

Energías renovables y desarrollo sostenible en zonas rurales de Colombia.

El caso de la vereda Carrizal en Sutamarchán¹

FLAVIO PINTO SIABATO*

Recibido: 20-02-2004.

Aceptado: 10-11-2004.

Resumen

Se presenta el balance de energía de la vereda El Carrizal de Sutamarchán, Colombia, y se estima el potencial de energías renovables. Se demuestra que sólo un enfoque riguroso de la sostenibilidad garantiza un impacto en el desarrollo económico de la comunidad, teniendo en cuenta los criterios de sostenibilidad exigidos por el mecanismo de desarrollo limpio. Se desarrolló un modelo de energía para el cálculo de la demanda para irrigación, según variables climáticas, orográficas y de cultivo.

Palabras clave: desarrollo sostenible, energías renovables, MDL, LULUCF.

Abstract

The paper shows the energy balance including the assessment of renewable energy potential, of the rural settlement of Carrizal belonging to the Sutamarchán village in Colombia. It is shown that only an rigorous approach of sustainability guarantees a real impact in the economic development of the community, taking into account

1 El autor agradece a la UNAB, por el apoyo en la realización de estudios en energías renovables; al ICA de Sutamarchán, al Colegio Verde de Villa de Leyva y a la alcaldía de Sutamarchán por su apoyo e interés en el proyecto; y con especial afecto a los pobladores de Carrizal.

* Universidad de Flensburg: Auf dem Campus 1. 24943 Flensburg, Alemania: flavio@uni-flensburg.de

the sustainability criteria of the Clean Development Mechanism. It is developed an energy model for calculating the demand for irrigation, according to climatic, landscape and crop variables

Key words: sustainable development, renewable energies, clean, development mechanism, LULUCF.

Résumé

On présente le bilan de l'énergie du hameau El Carrizal de Sutamarchán, Colombie, et on estime le potentiel des énergies renouvelables. On démontre que seule une approche rigoureuse en terme de faisabilité et de durabilité garantit un impact dans le développement économique de la communauté, en tenant compte des critères de soutenabilité exigés par le Mécanisme de Développement Propre. On a développé un modèle d'énergie, pour le calcul de la demande en irrigation, selon des variables climatiques, orographiques, en fonction des cultures.

Mots-clés: développement durable, énergies renouvelables, MDL LULUCF.

.....

Introducción

Por estos tiempos, dos hechos realzan el interés de la energía en el desarrollo rural. El primero es el auge internacional de tecnologías de energías renovables, basadas en biomasa, biogas, energía solar y eólica, que se suman a las pequeñas plantas hidroeléctricas. Estas son alternativas ciertas para zonas rurales aisladas, dada la inviabilidad económica de llevar servicios de energía por medio de redes de interconexión y por la potencial natural de energías renovables en estas zonas, representado en el brillo solar, viento y caídas de agua permanentes y por la producción silvestre de biomasa. El tamaño y la autonomía de estos sistemas proponen retos tanto al diseño de instituciones óptimas en contextos imperfectos para la administración y la sostenibilidad de las soluciones, como a la discriminación de prioridades en la demanda para atender las actividades de mayor beneficio, y al logro de los objetivos de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en los casos que aplique.

Un segundo hecho lo conforman las oportunidades derivadas, del mecanismo de desarrollo limpio (MDL) para la mitigación de emisiones de GEI, y de las políticas sobre uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y forestación. (LULUCF en inglés), que demandan de los gobiernos receptores el diseño de políticas para su aprovechamiento, así como el establecimiento de metas, estrategias, planes, instituciones y procedimientos para su realización. El Plan Energético Nacional (PEN) 2003-2020 de Colombia, reconoce las energías renovables como una alternativa para zonas *aisladas* (rurales) y determina que

“la identificación de la solución energética debe hacerse con una canasta donde se tenga en cuenta primordialmente la participación de las fuentes locales y se consideren las demandas potenciales derivadas de proyectos de desarrollo agroindustrial. Una vez identificada y seleccionada la solución energética, es necesario garantizar la recuperación de la inversión (total o parcial, después de los subsidios o aportes estimados como necesarios), y de la totalidad del esquema de operación y mantenimiento..., mediante la generación de excedentes productivos.” (UPME, 2003 p. 172).

El plan considera que

“para cubrir los costos de inversión inicial, se deben diseñar mecanismos financieros especializados... y aprovechar recursos derivados de los mecanismos de promoción ambiental, como el mecanismo de desarrollo limpio” (p. 173).

Aunque el PEN avanza en un procedimiento para la adaptación de tecnologías de energías renovables en zonas rurales, se hace necesario señalar sus limitaciones para reconocer en forma adecuada el problema de la energía en el medio rural, tanto en sus usos como en sus relaciones con el desarrollo sostenible (DS). Allí, el uso primero de la energía es la cocción de alimentos y la provisión de abrigo (FAO, 1983), seguido por el uso como insumo de producción y luego como insumo para el consumo de otros bienes y servicios —iluminación, aparatos, etc.—. Al desconocer esta jerarquía de las preferencias, el uso de leña en comunidades rurales pasa inadvertido. Quizá sucede que el consumo de leña se asocie con la deforestación, que inmediatamente lo deja a cargo de los responsables de medio ambiente, por fuera del alcance de las políticas de energía. Sin embargo, el problema de la explotación insostenible de la producción silvestre de leña es consecuencia de la poca atención de las políticas en energía. Esto obedece a la falta de idoneidad del actual diseño institucional. No obstante, vale resaltar que el PEN prioriza con acierto el uso de energía como insumo de la producción, sobre el uso como servicio, aunque se insiste, el plan no se estructura sobre una definición consecuente de DS.

Este artículo presenta los resultados de una investigación que tuvo por objeto la exploración del potencial de energías renovables de una zona rural deprimida —la vereda Carrizal del municipio de Sutamarchán, Boyacá—. Se busca aportar elementos concretos a la discusión de políticas de desarrollo rural que den apropiada cuenta de las energías renovables y las políticas globales para la mitigación de emisiones de GEI. En sintonía con los lineamientos del PEN, se procede con *la identificación de la solución energética que debe hacerse*, se evalúan *las demandas potenciales derivadas de proyectos de desarrollo*, y se calcula el potencial de Carrizal para el aprovechamiento de los *recursos derivados del MDL, para cubrir los costos de inversión inicial*.

El estudio se basó en diferentes fuentes: la información socioeconómica de Carrizal se obtuvo de documentos públicos del municipio y de un censo llevado a cabo por el autor. Éste apuntó a la evaluación de la oferta y la demanda de energía. La información fisiográfica se obtuvo de IDEAM², así como de recursos disponibles en internet. El potencial de biogas se obtuvo de un muestreo de la producción semanal de desechos del municipio, realizado por el autor, así como de otro estudio realizado por CORPOBOYACÁ³ en la misma zona. Datos demográficos del DANE⁴ (1996) de municipios aledaños, permitieron la extrapolación de los resultados a la producción de basuras de otros municipios.

2 IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

3 CORPOBOYACÁ: Corporación Autónoma Regional de Boyacá.

4 DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

1. Características de Carrizal

Carrizal, ubicado en una estribación del Valle de Moniquirá, lo conforman 35 familias dedicadas a la agricultura en 1.248,7 has. Como rasgo fisiográfico sobresaliente avanza desde tiempos coloniales un proceso de desertificación favorecido por la fragilidad del paisaje y originado en el uso intensivo del suelo (BANREP, 2002). Carrizal colinda con el casco urbano de Sutamarchán. Junto con Roa, son consideradas las veredas más pobres del municipio. La vereda es la unión de dos pequeñas cuencas de aguas de escorrentía, que inicialmente desembocan en la cañada Carrizal, y en las inmediaciones del casco urbano en el río Sutamarchán. El régimen de lluvias es muy escaso. El índice de evapotranspiración de la zona está entre 0,66 y 0,75 (SUR ORG, 2002, p. 33) que lo clasifica como desértico. Existen dos períodos anuales de lluvia. Los hogares prósperos de la vereda se ubican en el valle, mientras que los más pobres en la parte alta. Esta prosperidad tiene por soporte la disponibilidad permanente de agua.

La vereda presenta características de una economía agraria abierta (LIPTON, 1968). En ellas, el ingreso campesino producto de la producción agrícola, es regido por las variaciones de clima y precios del mercado. Debido a que ambos son factores exógenos de riesgo y a la ausencia de mercados de seguros, los campesinos lo evitan mediante el uso de técnicas conservativas de producción —sembrar poco para perder poco—, el cultivo de especies resistentes y en ocasiones de poca comerciabilidad, cría de animales resistentes por lo general para consumo interno, y el rechazo a nuevas tecnologías. Como economía abierta se caracteriza por la falta de incentivos. En consecuencia, los recursos necesarios para el nuevo cultivo, dependen de los ahorros de la anterior cosecha (PERRINGS, 1997) y posiblemente de prestamistas informales. Los bajos niveles de ahorro mantienen una baja producción; pero eventuales buenos resultados fruto de la favorabilidad climática, pueden ocasionar fuertes caídas en la producción siguiente, por desgaste del recurso originado en una explotación intensiva (LACROIX, 1985) o como resultado de buenas cosechas que conducen a la crisis por bajos precios del mercado. Sometidos por la incertidumbre de variaciones medioambientales y de precios, estas comunidades se mantienen en un permanente estancamiento, con altos niveles de malnutrición (FEI y RANIS, 1978; LACDE, 1990) y bajo rendimiento académico de los infantes⁵. Adicionalmente existen altas tasas de reproducción (3,9%) y de emigración (3,4%), con predominio de la leña como fuente de energía. En el caso de Carrizal, el factor determinante del estancamiento es la escasez de agua. Quienes cuentan con un suministro permanente han logrado elevar su nivel de bienestar, quienes dependen exclusivamente del régimen de lluvias, trabajan en sus propios cultivos cuando llueve, y se emplean como jornaleros durante la sequía. El precio del jornal es de 8 mil pesos, —unos 2,7 dólares por día—, y en

5 Según los comentarios de la profesora de la escuela veredal.

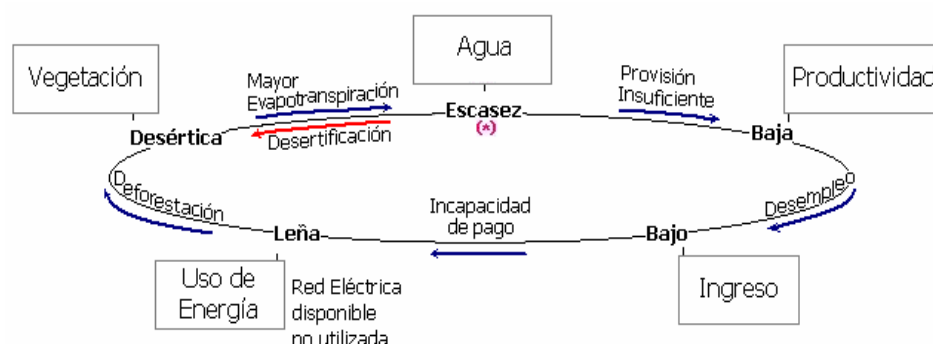
promedio obtienen unos 120 mil pesos al mes, apenas un 45% del salario mínimo legal⁶. Adicionalmente, Carrizal soporta el botadero municipal de basuras, con impactos negativos como malos olores y la proliferación de moscos que se ensañan principalmente sobre los niños. Asimismo es fuente de emisiones de metano, gas que aporta al calentamiento global.

En las condiciones actuales, el sistema económico y medioambiental de Carrizal tiene dos trayectorias posibles. En la primera, si el consumo de leña no se realiza en equilibrio, se acentúa la deforestación con aumento del índice de evapotranspiración y la consecuente reducción de la capacidad de retención del líquido, que disminuye la provisión de agua y refuerza el deterioro de la capa vegetal. Esta trayectoria conduciría a la degradación de los recursos y al colapso de la actividad económica. No obstante y de acuerdo con lo detectado, el consumo de leña se realiza en equilibrio y el sistema en Carrizal se reproduce en un ciclo estable que mantiene a los campesinos en un permanente estado de estancamiento, con la única esperanza en “*más de lo mismo*” —en palabras de FEI y RANIS (1978). Sin embargo, el consumo actual de leña no alcanza los niveles mínimos para cocción de alimentos (FAO, 1983). Este ciclo puede verse con punto de partida en la escasez de agua que produce desempleo y bajo ingreso como consecuencias inmediatas. La baja capacidad de pago impide a los campesinos el uso de la red eléctrica actualmente instalada, por lo que la fuente básica de energía es la leña. De acuerdo con los registros históricos (BANREP 2002), la crisis que dio origen a este nuevo estado en equilibrio se produjo por la explotación intensiva de la tierra, originado en el siglo XVI y acentuado en el siglo XVIII, ejercido por encomenderos, la iglesia y el corregidor representante del rey, quienes imponían a los indígenas cuotas de las cosechas. El ciclo se representa en la figura 1.

Luego de casi dos siglos de finalizada la colonia, el ciclo se reproduce y las comunidades mantienen los niveles de pobreza a que fueron llevados los indígenas. El modelo de economía agraria abierta es representativo por cuanto las prácticas agrícolas conservativas mantienen el equilibrio del recurso y de la actividad económica. El futuro del actual estado depende, del balance entre la regeneración natural del bosque y la intensidad de la deforestación. Sin embargo, la productividad del suelo está amenazada debido a los efectos negativos del uso de tecnologías de producción intensiva, fertilizantes y pesticidas, y no se espera que en el mediano plazo se preserven los rendimientos acostumbrados (RUTTAN, 1991, 1999; BEJARANO, 1998; PIERCE, 1993; PEZZEY, 1992).

6 En octubre de 2002.

Figura 1. Ciclo de estancamiento de la economía agrícola abierta de Carrizal.



Fuente: autor.

1.1. Energía en el desarrollo sostenible

La anterior caracterización induce la discusión central de este artículo: las implicaciones de la relación entre energía y DS en el diseño de políticas de desarrollo rural. En Carrizal, la energía debería suministrarse en el impulso de la actividad económica vía irrigación de cultivos y reforestación, que incluyen pero superan proyectos *agroindustriales* o para el uso de servicios asociados al consumo, dentro de una concepción más estricta del DS.

De acuerdo con el PEN, se trata de aprovechar los fondos del MDL para el desarrollo económico de las zonas rurales, vía proyectos agroindustriales. Aquí se argumenta que los lineamientos del PEN no orientan de manera apropiada las opciones del MDL, debido a la falta de comprensión de la naturaleza biunívoca de la energía y el DS. El caso Carrizal muestra que el apoyo al desarrollo económico debería realizarse a través de la recuperación del medio ambiente y no a sus expensas. Este es el verdadero espíritu de las políticas globales de DS, expresadas en el MDL y en las políticas de LULUCF. Sobre la naturaleza biunívoca de la energía y el DS, vale citar otros casos. El uso de la energía está en el centro de los problemas del calentamiento global en mayor medida originado por el uso combustibles fósiles. Las tecnologías de energías renovables son una respuesta a la amenaza sobre la sostenibilidad de la comunidad planetaria y las políticas de mitigación de emisiones de GEI, basadas en estas tecnologías de energías renovables, son la contribución de la comunidad global para enfrentar estos problemas.

La pregunta para gobiernos receptores de fondos es, ¿por qué los planes locales deberían pasar por encima de esa relación indisoluble entre energía y DS, y considerar las energías renovables sólo por sus ventajas comparativas frente a la interconectividad y por las oportunidades económicas del MDL? Una pobre ponderación del significado de las energías renovables y de las políticas globales para la mitigación de emisiones de GEI, limita los beneficios de esas políticas a objetivos de corto alcance, ligados apenas retóricamente con el DS.

El estudio se adentra en la evaluación del consumo de energía en Carrizal y en la proyección de la demanda. Se muestra que para ubicar la energía donde es más apreciada, debería dedicarse al suministro de potencia para el bombeo de agua tanto para irrigación agrícola como para forestación, en la provisión del consumo mínimo de leña. Posteriormente se evalúa el potencial de energías renovables, se realiza el balance entre oferta de renovables y demanda, se calcula el potencial para el MDL y al final se retoma la discusión sobre políticas.

2. Demanda de energía

Según el World Energy Council (WEC, 1999, p. 35) “*se ha demostrado que la falta de energía se correlaciona muy estrechamente con muchos indicadores de pobreza*”. Carrizal no es la excepción: aunque los 35 hogares de la vereda poseen interconexión eléctrica, la instalación final no se ha realizado o el servicio no se usa, debido al bajo ingreso. Sólo 7 familias usan electricidad. Paradójicamente, a la par de la incapacidad para usar la energía como servicio, la mayor parte del presupuesto se dedica a la provisión de potencia para el bombeo de agua para irrigación y para consumo humano. Esto evidencia para el sector rural dos roles básicos de la energía: como servicio y como insumo de la agricultura. Esto muestra con claridad que el uso de la energía como servicio es una consecuencia del aumento del ingreso, y que la provisión de energías renovables debería asignarse donde mejor es apreciada: como insumo de la actividad económica: en Carrizal, como potencia para el bombeo de agua para la irrigación.

Se presenta la demanda actual de energía desde varias perspectivas: la tabla 1 muestra la demanda por actividad económica, como propone el WEC (2003). En la tabla 2 se presenta la demanda efectiva por combustibles y por servicio. Por último, la tabla 3 ofrece la demanda como porcentajes del presupuesto para energía, por combustible y servicio. En todos los casos la información fue obtenida por el autor.

La tabla 1 muestra el carácter agrícola de la economía de Carrizal, sin actividades comerciales o industriales. Actividades domésticas y agrícolas gobiernan el consumo de energía. En la tabla 2, los combustibles comerciales (electricidad, gasolina y propano) alcanzan apenas el 26,9% y se consumen principalmente en el bombeo de agua para irrigación y el acueducto veredal, como lo muestra la tabla 3.

Tabla 1
Demanda de energía por actividad económica en Carrizal

	<i>Doméstico</i>	<i>Agricultura</i>	<i>Industria y comercio</i>	<i>Otros (Bombeo de agua de acueducto)</i>
	%	%	%	%
Comercial	4,3	15,2	0,0	7,3
Tradicional	73,1	0,0	0,0	0,0

Fuente: autor.

Tabla 2
Demanda de energía por combustible y servicio en Carrizal

<i>Combustible</i>				<i>Servicio</i>			
<i>Electricidad</i>	<i>Gasolina</i>	<i>Propano</i>	<i>Madera</i>	<i>Iluminación</i>	<i>Aparatos eléctricos</i>	<i>Agua (riego y acueducto)</i>	<i>Cocción de alimentos</i>
%	%	%	%	%	%	%	%
8,76	16,89	1,2	73,14	0,29	1,18	22,53	76

Fuente: autor.

La leña es la principal fuente de energía, utilizada para la cocción de alimentos. Como datos adicionales a la tabla 2, tres familias compran la leña, debido a la falta del recurso en sus alrededores. El 94,3% de los hogares usa la estufa de tres piedras, 8,6% usa estufa de gasolina y 17,14% de propano. Sólo una familia posee estufa de ladrillo. Estos usos no son excluyentes. Los servicios de energía eléctrica (plancha, radio,...) apenas alcanzan 1,57% del consumo. El resto de la energía eléctrica se usa para el bombeo de agua del acueducto veredal. El pico de consumo eléctrico no alcanza los 2,5 kWh y el consumo promedio diario es algo más de 13 kWh.

El análisis del presupuesto para energía de la tabla 3, muestra la diferencia entre la energía como servicio y la energía como insumo de la actividad económica. Sobresale que el 74,59% del gasto total en energía se dedica al bombeo de agua. La cocción de alimentos, el servicio más básico, alcanza un 12,2% del gasto. La gasolina es utilizada para bombeo del agua para riego de las parcelas, del agua de reservorios de escorrentía o pequeños manantiales.

La tabla 3 muestra la importancia del agua en la economía de Carrizal. El bajo ingreso y la escasez del líquido a la vez que limitan el presupuesto para la obtención del combustible, obliga a los campesinos a gastar la mayor parte del presupuesto

en la provisión del recurso. La heterogeneidad de la distribución del recurso aparece como una imperfección del mercado de energía. La poca posibilidad de ahorro impide la efectiva solución del problema. La energía aparece como un factor determinante de las posibilidades de mejoramiento.

Tabla 3
Porcentaje del presupuesto por fuente de energía y servicio, en Carrizal

Fuente	Velas	Electricidad	Gasolina	Propano	Leña	Pilas
Porcentajes	4,4%	36,75%	48,4%	2,57%	4,87%	2,97%
	5,59%	4,89%	74,59%		12,19%	2,97%
Servicio	Iluminación	Aparatos	Bombeo de Agua	Cocción de Alimentos	Entretención	

Fuente: autor.

2.1. Demanda de leña

El estudio muestra que las familias con el mejor nivel de bienestar, y que utilizan fuentes comerciales de energía, son así mismo las que más consumen leña. Esto evidencia como sucede en otras partes del mundo, que el aumento del bienestar produce un aumento de la demanda de biomasa. Esto se explica por el déficit entre las necesidades básicas de leña y el consumo actual. El objetivo de una política sostenible para zonas rurales no puede ser la disminución del consumo de leña a expensas de energías comerciales, sino un adecuado suministro de biomasa. Puede darse un cambio en el patrón, con aumentos en el consumo de combustibles comerciales, merced del aumento del ingreso, que probablemente acompañarían un aumento del consumo de leña.

La evaluación tiene por objeto confrontar el actual consumo de leña con los estándares para un adecuado suministro. De acuerdo con MONTALEMBERT Y CLEMENT (FAO 1983), para Latinoamérica, las necesidades de energía de biomasa en áreas por encima de 1800 m está entre 18 y 23 Giga Joules (GJ) por persona por año⁷. En Carrizal, el 76,3% de las personas consume menos de la cantidad sugerida por la FAO. Sólo 5,2% están en el rango de 18-23 GJ/año, y 18,5% están por encima.

⁷ Carrizal está localizado a 2.100 m de altura.

Considerando el 76,3% por debajo del rango, el suministro adicional requerido está entre 1.054,55 y 1.569,55 *GJ/año*. Éstos representan 1,52 y 1,78 veces el actual consumo. En la actualidad, la biomasa consumida para cocción alcanza 40,55 *tons/año*. Para cubrir la actual necesidad serían necesarias entre 61,79 y 72,164 *tons/año*.

3. Proyección de la demanda

3.1. Energía para irrigación y reforestación

La energía demandada en irrigación y forestación, es igual al trabajo necesario para llevar el agua a cada una de las 35 casas de Carrizal, desde una o varias fuentes permanentes. Los habitantes de Carrizal han excavado algunos pozos subterráneos, pero afirman que el contenido de hierro es muy alto. La fuente más confiable de agua es el río Sutamarchán. Los registros históricos obtenidos de IDEAM muestran que aunque el caudal del río no es abundante, sí es suficiente para sostener la producción agrícola de toda la vereda. Al procesar los datos de IDEAM, se encuentra que en el 99% de los casos hay algún caudal, aunque sólo en el 67% del tiempo éste es mayor de 1 *m³/seg*. Para conocer la energía, se requiere la altura de cada casa y la carga de agua a transportar. La ecuación a calcular es:

$$W = \sum_{i=1}^{35} m_i * g * h_i \quad (1)$$

donde g es la gravedad, m_i es la masa total de agua a ser distribuida en cada casa, y h_i la altura de cada casa respecto del nivel del río. La altura de cada casa se obtuvo con la ayuda de un sistema de posicionamiento global.

El volumen de agua requerido para irrigación y reforestación depende del tipo de cultivo, de las características del suelo y de la precipitación local, variables contenidas en el índice de evapotranspiración. Asimismo, depende del área a irrigar. El autor elaboró un modelo analítico para el cálculo de la energía demandada en la ecuación 1, a partir la teoría desarrollada por la FAO (1988, 1997, 2002) con base en la evapotranspiración, los índices de cada cultivo, la precipitación y la capacidad de retención del suelo⁸.

La aplicación de la ecuación 4 del apéndice 1, con un $K_c = 1,4$ dio como resultado para el consumo actual y la demanda proyectada de agua:

8 Todos los detalles en el apéndice 1.

Tabla 4
Consumo actual y demanda proyectada de agua para irrigación y forestación en Carrizal

<i>Actual demanda de agua para cultivo</i>	<i>para cultivo de 2 has/casa</i>	<i>para cultivo de 3 has/casa</i>	<i>para reforestación</i>
1.222.666,7 (m ³ /año)	1.458.333,3 (m ³ /año)	1.960.000,0 (m ³ /año)	1.458.333,3 (m ³ /2 has/casa/año)

Fuente: autor.

La aplicación de la ecuación 12 del apéndice 1, incluidos factores adicionales de eficiencia, da los requerimientos de energía:

Tabla 5
Necesidades de energía para irrigación y reforestación en Carrizal.

<i>Energía</i>	<i>GJ/año</i>	<i>KWh/día</i>
<i>Actual demanda de energía para cultivo</i>	961,4	731,7
<i>Energía para 2 has/casa</i>	1136,1	864,6
<i>Energía para 3 has/casa</i>	1704,1	1296,9
<i>Energía para reforestación</i>	1267,9 (m ³ /2 ha/casa/año)	964,9
Con 0,35 de eficiencia en el bombeo de agua		
<i>Actual demanda de energía para cultivo</i>	2746,9	2090,5
<i>Energía para 2 has/casa</i>	3245,9	2470,2
<i>Energía para 3 has/casa</i>	4868,8	3705,3
<i>Energía para Reforestación</i>	3622,6 (m ³ /2 ha/casa/año)	2756,9

Fuente: autor.

Se ha estimado un tamaño promedio de 2 has por parcela, con crecimiento hasta 3 has. Para reforestación, ha sido calculada una superficie máxima de 2 has por casa. Debido a las diferencias de altura, la demanda de energía no es proporcional al tamaño promedio de la parcela. Sumando las demandas de agua para reforestación y cultivo, en el caso de máxima demanda, se requeriría un caudal de 4 m³/min del río Sutamarchán, que se cubre con certeza en el 99% de los casos.

3.2. Leña

Con respecto a la deforestación, no existen estudios previos que permitan verificar si el actual consumo ha venido deteriorando la producción silvestre de leña en

Carrizal. Sin embargo, es posible conocer la producción requerida para asegurar el suministro mínimo, basado en el crecimiento proyectado de la población.

Tabla 6
Prospecto de la demanda de biomasa en Carrizal

Año	2002	2007	2012	2017	2022
<i>Rango bajo (18 GJ/pers/año)</i>	73,2 (tons/año)	175,9	192,3	219,3	252,6
<i>Rango alto (23 GJ/pers/año)</i>	109,0 tons/año	224,7	245,8	280,2	371,3

Fuente: autor.

En la estimación del balance de biomasa, es necesario conocer la densidad de producción de leña por unidad de área. La FAO ha realizado una completa caracterización de bosques y recursos vegetales de diferentes regiones del planeta, incluida Latinoamérica (FAO, 1983)⁹. Teniendo en cuenta las características del paisaje de Carrizal, la vereda encaja dentro de la descripción de formación de “Matorrales”¹⁰. Considerando la escasez de agua y el probable bajo peso específico de la madera local, del rango sugerido de densidades (REHLING 2001), para efectos de cálculo se ha tomado $0,7 \text{ g/cm}^3$ (700 kg/m^3). Por tanto, la producción de biomasa de zonas similares a Carrizal podrían estimarse en $1,5 \times 700 = 1050 \text{ kg/ha}$ (véase pie de página). Para producir una tonelada se requieren 0,9524 has. Para producir las actuales 40,55 tons, son requeridas 38,62 has. Se precisa por año:

Tabla 7
Área requerida para atender las necesidades de biomasa en Carrizal

Año	2002	2007	2012	2017	2022
<i>Rango bajo (18 GJ/pers/año)</i>	70,1 has	168,4	184,1	209,9	241,8
<i>Rango alto (23 GJ/pers/año)</i>	104,3 has	215,1	235,2	268,2	355,4

Fuente: autor.

9 FAO 1983. “Los diferentes tipos de bosque han sido analizados y agrupados de acuerdo con la siguiente clasificación: Closed broadleaved forests, Closed coniferous forests, Open forest formations, Savanna with trees, Matorral and Closed forest modified by agriculture and fallows.

10 “Son bosques abiertos tachonados con claros, que se encuentran en regiones secas de Paraguay y Bolivia del este, Brasil meridional, ciertas partes de Venezuela, Colombia y México central. Cubren un total de 225 millones de ha, representando 16 % del área total de las formaciones del bosque y de arbustos y 20% del área del bosque. El volumen medio es de cerca de 80 m^3 por hectárea, con una producción de leña y de madera para carbón de leña del m^3 1.5 por hectárea por año”(FAO, 1983).

Teniendo en cuenta que la superficie total de Carrizal es 1248,7 has, el área requerida está entre 8,3% en 2002 y 28,42% en 2022. Considerando incluso que las áreas despejadas son más amplias que en la descripción típica de FAO, doblando el área, los requerimientos totales estarían entre el 16,6% (2002) y el 56,8% (2022) de la superficie total. Esto permite afirmar que en la actualidad, si existe un deterioro de la producción silvestre de biomasa, no es debido al consumo de leña. Más aún, que la actual producción natural de leña permitiría sostener los requerimientos de un consumo adecuado.

Sin embargo, que la población de la vereda no pueda consumir niveles mínimos de biomasa, refleja hasta qué punto las condiciones económicas oprimen la comunidad en Carrizal. Los modelos de hogares agrícolas (SINGH *et al.*, 1986; HANNAN, 1993) han permitido reconocer que los hogares campesinos distribuyen sus recursos, tiempo y mano de obra para maximizar el consumo. Que las familias de Carrizal no logren un consumo mínimo de leña se explica por un ingreso deficiente causado por un mercado laboral imperfecto (STIGLITZ, 1989). Esto es, si existe la capacidad para recolectar la leña, lo que impide un consumo mínimo normal es la imposibilidad para adquirir o cultivar alimentos. De nuevo se evidencia, que el uso de servicios domésticos de energía es básicamente función del ingreso, incluso si las fuentes de energía son libres de costo.

3.3. Análisis de la demanda

Si bien Carrizal es una zona rural y su actividad económica refleja la situación de las economías campesinas, descrita arriba como una economía agraria abierta, no puede catalogarse como una zona no interconectada. Allí, la red eléctrica alcanza las 35 familias. Tampoco puede atribuirse el atraso a la falta de infraestructura de comunicaciones, aunque para algunas familias el acceso a un vía de transporte principal les demanda 2 horas. Carrizal colinda con el caso urbano de Sutamarchán. Esto no ha impedido que la economía campesina comporte como cualquiera de otra zona rural aislada. Así pues, es el nivel económico de los habitantes lo que determina su aislamiento y no su cercanía física con mercados e infraestructura. Esto señala que la provisión de servicios de energía puede ser irrelevante para el desarrollo económico si no existe un nivel mínimo de ingreso que garantice su uso. Es la economía la que impide la demanda efectiva de energía. Teniendo en cuenta que el factor económico es el fundamental para el uso de servicios de energía, dado que la electricidad del sistema interconectado es la más económica, las soluciones basadas en energías renovables serían insostenibles en zonas deprimidas no interconectadas. Es de esperar que estas zonas padezcan de menores niveles de ingreso y por tanto la demanda de servicios de energía esté aún más lejos del alcance. Así, el problema no es de distancia física, sino de pobreza. Y en tal caso, el objetivo de la política de expansión de la cobertura de la energía

debería ser el apoyo a la actividad económica y en el peor de los casos considerar el consumo de servicios de energía como resultado de unas mejores condiciones que deben ser atendidas con prioridad. En Carrizal sobresale la demanda de energía para la extracción y ubicación de un recurso natural. Pero en otras zonas, los requerimientos pueden ser otros.

4. Potencial de energías renovables

Carrizal presenta un buen potencial de energías renovables. El único recurso que no pudo evaluarse fue el eólico, debido a que el período del estudio de campo fue insignificante para un cálculo confiable de su potencial. Otros factores son determinantes: en paisajes planos puede ser factible interpolar los resultados de estaciones cercanas. IDEAM no posee anemómetros siquiera cerca del lugar. No obstante, como regla, el potencial eólico exige una evaluación *in situ*, más aún teniendo en cuenta la variabilidad local del viento producida por la irregularidad orográfica¹¹. Sin embargo, otros potenciales compensan de lejos esta carencia. Los principales son de la energía de biogas, biomasa y solar. Carrizal tiene un potencial sobresaliente de biogas gracias a la presencia del vertedero de basuras del municipio de Sutamarchán. Por su actual impacto en la salud de los habitantes de la vereda, así como su participación en la emisión de GEI, el estudio se orientó a la exploración de las posibilidades del biogas.

4.1. Potencial de energía solar¹²

El brillo solar promedio es 135,3 horas/mes. El brillo solar mínimo diario es $66/30=2,2$ h/d. En el 92% del tiempo, el brillo solar disponible es 4 horas/día. La densidad de potencia (KWh/m^2) se calculó con el software desarrollado por GES¹³.

11 La potencia es función del cubo de la velocidad del viento. Esto significa que pequeñas variaciones en la velocidad del viento producen grandes diferencias en la potencia registrada. Terrenos irregulares originan frecuentes rizos de turbulencia que originan altas variaciones de la velocidad, con el consecuente aumento del tiempo requerido para una evaluación confiable.

12 La información de horas brillo por mes se obtuvo de la estación IDEAM 2401530 localizada en Villa de Leyva, a unos 6 km de Sutamarchán. Los registros presentados como promedios mensuales, se realizaron entre enero de 1981 y diciembre de 2001, en un lapso de 252 meses.

13 Grupo de Energía Solar y Energías Renovables de la Universidad Nacional. (sky.net.co. Click "Software de Cálculo". Marzo de 2003).

Tabla 8
Potencia de energía solar en Carrizal

Potencia con brillo solar mínimo	Potencia con 110 horas/mes de brillo solar. (Frecuencia de 92%)
3,089 kWh/m ² /día	5,133 kWh/m ² /día

Fuente: autor.

Comparando los resultados de la tabla 5, de la demanda de energía para irrigación de 2 *has*, con los resultados de la tabla 8, se necesitarían en promedio 172 m² de paneles por cada hogar.

4.2. Potencial de biogas

La información de producción de basuras se obtuvo con un muestreo de la producción local y de un trabajo previo de BOLÍVAR *et al.* (2001), que incluyó Sutamarchán, municipio 4, municipio 5, municipio 6, municipio 7, municipio 8 y municipio 9. De acuerdo con GBU (2003), el contenido de biogas de desechos orgánicos está dado por:

Tabla 9
Contenido de materia seca en desechos orgánicos. Fuente: GBU (2003)

Materia Seca en Biodesechos (MS)	Contenido de Materia Orgánica Seca (MSO)	Tiempo de Retención dentro del Digestor (T)	Peso Específico dentro del Digestor	Rata de Descomposición Esperada	Producción Específica de Biogas
25%	75% de MS	20 días	Máx 4 kg MSO/m ³	70%	900 lt/kg de MSO

Entonces, la producción de biogas está dada por:

$$V_{biogas} = 0,25 * 0,75 * 0,7 * 900 * m_{de\ sec\ ho\ orgánico} = 118 \left[\frac{lt}{kg} \right] * m_{de\ sec\ ho\ orgánico} \quad (2)$$

Para Colombia, los desechos se han caracterizado de la siguiente manera (BOLÍVAR *et al.*, 2001): materia orgánica 74%, papel y cartón 12,7%, plástico 5%, chatarra 1%, vidrio 4%, hueso, trapo y madera 3,3%. Hay concordancia entre el valor de 0,75 de GBU de la tabla 9 y el de 0,74 para Colombia. El potencial de biogas fue:

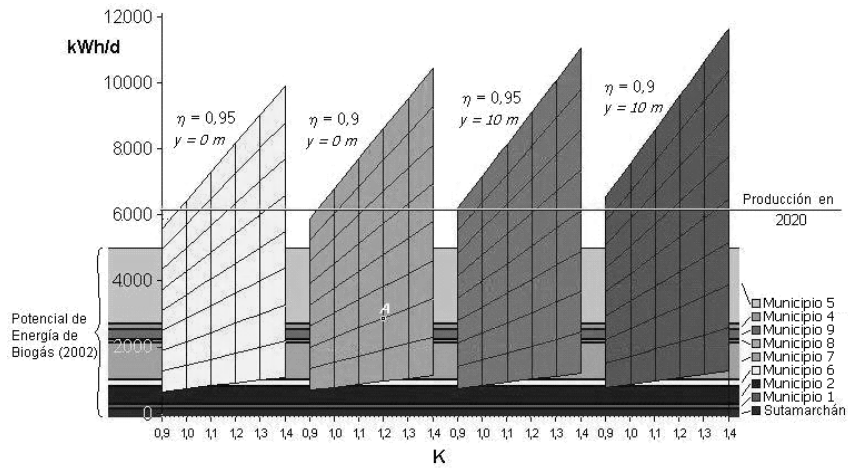
Tabla 10
Potencial de biogas de desechos orgánicos de Sutamarchán y municipios cercanos

Municipio	Población	Producción de Desechos	Producción de Biogas	Producción de Energía	Compostaje	Producción Acumulada
	<i>En 2002</i>	<i>Kg/semana</i>	<i>lt/día</i>	<i>kWh/día</i>	<i>kg/d</i>	<i>KWh/día</i>
Sutamarchán	1311	5365	44362	288	230	288
Municipio 1	381	2083	15988	104	89	392
Municipio 2	1838	1480	84317	548	63	940
Municipio 3	1003	808	46012	299	35	1239
Municipio 4	501	403	22983	149	17	1389
Municipio 5	4817	38896	345009	2243	1667	3631
Municipio 6	1608	3983	28449	185	171	3816
Municipio 7	3605	21432	168552	1096	919	4912
Municipio 8	1310	2576	13595	88	110	5000
Municipio 9	485	1238	4132	27	53	5027
Totales	16859	78264	773398	5027	3354	↑

Fuente: autor, BOLÍVAR *et al.* (2001)

Nos interesa el balance entre el potencial de biogas y la demanda de energía para irrigación y forestación. Con base en los resultados de la tabla 10 y los del modelo de energía desarrollado en el apéndice 1, y aplicado a los datos de Carrizal, el balance se presenta en la figura 2:

Figura 2
Balance de energía entre requerimientos del cultivo (K) y producción potencial de biogas



Fuente: autor.

La interpretación de la figura 2 es como sigue:

Potencial: En el fondo, en bandas horizontales se presenta el potencial acumulado de energía del biogas producido por Sutamarchán y por varios municipios aledaños. Según las proyecciones de crecimiento de la población, se señala la producción esperada en 2020¹⁴. Se observa que en el 2020, no se podrían suplir la demanda para 3 has de cultivo y 2 has de forestación.

Demanda: Las cuatro bandas verticales corresponden a la demanda de energía para irrigación según los requerimientos de cultivo expresados en el coeficiente K, entre 0,9 y 1,4. Cada una de las placas resulta de la combinación de las eficiencias (^h) en la retención del agua por parte de los reservorios, y las alturas de los reservorios relativas a la ubicación de cada casa (^o).

La línea vertical de cada plano especifica el valor de los coeficientes de los cultivos, mientras que la diagonal especifica el área. Como ejemplo, el punto A de la segunda banda vertical especifica la energía requerida para 2 has de cultivos con un coeficiente $K = 1,2$ (cebolla). La gráfica muestra que el potencial de energía de biogas haría posible el cultivo de 4,5 has de irrigación de plantaciones con el más bajo coeficiente de cultivo, siempre que se garantice alta eficiencia en la irrigación. Asimismo, se podrían cultivar 2,5 has por hogar, en el caso de una baja eficiencia de irrigación para cultivos con el más alto coeficiente de irrigación. Véanse detalles y más explicaciones en el apéndice 1.

La gráfica también muestra que el potencial de biogas de la producción de basuras de Sutamarchán no puede cubrir ninguno de los requerimientos, y que sería necesario obtener los desechos de otros centros, como municipio 1, municipio 2 y municipio 6, para logros mínimos. Para irrigar entre 2 y 3 has con cultivos de coeficientes medios, sería necesario obtener las basuras de todos los municipios de los alrededores, incluyendo el municipio 5. En conclusión, el potencial de biogas de la región, incluyendo el uso de los desechos de basuras de varios municipios aledaños, permitiría tanto el sustento de la producción agrícola como el sostenimiento de proyectos de reforestación. Evidentemente Carrizal es un caso especial, por la presencia del botadero municipal de basuras y la cercanía con otros municipios, en los que las basuras son actualmente un problema más que una solución.

14 El plan de desarrollo municipal reporta que Carrizal tiene 138 personas en 2000. El trabajo de campo mostró que actualmente hay 138 personas viviendo en la vereda. La tasa de crecimiento del DANE (1996) es acorde con la rata de crecimiento obtenida durante el trabajo de campo. Según la información oficial, entre 1998 y 2002 se predijo un crecimiento de entre 2 y tres nuevas personas. En Carrizal nacieron durante este período 23 personas. La rata de nacimientos es de 3,9% en promedio, basados en los últimos 5 años. Pero la rata de emigración también es muy alta: 3,4%.

Actualmente se ha logrado el desarrollo de tecnología casi libre de mantenimiento que garantiza la transformación confiable de los biodesechos en biogas, separa el material reciclable y produce compostaje¹⁵. El proyecto de uso de biogas para el fomento de la actividad económica de Carrizal, oferta la disminución (MDL) y captura (LULUCF) de emisiones de GEI. La mitigación se realiza en la transformación del metano en CO₂, en el momento de su combustión durante la producción de energía mecánica para el bombeo de agua. La captura de emisiones es lograda mediante la forestación. Sin embargo, sobre los proyectos LULUCF no existen decisiones finales entre las partes, por lo que aún se desconocen los montos a los que podría accederse¹⁶.

6. Discusión

Con la firma del protocolo de Kyoto, Colombia adquirió compromisos con los objetivos de mitigación y adaptabilidad al cambio climático. Estas no obstante, no son todas las facetas del DS en un país exportador de materias primas, pobre y agrícola. Como se ha demostrado, el rol de las energías renovables dentro de las comunidades rurales trasciende la expansión de los servicios de energía, y se relaciona directamente con la promoción de un DS basado en el alivio de la pobreza (MIDMORE *et al.*, 2000, p. 175) y la preservación de los recursos.

Sin embargo, parece que los entes encargados de la energía en Colombia han centrado su interés en los beneficios económicos del MDL, sin una consideración expresa de lo que se entiende por DS. El defecto principal de los enfoques economicistas del DS es que no incluyen como variable de cálculo la preservación de los intereses de las futuras generaciones.

El surgimiento de proyectos para el MDL, como el estudiado aquí, además del minminas y del minambiente, exigen la participación del Ministerio de Agricultura. Los intereses, a veces opuestos de cada entidad, obliga la concertación de políticas, en las que visiones contradictorias del DS, dan origen a propuestas del tipo “esto, pero también lo otro”, “caracterizadas por las buenas intenciones, atractivas políticamente pero irrealizables” (BEJARANO, 1998), o irrelevantes; o simplemente producen el copamiento de unas en beneficio de otras. Es el caso del parque eólico de Jepirachi, que representa un respaldo importante al sector privado, aún cuando no parecen claros los beneficios que su implementación traerá para el DS local, una

15 www.gbunet.de

16 Aún se discuten aspectos importantes como temporalidad y permanencia de las capturas de emisiones, riesgo y el papel de algunas partes como Rusia, cuyo peso específico en la oferta de captura de emisiones, crearía un desbalance importante en la oferta de emisiones. Véase por ejemplo (BODE, 2003; DUTSCHKE, 2003; MICHAELOWA, 2001; WONG, 2003).

muestra de la tenacidad de las autoridades de la energía y la flexibilidad de las autoridades medioambientales¹⁷.

El problema de fondo es institucional: los asuntos de energía corresponden al Ministerio de Minas y Energía y la UPME, el desarrollo sostenible está a cargo del Ministerio de Medio Ambiente y las ONG; y el desarrollo campesino del Ministerio de Agricultura. Mientras para los encargados de la energía se entiende la sostenibilidad como la preservación del sector energético con loables consideraciones sobre el medio ambiente, para el sector campesino la sostenibilidad se refiere a la sostenibilidad de la producción, de los recursos (BEJARANO, 1998; PEZZEY, 1992; PIERCE, 1993; RUTTAN, 1991, 1999) y de su economía. El reto de las autoridades consiste en la elaboración de un concepto operativo de la sostenibilidad de la agricultura, que reconcilie las diferentes visiones y atienda los sectores económicos involucrados, incluidos los campesinos, entre otros objetivos (BEJARANO, 1998). Por tanto, en búsqueda de una síntesis que reconcilie la diversidad de objetivos, una política para el uso de energías renovables en comunidades rurales debería atender el fomento de la actividad agrícola de comunidades rurales, la participación de estas comunidades en proyectos en la mitigación y la adaptabilidad al cambio climático, y la protección de los recursos.

Frente a la expansión de la cobertura, la promoción de la actividad económica de zonas no interconectadas, y el aprovechamiento de los beneficios de las políticas globales para el cambio climático, queda sin resolver el interrogante principal: ¿quién es responsable de la integración de estos aspectos? De acuerdo con BEJARANO (1998) no parece recomendable mantener la fragmentación de funciones, tal como se ha presentado alrededor del tema agrícola. Por otra parte, es sabido por los economistas que el perfil institucional define las políticas que pueden esperarse. Esto obliga a considerar, más que el trabajo conjunto de diferentes actores estatales, una institución a cargo del problema como un todo. Esto se puede plantear en varios niveles dentro de los que cabría la fusión entre entidades agrícolas y medioambientales. El reto no es menor: comprende la formulación de políticas que integren la sostenibilidad agrícola del sector campesino con el cuidado de los recursos naturales y la mitigación y adaptabilidad al cambio climático, el desarrollo de la capacidad técnica en la asimilación y transferencia de tecnologías de energías renovables, así como en los procesos de certificación de reducción de emisiones.

17 A cargo del Ministerio del Medio Ambiente se encuentra la oficina nacional para el cambio climático, que tiene por misión la gestión de proyectos de DS que incluyan la disminución de emisiones de GEI, dentro de los lineamientos de la Convención Marco para el Cambio Climático de las Naciones Unidas (UNFCCC en inglés). En la mitigación los proyectos son gestionados a través del MDL, mientras que la adaptabilidad se relaciona con la captura de emisiones (COP 3, Marruecos) y con proyectos LULUCF.

7. Conclusiones

1. El uso de servicios de energía en comunidades rurales depende principalmente del nivel de ingreso, y por tanto la expansión de la cobertura de servicios de energía a zonas no interconectadas debe priorizar el fomento de la actividad económica local. Se ha mostrado que aún en zonas interconectadas, se requiere de un aumento del ingreso para hacer efectivo el consumo de servicios de energía. En zonas rurales, las externalidades producidas por una sobreexplotación agrícola en el pasado, se traducen en impactos sobre la producción actual, y da origen a una imperfección en el mercado de energía.
2. Una política orientada a la expansión de la energía en medios rurales debe observar que la adopción de soluciones basadas en energías renovables supone consideraciones rigurosas sobre DS, más allá de los beneficios globales generados por la mitigación de emisiones de GEI y de los atractivos económicos, debido a la naturaleza biunívoca de las energías renovables y el DS. Sólo una interpretación estricta del DS, basada en la inclusión de los intereses de futuras generaciones, trae a las comunidades rurales oportunidades ciertas de incentivos provenientes de las políticas globales para la mitigación y la adaptabilidad al cambio climático, a través del mecanismo de desarrollo limpio y de proyectos LULUCF. La exploración de estas posibilidades es deber de las autoridades.
3. Las deficiencias en la interpretación del DS se originan en la fragmentación institucional del tema de la energía. Actualmente, el diseño de políticas orientadas al mejor uso de las energías renovables en zonas rurales, involucra a las autoridades ambientales, agrícolas y de la energía. Más que una colaboración conjunta, parece requerirse además de una política integrada, un rediseño institucional. Los retos comprenden la sostenibilidad agrícola del sector campesino, la promoción de iniciativas potenciales beneficiarias de las políticas globales de cambio climático, el desarrollo de la capacidad en transferencia tecnológica y en los procesos de certificación de reducción de emisiones.

Bibliografía

- BANREP, 2002, <<http://www.banrep.gov.co/blaavirtual/boleti1/bol44/reseo.htm>>
Como aparece la información el 12 de octubre de 2004.
- BEJARANO, J.A., Un marco institucional para la gestión del medio ambiente y para la sostenibilidad agrícola. En: *Agricultura, medio ambiente y pobreza rural en América Latina*. Washington, D.C., 1998; 191-230.

BODE, S., 2003, Abatement Costs vs. Compliance Costs in Multiperiod Emissions Trading - The Firm Perspective. HWWA Discussion Paper No. 230. Como aparece en enero de 2005

< http://www.hwwa.de/Publikationen/Discussion_Paper/2003/230.pdf>

BOLÍVAR, L.; GÓMEZ, M.; GUÍO, A.; REYES, S., Diagnóstico, caracterización y formulación de la alternativa más conveniente para el manejo integral de residuos sólidos de los municipios de municipio 5, municipio 7, municipio 6, Sutamarchán, municipio 8, municipio 9, municipio 1 y Chíquiza. Tesis de ingeniería sanitaria y ambiental. Fundación Universitaria de Boyacá, 2001.

CARBONFUND, 2003, <<http://prototypecarbonfund.org/router.cfm?Page=FAQ>> Como aparece la información en febrero de 2002.

DANE, 1996, <http://www.dane.gov.co/Informacion_Estadistica/informacion_estadistica.html> El archivo está bajo el subtítulo “Censos demográficos 1993”. Como aparece la información en enero de 2003.

DUTSCHKE, M., SCHLAMADINGER, B., 2003, Practical Issues Concerning Temporary Carbon Credits in the CDM. HWWA Discussion Paper No. 227. Como aparece en enero de 2005

< http://www.hwwa.de/Publikationen/Discussion_Paper/2003/227.pdf>

FAO, 1983. FAO forestry paper. food and agriculture organization of the united nations. Rome, 1983.

FAO 1997, Chapter 5. Irrigation Potential in Africa. <<http://www.fao.org/docrep/W4347E/w4347e00.htm#Contents>> Como aparece la información en enero de 2003.

FAO 1998, Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements FAO Irrigation and drainage paper 56. <<http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm#Contents>> Como aparece la información en enero de 2003.

FAO, 2002, Review of global agricultural water use per country. Como aparece la información en enero de 2003. <http://www.fao.org/ag/AGL/aglw/aquastat/water_use/index2.stm>

FEI, J.C.H. and RANIS, G., “Agrarianism, dualism, and economic development”, in S.P. Singh (ed), in Underdevelopment to Development Economies, Oxford University Press, New York: 1978; 1-42.

GBU. Gesellschaft für Gas und Umwelttechnik. <www.gbunet.de> Como aparece la información en enero de 2003.

HANNAN, J., Shadow Wages and Peasant Family Labour Supply. An Econometric

- Application to the Peruvian Sierra. *The Review of Economic Studies*, vol. 60, n° 4 (Oct., 1993), 903-921.
- LACDE. Latin American Commission on Development and Environment, 1990. Our Own Agenda. Iner-American Development Bank-UNEP, New York.
- LACROIX, R.L.J., Integrated rural development in Latin America. *World Bank Staff Working Papers*, n° 716. The World Bank, Washington, 1985.
- LIPTON, M., "The theory of the optimising peasant", *Journal of Development Studies*: 1968; 327-351.
- MICHAELOWA, A., Mitigation versus adaptation: the political economy of competition between climate policy strategies and the consequences for developing countries. *HWWA Discussion Paper*, n° 153, 2001.
- MIDMORE, P.; WHITTAKER J., Economics for sustainable rural systems. *Ecological Economics*, vol. 35, 2000, 173-189.
- PERRINGS, CH., An Optimal Path to Extinction? Poverty and Resource Degradation in the Open Agrarian Economy. In: *Economics of Ecological Resources*, Edward Elgar Eds. Cheltenham UK. 1997; 93-117.
- PEZZEY, J., Sustainable Development Concepts. An Economic Analysis. *Environment Paper Number 2*. Washington D.C.: World Bank, 1992.
- PIERCE, J., Agriculture, Sustainability and the Imperatives of Policy Reform. In *Geoforum, Great Britain*, vol. 24, n° 4, 1993; 381-396.
- REHLING 2001-Slides. *Slides for biogas*. MSc. Program on Sustainable Energy Systemas and Management. Rehling Uwe. University of Flensburg.
- REHLING. *What is Energy*. Document of MSc. Program on Sustainable Energy Systemas and Management. University of Flensburg, 2001.
- RUTTAN, V., Sustainable growht in agricultural production: poetry, policy, and science. In: Vosti, R., T. and Von Urff, W. *Agricultural sustainability, growth and poverty alleviation: issues and policies*. IFPRI. Feldafing, Germany, Proceeding of the Conference, September 1991; 23-27.
- RUTTAN, V., Biotechnology and Agriculture: a skeptical perspective. *AgBioForum*, vol. 2, n° 1, 1999; 54-60.
- SINGH, I.; SQUIRE, L. & STRAUSS, J. *Agricultural household models, extensions, applications and policy*. Washington D.C., World Bank, Johns Hopkins University Press, 1986.
- STIGLITZ, J., Rational Peasants, Efficient Institutions, and a Theory of Rural Organization: Methodological Remarks for Development Economics, p. 18-29. In. *The Economic Theory of Agrarian Institutions*. Edited by Pranab

Bardhan. Clarendon Press. Oxford. 1989.

SUR ORG, 2002, <<http://www.sur.iucn.org/programa/desetificacion/paralela/Icomping.pdf>> Como aparecía la información en diciembre de 2002. En octubre 13 de 2004, aparece una referencia del libro en <http://www.sur.iucn.org/publicaciones/detalles_portema.cfm?passcodpub=130>

UPME, 2003. < <http://www.upme.gov.co/energia/e-elect/pen.htm>> Como aparece el 12 de octubre de 2004.

Villa de Leyva Gov 2002. <<http://www.villadeleyva.gov.co/infgeneral/infgeneral.htm>> As printed in december of 2002.

WEC, *World Energy Council*. The Challenge of Rural Energy Poverty in Developing Countries. 1999.

WEC 2003. <http://www.worldenergy.org/wec-geis/global/downloads/table1_2.htm> Como aparece la información en enero de 2003.

WONG, J.; DUTSCHKE, M., 2003, Can Permanence be Insured? Consideration of some Technical and Practical Issues of Insuring Carbon Credits from Afforestation and Reforestation. *HWWA Discussion Paper*, nº 235. Como aparece en enero de 2005. < http://www.hwwa.de/Publikationen/Discussion_Paper/2003/235.pdf>

9. Apéndices

Apéndice 1: El modelo de energía para irrigación

Los requerimientos netos de irrigación *IWR* están dados por:

$$IWR = K_c * ET_0 - P - \Delta S \quad (3)$$

donde **P** es la precipitación, y **DS** es el cambio de la humedad del suelo durante el mes previo. **ET₀** es el coeficiente de evapotranspiración de referencia, **Kc** es un factor experimental sin unidades propio de cada cultivo. Las unidades están dadas en mm/año o equivalentemente en m³/ha/año (FAO, 1998). En Sutamarchán, la zona de laderas tiene una precipitación de 922,1 mm/año (Villa de Leyva Gov, 2002). La humedad del suelo se considera nula. Para tener en cuenta las pérdidas en el proceso de irrigación se requiere información sobre los sistemas utilizados, pero ésta no es disponible para Sutamarchán. Para África, las eficiencias han sido calculadas entre 0,45 y 0,8 (FAO, 2002). Carrizal posee suelos arcillosos con buenas propiedades de retención, por tal motivo se ha utilizado un valor estimado de 0,6 para la eficiencia de la irrigación. El requerimiento total para irrigación es dado por:

$$WR = \frac{IWR}{\eta_{mech}} * A \quad (4)$$

donde h es la eficiencia de la irrigación y A es el área por irrigar. En la aplicación de (3), $P=922,1$ y $DS=0$, $ET_0=1250 \text{ mm}=12.500 \text{ m}^3/\text{ha}$, $h=0,6$, $K_c=1,4$, $A=35,52 \text{ ha}$ (1 ha/familia), y $WR=490.116 \text{ m}^3/\text{año}/\text{ha}$. Los requerimientos de energía están dados por el trabajo necesario para llevar el agua a los 35 puntos:

$$E = W = \frac{1}{\eta_{mech}} \sum_{i=1}^{35} m_i g h_i \quad (5)$$

donde m_i es la masa de agua por transportar a la altura h_i , y se suma la demanda de los 35 hogares. El término η_{mech} es la eficiencia mecánica del proceso. Considerando como la mejor opción un motor que transforme la energía del biogas en trabajo mecánico, se asume un valor de $\eta_{mech} = 0,35$. La cantidad de agua es dada por la relación de masa y volumen y la combinación de las ecuaciones 3 y 4:

$$m_i = \rho_{agua} V_i = \rho_{agua} \frac{K_c * ET_0 - P - \Delta S}{\eta_{Irr}} A_i \quad (6)$$

donde ρ_{agua} es la densidad del agua, V_i el volumen de agua para la i -ésima casa, A_i es el área a irrigar en la i -ésima casa; y η_{Irr} es la eficiencia de irrigación. Esta eficiencia está dada por el producto de las eficiencias del transporte del agua, del almacenamiento y del riego.

$$\eta_{Irr} = \eta_{Transp} \eta_{Almacen} \eta_{regadío} \quad (7)$$

Es factible asumir que no habrían pérdidas en el proceso de transporte. Debido a que el uso básico del agua es la irrigación, es también factible considerar cero pérdidas en la entrega, ya que la conexión entre el reservorio y la parcela no posee pasos intermedios. Es posible que el almacenamiento presente pérdidas por filtración, aunque los suelos en Carrizal son arcillosos. Como resultado la eficiencia total se ha asumido entre 0,9 y 0,95. Considerando todos estos factores, la ecuación 5 se transforma en:

$$E = \frac{\rho_{agua} g}{\eta_{mech} \eta_{Irr}} \sum_{i=1}^{35} \left[(K_c * ET_0 - P - \Delta S) A^c * h_i + (K_r * ET_0 - P - \Delta S) A^r * h_i \right] \quad (8)$$

Hay seis variables que definen la energía total requerida. Estos son dados en la tabla siguiente:

Tabla 11
Variables de la energía total requerida

Símbolo	Variable	Rango	Explicación
η_{irr}	Eficiencia de Irrigación	[0,9 - 0,95]	Considerando eventuales pérdidas de almacenamiento.
K_c	Coefficiente de Cultivo	[1,05 - 1,4]	Valores más bajos para algunos productos en condiciones normales, y más altos en condiciones climáticas extremas para Maíz (FAO).
A^c	Área de Cultivo	[1 - 3] Ha	Considerando el tamaño de las propiedades y la extensión laborable por cada familia.
K_r	Coefficiente de Reforestación.	[0,7 - 1,15]	Rango para árboles típicos de la región (FAO).
A^r	Área de Reforestación.	[1 - 2] Ha	Rango para unos compromisos iniciales de reforestación.
h_i	Áltura de la i -ésima casa.	$[h_i + 10] m$	El rango se debe a la necesidad de llevar el agua a un reservorio, y metros por encima del nivel de la casa, o en el peor de los casos, a la altura h_i de la casa.

Un modelo de decisión basado en tantas variables no es manejable. Dados unos valores fijos para las eficiencias y conocidas las alturas h_i de los reservorios, la información relevante para la gestión está dada por las áreas de cultivo A^c y reforestación A^r , y los coeficientes K_c de cultivo y K_r de reforestación. Es posible aún, ligar los coeficientes de cultivo y reforestación, y las áreas de cultivo y reforestación.

A.1.1. Relación entre K_c y K_r

El coeficiente K_c de cultivo depende, como se ha mostrado, de los requerimientos de las plantas y de las condiciones climáticas. El rango más probable para los cultivos es $1,05 = K_c = 1,4$. Por abajo, un gran número de cultivos requieren al menos un K_c de 1,05. Por arriba, el estudio ha seleccionado el requerimiento del maíz. Por otra parte, árboles para la forestación presentan valores $0,7 = K_r = 1,15$. Con estos rangos, es posible ligar los coeficientes K_c y K_r , por medio de una ecuación lineal:

$$K_r = 1,286K_c - 0,65 \quad (9)$$

A.1.2. Relación entre A^c y A^r

La disponibilidad de agua determina el área por cultivar. Es evidente que la prioridad es la producción de alimentos. Sin embargo, si se garantiza un área mínima para el cultivo de alimentos, el compromiso con la reforestación debería ser honrado. Las áreas han sido establecidas como 1-3 ha para cultivo y 1-2 ha para reforestación. Por lo tanto, el área total de irrigación varía entre 1 ha en el peor caso, y 5 has en el mejor. En el peor caso no hay opciones de reforestación. Entonces, la relación entre áreas es:

$$A^r = A^c - 1 \quad (10)$$

A.1.3. Alturas

De la ecuación 8 puede observarse que el único factor que pertenece a la sumatoria es la altura de cada casa. De los datos de alturas de las 35 casas se tiene entonces:

$$\sum_{i=1}^{35} h_i = H = 3043m \quad (11)$$

El rango de ubicación del reservorio sería $H+35y$, con y la diferencia de altura entre reservorio y casa.

A.1.4. Forma específica del modelo

Remplazando y, 11, 10 y 9 en 8, la ecuación resultante es:

$$E = \frac{\rho_{\text{water}} g E T_0}{\eta_{\text{mech}} \eta_{\text{Irr}}} (H + 35y) \left[K_c A^c + (A^c - 1) (1,286 K_c - 0,65) - (P - \Delta S) (2A^c - 1) \right] \quad (12)$$

Esta ecuación es función del área y del coeficiente de cultivo. Aplicando la ecuación a los valores de Carrizal, es posible conocer cuántas hectáreas podrían cultivarse y cuáles plantas podrían cosecharse. En las siguientes dos secciones se descomponen gráficamente estas opciones, comparándolas con la potencial producción de biogas.

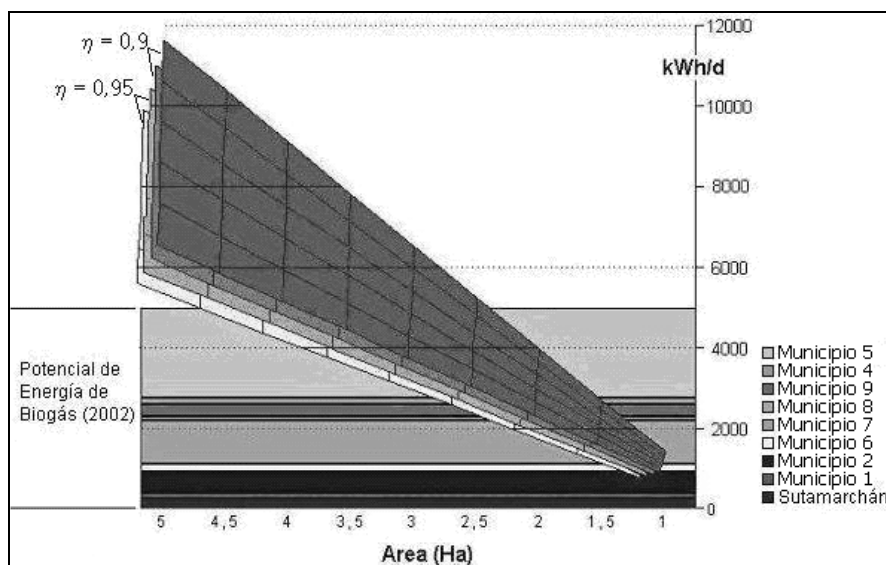
A.1.4. Opciones de Acuerdo con Kc

Véase figura 2. Allí se muestra que el potencial de energía de biogas haría posible el cultivo de 4,5 has de plantaciones con el más bajo coeficiente de cultivo, siempre que se garantice una alta eficiencia en la irrigación. Asimismo, podrían cultivarse 2,5 ha/casa, si hay una baja eficiencia de irrigación para cultivos con el más alto coeficiente de irrigación. La figura 2 también muestra que el potencial de biogas de la producción de basuras de Sutamarchán no cubre ninguno de los requerimientos, y que sería necesario obtener los desechos de otros municipios, como municipio 1, 2 y 6, para logros mínimos. Para irrigar entre 2 y 3 has con cultivos de coeficientes medios, sería necesario obtener las basuras de todos los municipios de los alrededores, excluyendo el municipio 5.

A.1.6. Opciones de acuerdo con el área

La siguiente disposición de la gráfica muestra la misma información, considerando el área de cultivo.

Figura 3
Necesidades de energía según el área de cultivo (ha) y producción potencial de biogas.



Fuente: autor

En la gráfica, las líneas diagonales representan los coeficientes de cultivo. Las líneas verticales en los planos superpuestos representan el área a ser cultivada. Con los desechos de ocho municipios el área máxima que podría cultivarse sería de 2,5 ha, siempre que se dé una alta eficiencia en la irrigación y los reservorios no estén por encima de las alturas de las casa (valores “y” nulos).

Apéndice 2

Cálculo de las emisiones de GEI a partir del potencial de biogas de Carrizal

La densidad de biogas es 1,2 g/litro (REHLING 2001-Slides). Considerando el biogas compuesto por CO_2 y metano, y despreciando el 1% del resto de componentes, la ecuación de densidad establece:

$$\rho_{biogas} = 1,2 \frac{gr}{lt} = \frac{m_{CH_4} + m_{CO_2}}{1lt} \tag{13}$$

La masa molecular del CH₄ es 12+4*1=16g/mol y la de CO₂ es 12+2*16 = 44 g/mol, la masa del CO₂ es:

$$m_{CO_2} = \frac{44}{16} m_{CH_4} = 2,75m_{CH_4} \tag{14}$$

Ya que la proporción entre CO₂ y CH₄ es 3:7, reemplazando (14) en (13) y resolviendo la masa del CH₄:

$$m_{CH_4} = \frac{1,2}{0,7 + 0,3 * 2,75} = 0,78688525gr$$

Es decir, hay 0,78688525 g por litro de biogas. De la tabla 10, reemplazando, la emisión de CH₄ es:

Tabla 11
Emisiones de metano del biogas de basuras producidas por Sutamarchán y municipios aledaños

Municipio	Producción de Basura.	Producción de Biogás	Metano	Metano	Equivalente en Carbono.	Reducción de Emisiones
	kg/semana	lt/día	gr/día	Ton/año	Ton/año	GEI
Sutamarchán	5365	44362	34907,8	12,74	267,57	254,83
Municipio 1	2083	15988	12580,5	4,59	96,43	91,84
Municipio 2	1480	84317	66348,1	24,22	508,56	484,34
Municipio 6	3983	28449	22386,3	8,17	171,59	163,42
Municipio 7	21432	168552	132630,9	48,41	1016,62	968,21
Municipio 8	2576	13595	10697,4	3,90	82,00	78,09
Municipio 9	1238	4132	3251,2	1,19	24,92	23,73
Municipio 3	808	46012	36206,3	13,22	277,52	264,31
Municipio 4	403	22983	18085,1	6,60	138,62	132,02
Municipio 5	38896	345009	271482,2	99,09	2080,91	1981,82
Totals	78264	773398	608575,7	222,13	4664,73	4442,60
Densidad del Biogás:		1,2 gr/lt	m(CH4): 16 gr.mol		Ton CO ₂ /año	
Contenido de Metano en Biogas:		70%	m(CO2): 44 gr.mol			

Fuente: autor.

El equivalente de emisiones de metano en emisiones de CO_2 se ha calculado considerando que el potencial de invernadero del metano es 21 veces mayor que del CO_2 . Por lo tanto, las reducciones de emisiones de GEI serían 20/21 veces las emisiones totales sin el proyecto. La reducción de emisiones de GEI, a partir de los resultados de la tabla 11 sería 4.442,60 *tons CO₂/año*. Para el período de 20 años, basado en un crecimiento de la población de 1% por año, la reducción total de emisiones sería:

$$P_{total} = \sum_{i=0}^{19} 4442,60(1 + 0,01)^i = 97821,627 \text{ TonnCO}_2$$