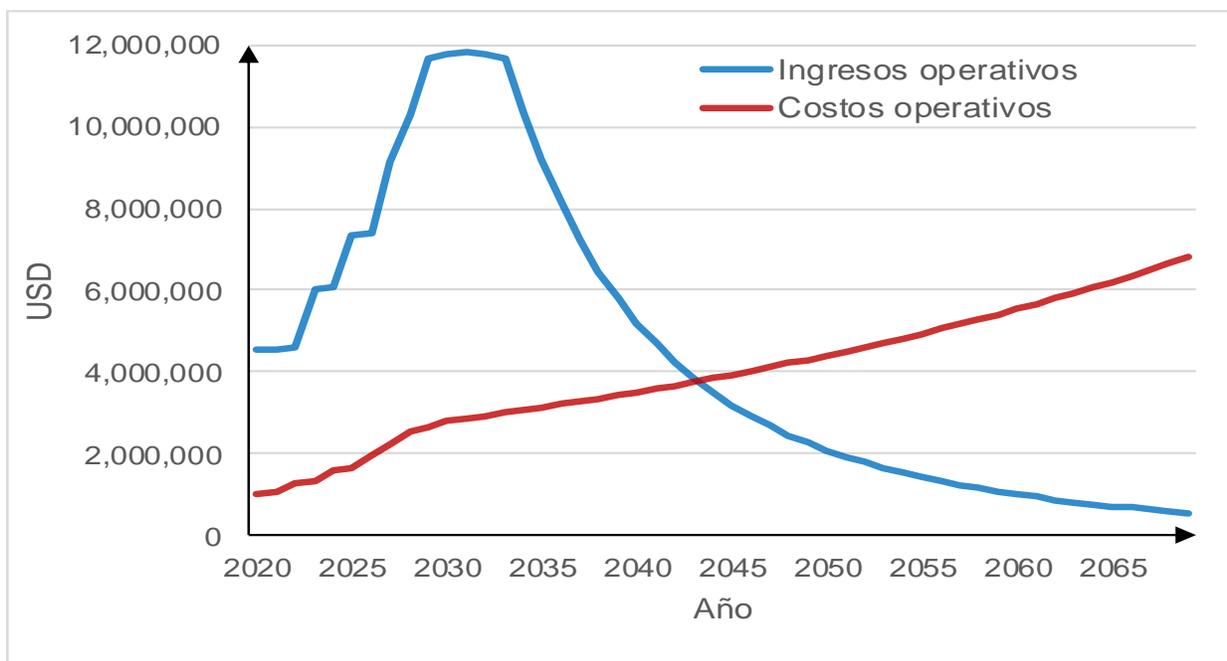


Figura 6.7. Ingresos y costos operativos para el escenario de captura máxima.

6.5. Costo unitario por MWh.

La Figura 6.8 presenta el análisis de punto de equilibrio del proyecto, para cada una de las eficiencias de recolección modeladas. Dicho análisis evalúa el VPN de cada escenario para distintos precios de venta de la energía. El precio de equilibrio es aquel para el cual el VPN = 0, es decir, el precio a partir del cual cada escenario comienza a ser rentable. La gráfica muestra además dos de los últimos precios registrados en proyectos similares: 180 USD/MWh, de acuerdo a los contratos de generación de electricidad con biomasa suscriptos en el marco de la Resolución 180 de la Secretaría de Energía (discutida en el capítulo 5.5), y 124 USD/MWh, que es el precio firmado en 2011 por el relleno sanitario Norte III.C de la provincia de Buenos Aires, uno de los más grandes de Argentina, con 6872 toneladas de residuos depositadas por día (Iezzi et al., 2011).

El escenario base (ER = 30%) requiere un precio mínimo de 169 USD/MWh, por encima del monto contratado por el proyecto Norte III.C (de una escala muy superior a Overa Pozo, en Tucumán), pero por debajo de los contratos basados en la Resolución 180 de la Secretaría de Energía. Es importante reiterar que dicha norma no se encuentra vigente al momento de la redacción de esta tesis, tras ser derogada en 2015. Se espera que para los nuevos contratos los precios sean determinados en procesos competitivos de licitación por tipo de tecnología (energiaestrategica.com). No obstante, las cifras consideradas para el análisis de esta sección constituyen las últimas referencias disponibles hasta tanto se adjudiquen contratos nuevos.

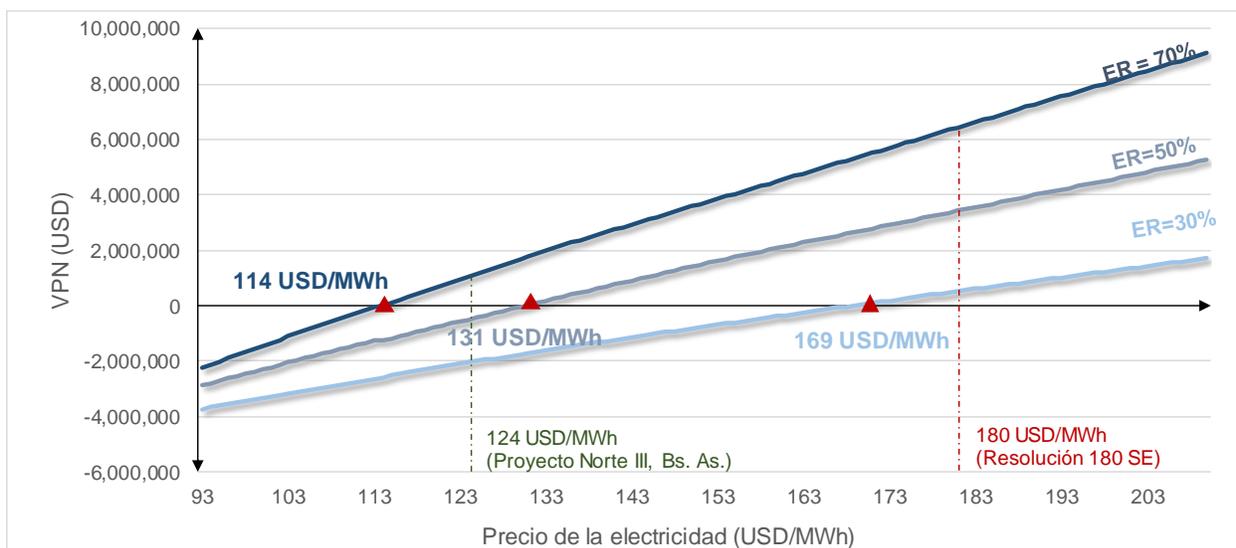


Figura 6.8. Relación precio de venta de la electricidad y VPN para distintas eficiencias de captura.

El precio mínimo desciende conforme aumenta la eficiencia de recolección, ubicándose en 131 USD/MWh (eficiencia del 50%) y en 114 USD/MWh (eficiencia del 70%).

Por su parte, la Figura 6.9 captura el impacto de las elevadas tasas de interés pagadas en Argentina sobre el desarrollo de este tipo de proyectos. De acuerdo a expertos del sector consultados por el portal periodístico *Energía Estratégica*, países vecinos consiguen financiamiento bancario por debajo del 4% o 5%, mientras que en Argentina las tasas se ubican alrededor del 12% (energiaestrategica.com). En efecto, el precio de equilibrio para un proyecto de generación de electricidad a partir de los residuos en Overa Pozo baja de 172 USD/MWh (para una tasa del 12%) a 157 USD/MWh (para una tasa del 5%), siempre considerando la eficiencia de recolección mínima. De este modo, se observa cómo el alto costo del endeudamiento repercute claramente en las tarifas negociadas en el sector energético.

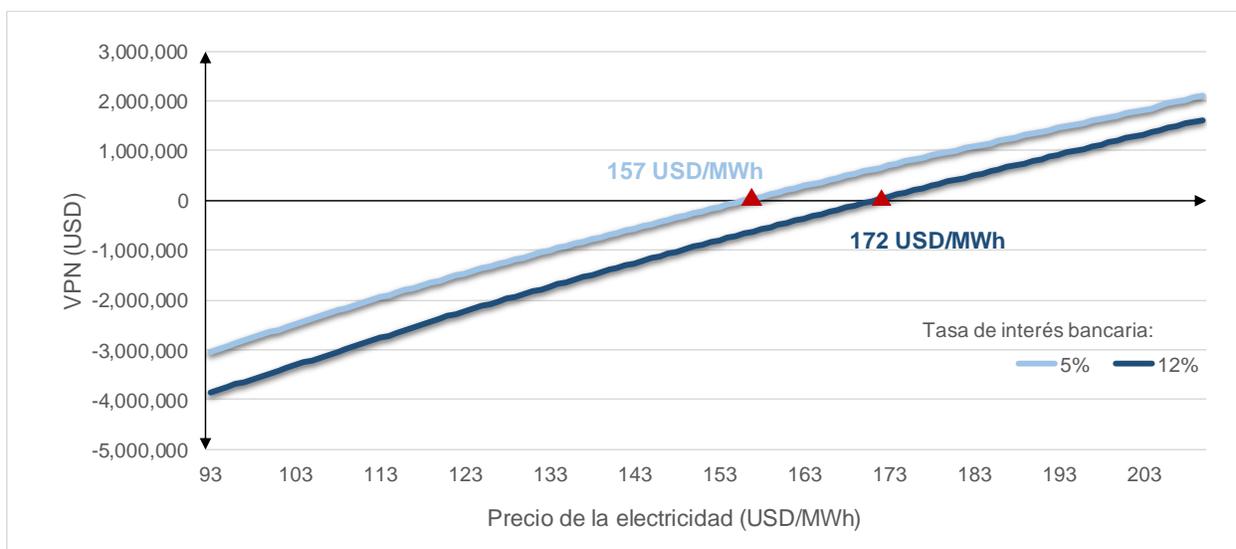


Figura 6.9. Relación precio de venta de la electricidad y VPN para distintas tasas de interés bancarias.

6.6. Escala adecuada para la generación de electricidad a partir del biogás de rellenos sanitarios en Argentina.

El modelo desarrollado en este trabajo permite extraer conclusiones para el caso de Overa Pozo; sin embargo, debido a que la hoja de cálculos actualiza de manera automática la capacidad del proyecto de acuerdo a la curva de generación de biogás, es posible extender el análisis para otros rellenos sanitarios, esto es, para sitios que manejen cantidades diferentes de residuos. En el contexto de esta tesis, la “escala” de un relleno sanitario vendrá dada por la cantidad de residuos por día que se almacenan en dicho sitio.

Es importante aclarar que el análisis presentado en esta sección constituye una primera aproximación hacia la determinación de la escala mínima necesaria para el aprovechamiento de biogás de un relleno. Si bien al variar la cantidad de residuos el tamaño de la central eléctrica se ajusta de manera automática, el modelo no modifica, ante cambios en las toneladas recibidas por día, elementos como la cantidad total de hectáreas del sitio y el tiempo que el relleno tarda en llenarse. Del mismo modo, la curva de biogás se calcula considerando la composición de residuos asumida en la sección 6.1, supuesto que podrá ser válido o no para otros sitios. Teniendo en cuenta estas advertencias, es posible estimar el VPN como función de la cantidad de residuos que se depositan por día en un sitio hipotético.

En lo que respecta al cálculo propiamente dicho, el modelo utilizado para la determinación de la escala mínima se desvía del que se consideró para el caso puntual de Overa Pozo en un aspecto importante. Siguiendo la recomendación de Conestoga-Rovers & Associates (2004), en el modelo de Overa Pozo los sistemas de bombeo y antorchas fueron presupuestados contemplando la máxima eficiencia de recolección posible, incluso para las cotizaciones correspondientes a los Modelos de predicción de generación de biogás: análisis crítico y aplicación al caso de Tucumán, Argentina.

escenarios de eficiencia media y baja (Tabla 6.3). De este modo, si la cantidad de biogás que el sitio efectivamente logra recuperar se ubica sobre el rango superior de la estimación, los sistemas de bombeo y de antorchas instalados tendrán la capacidad suficiente para operar en este escenario “de máxima”. Este procedimiento otorga mayor flexibilidad ante la posibilidad de recuperar mayor biogás al contemplado por los escenarios de mínima y de media, al tiempo que establece un “piso” al “peor de los escenarios posibles”³³. Extender este supuesto al rango de escalas analizadas en esta sección equivaldría a decir que *necesariamente* los proyectos que obtengan eficiencias de recolección *bajas* realizarán sus inversiones de acuerdo a un presupuesto que contempla eficiencias de recolección *altas*. Si bien este riesgo existe para cada proyecto considerado de manera puntual, asumir que *todos* los proyectos sufrirán este problema castiga los resultados de manera excesiva. Por ende, el modelo revisado asume que, si la eficiencia de recolección efectivamente observada es “baja”, las plantas serán diseñadas y presupuestadas en consecuencia. Dicho de otro modo, el modelo utilizado para la determinación de las escalas excluye la posibilidad de un sobredimensionamiento innecesario de las plantas.

La curva que relaciona el VPN con la escala de un relleno sanitario con aprovechamiento de biogás se presenta en las figuras a continuación. La Figura 6.10 presenta las escalas mínimas para diferentes eficiencias de recolección cuando el precio de venta de la electricidad es de 180 USD/MWh, mientras que la Figura 6.11 presenta el un análisis similar para un precio de 124

³³ El “peor escenario posible” sería aquel en el que se invierte previendo una eficiencia de recuperación máxima al tiempo que la generación de ingresos ocurre de acuerdo a una eficiencia de recuperación menor.

Capítulo 6: Aprovechamiento del biogás disponible en el relleno sanitario de Overa Pozo.

USD/MWh (recordando que ambas cifras conforman los últimos antecedentes para proyectos similares en Argentina).

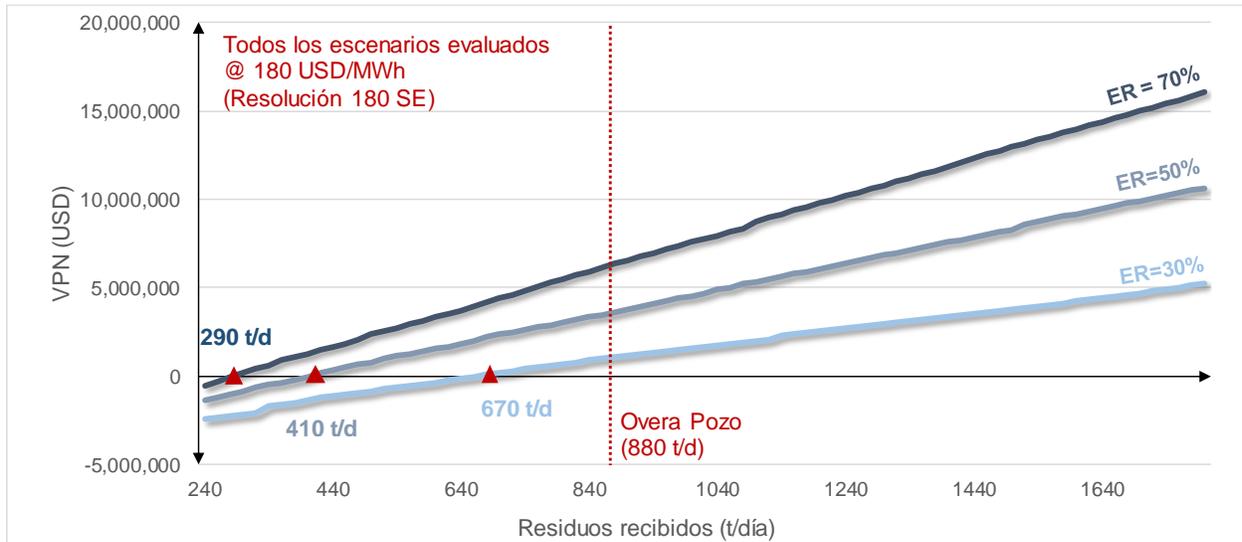


Figura 6.10. Escala mínima (en t/d) para la rentabilidad económica de un proyecto de generación eléctrica a partir de biogás de un relleno sanitario (para un precio de 180 USD/MWh).

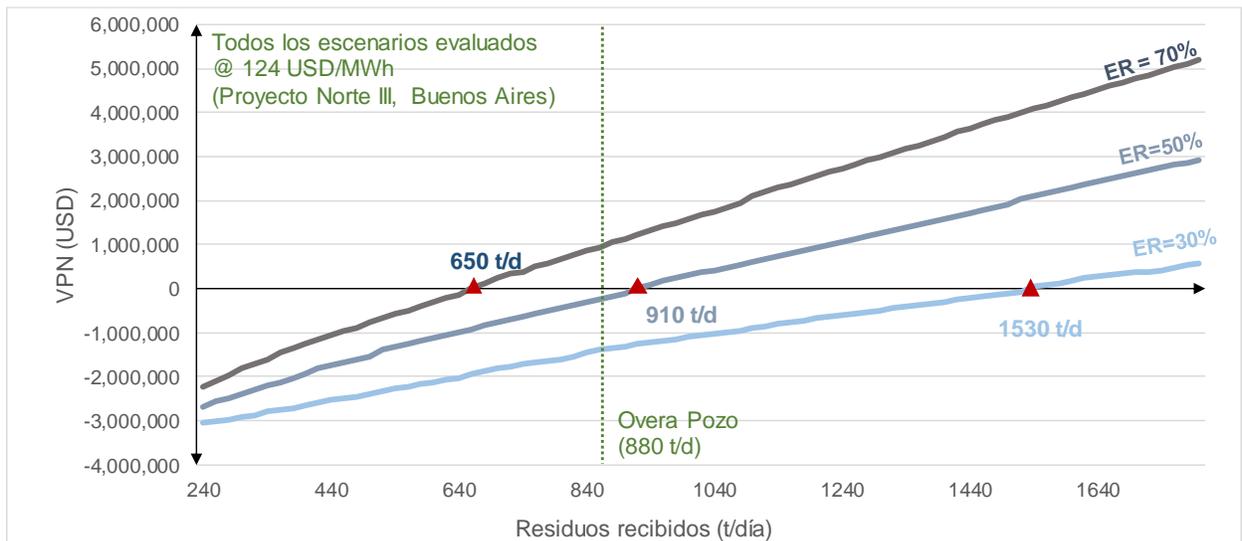


Figura 6.11. Escala mínima (en t/d) para la rentabilidad económica de un proyecto de generación eléctrica a partir de biogás de un relleno sanitario (para un precio de 124 USD/MWh).

La escala mínima dependerá del precio ofrecido por la generación de energía eléctrica. A un valor de 180 USD/MWh, el tamaño mínimo se ubica entre 290 y 670 toneladas de residuos diarios, dependiendo de la eficiencia de recolección. Cuando el precio considerado es menor (en este caso, 124 USD/MWh), el rango se corre a la derecha, entre 650 y 1530 toneladas diarias de residuos, nuevamente dependiendo de la eficiencia de recolección del biogás³⁴.

6.7. Principales variables que inciden en los resultados.

El análisis económico del aprovechamiento eléctrico del biogás de rellenos sanitarios hereda la enorme complejidad del proceso de descomposición que se produce en las celdas de los rellenos. La Figura 6.12 expande el esquema de Lamborn (2010), en el que se muestran los determinantes de la generación de biogás, para incluir los demás factores que inciden al momento de implementar un proyecto de aprovechamiento de metano proveniente de rellenos sanitarios. Los parámetros que inciden en los resultados se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- 1) En primera instancia se encuentra la producción del biogás propiamente dicha, la cual dependerá principalmente de la cantidad de residuos almacenados en el sitio, así como de su composición. Estos elementos pueden ser influenciados ya sea por el operador del sitio (suscribiendo contratos con clientes nuevos) o por las autoridades a cargo de la gestión de RSU (por ejemplo, incorporando nuevas municipalidades dentro de la órbita del relleno para incrementar la velocidad de llenado). La composición de los residuos, si bien es más difícil de modificar, puede ser estimada con mayor precisión mediante muestreos

³⁴ Es importante destacar que estas cifras no consideran la presencia de economías de escala.

sistemáticos³⁵. También bajo el control de los operadores de los sitios se incluye la manera en la que se realiza la disposición y el tipo de cobertura (diaria y final) utilizada, el contenido de humedad y la cantidad de nutrientes e incluso aspectos relacionados con la topografía y la hidrogeología del sitio (definidos al momento del diseño). Los aspectos fuera del control del operador tienen que ver con condiciones climáticas, como la cantidad de precipitaciones y la temperatura ambiente. Los factores que inciden en la producción de biogás se discutieron en detalle en el capítulo 2.3.

- 2) Una vez que el biogás se produce, es necesario *capturarlo*. Para ello (como se presentó en la sección 4.4), se necesita el trabajo coordinado del personal a cargo del sitio de disposición y de la planta de generación de electricidad (que a menudo incluso pertenecen a empresas distintas). La correcta recolección de lixiviados permite que los pozos (o las trincheras horizontales) de extracción funcionen sin atascarse. Del mismo modo, la compactación del material utilizado como cubierta de los residuos no sólo favorece las condiciones anaeróbicas en las celdas, sino que además impide las fugas del biogás una vez que se ha producido. En algunos casos, si existiera evidencia de fugas a través de la superficie, será necesario cambiar el tipo de material utilizado para cerrar las celdas. Las buenas prácticas de manejo del relleno sanitario, sin embargo, tendrán un impacto tanto en

³⁵ Por ejemplo: analizando composición de los residuos según momento del año (verano/invierno, etc.) y construyendo series de tiempo para comprender la evolución en la composición de los desechos que llegan al sitio. Esto es relevante ya que una pequeña reducción en el contenido de materia orgánica podría tener un impacto más que proporcional en la cantidad de biogás producido por el sitio.

el monto a invertir (en un sistema de captura adecuado) como en los gastos operativos durante la vida del proyecto.

- 3) El modelado del biogás es otro insumo esencial para el análisis económico y que a la vez presenta dificultades específicas. Por un lado, se necesita estimar tanto la producción total (como función de los residuos almacenados, el paso del tiempo y las condiciones del sitio) como la tasa de recuperación de dicho producto. Para ello es posible realizar calibraciones, tanto de la eficiencia de recolección (como la que se presentó en este trabajo, ver sección 4.5) como de los parámetros que determinan la forma de la curva de descomposición de los residuos en los modelos respectivos (como ser, la velocidad de descomposición, tasa de generación de CH₄, etc.). En particular, es de suma importancia realizar pruebas de bombeo en las celdas cerradas para ajustar *in-situ* los modelos a utilizar (GMI y U.S. EPA, 2012), lo que permitirá acotar sensiblemente el rango de valores posibles (ya sea de la eficiencia de recolección como de los parámetros k y L_0 en el modelo LandGEM, por ejemplo)³⁶. Otro tipo de calibración más “profunda” de los parámetros de los modelos dependerá de la acumulación de información histórica acerca de un número lo suficientemente amplio de experiencias en condiciones variadas (y de preferencia, controladas), lo que permitirá evaluar el impacto cuantitativo de modificaciones en las

³⁶ Estas pruebas consisten en la instalación de un pozo (o una trinchera) en algún sector cerrado del relleno a efectos de realizar mediciones preliminares de los flujos de biogás existentes y de los ámbitos de influencia de los respectivos pozos. Un ejemplo de este tipo de pruebas se presenta en Aguilar-Virgen et al. 2014b.

prácticas de manejo de los sitios, de instalación de equipos, de recolección y tratamiento de lixiviados, del tipo de geomembrana a utilizar, etc.

- 4) Por último, aunque no necesariamente menos importante, se tiene a los factores que hacen al *entorno económico* del proyecto. El aprovechamiento de este tipo de recursos todavía depende, incluso en los países más desarrollados, de esquemas de incentivos para las energías renovables (como tarifas preferenciales, garantías de deuda, condiciones de financiamiento flexibles, exoneraciones del impuesto sobre la renta, etc.). Los esquemas de fomento vigentes en Argentina al momento de la redacción de este documento buscan generar una demanda específica por renovables al requerir que los grandes consumidores deban cubrir una cuota de sus requisitos energéticos con estas fuentes. Sin embargo, no existen exoneraciones impositivas más allá de las tarifas de importaciones, ni existe un mecanismo que garantice un precio acorde a las necesidades de cada tecnología o las diferentes escalas mencionadas en la sección 6.6. Adicionalmente, se demostró cómo el nivel de riesgo país percibido por los inversores y las entidades crediticias puede tener un impacto importante en el “precio de corte” que hace a éste y otros tipos de proyectos económicamente viables. La existencia de contratos denominados en moneda fuerte, con estabilidad jurídica que asegure que los términos de los mismos sean respetados en el largo plazo, permitirá reducir el riesgo de un cambio brusco en el precio real percibido por el proyecto. A su vez, esto redundará en proyectos con precios más competitivos, cuyos

inversores no pretendan recuperar la inversión “antes que finalicen los cuatros años del mandato presidencial de turno”³⁷.

³⁷ La expresión es una cita textual atribuida a un actor del sector, reproducida en el energiaestrategica.com.

Capítulo 6: Aprovechamiento del biogás disponible en el relleno sanitario de Overa Pozo.

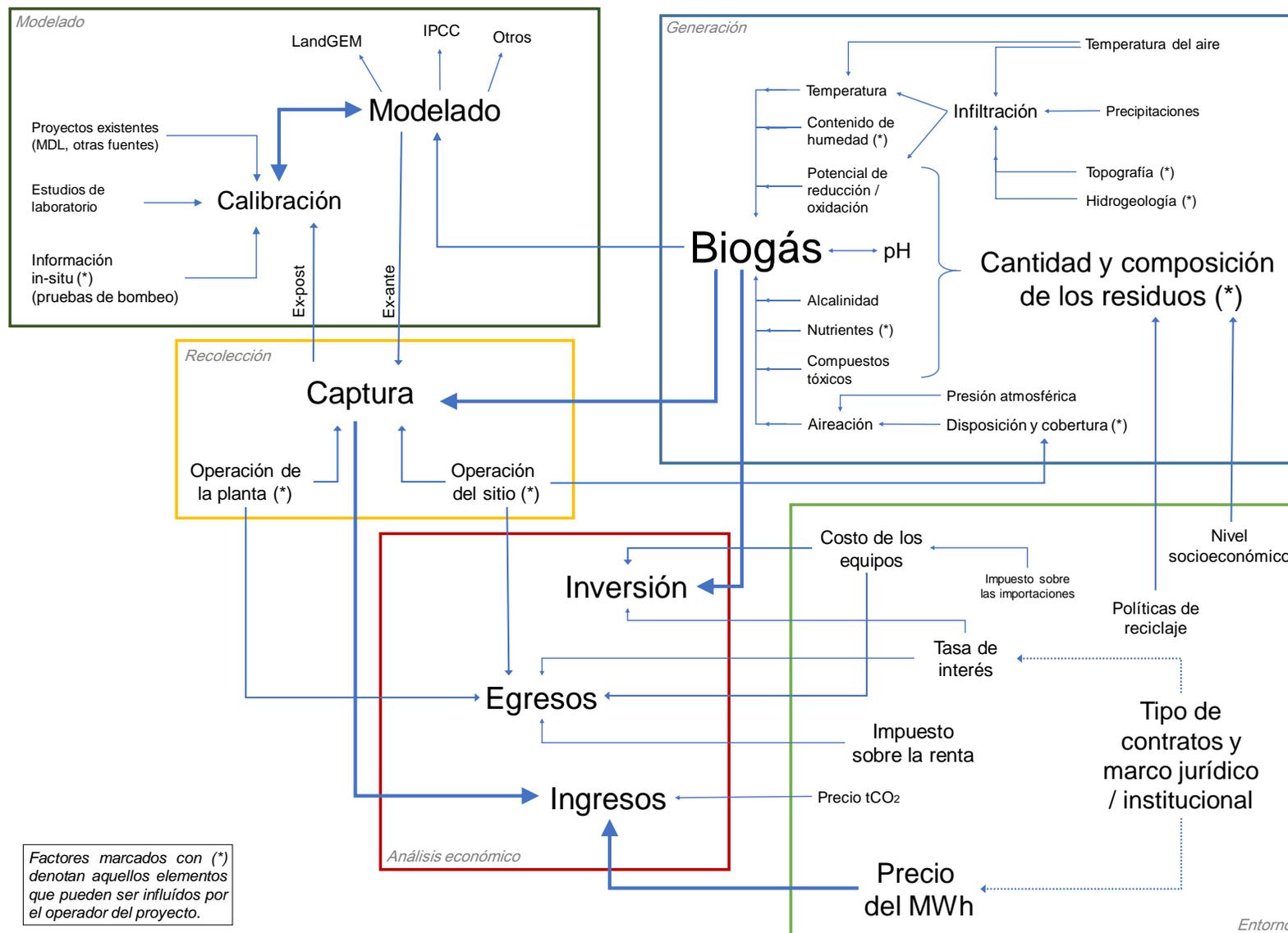


Figura 6.12. Factores que inciden en los resultados del análisis económico del aprovechamiento del biogás de un relleno sanitario.

Modelos de predicción de generación de biogás: análisis crítico y aplicación al caso de Tucumán, Argentina.

6.8. Conclusiones para el análisis del potencial eléctrico del biogás de Overa Pozo.

El análisis del caso de Overa Pozo brinda las siguientes conclusiones:

- i) Considerando eficiencias de recolección que van de 30% a 70%, el proyecto es capaz de proveer combustible suficiente para la instalación de entre 3.08 y 8.16 MW. La capacidad instalada no sólo dependerá del escenario escogido, sino también de otros factores como la tarifa eléctrica, los costos de los equipos e incluso la tasa de descuento, ya que estos elementos intervienen en la decisión de instalar capacidad adicional ante flujos variables de biogás (ver, por ejemplo, la discusión del Apéndice A).
- ii) Si se consideran los precios más recientes otorgados a otros proyectos argentinos de energías renovables (180 USD/MWh), el proyecto de aprovechamiento eléctrico del biogás de Overa Pozo es económicamente viable. Esta conclusión se sostiene incluso utilizando el límite inferior del rango observado para las eficiencias de captura empíricas. Estimaciones más optimistas de la eficiencia de recolección del biogás (o, de manera equivalente, de la cantidad de residuos recibidos por año para una eficiencia de recolección dada) redundarán en una mejora en la rentabilidad de la planta de generación que permitirán precios de equilibrio más competitivos para la venta de electricidad a la red.
- iii) Al momento de la elaboración del presente documento, existe incertidumbre acerca de los precios que podrán ser suscriptos por proyectos nuevos de energías renovables. La viabilidad del presente caso de estudio dependerá del marco regulatorio de los procesos licitatorios de próxima convocatoria, así como de los precios que resulten del mismo.

- Dejando todo lo demás constante, cualquier valor a partir de 169 USD/MWh permitirá la viabilidad económica del proyecto.
- iv) Los resultados presentados en esta tesis de maestría son comparables a los de un estudio de pre-factibilidad. Los diferentes costos relevantes para el proyecto se obtuvieron de literatura que, si bien especializada en la temática, no presenta diseños a medida y/o valores ajustados a las condiciones específicas en el sitio de estudio. La evaluación a nivel de factibilidad deberá contemplar presupuestos detallados de los equipos y las obras a realizar, así como del cronograma de trabajos y desembolsos, todos valorizados por proveedores locales (o internacionales, en los casos que resulte necesario / conveniente).
 - v) La pertinencia de los escenarios considerados en el presente trabajo (eficiencia de recolección entre 30% y 70%) deberá contrastarse contra pruebas de bombeo realizadas en el propio sitio, que a su vez brindarán una estimación específica (y mucho más concreta) de la cantidad de biogás que efectivamente podrá ser recuperada en Overa Pozo. Cuanta mayor sea la disponibilidad de estas mediciones, menor será la incertidumbre sobre la recolección potencial de biogás que podrá ser aprovechada para la generación de electricidad. Esto repercutirá en un análisis económico con menor incertidumbre y un diseño final del proyecto más preciso.
 - vi) El presente análisis contempla únicamente la construcción y operación de una central eléctrica a partir del biogás, dando por sentadas las actividades relacionadas con la gestión de los residuos y del relleno sanitario propiamente dicho. Sin embargo, la interdependencia de uno y otro aspecto del mismo sitio sugiere explorar esquemas de

trabajo conjuntos, por ejemplo, el uso de fondos provenientes del componente energético que permitan mejorar el de gestión de RSU.

Capítulo 7: Resumen y conclusiones.

7.1. Objetivos y organización del trabajo.

El presente trabajo puede ser dividido en dos grandes ejes temáticos. Los capítulos 1 a 4 tratan acerca de los modelos de predicción de biogás generado en rellenos sanitarios, intentando cuantificar cuán efectivos han sido estas herramientas al momento de predecir correctamente el fenómeno del cual se ocupan. Adicionalmente, se discutieron ajustes posibles para mejorar su desempeño.

El segundo “bloque”, conformado por los capítulos 5 y 6, conecta el modelado de la generación de biogás en rellenos sanitarios con el del análisis económico de la recolección y aprovechamiento de este recurso para la generación de electricidad. El análisis económico se aplica a un caso de estudio concreto, el de Overa Pozo, el relleno sanitario más grande de la provincia de Tucumán (Argentina), en funcionamiento desde 2010. Particularmente, se evaluó la factibilidad de lograr un aprovechamiento eléctrico del biogás generado en dicho sitio de disposición final.

El presente capítulo resume, en forma de viñetas, las principales conclusiones y resultados obtenidos a lo largo de esta tesis.

7.2. Validación de los modelos de biogás utilizados por la industria: predicción ex-ante y realidad ex-post.

1. La “precisión” de un modelo, referida en este trabajo como “tasa de éxito”, se estableció como el cociente entre lo alcanzado (ex-post) y lo esperado (ex-ante). En particular, la tasa de éxito se definió en términos de créditos de carbono y en términos de biogás, utilizando la base de datos del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC por sus siglas en inglés).
2. Como una primera aproximación, se utilizó el cociente entre créditos de carbono obtenidos sobre esperados, a partir de lo cual se calculó una tasa de éxito de entre 52% y 60% para toda la población de rellenos sanitarios registrados en el MDL que utilizan alguna versión de la metodología ACM0001. La misma, presentada en la sección 3.3, permite cuantificar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a partir de rellenos sanitarios.
3. Analizando la cantidad de metano obtenido y esperado para una muestra de proyectos del MDL, se estimó una tasa de éxito (en términos de biogás) de entre 54% y 77%.
4. Utilizando la misma muestra, se calcularon las eficiencias de recolección “empíricas”, que ajustan las predicciones de los modelos a los datos medidos en campo. Las eficiencias se presentan en el capítulo 4.3 para dos variantes de un mismo modelo del IPCC y otro modelo de uso extendido, denominado LandGEM. Se estableció un intervalo de confianza (al 95% de significancia) para la eficiencia media, resultando en un rango de 27%-67% para los

proyectos con una tasa de éxito (en términos de CERs) “regular”, y de 47%-84% para los proyectos con una tasa de éxito “buena”³⁸.

5. La consecuencia de este bajo desempeño ha sido una pobre puesta en marcha de los rellenos sanitarios, que se encontraron con flujos de biogás (y de efectivo) menores a los esperados. Esto a su vez genera incentivos a reducir gastos de operación y mantenimiento, lo que retroalimenta el pobre desempeño en términos de captura. Otro condicionante del desempeño ha sido la caída del precio de los bonos de carbono, principal fuente de ingreso para aquellos proyectos que no cuentan con generación de energía.

7.3. El caso de Overa Pozo en la provincia de Tucumán y la escala adecuada para el aprovechamiento de biogás en Argentina.

Con base en los resultados anteriores, se estableció un rango entre 30 y 70% para la eficiencia de recolección del análisis del caso de estudio tucumano. El capítulo 6 considera tres escenarios, asumiendo una eficiencia de recolección de biogás en el límite inferior (30%), medio (50%) y superior (70%), respectivamente. El escenario correspondiente al límite inferior se consideró como “base”, lo que permitiría tener una estimación conservadora del desempeño potencial de un proyecto de aprovechamiento en dicho sitio. Todos los escenarios prevén el uso del biogás capturado para abastecer motores de combustión interna; sin embargo, las distintas curvas de

³⁸ En el capítulo 3.4 se definieron las categorías de proyectos con rendimiento “regular” como aquellos con tasas de éxito entre 30% y 80% (en términos de CERs); los proyectos “buenos” tienen tasas de éxito por encima de este rango.

disponibilidad de dicho combustible determinan una capacidad instalada diferente para cada caso (y, consecuentemente, diferentes montos totales a invertir, ingresos y gastos de operación y mantenimiento). Los costos estándares utilizados como base para el cálculo se obtuvieron de Terraza y Willumsen (2009); los datos de precios y otros factores referidos al entorno económico de relevancia para el proyecto se discuten en el capítulo 5.5. La Tabla 7.1 resume los principales supuestos y resultados del análisis. Todos los escenarios presentan un VPN positivo, por lo que se recomienda explorar en mayor profundidad la posibilidad de implementar el proyecto mediante un análisis de factibilidad.

Tabla 7.1. Resumen de los supuestos principales y resultados del análisis económico.

Concepto	Escenario: ER = 30%	Escenario: ER = 50%	Escenario: ER = 70%
Costo total del proyecto (USD)	12,698,811	17,817,433	22,242,903
Costo total del proyecto en el período “cero” (USD)	6,101,049	8,101,773	10,108,783
Capital propio (USD)	1,833,786	2,461,185	3,048,984
Deuda (USD)	4,267,262	5,640,588	7,059,799
Plazo de la deuda (años)	15	15	15
Tasa de interés (%)	11%	11%	11%
Exigencia capital propio (%)	20.25%	20.25%	20.25%
Potencia total (MW)			
Generación media (MWh/año)	9,595	16,616	23,625
USD/MWh (año base)	180	180	180
tCO ₂ e reducidas / año (media)	73,751	123,228	172,700
USD/ tCO ₂ e (año base)	0.30	0.30	0.30
O&M (% de la inversión total)	10%	10%	10%
Valor Presente Neto (USD)	471,938	3,350,954	6,337,010
Período de recupero del capital (años)	7	3	3
Precio de equilibrio (USD/MWh)	169	131	114
Período de cierre del proyecto (años desde primer período de operaciones)	22	24	25

Nota. Resultados basados en las premisas discutidas en el capítulo 6.2.

7.4. Comentarios finales y líneas de investigación futura.

Los resultados aquí presentados pueden ser aplicables a otros casos de estudio en Argentina (y América Latina). Es importante tener en cuenta:

- En materia de modelado, los resultados ponen de relieve el elevado grado de incertidumbre alrededor de las herramientas más utilizadas para predecir la generación de biogás: el modelo LandGEM y el del IPCC. Por la complejidad del fenómeno en cuestión, es posible que no haya una manera genérica y universalmente válida que permita eliminar por completo los riesgos del modelado.
- Como consecuencia de lo anterior, aun cuando fuera posible estimar un intervalo de confianza para la eficiencia de recolección (ejercicio realizado en la presente tesis), el intervalo resultante tendrá una longitud considerable, y la realidad de cada proyecto particular podrá ubicarse en cualquier tramo dentro del rango. Es por ello que los estudios *in-situ* (como las pruebas de bombeo) se vuelven imprescindibles a efectos de ajustar las estimaciones de los modelos, reduciendo así los riesgos de la inversión.
- En la misma línea, otro aspecto fundamental para facilitar el modelado (y, por ende, reducir la incertidumbre) es el de contar con información histórica abundante acerca de los sitios existentes y los que se pongan en marcha. Esto incluirá las cantidades (y la composición) de residuos producidas en cada ciudad (y depositadas en cada relleno), así como las cantidades de biogás efectivamente alcanzadas, las prácticas de manejo aplicadas en los rellenos sanitarios y los sistemas instalados.

- Es importante resaltar que el ejercicio de calibración realizado en este trabajo, si bien presenta información de utilidad, dista de ser un ejercicio *completo*. Esto se debe a que se dispuso de un número relativamente pequeño de años con información ex-post (a lo sumo, ocho años, dependiendo del proyecto), a partir de los cuáles se extrapolaron las conclusiones para la totalidad del período de análisis (de 50 años). El supuesto explícito asumido en este trabajo es que un ajuste en la eficiencia de recolección basta para mejorar la precisión de los modelos, es decir, que los modelos capturan de manera correcta la *forma* de la curva de biogás, requiriendo únicamente un ajuste en la *escala*. La validez de este supuesto deberá ser revisada una vez que se disponga de una serie histórica más extensa que la que se utilizó en este trabajo.
- Aun utilizando modelos sencillos como los estudiados a lo largo de este trabajo, el número de parámetros que intervienen en los resultados es lo suficientemente elevado como para permitir numerosos métodos de calibración. Por ejemplo, en el caso más sencillo del modelo LandGEM, y ante la disponibilidad de datos in-situ obtenidos de pruebas de bombeo, no queda claro el mejor camino para estimar los parámetros k , L_0 y la eficiencia de recolección. Una alternativa sería tomar valores de k y L_0 de la literatura especializada, ajustando únicamente la eficiencia de recolección de acuerdo a la información del sitio³⁹.

³⁹ En esencia, este sería el enfoque seguido en esta tesis, donde la información “in-situ” se reemplaza con datos empíricos derivados de casos de estudio en países en vías de desarrollo.

Otra opción consistiría en calibrar k para valores dados de los demás parámetros, enfoque similar al seguido por el Código de Regulaciones Federales de los EEUU (U.S. GPO, 2016). El problema reside en que el orden seguido durante la calibración puede afectar la combinación de valores elegidos para los parámetros: así, por ejemplo, un cierto valor de k adecuado a las condiciones de un sitio dado puede ser válido únicamente para el valor de L_0 que se tuvo en cuenta en la respectiva iteración. La consecuencia de este problema es la falta de comparabilidad de los valores estándar reportados para los principales parámetros, por lo que el establecimiento de métodos estándar de calibración es un tema sumamente relevante para futuras investigaciones.

- Pasando al análisis económico, es importante resaltar que los precios de equilibrio reportados en este trabajo no constituyen *costos nivelados de producción*, sino más bien *precios mínimos de venta* bajo circunstancias específicas. Los costos nivelados de producción se limitan a aspectos tecnológicos desprovistos de contexto fiscal, es decir, ignorando las políticas impositivas y de subsidios vigentes en un lugar y momento dado. Los precios mínimos estimados en este trabajo, en cambio, consideran las circunstancias específicas del contexto político-fiscal en el que se desarrollaría el proyecto de Overa Pozo.
- Los precios de venta mínimos para el caso de estudio de esta tesis se ubican alrededor de los 114-169 USD/MWh. Dichos valores se encuentran muy por encima de los que vuelven competitiva al mismo tipo de tecnología en países desarrollados: por ejemplo, Conestoga-Rovers & Associates (2004) prescriben un valor mínimo de 65 USD/MWh para proyectos con un flujo de biogás de al menos 1000 m³/h durante un período de 20 años. Overa Pozo

requiere alrededor de 131 USD/MWh pese a contar con un flujo de biogás superior (1377 m³/h en promedio durante el período 2020-2039, correspondiente al escenario de eficiencia media). Esto obedece a la enorme diferencia en los retornos esperados por inversionistas en países desarrollados en comparación con países en vías de desarrollo (en particular, aquellos con sectores energéticos históricamente “problemáticos”, como se describe en el capítulo 5.5 para el caso de Argentina). Por ende, un aspecto fundamental para bajar el precio de equilibrio pasará por reducir el riesgo percibido por los inversores.

- También es importante destacar que los resultados presentados en este trabajo corresponden a residuos con un fuerte componente de materia orgánica (cerca del 80% de acuerdo a la Tabla 6.1), de manera que modificaciones en el marco de la gestión de RSU (por ejemplo, políticas activas de reciclaje) podrían alterar los resultados. En dicho caso, debería re-evaluarse el modelo ajustando el nuevo contenido de materia orgánica.
- El modelo económico de este trabajo arroja cifras útiles para la toma de decisiones en materia de política energética, exponiendo de manera clara la relación entre escala (medida en toneladas de residuos por día) y precio de equilibrio. Un proceso licitatorio tenderá a aceptar proyectos de mayor tamaño, descartando los de menor envergadura (como Overa Pozo). Por ello, será importante definir una matriz de selección de proyectos que no esté solamente basada en los precios, sino que también contemple aspectos como el ambiental o la descentralización del sistema interconectado. El análisis presentado en la sección 6.6 puede ser de utilidad, ya que establece escalas de precios según rangos de tamaños.

- El modelo económico utilizado en este trabajo permitiría analizar el impacto de agregar municipios adicionales al consorcio del área metropolitana del Gran San Miguel de Tucumán. Con residuos adicionales, el proyecto incrementaría su escala (y así, los ingresos esperados), a lo que habría que deducirle el incremento en los costos de transporte por el traslado de los desechos de su destino actual a Overa Pozo.
- Del mismo modo, esta base analítica podría aplicarse a municipios o regiones en otros puntos de Argentina (u otros países en vías de desarrollo), con el fin de evaluar la prefactibilidad del potencial energético de sus respectivos rellenos sanitarios. En dichos casos, será importante ajustar los parámetros relacionados con el entorno puramente “económico” (por ejemplo, la tasa de interés bancaria y el retorno exigido al capital propio) y aquellos relacionados al entorno “físico” (por ejemplo, la cantidad de los residuos recibidos y su composición).

Apéndice A. Estimación del número mínimo de años con disponibilidad de biogás para justificar la inversión en capacidad adicional de generación.

Los ingresos anuales generados por 1 MW de capacidad (que dispone de todo el combustible necesario para operar) vienen dados por la siguiente expresión:

$$I = 8760 \cdot \eta \cdot (1 - \alpha) \cdot p_e \quad (\text{A.1})$$

con:

- I = Ingreso anual generado por 1 MW de capacidad (MWh/año).
- η = Factor de disponibilidad de la planta (93%) (U.S. EPA, 2014)
- α = Pérdidas parasitarias (7%) (U.S. EPA, 2014)
- p_e = Precio de la electricidad (USD/MWh)

De manera simplificada⁴⁰, será conveniente invertir en la compra de 1 MW de capacidad en la medida que:

$$\sum_{t=1}^n \frac{(I - p_c c)}{(1 + i)^t} \geq p_c \quad (\text{A.2})$$

⁴⁰ La siguiente expresión no contempla el pago de impuestos sobre la renta y la depreciación.

donde:

- I = Ingreso anual generado por 1 MW de capacidad (MWh/año, de acuerdo a la ecuación (A.1)).
- c = Costo anual de operación y mantenimiento como % del costo inicial del equipo (10%, según Terraza y Willumsen, 2009)
- p_c = Costo de 1 MW de capacidad adicional (1700 USD según Terraza y Willumsen, 2009)
- i = Tasa de descuento del capital propio (20.25% en el modelo económico-financiero, según se discute en la sección 6.2).
- t = Período, con $t = 1, 2, \dots, n$
- n = Número de años con disponibilidad de combustible para operar la capacidad adicional.

El lado izquierdo de (A.2) es una progresión geométrica de razón $r = 1 / (1+i)$, por lo que puede ser re-escrita como:

$$(I - p_c c) \left(\frac{1 - r^n}{1 - r} - 1 \right) \geq p_c \quad (\text{A.3})$$

Reacomodando y considerando únicamente la igualdad:

$$\left[\frac{p_c}{(I - p_c c)} + 1 \right] (1 - r) = 1 - r^n$$
$$1 - \left[\frac{p_c}{(I - p_c c)} + 1 \right] (1 - r) = r^n$$

$$n = \frac{\ln \left[r - \frac{p_c(1-r)}{(1-p_cC)} \right]}{\ln r} \quad (\text{A.4})$$

La ecuación (A.4) permite determinar el mínimo número de años de disponibilidad de combustible necesario para recuperar (en valor actual) el monto de la compra de 1 MW de capacidad adicional. Por ende, toda vez que se prevean n años de combustible, se recomendará la incorporación de la capacidad adicional incluso cuando no exista suficiente combustible para operarla a pleno a partir del año $n+1$.

Bibliografía

Aguilar-Virgen, Quetzalli; Taboada-González, Paul; Ojeda-Benítez, Sara (2014a): *Analysis of the feasibility of the recovery of landfill gas: a case study of Mexico*. En: *Journal of Cleaner Production* 79, pág. 53–60. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.05.025.

Aguilar-Virgen, Quetzalli; Taboada-González, Paul; Ojeda-Benítez, Sara; Cruz-Sotelo, Samantha (2014b): *Power generation with biogas from municipal solid waste: Prediction of gas generation with in-situ parameters*. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30, pág. 412–419. DOI: 10.1016/j.rser.2013.10.014.

ATSDR (2001): *Landfill Gas Primer*. An Overview for Environmental Health Professionals, Última comprobación el 15/05/2016.

Banco Interamericano de Desarrollo (BID); Bloomberg New Energy Finance (2016): *Climascopio 2015*. Índice de competitividad en energía limpia por país. En colaboración con UK Department for International Development (UK Aid) und Power Africa.

Bionersis; Aply Carbon (2011): *Project Design Document: Bionersis LFG project Argentina 2 (Tucumán)*. Borrador para validación. Disponible en línea en <https://cdm.unfccc.int/Projects/Validation/DB/NGJGKXXGFX56F2KUACOBHR3CZK7ZZP/view.html>, Última comprobación el 07/04/2016.

Brealey, Richard A.; Myers, Stewart C.; Allen, Franklin (2008): *Principles of corporate finance*. 9th ed. Boston: McGraw-Hill/Irwin (The McGraw-Hill/Irwin series in finance, insurance, and real estate).

CAMMESA (2015): *Informe anual del año 2014*. Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico.

CAMMESA (2016): *Informe Mensual del Mercado Eléctrico Mayorista*. Marzo de 2016. Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico. Disponible en línea en [Modelos de predicción de generación de biogás: análisis crítico y aplicación al caso de Tucumán, Argentina](#).

Referencias

<http://portalweb.cammesa.com/memnet1/Pages/RedireccionLogin.html?redireccion=/linfomen.nsf/MINFOMEN?OpenFrameSet>, Última comprobación el 21/04/2016.

CEPAL (2015): *Centroamérica: estadísticas de producción del subsector eléctrico, 2014*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Disponible en línea en http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/38425/S1500581_es.pdf?sequence=1, Última comprobación el 23/04/2016.

Chaudhary, Rubina; Garg, Rohit (2014): *Comparisons of two methods for methane emission at proposed landfill site and their contribution to Climate Change: Indore City*. En: *International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management* 3 (5), pág. 9–16.

Christensen, T. H.; Cossu, R.; Stegmann, R. (eds.) (1996): *Landfilling of waste: biogas*. Londres: E & FN Spon.

Cohen, Barney (2004): *Urban Growth in Developing Countries. A Review of Current Trends and a Caution Regarding Existing Forecasts*. En: *World Development* 32 (1), pág. 23–51. DOI: 10.1016/j.worlddev.2003.04.008.

Conestoga-Rovers & Associates (2004): *Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean*. Ontario. Disponible en línea en <http://documents.worldbank.org/curated/en/2004/01/6210113/handbook-preparation-landfill-gas-energy-projects-latin-america-caribbean>, Última comprobación el 08/02/2016.

Congreso de la Nación Argentina (1992): *Ley N° 24051, Residuos peligrosos - Generación, manipulación, transporte y tratamiento*. Fuente: Boletín Oficial.

Congreso de la Nación Argentina (2002): *Ley N° 25612. Gestión Integral de Residuos Industriales y de Actividades de Servicios*.

Congreso de la Nación Argentina (2004): *Ley 25916 - Gestión de Residuos Domiciliarios*. Fuente: Boletín Oficial.

Referencias

Congreso de la Nación Argentina (2015): *Ley 27191. Modificaciones al Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica*. Disponible en línea en <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/250000-254999/253626/norma.htm>, Última comprobación el 20/05/2016.

Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos (2003): *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos de México*. LGPGIR, del 22 de mayo de 2015. Fuente: Diario Oficial de la Federación.

Convención Constituyente (1994): *Constitución de la Nación Argentina*.

Convención Constituyente de la Provincia de Tucumán (06/06/2006): *Constitución de la Provincia de Tucumán*. Fuente: Boletín Oficial.

Cooprogetti (2005): *Plan Provincial de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos de la Provincia de Tucumán*. San Miguel de Tucumán (1).

Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado (CEAMSE) (2014): *Generamos energía eléctrica para 25 mil hogares a partir del biogás de la basura*. Disponible en línea en <http://www.ceamse.gov.ar/generamos-energia-electrica-para-25-mil-hogares-a-partir-del-biogas-de-la-basura/>, Última comprobación el 21/04/2016.

de Souza, S. N.; Horttanainen, M.; Antonelli, J.; Klaus, O.; Lindino, C. A.; Nogueira, C. E. (2014): *Technical potential of electricity production from municipal solid waste disposed in the biggest cities in Brazil: Landfill gas, biogas and thermal treatment*. En: *Waste Management & Research* 32 (10), pág. 1015–1023. DOI: 10.1177/0734242X14552553.

Dirección de Estadística de Tucumán (2006): *Anuario Estadístico 2004-2005*. Disponible en línea en http://estadistica.tucuman.gov.ar/archivos/pagina_anuario/cartografia.htm, Última comprobación el 15/06/2016.

educ.ar (2011): *Mapoteca*. La Argentina en mapas. Ministerio de Educación, Última comprobación el 20/06/2016.

Referencias

energiaestrategica.com: *Gustavo Gil sobre la suspensión de la Resolución 108: licitaciones, precios y el compra nacional*. Disponible en línea en <http://www.energiaestrategica.com/gustavo-gil-sobre-la-suspension-de-la-resolucion-108-lo-determinante-es-definir-una-matriz-de-seleccion-de-proyectos-que-no-este-solo-ponderada-por-precios/>, Última comprobación el 06/07/2016.

energiaestrategica.com: *Perspectivas de las Licitaciones: los precios de la energía renovable en Argentina y sus diferencias con la región*. Disponible en línea en <http://www.energiaestrategica.com/perspectivas-de-las-licitaciones-los-precios-de-la-energia-renovable-en-argentina-y-sus-diferencias-con-la-region/>, Última comprobación el 06/07/2016.

Fenhann, Joergen; Schletz, Marco Christian (2015): *CDM/JI Pipeline Analysis and Database*. United Nations Environment Programme (UNEP); Technical University of Denmark (DTU). Disponible en línea en <http://www.cdmpipeline.org>, Última comprobación el 7 de abril de 2016.

Giusti, L. (2009): *A review of waste management practices and their impact on human health*. En: *Waste Management* 29 (8), pág. 2227–2239. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.03.028.

GMI; U.S. EPA (2012): *International Best Practices Guide for Landfill Gas Energy Projects*. Global Methane Initiative, U.S. Environmental Protection Agency.

Gobierno de la Provincia de Tucumán. (2014): *Ubicación de la provincia*. Gobierno de Tucumán (Portal oficial del gobierno de la Provincia de Tucumán). Disponible en línea en <http://www.tucuman.gov.ar/tucuman>, Última comprobación el 06/04/2016.

Guinle, Marcelo (2014): *Fundamentos para la reforma de la Ley N° 26190*. Disponible en línea en http://www.energiaestrategica.com/wp-content/uploads/2014/10/Proyecto_final_con_ACUERDO_MECON_con_fundamentos.pdf, Última comprobación el 23/04/2016.

Iezzi, Marcelo; Bocco, Ricardo; Weihs, Juan Pablo (2011): *Project Design Document: Norte III.C landfill – Methane recovery and power generation project*. Disponible en línea en

Referencias

<http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1330916529.85/view>, Última comprobación el 20/05/2016.

INDEC (s.f.): *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010*. Población: resultados. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Disponible en línea en http://www.censo2010.indec.gov.ar/resultadosdefinitivos_totalpais.as, Última comprobación el 7 de abril de 2016.

IPCC (1996): *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. edit. por J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. Lim, K. Treanton, I. Mamaty, Bonduki y Y. Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC (2000): *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. edit. por J. Penman, D. Kruger, I. Galbally, T. Hiraishi, B. Nyenzi, S. Emmanul, et al. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en línea en https://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml, Última comprobación el 02/05/2016.

IPCC (2006): *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Disponible en línea en https://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml.

Johannessen, Lars Mikkel; Boyer, Gabriela (1999): *Observations of solid waste landfills in developing countries*. The World Bank Group. Washington. Disponible en línea en http://www.worldbank.org/urban/solid_wm/erm/CWG%20folder/uwp3.pdf, Última comprobación el 08/04/2016.

La Gaceta (2012): *Ven a Overa Pozo como una oportunidad para el cambio*. Disponible en línea en <http://www.lagaceta.com.ar/nota/478239/politica/ven-overa-pozo-como-oportunidad-para-cambio.html>, Última comprobación el 08/04/2016.

La Gaceta (2014): *Cómo es el lugar donde siete ciudades tucumanas sepultan la basura*. En: *La Gaceta en línea*, 09/03/2014. Disponible en línea en

Referencias

<http://www.lagaceta.com.ar/nota/582127/sociedad/como-lugar-donde-siete-ciudades-tucumanas-sepultan-basura.html>, Última comprobación el 19/04/2016.

La Gaceta (2015): *Por ahora, no existe una gestión de residuos*. En: *La Gaceta en línea*, 22/04/2015. Disponible en línea en <http://www.lagaceta.com.ar/nota/634536/sociedad/por-ahora-no-existe-gestion-residuos.html>, Última comprobación el 20/04/2016.

Lamborn, Julia (2010): *Modelling landfill degradation behaviour*. Tesis doctoral. Swinburne University of Technology.

Lanoticiaya.com (2015): *En Overá Pozo construyen una nueva celda para el depósito de residuos sólidos urbanos*, 23/06/2015. Disponible en línea en <http://www.lanoticiaya.com/nota.php/2015/06/23/en-over-pozo-construyen-una-nueva-celda-para-el-dep-sito-de-residuos-s-lidos-urbanos.html>, Última comprobación el 20/04/2016.

Lecocq, F.; Ambrosi, P. (2007): *The Clean Development Mechanism: history, status, and prospects*. En: *Review of Environmental Economics and Policy* 1 (1), pág. 134–151. DOI: 10.1093/reep/rem004.

Legislatura de la Provincia de Tucumán (2005): *Ley 7.622 - Residuos Sólidos Urbanos*. Fuente: Boletín Oficial.

Legislatura de la Provincia de Tucumán (2007): *Ley 7874, Modificaciones a la ley 7622 de Residuos Sólidos Urbanos*.

Legislatura de la Provincia de Tucumán (2009): *Ley N° 8.177*. Fuente: Boletín Oficial.

LMOP (2015): *LFG Energy Project Development Handbook*. Landfill Methane Outreach Program.

Marshall, Rachael E.; Farahbakhsh, Khosrow (2013): *Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries*. En: *Waste Management* 33 (4), pág. 988–1003. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.12.023.

Referencias

Ministerio de Industria, Energía y Minería (2015): *Balance Energético Nacional Uruguay 2014*. Disponible en línea en <http://www.miem.gub.uy/documents/15386/6815916/1.1%20INFORME%20GENERAL%20BE%20N2014.pdf>, Última comprobación el 23/04/2016.

Noguera, Katia; Olivero, Jesús (2010): *Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso colombiano*. En: *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* (34), pág. 347–356. Disponible en línea en http://www.accefyn.org.co/revista/Vol_34/132/347-356.pdf, Última comprobación el 09/04/2016.

Pampa Energía (2015): *El sector eléctrico de Argentina*. Antecedentes y evolución del sector. Disponible en línea en http://ri.pampaenergia.com/pampaenergia/web/conteudo_es.asp?idioma=2&conta=47&tipo=24234, Última comprobación el 23/04/2016.

Pérez Miranda C.; Almada G.H.; Riviere C.A.; Gordillo M.A.; Fernández-Turiel J.L.; Medina M.E. (2001): *Proyecto Agua: composición y calidad del agua de la cuenca del Río Salí*. Gobierno de la Provincia de Tucumán. Tucumán (3).

Poder Ejecutivo de la Provincia de Tucumán (2005): *Decreto 4.388/2005, Reglamento Ley 7622*. Fuente: Boletín Oficial.

Robayo Avellaneda, Carmenza (2012): *Diseño de Rellenos Sanitarios*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Bogotá. Disponible en línea en http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358045/Diseno_de_Rellenos_Sanitarios.pdf, Última comprobación el 15/05/2016.

Ruíz de Toro, Gloria del Carmen; Toro, María Constanza (2014): *Tucumán mi querida provincia*. San Miguel de Tucumán. Disponible en línea en <http://tictucuman.net/miqueridaprovincia/ebook/miquerida/assets/downloads/publication.pdf>, Última comprobación el 06/04/2016.

Referencias

Santos, M. M.; van Elk, A. G.; Romanel, C. (2015): *A correction in the CDM methodological tool for estimating methane emissions from solid waste disposal sites*. En: *Journal of environmental management* 164, pág. 151–160. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.08.048.

Sapag Chain, Nassir (2011): *Proyectos de inversión*. Formulacion y evaluación. 2da ed. Santiago de Chile: Person Educación.

Savino, Atilio A. (2008): *Large population - more sanitation: The state of urban solid waste management in Latin America*. Waste Management World Magazine. Disponible en línea en <https://waste-management-world.com/a/large-population-150-more-sanitation-the-state-of-urban-solid-waste-management-innbsplatin-america>, Última comprobación el 09/04/2016.

Scharff, Heijo; Jacobs, Joeri (2006): *Applying guidance for methane emission estimation for landfills*. En: *Waste management (New York, N.Y.)* 26 (4), pág. 417–429. DOI: 10.1016/j.wasman.2005.11.015.

SEDESOL (s.f.): *Manual para la operacion de rellenos sanitarios*. Disponible en línea en http://www.sustenta.org.mx/3/?dl_name=MT_OperacionRellenoSanitario.pdf, Última comprobación el 14/03/2016.

SEMARNAT: *NOM-083-SEMARNAT-2003*. Norma Oficial Mexicana. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Disponible en línea en <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1306/1/nom-083-semarnat-2003.pdf>, Última comprobación el 24/06/2016.

SEMARNAT; INECC (2013): *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México D.F.

Referencias

Spokas, K.; Bogner, J.; Chanton, J. P.; Morcet, M.; Aran, C.; Graff, C. et al. (2006): *Methane mass balance at three landfill sites: what is the efficiency of capture by gas collection systems?* En: *Waste management (New York, N.Y.)* 26 (5), pág. 516–525. DOI: 10.1016/j.wasman.2005.07.021.

statista (2016): *Projected U.S. inflation rate 2008-2021*. The Statistics Portal. Disponible en línea en <http://www.statista.com/statistics/244983/projected-inflation-rate-in-the-united-states/>, Última comprobación el 12/07/2016.

Strachan, L.; Wright, M.; Pass, J.; Couth, B.; Pearson, G. (2008): *Landfill gas generation: theory vs reality in Africa*. Proceedings Waste 2008: Waste and Resource Management – a Shared Responsibility. Warwickshire.

Tacoli, Cecilia (2012): *Urbanization, gender and urban poverty*. Paid work and unpaid carework in the city. London, UK, New York, NY, USA: Human Settlements Group, International Institute for Environment and Development; Population and Development Branch, United Nations Population Fund (Urbanization and emerging population issues working paper, 7). Disponible en línea en <https://www.unfpa.org/sites/default/files/resource-pdf/UEPI%207%20Tacoli%20Mar%202012.pdf>, Última comprobación el 09/04/2016.

Tchobanoglous, George; Kreith, Frank (2002): *Handbook of solid waste management*. 2nd ed. New York, London: McGraw-Hill (McGraw-Hill handbooks).

Terraza, Horacio; Willumsen, Hans (2009): *Guidance note on landfill gas capture and utilization*. Inter-American Development Bank (Technical notes, 108).

Terraza, Horacio; Willumsen, Hans; Guimaraes, Helvecio (2007): *Landfill gas capture: design versus actual performance and the future for CDM projects*. The World Bank Group. Washington. Disponible en línea en <http://siteresources.worldbank.org/INTLACREGTOPURBDEV/Resources/840343-1178120035287/EditedLFGWorkshopReportAugust14.pdf>, Última comprobación el 26/06/2016.

Thacker, B. H.; Doebeling, S. W.; Hemez, F. M.; Anderson, M. C.; Pepin, J. E.; Rodriguez, E. A. (2004): *Concepts of model verification and validation*. National Nuclear Security Administration.

Referencias

Disponible en línea en <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/835920>, Última comprobación el 25/07/2016.

U.S. EPA (2005): *Landfill Gas Emissions Model (Land GEM) Version 3.02 User's Guide*. U.S. Environmental Protection Agency.

U.S. EPA (2009): *User's Manual Mexico Landfill Gas Model*. U.S. Environmental Protection Agency.

U.S. EPA (2014): *Landfill Gas Energy Cost Model (LFGcost-Web) User's Manual, Version 3.0*. Landfill Methane Outreach Program. Disponible en línea en https://www3.epa.gov/lmop/publications-tools/lfgcost/LFGcost-WebV3_0manual.pdf, Última comprobación el 08/07/2016.

U.S. GPO (2016): *Title 40 of the Electronic Code of Federal Regulations*. Appendix A-1. Method 2E - Determination of Landfill Gas Production Flow Rate. U.S. Government Publishing Office. Disponible en línea en http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=d5718cd6a4114f39f62c95e18bff300e&mc=true&node=pt40.9.60&rgn=div5#ap40.9.60.a_61, Última comprobación el 20/07/2016.

UNFCCC (2015a): *CDM Methodology Booklet*. Disponible en línea en http://cdm.unfccc.int/methodologies/documentation/1511/Meth_Booklet_2015_Named.pdf, Última comprobación el 24/06/2016.

UNFCCC (2015b): *Emissions from solid waste disposal sites*. am-tool-04-v7. United Nations Framework Convention on Climate Change. Disponible en línea en <http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-04-v7.pdf>, Última comprobación el 16/04/2016.

UNFCCC (2015c): *Large-scale methodology for flaring or use of landfill gas*. ACM0001. United Nations Framework Convention on Climate Change. Disponible en línea en <http://cdm.unfccc.int/filestorage/2/O/I/2OIBC4TAF3PZD06ELG5S8RVKQMYHJ1/Methodolog>

Referencias

y%20%28LS%29_ACM0001_EB86a12%28ver16.0%2C%2016Oct15%29_clean.pdf?t=TkJ8bzVuZTNrfDBbCcaA2CyPlvaxs2Hzws4-, Última comprobación el 14/04/2016.

Vanney, M.; Giménez, M.; López, F. (2005): *Resumen técnico del plan de cierre del relleno sanitario Los Vázquez en San Miguel de Tucumán*. San Miguel de Tucumán.

Vatzaki, E.; Lazaridis, M. (n.d.): *Estimation of greenhouse gaseous emissions from municipal solid waste landfills in Greece*. Department of Environmental Engineering, Technical University of Crete.

WB; Ecofys (2015): *State and trends of carbon pricing*. 2015. En colaboración con Alexandre Kossoy, Grzegorz Peszko, Klaus Oppermann, Nicolai Prytz, Noémie Klein, Kornelis Blok et al. The World Bank Group. Washington. Disponible en línea en <http://documents.worldbank.org/curated/en/2015/09/25053834/state-trends-carbon-pricing-2015>, Última comprobación el 12/04/2016.

Zuccardi, Ramón B.; Fadda, Guillermo S. (1985): *Bosquejo Agrológico de la provincia de Tucumán*. Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Agronomía y Zootecnia (Miscelánea, 86).