

**FLUJOS DE GASES DE EFECTO INVERNADERO, POTENCIAL DE
CALENTAMIENTO GLOBAL Y EVALUACIÓN DE EMERGÍA DEL SISTEMA
AGROFORESTAL QUESUNGUAL EN EL SUR DE LEMPIRA, HONDURAS**

ÓSCAR IVÁN FERREIRA CATRILEO

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE PALMIRA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ESCUELA DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRARIAS CON ÉNFASIS EN SUELOS
2008**



**FLUJOS DE GASES DE EFECTO INVERNADERO, POTENCIAL DE
CALENTAMIENTO GLOBAL Y EVALUACIÓN DE EMERGÍA DEL SISTEMA
AGROFORESTAL QUESUNGUAL EN EL SUR DE LEMPIRA, HONDURAS**

OSCAR IVÁN FERREIRA CATRILEO

**Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar al título de
Magíster en Ciencias Agrarias con Énfasis en Suelos**

Directores

MARÍA DEL PILAR HURTADO, M.Sc.

CARMEN ROSA BONILLA, M.Sc.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE PALMIRA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ESCUELA DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRARIAS CON ÉNFASIS EN SUELOS
2008**

Dedicado a:

📖 A Rayén, Óscar W. y Susana

AGRADECIMIENTOS

- Al Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), al Consorcio para Manejo Integrado de Suelos Frágiles de Centroamérica (MIS) y al Challenge Program on Water and Food (CPWF) del CGIAR.
- A la Universidad Nacional de Colombia y la Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- A María del Pilar Hurtado por su invaluable y constante apoyo durante todo el proceso.
- A Carmen Rosa Bonilla por sus recomendaciones y colaboración en la universidad.
- Al Dr. Marco Rondón, por darme la oportunidad de participar en este proyecto.
- Al Dr. Idupulapati Rao y Dr. Édgar Amézquita por su apoyo en el proyecto Suelos.
- Al Dr. Juan Carlos Menjívar en la Escuela de Posgrados.
- A Mariela Rivera por sus valiosos aportes a este estudio.
- Al Laboratorio de Isótopos Estables de CIAT por las facilidades brindadas.
- Al equipo de CIAT-Candelaria: Edwin García, Daniel Vásquez y Odvin Ayala, por su apoyo en el trabajo de campo.
- Al personal de CIAT: Neuza Asakawa, Josefa Salamanca, Arvey Álvarez, Jesús Galvis, Jaumer Ricaute, Julián Betancourt, Edilfonso Melo, Irlanda Corrales, Juan Guillermo Cobo y Hernán Mina, por su cooperación.
- Al Dr. Alfredo Caldas y Andrés Barona de la Unidad de Capacitación de CIAT.
- A mis estimados profesores de la Universidad: Marina Sánchez, Diosdado Baena, Édgar Madero, Horacio Rivera, Juan Carlos Menjívar, Carmen Rosa Bonilla, Harold Tafur, Óscar Chaparro, Jaime Eduardo Muñoz y Ricardo Malagón.
- A mis apreciados compañeros: Milton Ararat, Clever Becerra, Sidney Pérez, Carlos Chalarca, Marta Almanza, Claudia Ipaz, Edgar Hincapié, Román Stechauner, Jellin Pavón y Juan Carlos Montoya.
- A Marzory Andrade y Margarita Bonilla de la Universidad, por su colaboración.
- A los productores de Camapara, Gualmuraca, Portillo Flor, San Lorenzo, El Obrajito y Quesungual, que nos dieron acceso a sus fincas.

- Al proyecto Uso de la Tierra: a Alexander Cuero y Andy Jarvis.
- Al Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) y a Enrique Castillo.
- A CIAT-Tegucigalpa: Dr. Miguel Ayarza, Filander Rodríguez, Aracely Castro y Vilía Escobar, por las facilidades brindadas.
- Al Dr. Samuel Rivera por sus consejos.
- A la FAO-Lempira Sur, a Luis Álvarez Wélchez y Edgardo Valerio por su apoyo.
- A la Escuela Nacional de Ciencias Forestales y a DIFA.
- A Oscar W. Ferreira, Rayén Catrileo y Susana Ferreira.

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 Gases de Efecto Invernadero.....	3
2.1.1 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Agricultura.....	4
2.2 Potencial de Calentamiento Global.....	7
2.3 Evaluación de Emergía.....	8
2.3.1 Sostenibilidad.....	8
2.3.2 Emergía.....	8
2.4 Sistema Agroforestal Quesungual.....	10
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
3.1 Localización del Estudio.....	11
3.2 Protocolo de Muestreo de Gases de Efecto Invernadero.....	12
3.3 Muestreo de Gases de Efecto Invernadero.....	16
3.4 Potencial de Calentamiento Global.....	17
3.5 Evaluación de Emergía.....	17
3.6 Análisis estadístico.....	19
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
4.1 Gases de Efecto Invernadero.....	20
4.1.1 Flujos de Gases de Efecto Invernadero.....	20
4.1.1.1 Flujos de Metano.....	20
4.1.1.2 Flujos de Dióxido de Carbono.....	25
4.1.1.3 Flujos de Óxido Nitroso.....	26
4.1.1.4 Análisis Estadístico de Flujos de Gases de Efecto Invernadero.....	33
4.1.2 Flujos Acumulados de Gases de Efecto Invernadero.....	39
4.1.2.1 Flujos Acumulados de Metano.....	39
4.1.2.2 Flujos Acumulados de Dióxido de Carbono.....	41

4.1.2.3 Flujos Acumulados de Óxido Nitroso.....	41
4.1.2.4 Análisis Estadístico de Flujos Acumulados de Efecto Invernadero.....	42
4.2 Potencial de Calentamiento Global.....	43
4.2.1 Potencial de Calentamiento Global de TQ, SAQ y BS.....	43
4.2.2 Almacenamiento de Carbono.....	44
4.2.3 Extrapolación del Potencial de Calentamiento Global al Sur de Lempira, Honduras.....	47
4.2.3.1 Balance de los Gases de Efecto Invernadero.....	48
4.2.3.2 Proyecciones.....	49
4.3 Evaluación de Emergía.....	52
4.3.1 Diagramas.....	52
4.3.2 Índices de Emergía.....	59
5. CONCLUSIONES.....	61
6. RECOMENDACIONES.....	62
7. BIBLIOGRAFÍA.....	63
ANEXOS.....	69

FIGURAS

	Página
Figura 1. Esquema simplificado del efecto invernadero natural en superficie terrestre.....	3
Figura 2. Ciclo del óxido nitroso en agricultura y modelo de nitrificación y denitrificación.....	5
Figura 3. Ciclos del metano y óxido nitroso en agricultura.....	5
Figura 4. Principales fuentes de emisiones de CH ₄ , CO ₂ y N ₂ O, provenientes de la agricultura.....	6
Figura 5. Cronograma de actividades en cultivos de maíz y frijol en SAQ, en sur de Lempira Honduras.....	10
Figura 6. Localización del estudio de GEI, PCG y emergía en Lempira, Honduras.....	11
Figura 7. Componentes de cámara en técnica de la cámara cerrada y frascos de vidrio utilizados en muestreo.....	13
Figura 8. Diagrama de cromatógrafo de gases utilizado para determinar concentraciones de CH ₄ y N ₂ O.....	15
Figura 9. Distribución de cámaras en parcelas de estudio de GEI, PCG y emergía en Lempira, Honduras.....	16
Figura 10. Diagrama total de un sistema: mostrando el uso de recursos renovables, no renovables y comprados.....	18
Figura 11. Arreglo experimental del estudio de GEI, PCG y emergía en Lempira, Honduras.....	19
Figura 12. Flujos de CH ₄ , CO ₂ y N ₂ O, de julio 2005 a junio 2006, en cinco tratamientos en estudio de GEI en Lempira, Honduras.....	21
Figura 13. Flujos de CH ₄ , CO ₂ y N ₂ O, de julio 2005 a junio 2006, en tres tratamientos en estudio de GEI en Lempira, Honduras.....	22

Figura 14.	Valores diarios de temperatura y precipitación, de julio 2005 a junio 2006, en Lempira, Honduras.....	23
Figura 15.	WFPS en cinco tratamientos, de julio 2005 a junio 2006, en estudio de GEI en Lempira, Honduras.....	23
Figura 16.	VARIABLES del suelo seleccionadas, por profundidad, en estudio de GEI en Lempira, Honduras (a-h).....	30
Figura 17.	VARIABLES del suelo seleccionadas, por profundidad, en estudio de GEI en Lempira, Honduras (i-o).....	32
Figura 18.	Representación en plano principal de variables del suelo en estudio de GEI en Lempira, Honduras.....	34
Figura 19.	Relación de CH ₄ y variables del suelo seleccionadas en estudio de GEI en Lempira, Honduras.....	36
Figura 20.	Relación de N ₂ O y variables del suelo seleccionadas en estudio de GEI en Lempira, Honduras.....	36
Figura 21.	Relación de CO ₂ y variables del suelo seleccionadas en estudio de GEI en Lempira, Honduras.....	37
Figura 22.	Representación de individuos en primer plano principal en estudio de GEI en Lempira, Honduras.....	38
Figura 23.	Flujos acumulados anuales de CH ₄ , CO ₂ y N ₂ O en cinco tratamientos y dos niveles de fertilización en estudio de GEI en Lempira, Honduras.....	40
Figura 24.	PCG de TQ, SAQ y BS, para un horizonte de 20 años en estudio de PCG en Lempira, Honduras.....	44
Figura 25.	Stock de C en suelo por profundidad y uso de la tierra en estudio de PCG en Lempira, Honduras.....	45
Figura 26.	Almacenamiento de C en suelo y biomasa arbórea en estudio de PCG en Lempira, Honduras.....	45
Figura 27.	Tasa anual de pérdida de C en suelo y biomasa arbórea en estudio de PCG en Lempira, Honduras.....	46

Figura 28.	Mapa de uso de la tierra del área a extrapolar en estudio de PCG en sur de Lempira, Honduras.....	47
Figura 29.	Uso de la tierra en % en sur de Lempira, Honduras para año 2006.....	48
Figura 30.	Tendencia en el tiempo del uso de la tierra en sur de Lempira, Honduras. Proyección a 2026.....	49
Figura 31.	PCG para diferentes usos de la tierra y dos horizontes de tiempo en sur de Lempira, Honduras.....	50
Figura 32.	PCG integrado actual y proyectado a 20 años para sur de Lempira, Honduras.....	51
Figura 33.	Diagrama de TQ en estudio de emergía en Lempira, Honduras.....	52
Figura 34.	Diagrama de SAQ en estudio de emergía en Lempira, Honduras.....	53
Figura 35.	Diagrama de BS en estudio de emergía en Lempira, Honduras.....	53
Figura 36.	Diagrama de emergía por entrada por año en estudio de emergía en Lempira, Honduras.....	57
Figura 37.	Diagrama total de TQ en estudio de emergía en Lempira, Honduras.....	57
Figura 38.	Diagrama total de SAQ en estudio de emergía en Lempira, Honduras.....	58
Figura 39.	Diagrama total de BS en estudio de emergía en Lempira, Honduras.....	58
Figura 40.	Índices de emergía para tres sistemas en estudio de emergía en Lempira, Honduras.....	60
Figura 42.	Ilustración de Huella Ecológica en tres sistemas en estudio de emergía en Lempira, Honduras.....	60

TABLAS

	Página
Tabla 1. Concentraciones, permanencia y PCG de gases de efecto invernadero más importantes.....	4
Tabla 2. Valores de PCG para diferentes horizontes de tiempo	7
Tabla 3. Índices de evaluación de emergía y descripción.....	9
Tabla 4. Parcelas del estudio de GEI, PCG y emergía en Lempira, Honduras.....	12
Tabla 5. Valores eigen y componentes principales de variables del suelos seleccionadas en estudio de GEI en Lempira, Honduras.....	33
Tabla 6. Correlación y probabilidad de flujos de GEI con variables del suelo seleccionadas, en estudio de GEI en Lempira, Honduras.....	35
Tabla 7. Contrastes ortogonales de flujos acumulados de CH ₄ , CO ₂ y N ₂ O en estudio de GEI en Lempira, Honduras.....	42
Tabla 8. PCG anual por fuente de emisión de TQ, SAQ y BS para un horizonte de 20 años, en estudio de PCG en Lempira, Honduras.....	43
Tabla 9. Contribución de usos de tierra al balance de CH ₄ y N ₂ O del suelo en estudio de PCG en sur de Lempira, Honduras.....	48
Tabla 10. Flujos anuales de CH ₄ y N ₂ O por factor contribuyente en estudio de PCG en sur de Lempira, Honduras.....	49
Tabla 11. PCG integrado para sur de Lempira, Honduras con uso de la tierra actual y el proyectado a 20 años.....	50

Tabla 12. Evaluación de Emergía de TQ en Lempira, Honduras. Datos para el 2006.....	54
Tabla 13. Evaluación de Emergía de SAQ en Lempira, Honduras. Datos para el 2006.....	55
Tabla 14. Evaluación de Emergía de BS en Lempira, Honduras. Datos para el 2006.....	56
Tabla 15. Índices de Emergía para tres tratamientos del estudio de emergía en Lempira, Honduras.....	59

ANEXOS

	Página
Anexo A. Correlación y probabilidad de los flujos de GEI con variables físicas y químicas del suelo en estudio de GEI en Lempira, Honduras.....	69
Anexo B. Cálculos y referencias de Emergía para TQ en estudio de emergía en Lempira, Honduras.....	70
Anexo C. Cálculos y referencias de Emergía para SAQ en estudio de emergía en Lempira, Honduras.....	72
Anexo D. Cálculos y referencias de Emergía para BS en estudio de emergía en Lempira, Honduras.....	74
Anexo E. Fotografías del estudio de GEI, PCG y emergía en Lempira, Honduras.....	76
Anexo F. Análisis de Varianza de flujos acumulados en estudio de GEI en sur de Lempira, Honduras.....	78
Anexo G. Cronograma de actividades en cultivos de maíz y frijol en SAQ, en sur de Lempira, Honduras.....	79
Anexo H. Simbología propuesta por Odum, 1971 y utilizada en elaboración de diagramas de sistemas.....	80
Anexo I. Flujos acumulados de CH ₄ , CO ₂ y N ₂ O por tratamiento y fertilización en estudio de GEI en Lempira, Honduras.....	81

FLUJOS DE GASES DE EFECTO INVERNADERO, POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL Y EVALUACIÓN DE EMERGÍA DEL SISTEMA AGROFORESTAL QUESUNGUAL EN EL SUR DE LEMPIRA, HONDURAS

RESUMEN

El Sistema Agroforestal Quesungual (SAQ) es un sistema conservacionista que se practica en el sur de Lempira, Honduras. Se considera como una alternativa viable frente al sistema tradicional de tala y quema, pero se desconocen sus beneficios ambientales como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la utilización de recursos renovables y sostenibles.

Se determinaron los flujos de los gases de efecto invernadero: óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), se calculó el potencial de calentamiento global (PCG) y se realizó una evaluación de emergía del SAQ, sistema tradicional de Tala y Quema (TQ) y el Bosque Secundario (BS). Se utilizaron cinco tratamientos (TQ, SAQ >2 años, SAQ 5-7 años, SAQ >10 años y BS) y tres repeticiones y se establecieron quince parcelas de 200 m².

Para el muestreo de gases de efecto invernadero, se utilizó la técnica de la cámara cerrada, con 16 fechas de muestreo, de julio 2005 a julio 2006. Las concentraciones de N_2O y CH_4 se determinaron con un cromatógrafo de gases Shimadzu GC-14A con detector ECD y FID. Para CO_2 , se utilizó un analizador Qubit System S151. Para determinar el PCG, se utilizaron los flujos de CH_4 y N_2O y el almacenamiento de C en el suelo (SOC) y en la biomasa arbórea. Los valores de PCG se extrapolaron a la región del sur de Lempira y se proyectaron en el tiempo de acuerdo al cambio en el uso de la tierra. Se realizó una evaluación de emergía para cuantificar el uso de los recursos y la sostenibilidad de los sistemas. Se utilizaron datos de las parcelas y transformicidades reportadas en otros estudios. Se elaboraron diagramas y se calcularon diferentes índices.

Los flujos de gases de efecto invernadero presentaron un comportamiento estacional, con las mayores emisiones durante la época lluviosa, de mayo a octubre. El SAQ y el BS fueron sumideros netos de CH₄, con -102.48 mg CH₄ m⁻² año⁻¹ y -36.08 mg CH₄ m⁻² año⁻¹, respectivamente. La única fuente neta de CH₄ fue TQ, con 149.68 mg CH₄ m⁻² año⁻¹. Todos los tratamientos fueron sumideros de óxido nitroso y dióxido de carbono, relacionados con procesos naturales y de manejo. Las variables del suelo que más explican el comportamiento de los flujos de CH₄, son el pH y la susceptibilidad a la compactación. En el caso de N₂O, densidad aparente, la porosidad total y la permeabilidad del aire.

El SAQ presentó un PCG mucho más bajo (10532 kg Equiv. de CO₂) que el sistema tradicional de TQ (40941 kg Equiv. de CO₂). El BS tuvo un valor muy bajo de PCG (1136 kg Equiv. de CO₂), indicando un sistema poco disturbado. De acuerdo las tendencias en el uso de la tierra, al realizar una proyección del PCG a la región del sur de Lempira y a un horizonte de 20 años, se estima una disminución de 0.10 Tg Equiv. de CO₂. Los mayores niveles de almacenamiento de carbono en el suelo y en biomasa, se presentaron en SAQ y BS, destacándose la progresiva acumulación de carbono al aumentar la edad del SAQ.

Las mayores diferencias de emergía entre sistemas, se observaron en la variable de suelo erosionado, con los valores más altos en el sistema de TQ. El BS y SAQ tuvieron menor impacto ambiental que TQ, como se observa en la Razón de Carga Ambiental, con 0.63, 0.14 y 0.02, respectivamente. TQ presenta el valor más alto del Índice de Huella Ecológica, seguido por SAQ y BS, relacionado con el uso de recursos locales. El Índice de Sostenibilidad de Emergía de TQ fue 34.8, SAQ 135.6 y BS 4123.8, indicando mayores valores de sostenibilidad en SAQ y BS, los cuales favorecen el uso de recursos renovables y locales.

Palabras claves: cambio climático, sistemas agroforestales, metano, óxido nitroso, dióxido de carbono, sostenibilidad

GREENHOUSE GASES FLUXES, GLOBAL WARMING POTENTIAL AND EMERGY EVALUATION OF QUESUNGUAL AGROFORESTRY SYSTEM IN SOUTHERN LEMPIRA, HONDURAS

ABSTRACT

Quesungual Slash-and-Mulch Agroforestry System (QSMAS) is a conservationist system practiced in southern Lempira, Honduras. It is considered a viable alternative compared to Slash-and-Burn traditional system, but there is not information about their environmental benefits such as reducing greenhouse gases emissions and renewable and sustainable resources use.

Greenhouse gases fluxes: nitrous oxide (N_2O), methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2) were determined, global warming potential (GWP) was calculated and an emergy evaluation was conducted in QSMAS, Slash-and-Burn traditional system (SB) and in Secondary Forest (SF). It was used five treatments (SB, QSMAS >2 years, QSMAS 5-7, QSMAS >10 and SF) and three replicates, establishing 15 plots of 200 m².

For greenhouse gases sampling, closed chamber technique was used, with 16 sampling dates, from July 2005 to July 2006. N_2O and CH_4 concentrations were determined with a Shimadzu GC-14A gas chromatograph with ECD and FID detector. For CO_2 , was used a Qubit System S151 analyzer. To determine GWP, were used CH_4 and N_2O fluxes and C stocks in soil (SOC) and in biomass trees. GWP values were extrapolated to the region of southern Lempira and were projected in time considering land use change. An emergy evaluation was conducted to quantify resources use and systems sustainability. It was used data from plots and transformities reported in other studies. We elaborated diagrams and calculated different emergy indices.

Greenhouse gases fluxes showed a seasonal behavior, with higher emissions during rainy season, from May to October. QSMAS and SF were CH₄ net sinks, with -102.48 mg CH₄ m⁻² year⁻¹ and -36.08 mg CH₄ m⁻² year⁻¹, respectively. The only CH₄ net source was SB, with 149.68 mg CH₄ m⁻² year⁻¹. All treatments were nitrous oxide and carbon dioxide sinks, related with natural processes and from management. Soil variables explaining CH₄ fluxes behavior are pH and susceptibility to compaction. In the case of N₂O, bulk density, total porosity and air permeability.

QSMAS presented a much lower GWP value (10532 kg Equiv. CO₂) than SB traditional system (40941 kg Equiv. CO₂). SF had a very low GWP value (1136 kg Equiv. CO₂), indicating a system which has not been disturbed. According to land use trends, when projecting GWP to southern Lempira region and using a 20 years time horizon, it is estimated a decrease of 0.10 Tg Equiv. CO₂. Higher levels of carbon stock in soil and tree biomass were presented in QSMAS and SF, highlighting carbon gradual accumulation in older QSMAS.

Major differences in energy between systems, were observed in eroded soil variable, with higher values in SB system. SF and QSMAS had less environmental impact than SB, as noted in Environmental Loading Ratio with 0.63, 0.14 and 0.02, respectively. SB presents higher value of Ecological Footprint Index, followed by QSMAS and SF, associated with local resources use. Energy Sustainability Index of TQ was 34.8, QSMAS 135.6 and SF 4123.8, indicating higher values of sustainability in QSMAS and BS, which favor the use of renewable and local resources.

Keywords: climate change, agroforestry systems, methane, nitrous oxide, carbon dioxide, sustainability

1. INTRODUCCIÓN

Desde la época industrial, las concentraciones en la atmósfera de los gases de efecto invernadero: dióxido de carbono, metano y óxido nitroso, han aumentado significativamente, de 278 a 358 ppm, 0.70 a 1.72 ppm y de 0.27 a 0.31 ppm, respectivamente, atribuido en gran parte a actividades humanas como la utilización de combustibles fósiles, cambio de uso de la tierra y la agricultura. Este incremento en la concentración de gases de efecto invernadero provoca un aumento de la temperatura sobre la Tierra y cambios en los patrones de lluvia y sequía (UNFCCC, 2002; IPCC, 2007).

El suelo cumple una función muy importante en la regulación de la composición gaseosa de la atmósfera (Lal *et al.*, 1994) y algunas prácticas agrícolas como la labranza, quema y la fertilización química influyen en la emisión del suelo hacia la atmósfera de los gases de efecto invernadero. Se ha sugerido que los sistemas agroforestales disminuyen la emisión neta de gases de efecto invernadero y poseen potencial para contrarrestar las emisiones asociadas a la deforestación y al cambio de uso hacia la agricultura (Dixon, 2004). Sin embargo, los datos de los flujos de gases de efecto invernadero entre el suelo y la atmósfera en los sistemas agroforestales tropicales son escasos (Rondón *et al.*, 2001).

El Sistema Agroforestal Quesungual (SAQ) es un conjunto de principios y tecnologías de manejo del suelo, cultivos y las diferentes coberturas e tiene como principios, la no quema, uso de diferentes coberturas (mulch, cultivos, cobertura arbórea), cero labranza y el manejo de la regeneración natural. El SAQ ha sido adoptado por 6000 agricultores en 7000 hectáreas en el sur de Lempira, Honduras, permitiendo reducir la vulnerabilidad alimentaria de las familias al incrementar los rendimientos de los cultivos en más del 100%, en comparación con el sistema tradicional de TQ (FAO, 2005, Wélchez *et al.*, 2006).

El objetivo general de este estudio fue determinar los flujos de gases de efecto invernadero, el potencial de calentamiento global y realizar una evaluación de emergía del Sistema Agroforestal Quesungual (SAQ), agricultura tradicional de TQ y BS del sur de Lempira, Honduras.

Los objetivos específicos fueron: (a) comparar los flujos y acumulados de gases de efecto invernadero en el SAQ, agricultura tradicional de TQ y BS y determinar las variables del suelo relacionadas con los flujos; (b) cuantificar el potencial de calentamiento global de los usos de la tierra: SAQ, agricultura tradicional de TQ y del BS y extrapolar los valores de PCG a la región del sur de Lempira, Honduras y (c) realizar una evaluación de emergía e índices para SAQ, agricultura tradicional de TQ y BS.

El presente estudio hizo parte del proyecto *“PN15: Quesungual Slash and Mulch Agroforestry System (QSMAS): Improving crop water productivity, food security and resource quality in the sub-humid tropics”* parcialmente financiado por el *Challenge Program on Water and Food of CGIAR (CPWF)* y co-ejecutado por el Consorcio para el Manejo Integrado de Suelos Frágiles de Centroamérica (MIS) y el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 GASES DE EFECTO INVERNADERO

Se denomina efecto invernadero a la absorción en la atmósfera de las radiaciones infrarrojas emitidas por la superficie terrestre, impidiendo que escapen al espacio exterior y aumentando la temperatura media del planeta, produciendo a escala planetaria un efecto similar al observado en un invernadero. Los gases de efecto invernadero (GEI), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), tienen la habilidad de atrapar parte de la energía infrarroja (Figura 1). Aunque representan menos del 1% de la atmósfera, son suficiente para producir un efecto de invernadero natural que mantiene el planeta unos 30 °C más caliente que en su ausencia y que es esencial para la vida. Los niveles de los gases de efecto invernadero están determinados por un equilibrio entre fuentes y sumideros. Sin embargo, los seres humanos y su tecnología están afectando estos niveles, al introducir nuevas fuentes o interferir con los sumideros naturales. Los registros de temperatura muestran un incremento de 0.6 °C en los valores promedios globales anuales desde el comienzo de la Revolución Industrial y se espera un incremento adicional de 1 a 3.5 °C durante los próximos 100 años (UNFCCC, 2004).

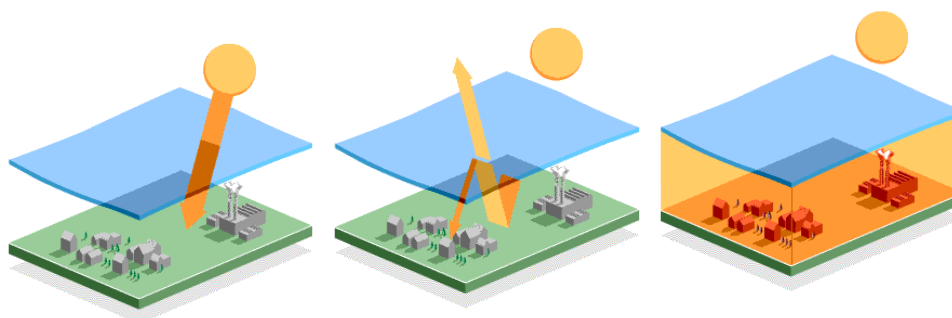


Figura 1. Esquema simplificado del efecto invernadero natural en la superficie terrestre (BBC, 2008)

El óxido nitroso, el metano y el dióxido de carbono, son los gases de efecto invernadero más importantes relacionados a la agricultura y al cambio de uso de la tierra. El metano y el óxido nitroso tienen un potencial de calentamiento global (PCG) más alto que el dióxido de carbono, con 25 y 298 veces más potencia radiativa que el dióxido de carbono, en un horizonte de tiempo de 100 años, respectivamente (Tabla 1) (IPCC, 2001).

Tabla 1. Concentraciones, permanencia y PCG de gases de efecto invernadero más importantes (IPCC, 2007)

Gas	Concentración pre-Industrial (ppm)	Concentración en 1994 (ppm)	Permanencia en atmósfera (años)	PCG ¹
Dióxido de carbono	278	358	Variable	1
Metano	0.70	1.72	12	25
Óxido nitroso	0.27	0.31	114	298

¹Para un Horizonte de tiempo de 100 años

2.1.1 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Agricultura

La agricultura se ha asociado con la reducción de los sumideros de metano en el suelo y con un aumento en las emisiones de óxido nitroso hacia la atmósfera (Powlson *et al.*, 1997, Freney, 1997) (Figuras 2 y 3). Tanto la labranza como la fertilización contribuyen a una aceleración en la dinámica del nitrógeno. La intensificación de la agricultura provoca el uso de dosis altas de fertilizantes nitrogenados, estimulando la emisión de N₂O y un efecto inhibitorio en el almacenamiento (oxidación) de CH₄ (Bronson, 1994). El tipo de fertilizante, los tiempos y el método de aplicación puede afectar considerablemente los flujos entre el suelo y la atmósfera de estos gases (Mosier *et al.*, 1998). Algunos estudios indican que hay mayor emisión de N₂O al utilizarse fertilizantes orgánicos (Freney, 1997). Además, a mayor cantidad de nitrógeno que circula en el suelo, mayor cantidad de N₂O es liberado hacia la atmósfera por procesos de nitrificación y denitrificación (Figura 2).

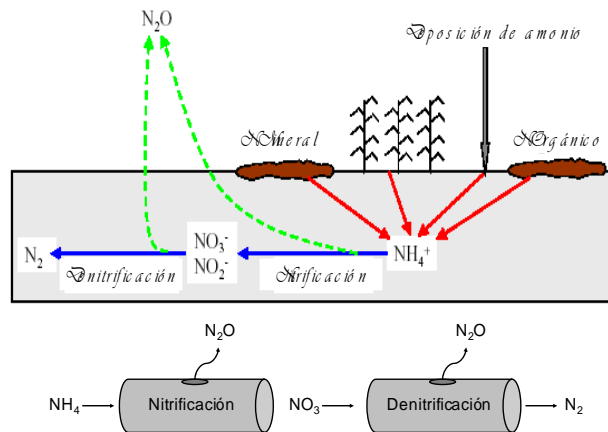


Figura 2. Ciclo del óxido nítrico en la agricultura y modelo de nitrificación y desnitrificación (Modificado de Mosquera *et al.*, 2007; FAO, 2001)

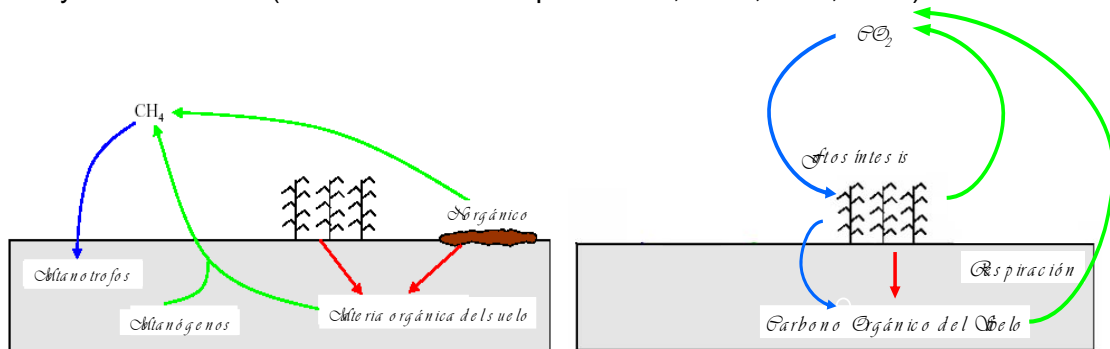


Figura 3. Ciclos del metano y dióxido de carbono en la agricultura (Modificado de Mosquera *et al.*, 2007)

Las principales fuentes y sumideros de los gases de efecto invernadero, relacionadas con las actividades agrícolas se presentan en la Figura 4. La mayoría de los suelos en condiciones naturales se comportan como sumideros de metano y como fuentes de óxido nítrico (Mosier *et al.*, 1995). La textura del suelo es un importante factor relacionado a los flujos de metano, siendo las texturas más gruesas las que tienen mayores tasas de captación de metano, en relación a los suelos con texturas más finas (Boeckx *et al.*, 1997) y el contenido de agua en el suelo es uno de los factores más importantes en la variabilidad de los flujos de gases de efecto invernadero (Conrad, 1995, Pol *et al.*, 1998).

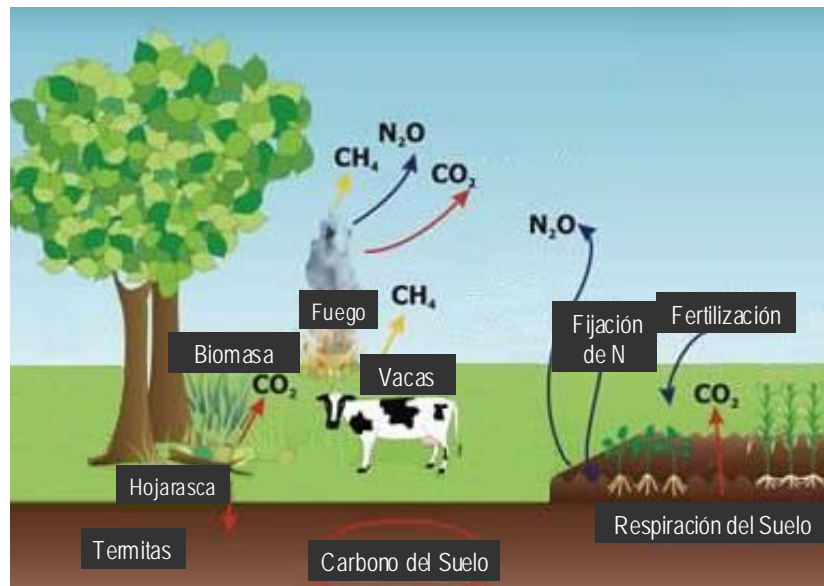


Figura 4. Principales fuentes de las emisiones de CH₄, CO₂ y N₂O, provenientes de la agricultura (Modificado de IPCC, 2006)

Los suelos agrícolas son una fuente de dióxido de carbono, pero podrían transformarse en sumideros. Algunas de las estrategias incluyen el uso de residuos de cultivos y un nivel mínimo de labranza. En los trópicos se puede incrementar el carbono del suelo, devolviendo los residuos de cultivos al suelo, introduciendo cultivos permanentes y reduciendo los períodos donde el suelo se deja sin cobertura (UNFCCC, 2004). Por otra parte, las quemas liberan grandes cantidades de N₂O, CH₄ y CO₂ hacia la atmósfera y también cambian los parámetros químicos, biológicos y físicos del suelo, perturbando los intercambios de gases entre el suelo y la atmósfera (Poth *et al.*, 1995). Se estima que la emisión directa durante las quemas es la fuente más importante de metano hacia la atmósfera (Delmas, 1997).

La disminución en las tasas de difusión de los gases por los cambios en los parámetros físicos del suelo, están relacionadas a la degradación del suelo. La compactación del suelo provoca una reducción de la macroporosidad, porosidad total y de la superficie para el movimiento del gas y agua, lo cual también reduce la tasa de intercambio de gases (Jensen *et al.*, 1996).

La compactación del suelo tiene un importante efecto en la reducción de las tasas de almacenamiento de metano y pueden convertir un suelo, de sumidero a fuente de metano hacia la atmósfera (Rondón, 2000). La conversión de ecosistemas naturales hacia agricultura, resulta en la reducción de las tasas de almacenamiento de metano y en el incremento de las emisiones de óxido nitroso del suelo, ya que los cultivos requieren la adición de fertilizantes (Mosier *et al.*, 1991). Los bosques tropicales son importantes sumideros de metano (Keller y Reiners, 1994).

2.2 POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL

El PCG, expresado en kg de equivalentes de CO₂, se utiliza como un valor que integra los flujos de gases de efecto invernadero, proporcionando la contribución al calentamiento global de diferentes usos de la tierra, lo que permite definir el impacto que los gases de efecto invernadero de determinados sistemas y usos de la tierra tendrán en el calentamiento global en diferentes horizontes de tiempo, usualmente 20 y 100 años (Tabla 2) (Rondón, 2000; IPCC, 2007).

Tabla 2. Valores de PCG para diferentes horizontes de tiempo (IPCC, 2007)

Gas	PCG		
	Horizonte de tiempo		
	20 años	100 años	500 años
Dióxido de carbono	1	1	1
Metano	72	25	8
Oxido Nitroso	289	298	153

Para la mayoría de los gases de efecto invernadero, el PCG disminuye cuando el horizonte en el tiempo se incrementa. Esto se debe a que el gas de efecto invernadero es removido gradualmente de la atmósfera a través de mecanismos naturales, y así su influencia sobre el efecto invernadero disminuye. Por convención, el PCG del dióxido de carbono, medido a través de todos los horizontes de tiempo, es 1 y el PCG de los otros gases de efecto invernadero se mide en relación al PCG de CO₂ (IPCC, 2007).

2.3 EVALUACIÓN DE EMERGÍA

2.3.1 Sostenibilidad

Ante el enorme reto de alimentar a una población cada vez mayor, con recursos energéticos que disminuyen y recursos ambientales finitos, es muy importante evaluar la sostenibilidad de los sistemas, de modo que sea posible maximizar los rendimientos, considerando los recursos disponibles (Diemont *et al.*, 2006). En la Declaración de Río, 1992, se utilizó la definición de sostenibilidad como: *“Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades”* (UN, 1992). La sostenibilidad es un parámetro difícil de medir, es multidisciplinaria y está relacionada con la Ecología, Economía y Termodinámica, utilizándose herramientas para medir la sostenibilidad como la Huella Ecológica, Producto Neto Nacional “Verde” y la Emergía, respectivamente (Hlidkvist, 2005).

2.3.2 Emergía

La emergía es una herramienta utilizada para evaluar el uso de los recursos y la sostenibilidad de los sistemas de producción. La evaluación de emergía cuantifica los recursos naturales y económicos, sobre una base común, los julios de emergía solar (sej), y así las contribuciones naturales y económicas requeridas para producir los rendimientos agrícolas, se pueden cuantificar y comparar. La emergía expresa la energía disponible de una clase previamente consumida, al elaborar un producto o servicio y se utiliza para elaborar índices de sostenibilidad y del uso de los recursos naturales y económicos. La emergía solar se utiliza para determinar los valores del trabajo ambiental y humano en un sistema, considerando a la energía solar como la máxima fuente de energía (Odum, 1995; Odum, 1996; Diemont *et al.*, 2006).

En la Tabla 3, se presentan los principales índices utilizados en la evaluación de emergía, su descripción y significado.

Tabla 3. Índices de evaluación de emergencia y su descripción (Modificado de Haden, 2002; Lomas et al., 2005; Diemont et al., 2006)

No.	Índice	Fórmula	Unidad	Descripción	Significado
1	Flujo de Emergía Renovable	R	sej/año	Emergía procedente de fuentes naturales de carácter renovable	Entrada de emergencia renovable al sistema
2	Flujo de Emergía No Renovable	N	sej/año	Entrada de emergencia no renovable al sistema desde fuentes internas al mismo	Parte de las reservas del sistema que son utilizadas
3	Flujo de Emergía Comprado (Importado)	F+G+S	sej/año	Entrada de emergencia desde fuentes externas	Importaciones al sistema desde el sistema económico
4	Densidad de Potencia de Emergía	Y/superficie	sej/m ² /año	Flujo de emergencia por unidad de tiempo y superficie	Indicador de la concentración espacial del flujo emergético de un proceso o sistema
5	Radio de Producción de Emergía (RPE o EYR)	Y/(N+F+G+S)		Fracción exportada de la emergencia externa al funcionamiento del sistema	Mide la contribución de un sistema más allá de su propio funcionamiento
6	Radio de Inversión en Emergía (RIE o EIR)	(F+G+S)/(R+N)		Relación de fuentes externas al sistema y fuentes internas al mismo	Muestra si un sistema utiliza de forma más económica las entradas del sistema económico
7	Radio de Carga Ambiental (RCA o ELR)	(N+F+G+S)/R		Relación de emergencia no renovable con la renovable	Pretende ser un índice de estrés ambiental
8	Índice de Emergía Renovable Capturada	R/(F+G+S)		Relación entre la emergencia importada por el sistema económico y las fuentes renovables	Índice de efectividad del sistema socioeconómico en la captación de los flujos naturales
9	Fracción Renovable	R/(R+N+F+G+S)		Cantidad de emergencia renovable en el sistema	Fracción renovable de la emergencia empleada
10	Índice Monetario de Emergía (IME o EMR)	Y/PNB	sej/\$	Relación de la emergencia con las unidades monetarias. Análisis de relaciones comerciales	Riqueza que viene de forma directa o indirecta de recursos ambientales
11	Índice de Huella Ecológica (IHE o EFR)	Y/R		Relación de la emergencia total de un sistema y la emergencia total renovable	Tamaño de un sistema recibiendo emergencia renovable, para cumplir con requerimientos locales de emergencia
12	Índice de Sostenibilidad de Emergía (ISE o ESI)	IPE/ICA		Relación de la producción de emergencia con la emergencia captada de procesos naturales	Sostenibilidad de un proceso o sistema

2.4 SISTEMA AGROFORESTAL QUESUNGUAL

El Sistema Agroforestal Quesungual (SAQ) (“Quesungual” significa *Río de los pájaros de pluma rica*, en lengua lenca) combina el conocimiento indígena y técnico y tiene su origen en 1992, cuando técnicos de la FAO observaron “lunares verdes” en medio del paisaje devastado por las quemas. El sistema fue nombrado ‘Quesungual’ por L. A. Wélchez, por el lugar donde fue documentado por primera vez. El SAQ ha permitido reducir la vulnerabilidad alimentaria de las familias y mejorar las condiciones de los recursos naturales (Hellin *et al.*, 1999; FAO, 2004) (Anexo E).

Los principios básicos de manejo del SAQ son: (i) la no quema, (ii) uso de diferentes coberturas (mulch, cultivos y árboles), (iii) mínimo disturbio del suelo (siembra directa) y (iv) la fertilización puntual (FAO, 2005, Wélchez *et al.*, 2006). Los cultivos que se emplean en el SAQ son el maíz (*Zea mays* L.), el maicillo (*Sorghum bicolor* L.) y el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Algunos de los árboles maderables de alto valor utilizados, son el laurel (*Cordia alliodora* Ruiz & Pav.) y el guachipilín (*Diphysa robinoides* Benth.). Se utilizan algunos árboles frutales, como el nance (*Byrsonima crassifolia* L.) y la guayaba (*Psidium guajava* L.) (Hellin *et al.*, 1999) (Figura 5 y Anexo G).



Figura 5. Finca con el Sistema Agroforestal Quesungual en sur de Lempira, Honduras

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIZACIÓN DEL ESTUDIO

El estudio para determinar los flujos de gases de efecto invernadero, el potencial de calentamiento global y la evaluación de emergía, en el sur de Lempira, Honduras, se llevó a cabo en 8 fincas (14° 05' N, 88° 30' W) (Tabla 3), ubicadas en las comunidades de Camapara, El Obrajito, San Lorenzo, Portillo Flor, Gualmuraca y Quesungual, en los municipios de Candelaria y Gualcince, en el sur del departamento de Lempira, Honduras (Figura 6).

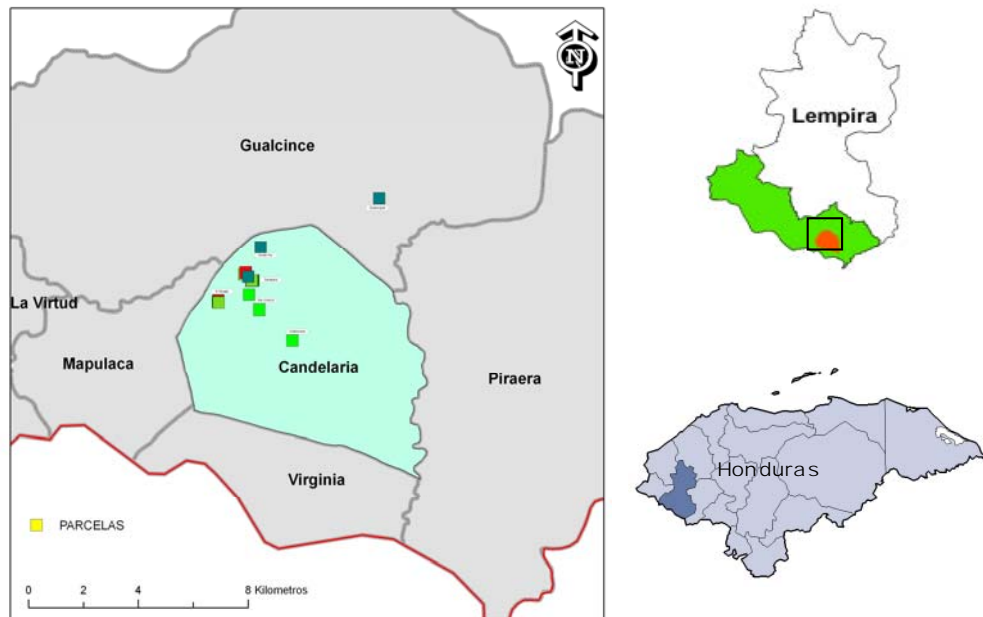


Figura 6. Localización del estudio de GEI, PCG y emergía en sur de Lempira, Honduras

Algunas de las características del área de este estudio son: ecosistema de bosque seco tropical, temperatura promedio 25 °C, época lluviosa de mayo a octubre con precipitación anual de 1400 mm. Con suelos Entisoles (Lithic Ustorthents) provenientes de rocas ígneas e intrusivas, materia orgánica 3.4 %, pH de 4.4 y baja disponibilidad de fósforo, con 3.5 mg kg⁻¹ (Hellin *et al.*, 1999).

Tabla 4. Parcelas del estudio GEI, PCG y emergía en sur de Lempira, Honduras

No.	Tratamiento	Productor	Comunidad	Coordenadas UTM		Altitud msnm
				x	y	
1	Tala y Quema	Juan Mejía	El Obrajito	327451	1554939	451
2	Tala y Quema	Lindolfo Arias	Camapara	328193	1555810	511
3	Tala y Quema	Miguel Cruz	Camapara	328405	1555516	563
4	SAQ <2	Juan Mejía	El Obrajito	327439	1555015	439
5	SAQ <2	Lindolfo Arias	Camapara	328141	1555741	491
6	SAQ <2	Miguel Cruz	Camapara	328460	1555516	561
7	SAQ 5-7	Camilo Mejía	San Lorenzo	328927	1554693	558
8	SAQ 5-7	Juan Sibrián	San Lorenzo	328916	1555231	514
9	SAQ 5-7	Santos vargas	Gualmuraca	330104	1553618	378
10	SAQ >10	Juan Mejía	Camapara	328280	1555656	522
11	SAQ >10	Bernarda Laínez	Portillo Flor	328974	1556950	683
12	SAQ >10	José Lino	Qesungual	333189	1558678	819
13	Bosque Secundario	Juan Mejía	El Obrajito	327418	1554963	490
14	Bosque Secundario	Lindolfo Arias	Camapara	328199	1555805	518
15	Bosque Secundario	Miguel Cruz	Camapara	328386	1555511	565

3.2 PROTOCOLO PARA MUESTREO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Para el monitoreo de los flujos de GEI entre el suelo y la atmósfera, se utilizó la Técnica de la Cámara Cerrada (*Closed-Chamber Technique* o CCT) (Rondón, 2000; Montenegro y Abarca, 2002). La CCT es muy utilizada en el muestreo de gases de efecto invernadero por ser simple de operar, rápida y con costos relativamente más bajos si se compara con otras técnicas, como las técnicas micrometeorológicas (Holland *et al.*, 1999).

A continuación, se detalla el procedimiento utilizado (Anexo E):

a. Instalación de anillos en las parcelas:

Al iniciar el estudio, se ubicaron los anillos de PVC (diámetro 25 cm, altura 8 cm) en las parcelas (Figura 7). La parte inferior de los anillos se entierra 5 cm en el suelo. Los anillos deben permanecer en las parcelas durante todo el estudio.

b. Muestreo de gases:

Al momento del muestreo, se coloca la cámara de PVC sobre el anillo previamente instalado en la parcela (Figura 7). La parte superior de la cámara posee una tapa de goma o séptum de 1 cm de diámetro, por la cual se toman las muestras de aire, utilizando una jeringa de plástico con válvula adaptada.

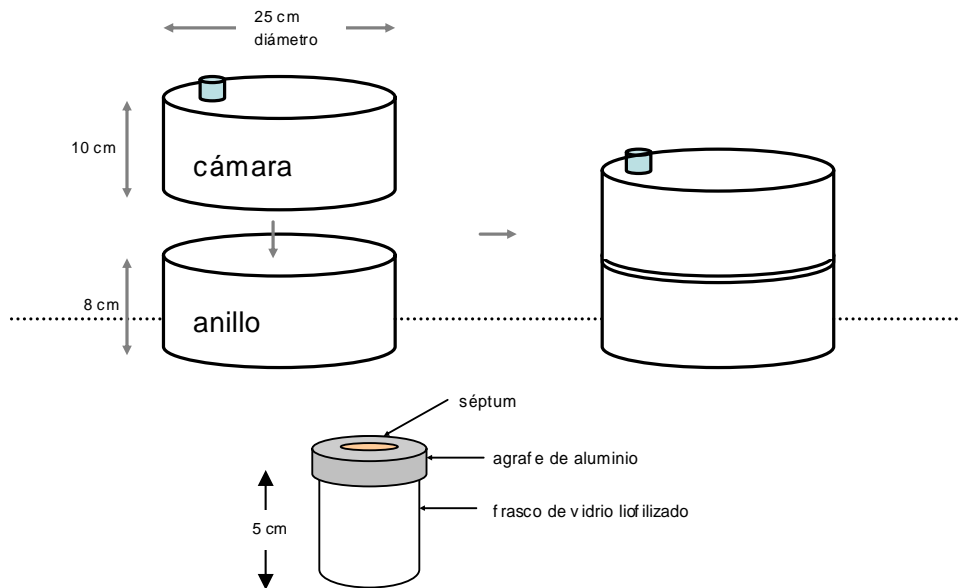


Figura 7. Componentes de la cámara en la técnica de la cámara cerrada y frascos de vidrio utilizados en muestreo de gases

Por cada cámara, se toman muestras de 15 mL de aire en los tiempos 0, 10, 20 y 30 minutos a partir de la instalación de la cámara, luego se eliminan 5 mL y los restantes 10 mL se transfieren a frascos de vidrio de 12 mL a los que previamente se les ha hecho vacío por medio de un liofilizador. Estas muestras fueron posteriormente enviadas al laboratorio de CIAT (Rondón, 2000).

Para la preparación de frascos liofilizados, se utilizan un séptum de un material impermeable al metano y agrafes de aluminio de 20 mm, los cuales se colocan herméticamente sobre el séptum para sellar efectivamente el frasco y evitar pérdida de la muestra.

c. Registro de temperatura y muestreo de la humedad del suelo:

Las cámaras poseen un segundo agujero con tapa de goma adaptado para ubicar un termómetro digital y tomar la temperatura dentro de la cámara cerrada. En la primera cámara de cada parcela se registra la temperatura en °F (a los 0, 10, 20 y 30 minutos). Además, a un lado de cada cámara se tomó una muestra de suelo para determinar humedad del suelo (la muestra de suelo se coloca en el horno por 24 horas a 105 °C).

d. Identificación de las muestras:

Los frascos con las muestras de aire se identificaron con un código con la información: cámara (1-4), parcela (1-15), tiempo (0, 10, 20, 30 minutos) y fecha de muestreo.

e. Procesamiento de muestras en el laboratorio:

Las muestras de aire fueron enviadas al laboratorio de CIAT para la determinación de las concentraciones de N₂O y CH₄, utilizando un cromatógrafo de gases Shimadzu® GC-14A con detectores FID y ECD (Figura 8). Se utilizó una válvula de 14 puertos y 2 posiciones para inyectar las muestras vía un loop de gas de 3 mL y para redirigir la corriente de gas hacia el detector ECD justo después de que se ha alcanzado el pico de metano con el detector FID. Se utilizó un mecanismo neumático operado eléctricamente para precisar el tiempo de cambio en la válvula (Rondón, 2000).

El programa Class VP de Shimadzu® se utilizó para operar el cromatógrafo de gases, controlar el mecanismo de cambio en la válvula, para reprocesar las señales generadas por los detectores y calcular las concentraciones (en ppm) de los gases en relación a los estándares. Para transferir las muestras de aire desde los frascos de vidrio hacia el cromatógrafo de gases, se utilizó una jeringa de vidrio de 5 mL para inyectar 4 mL vía el loop de 3 mL. El tiempo de análisis por muestra fue de 4.70 minutos.

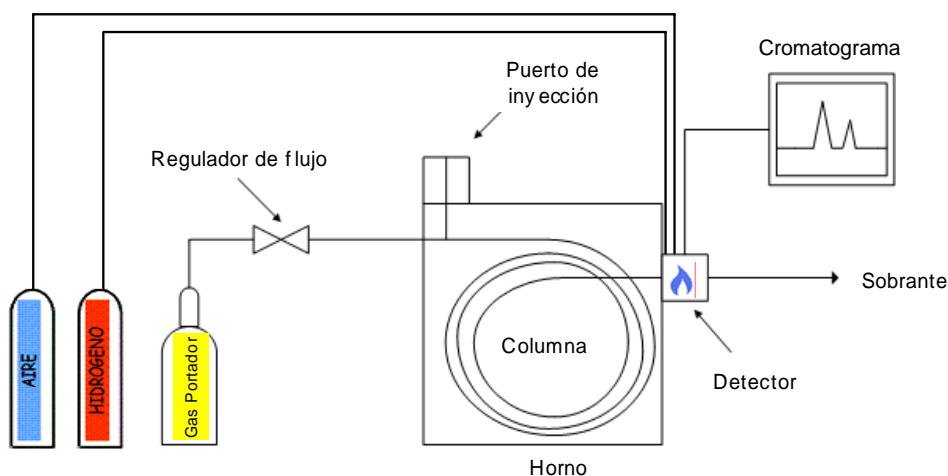


Figura 8. Diagrama de un cromatógrafo de gases utilizado para determinar las concentraciones de CH_4 y N_2O (Modificado de Wikipedia, 2008).

Las condiciones del cromatógrafo de gases Shimadzu GC-14A son: Precolumna Porapak Q (80-100 mesh) con 1 m de longitud y 2 mm de diámetro interno, Columna Porapak Q (80-100 mesh) con 2 m de longitud y 2 mm de diámetro interno, Fase Móvil Nitrógeno de alta pureza, Flujo de 22 mL/min, Temperatura del horno de 70 °C, Temperatura del inyector de 80 °C, Temperatura del detector de 320 °C y Estándar Scotty balanceado en N.

Para determinar CO_2 se utilizó un analizador de CO_2 Modelo S151 con tecnología infrarroja y el cuál es calibrado antes de iniciar las mediciones con estándares Scotty balanceados en nitrógeno. Se utilizó sílica gel para retener humedad y una trampa de NaOH, para asegurar que el CO_2 proveniente del aire quede atrapado y solo el CO_2 de la muestra ingrese al equipo y asegurar que no exista sobreestimación en la cuantificación.

f. Determinación de los flujos de gases de efecto invernadero:

Se utilizó la diferencia en concentración entre el minuto 30 y el minuto 0 para calcular la tasa de flujo de cada cámara. Para tal fin, se revisó la relación de linealidad en las concentraciones de N_2O y CH_4 de las 4 muestras de cada cámara, requiriéndose al menos tres puntos en línea para validar el flujo.

Valores negativos representan flujos netos desde la atmósfera al suelo y valores positivos indican una emisión neta del suelo hacia la atmósfera. Las concentraciones de N_2O y CH_4 registradas en el cromatógrafo, las temperaturas en °F tomadas en las parcelas, las dimensiones de la cámara de muestreo y la ecuación de los gases, se procesan en una hoja electrónica para obtener los flujos netos de metano y el óxido nitroso (Rondón, 2000).

3.3 MUESTREO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Para comparar los flujos de gases de efecto invernadero del Sistema Agroforestal Quesungual, agricultura tradicional de TQ y del BS y tomando en cuenta el manejo de la fertilización inorgánica, se muestrearon 15 parcelas de 200 m² (20 m x 10 m) (Figura 9).

Los muestreos se realizaron desde julio de 2005 a julio de 2006, cada tres semanas. En total, se llevaron a cabo 16 fechas de muestreo; en el 2005: 18 de julio, 8 de agosto, 29 agosto, 19 de septiembre, 10 octubre, 1 de noviembre, 21 de noviembre y 12 de diciembre, y en el 2006: 3 de enero, 25 de enero, 15 de febrero, 8 de marzo, 29 de marzo, 19 de abril, 10 de mayo y 21 de junio, recolectándose un total de 3840 muestras de aire para su análisis.

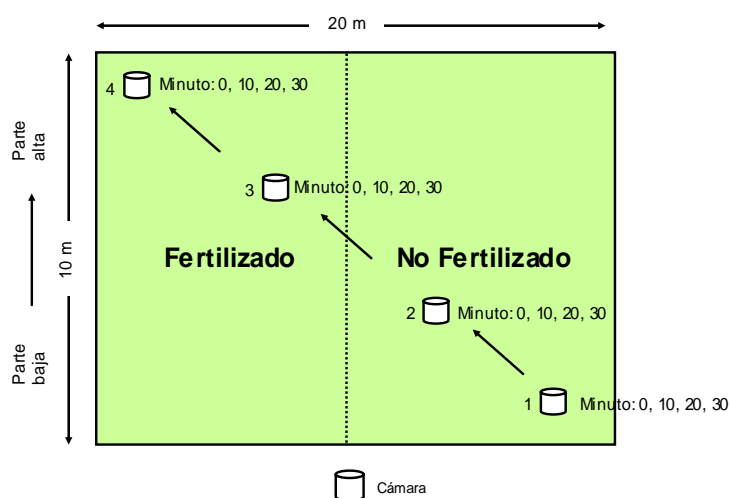


Figura 9. Distribución de cámaras en parcelas del estudio de GEI, PCG y emergencia en sur de Lempira, Honduras

3.4 POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL

Para determinar el PCG de cada uso de la tierra, se utilizaron los flujos de CH₄ y N₂O entre el suelo y la atmósfera y el almacenamiento de carbono en el suelo y en la biomasa de los árboles. También se incluyeron las emisiones directas de CO₂, CH₄ y N₂O de la quema, en el sistema tradicional de TQ. Los flujos de los gases de efecto invernadero de cada uso de la tierra, ya sea sumidero o fuentes, se multiplicaron por el valor de Potencial de Calentamiento Global correspondiente al gas y al horizonte de tiempo utilizado (Tabla 2) (IPCC, 2007).

Los valores obtenidos de PCG de cada uso de la tierra fueron extrapolados a la región del sur de Lempira, con el fin de obtener un panorama más amplio de la situación de la región. Se obtuvo el uso de la tierra actual del sur de Lempira, utilizando un mapa de coberturas con la información de la base de datos de *Global Land Cover (GLC)*¹. Para determinar las tendencias del cambio de uso de la tierra en el tiempo, se utilizó información histórica del uso de la tierra de la región.

3.5 EVALUACIÓN DE EMERGÍA

Para realizar la evaluación de emergía, se utilizó la metodología aplicada por Diemont en 2006, en la evaluación de emergía en un sistema agroforestal indígena en Chiapas, México (Diemont *et al.*, 2006; Trujillo, 1998). A continuación se detallan los pasos de la metodología empleada:

a. Recopilación de la información:

Se utilizaron los datos de las parcelas del estudio y las transformicidades utilizadas en estudios anteriores. Se recopiló información de (i) los Recursos Renovables, como la luz solar, lluvia, semillas y mano de obra renovable (para consumo propio); (ii) Recursos No Renovables, en este caso el suelo erosionado; (iii) Recursos Comprados, como los insumos y la mano de obra no renovable; y (iv) Producción de los sistemas.

¹ *Global Land Cover Facility*, glcf.umiacs.umd.edu

Se obtuvo la información de los insumos comprados para la producción, las labores anuales realizadas por el agricultor y los rendimientos e ingresos anuales de los sistemas de producción. Se consultó la información de la precipitación y del suelo erosionado por año, para cada uno de los sistemas.

b. Elaboración de los diagramas de sistemas:

Con la información obtenida, se procede a elaborar los diagramas de sistemas, los cuales ilustran los principales componentes y las interacciones de cada uno de los sistemas. Se utilizan símbolos (Anexo H) para representar los diferentes flujos, componentes y procesos involucrados en los sistemas.

c. Cálculo de emergjía y las transformicidades:

Se cuantificaron las entradas anuales de cada sistema, en las unidades básicas (J, horas, dólares) para obtener los valores por año (J/año, h/año o \$/año), los cuales se multiplicaron por el valor de transformicidad (en sej/J), dando como resultado, el valor de emergjía en julios de emergjía solar por año o sej/año. Para normalizar los datos por superficie, se dividió el valor de sej/año entre la superficie del sistema, para obtener el valor de emergjía en sej/ha/año. Se calcularon los totales de emergjía para cada una de las secciones: Recursos Renovables y No Renovables, Recursos Comprados y Recursos Exportados. (Figura 10).

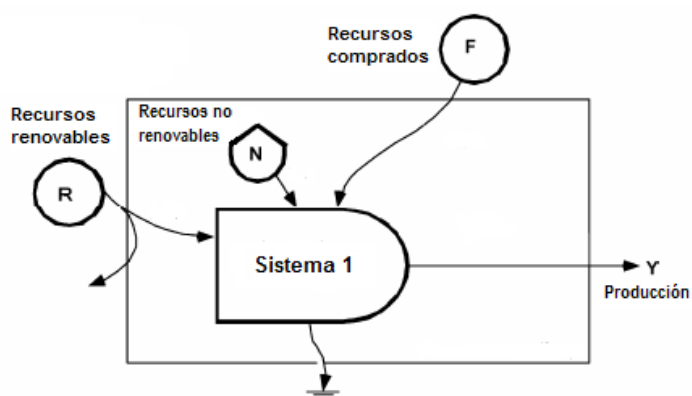


Figura 10. Diagrama total de un sistema, mostrando uso de recursos renovables, no renovables y comprados (Diemont *et al.*, 2006)

3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Con los datos de flujos acumulados de gases de efecto invernadero, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y las medias fueron comparadas mediante la prueba de Tukey a un nivel de significancia de $\alpha=0.05$, utilizando los programas estadísticos de SAS y Minitab. Se utilizó un diseño completamente al azar (DCA) (Figura 11). El modelo estadístico asociado al diseño fue:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad i: 1,2,3,\dots, 9 \text{ y } j: 1,2,3$$

Donde:

Y_{ij} : Emisión de gas en cada tratamiento y en parcela j

μ : Media general

τ_i : Efecto del tratamiento

ε_{ij} : Error aleatorio asociado a cada observación

Para el análisis de varianza, se utilizaron las hipótesis nula (H_0) y alterna (H_a):

$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_t$ y H_a : al menos un efecto de un tratamiento es diferente de los demás

Tala y Quema		SAQ <2		SAQ 5-7		SAQ >10		Bosque Secundario	
Juan Mejía F	N	Juan Mejía F	N	Camilo Mejía F	N	Juan Mejía N	F	Juan Mejía N	
Lindolfo Arias F	N	Lindolfo Arias N	F	Juan Sibrián N	F	Bernarda Lamez F	N	Lindolfo Arias N	
Miguel Cruz N	F	Miguel Cruz F	N	Santos Vargas F	N	José Lino F	N	Miguel Cruz N	

*F: fertilizado, N: no fertilizado

Figura 11. Arreglo experimental del estudio de GEI, PCG y emergencia en sur de Lempira, Honduras

Se buscaron correlaciones de los flujos de gases de efecto invernadero con variables del suelo seleccionadas y se determinaron modelos ajustados. Se realizó un Análisis de Componentes Principales y un Análisis de Conglomerados.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 GASES DE EFECTO INVERNADERO

4.1.1 Flujos de Gases de Efecto Invernadero

Se presentan los flujos de gases de efecto invernadero: metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O), para los tratamientos de TQ, SAQ <2, SAQ 5-7, SAQ >10 años y BS (Figura 12), monitoreados cada tres semanas, de Julio 2005 a Junio 2006, expresados en $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ para CH_4 y N_2O y $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ para CO_2 .

También, se incluyen los flujos de gases de efecto invernadero promediando los flujos de las 3 edades del SAQ, de esta manera, considerando únicamente los tratamientos de TQ, SAQ y BS (Figura 13), para visualizar de forma más clara las tendencias en el tiempo de los flujos.

4.1.1.1 Flujos de Metano

Los flujos de metano (Figura 12 a y 13 a) muestran gran variabilidad en el tiempo y entre los tratamientos en las fechas muestreadas, variando desde $147.6 \mu\text{g CH}_4 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$ en BS a $-113.28 \mu\text{g CH}_4 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$ en SAQ <2. Cada uno de los tratamientos es sumidero y emisor de metano en algún momento del período de estudio. Para TQ, SAQ <2 y BS, los meses de noviembre y diciembre 2005 y enero 2006, presentan la mayor variación en el tiempo, con los valores más extremos de emisión y captación de metano en el suelo, de todo el estudio. Los valores extremos en los flujos de metano (sumideros y emisores), se observaron en la época seca. Es posible que la alta variabilidad en los flujos de metano, esté relacionada con los períodos secos y lluviosos (Figura 14).

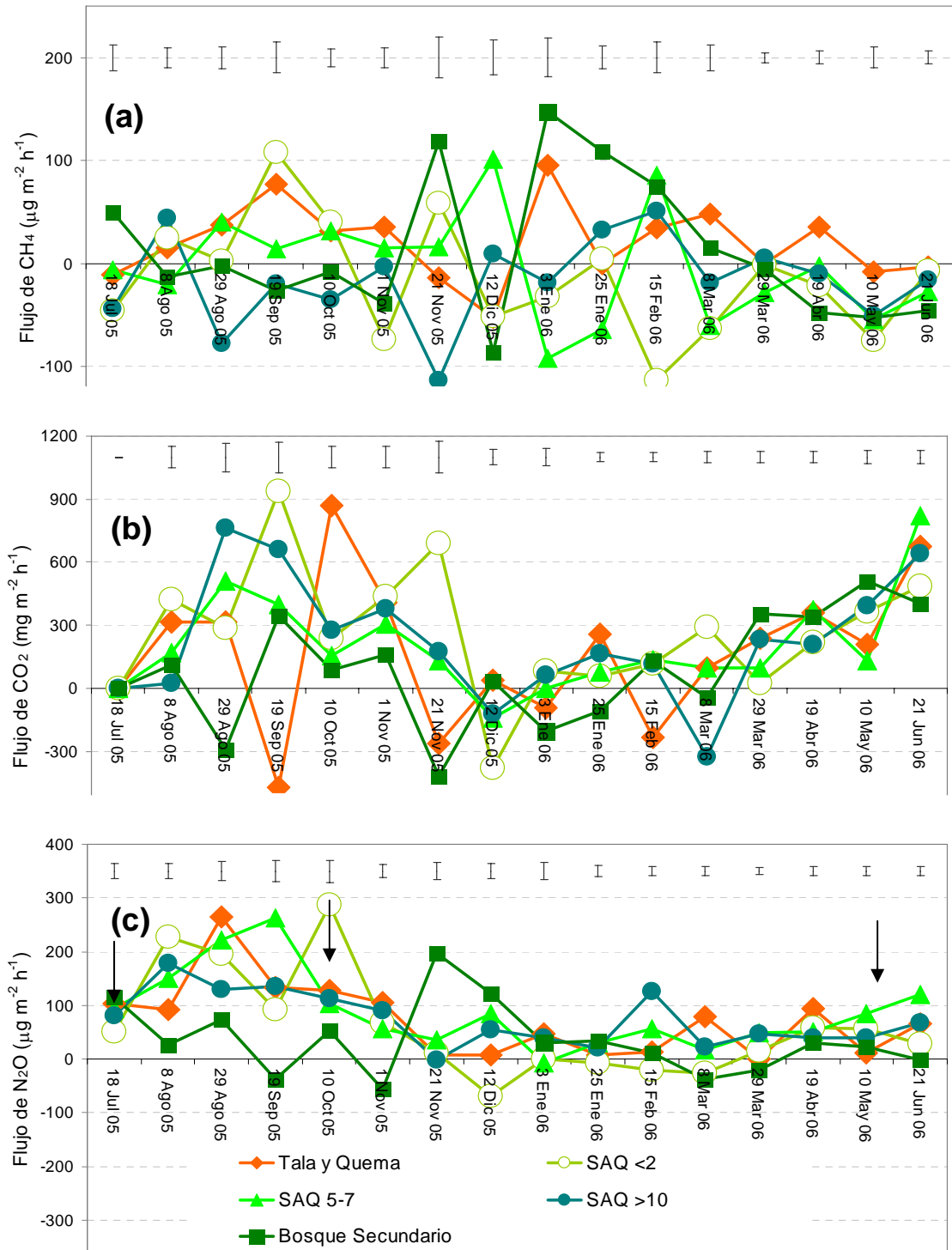


Figura 12. Flujos de gases de efecto invernadero: (a) CH_4 , (b) CO_2 y (c) N_2O , de julio 2005 a junio 2006, en cinco tratamientos del estudio de GEI en sur de Lempira, Honduras. Flechas indican fechas de aplicación de fertilizantes. Barras de error representan error estándar de la diferencia.

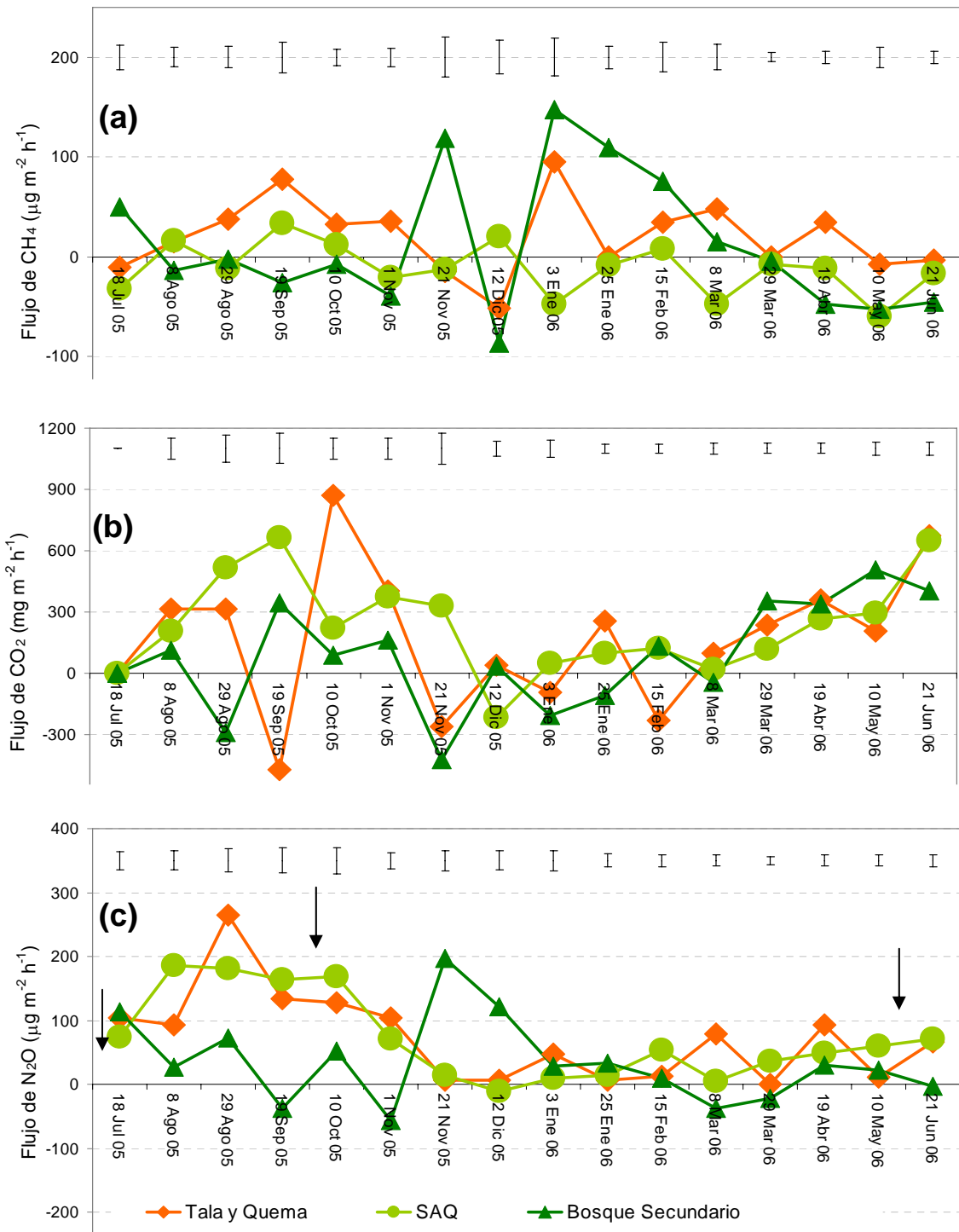


Figura 13. Flujos de gases de efecto invernadero: (a) CH₄, (b) CO₂ y (c) N₂O, de julio 2005 a junio 2006, en tres tratamientos del estudio de GEI en sur de Lempira, Honduras. Flechas indican fechas de aplicación de fertilizantes. Barras de error representan error estándar de la diferencia.

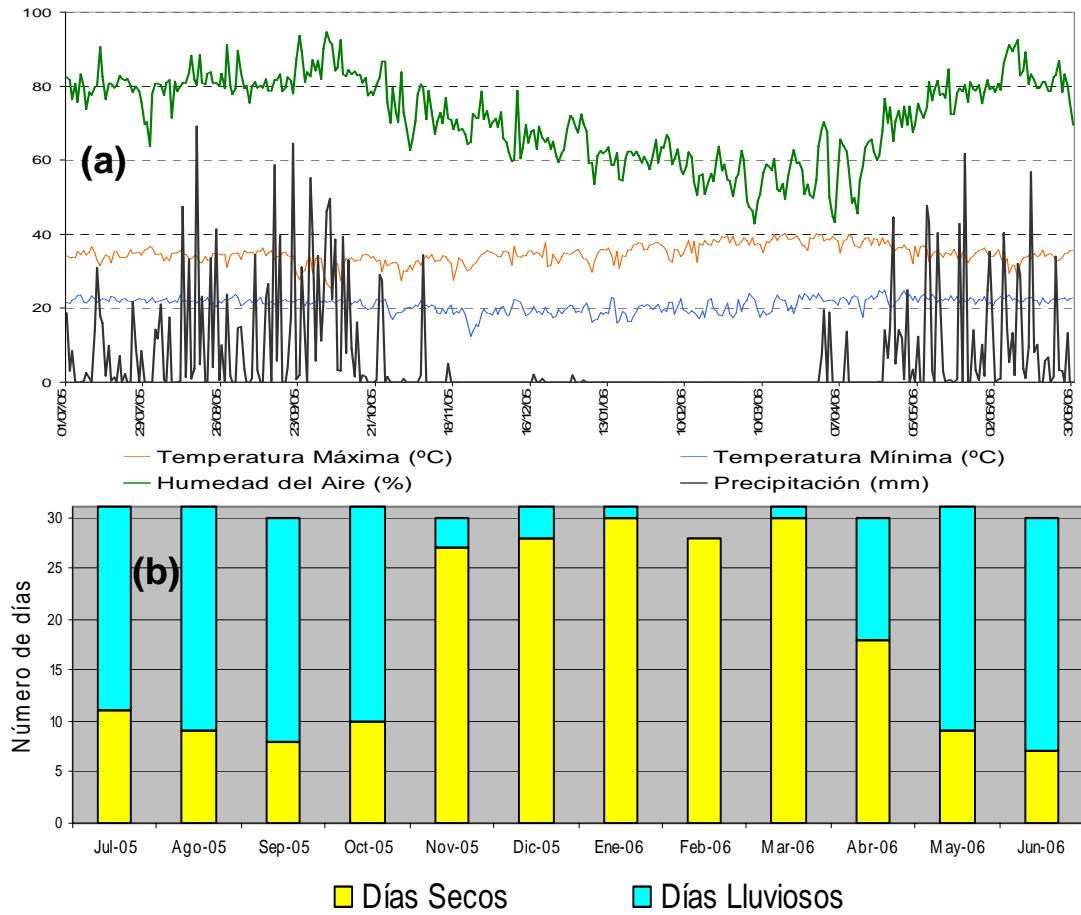


Figura 14. (a) Valores diarios de temperatura, humedad del aire y precipitación y (b) número de días secos y húmedos mensuales, de julio 2005 a junio 2006, en sur de Lempira, Honduras. SNET, 2007.

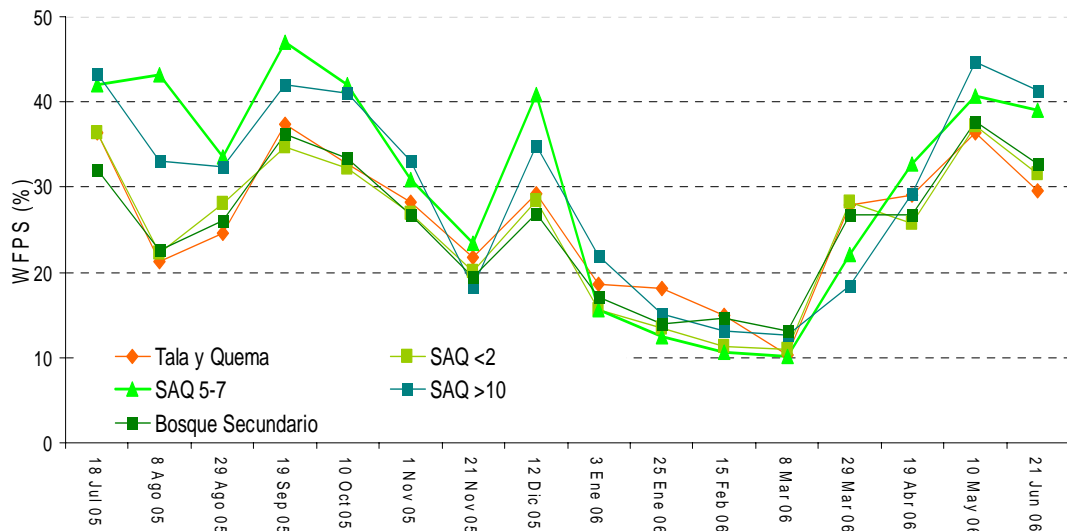


Figura 15. Espacio Poroso Lleno de Agua o WFPS %, en cinco tratamientos, de julio 2005 a junio 2006, en estudio de GEI en sur de Lempira, Honduras.

En algunos períodos, el suelo fue sumidero de metano y en otros, fue un emisor de metano, ambos procesos relacionados con la actividad microbial del suelo y el contenido de agua en el suelo. Lo anterior se observa claramente en el espacio poroso lleno de agua (WFPS %), donde los máximos niveles coincidieron con las máximas emisiones de metano en el período lluvioso (Figura 15).

En condiciones anaeróbicas del suelo, se produce metano por la metanogénesis, causada por bacterias en el suelo. Otra fuente importante de metano, son las termitas en el suelo, las cuales, en su proceso digestivo, producen metano.

El tratamiento de TQ (Figuras 12 a y 13 a) presentó su nivel más alto de emisión de metano a inicios de enero 2006, en la época seca y a mediados de septiembre 2005, en la época lluviosa. La tasa más alta de oxidación de CH_4 fue mediados de diciembre 2005, siendo casi el único momento en que TQ se comporta como sumidero.

Respecto a los flujos de metano en el SAQ (Figura 12 a y 13 a), en las tres edades del sistema, se observó también una alta variabilidad en el comportamiento de los flujos en el período de estudio.

Para el SAQ <2, el valor más alto de emisión de metano se presentó a mediados de septiembre 2005, en la época lluviosa, y el valor más alto de oxidación de CH_4 a mediados de febrero 2006, en la época seca. De noviembre 2005 a Junio 2006 (durante toda la época seca) el SAQ <2, fue un sumidero de metano.

En los flujos del SAQ 5-7 años (Figura 12 a), la mayor emisión de metano se registró en diciembre 2005, y la mayor oxidación a inicios de enero 2006, en la época seca. De agosto 2005 a diciembre 2005, el tratamiento de SAQ 5-7 es una fuente de metano, a partir de ahí hasta junio 2006, pasa a ser un sumidero de metano.

Para SAQ >10 (Figura 12 a), la mayor emisión de CH₄ se presentó a mediados de febrero 2006 y la mayor captación a finales de noviembre 2005. De agosto 2005 a diciembre 2005, este tratamiento es sumidero de metano, luego se comporta como fuente y por último como sumidero, de marzo 2006 a junio 2006.

El BS (Figura 12 a y 13 a), fue el tratamiento más variable, con respecto a los flujos de metano. El mayor valor de oxidación de CH₄ se presentó a mediados de diciembre de 2005 y la mayor tasa de emisión a inicios de enero 2006. De enero 2006 a marzo 2006, el bosque tuvo niveles altos de emisión de metano, y de agosto 2005 a noviembre 2005 y de marzo 2006 a junio 2006, el bosque es sumidero de metano.

4.1.1.2 Flujos de Dióxido de Carbono

En los flujos de dióxido de carbono (Figura 12 b y 13 b) se observa una tendencia clara, los tratamientos son emisores de CO₂ durante la época lluviosa y en la época seca las emisiones son muy bajas o son sumideros. En los flujos de CO₂ se observan menores diferencias entre los tratamientos para las fechas muestreadas. Los flujos de dióxido de carbono variaron desde 937.46 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ en SAQ <2 a -471.60 mg CO₂ m⁻² h⁻¹ en TQ. Al igual que el metano, todos los tratamientos son emisores y sumideros en algún momento del período de estudio. En todos los tratamientos, los mayores valores de emisión de dióxido de carbono, se presentaron en la época lluviosa, y por el contrario, los mayores sumideros se observaron en la época seca.

TQ (Figura 12 b y 13 b), fue el tratamiento que más varió respecto a los flujos de dióxido de carbono. A mediados de septiembre 2005 y mediados de octubre 2005, se presentaron los valores extremos, el mayor nivel de sumidero y la mayor producción de CO₂, respectivamente. De julio 2005 a marzo 2006, los flujos de CO₂ se comportaron de manera irregular, como emisor y sumidero, de forma intercalada, y a partir de mayo 2006 se comporta como emisor.

Los tres edades del SAQ: <2, 5-7 y >10, (Figura 12 b) se comportaron de manera similar, tanto en el período seco como lluvioso, exceptuando por SAQ <2 a mediados de septiembre y a finales de noviembre, en la época lluviosa. Las tres edades del SAQ, son emisores de dióxido de carbono durante todo el período de estudio, excepto por la fecha de muestreo de mediados de diciembre de 2005, en la cual todos los tratamientos son sumideros.

El BS (Figura 12 b y 13 b), presentó el mayor nivel de emisión de CO₂, al inicio de mayo 2005 y el mayor sumidero a finales de noviembre de 2005. Los períodos de emisión de dióxido de carbono de parte del BS comprenden de septiembre 2005 a noviembre 2005 y de marzo 2006 a junio 2006, ambas en época lluviosa. Los períodos en que el BS es sumidero son a finales de agosto 2005 y en el período de noviembre 2005 a enero 2006, durante la época seca.

Los resultados de los flujos muestran que los valores de emisión de metano están inversamente relacionados con las emisiones de dióxido de carbono, donde las menores emisiones de CO₂ coinciden con los mayores valores de CH₄. Las emisiones de dióxido de carbono desde el suelo, están relacionadas a la respiración del suelo, incluyendo la respiración microbial, de las raíces y de la fauna, principalmente en los primeros centímetros del suelo, donde se ubica la actividad de las raíces y organismos del suelo.

4.1.1.3 Flujos de Óxido Nitroso

Los flujos de óxido nitroso (Figura 12 c y 13 c) presentaron una tendencia definida; las mayores emisiones de los tratamientos están en la época lluviosa y los menores valores de emisión de óxido nitroso están en la época seca. Al igual que en los flujos de CO₂, los flujos de óxido nitroso presentaron menores diferencias entre los tratamientos para las fechas muestreadas.

Los valores de óxido nitroso variaron desde $287.90 \mu\text{g N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$ en SAQ <2 hasta $-70.19 \mu\text{g N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$, también en SAQ <2. Durante la época lluviosa, en la que se establecen los cultivos de maíz y frijol, se observaron las mayores diferencias en el flujo de N_2O entre los usos de la tierra fertilizados: TQ y SAQ y el uso de la tierra que no se fertiliza, el BS.

Todos los mayores valores de óxido nitroso se presentaron en la época lluviosa, excepto para el BS. Los menores valores de óxido nitroso están en la época seca. En lo que respecta a N_2O , los tratamientos de TQ, SAQ 5-7 y BS son fuentes de N_2O , durante todo el período del estudio. El suelo de los tratamientos de SAQ <2 y SAQ >10, son sumideros de óxido nitroso principalmente en durante la época seca.

Los niveles más altos de N_2O , coinciden con la aplicación de fertilizantes nitrogenados. Para maíz, la primera fertilización con 18-46-0 a inicios de junio 2005 y junio 2006, y una segunda fertilización con urea a mediados de julio 2005 y julio 2006. Para el frijol, la fertilización con 18-46-0 es a inicios de octubre.

En general, los suelos son fuentes naturales de óxido nitroso. Los factores que influyen los niveles de emisión de N_2O , están relacionados al ciclo del nitrógeno, como la aplicación de fertilizantes nitrogenados y los procesos de descomposición de materia orgánica en el suelo. Otro aspecto muy importante, es el contenido del agua en el suelo, el cual determina la actividad microbial y los procesos de nitrificación y denitrificación, que dan como resultado la producción de N_2O .

El espacio poroso lleno de agua (WFPS) se relaciona con las emisiones de óxido nitroso, ya que los microorganismos del suelo presentan su mayor actividad en un porcentaje cercano al 60% de WFPS; arriba de este valor, la actividad microbial se ve limitada por la reducción de aireación, y debajo de este valor, se ve limitada por la disponibilidad de agua (Linn y Doran, 1984; Dusenbury *et al.*, 2008).

En este estudio, los mayores valores de WFPS coincidieron con las más altas emisiones de N_2O . Los valores del WFPS se acercaron al valor de 60%, pero no lo sobrepasaron (Figura 15).

El tratamiento de TQ (Figura 12 c y 13 c) tuvo su mayor valor de emisión de óxido nitroso a finales de agosto 2005, coincidiendo con la etapa lluviosa y de cultivos. La menor emisión de N_2O en TQ se presenta a finales de marzo 2006, en la época seca. En todo el período de estudio, TQ es emisor de óxido nitroso.

Las tres edades del SAQ (Figura 12 c y 13 c), presentaron un comportamiento similar durante todo el período de estudio, respecto a los flujos de N_2O . Para SAQ <2, la mayor emisión de óxido nitroso se presentó a inicios de octubre 2005, en la época lluviosa y muy cerca de la fecha de fertilización de frijol con 18-46-0. A excepción de este punto con alta emisión en óxido nitroso en octubre, el SAQ <2 es uno de los tratamientos con los niveles más bajos de emisión de N_2O durante todo el período de estudio. Los niveles más bajos de emisión son a mediados de diciembre 2005, en la época seca. En SAQ 5-7, la mayor emisión de óxido nitroso es a mediados de septiembre 2005, en la época lluviosa y la menor emisión es a inicios de enero 2006, en la época seca. Durante todo el período de estudio, SAQ 5-7 es emisor de N_2O .

En los flujos de N_2O , el tratamiento de SAQ >10, es el que presenta menor variabilidad en el tiempo durante todo el período. La mayor tasa de emisión de óxido nitroso se observa a inicios de agosto 2005, en la época lluviosa y el menor nivel de emisión, se presenta a finales de noviembre 2005, en la época seca.

El BS (Figura 12 c y 13 c) tuvo niveles más bajos de emisión de N_2O durante la época lluviosa, en comparación con los otros tratamientos, en parte porque al bosque no recibe fertilización. A finales de noviembre 2005, se presenta el nivel más alto de emisión de N_2O , en la época seca.

El menor nivel de emisión está al inicio de noviembre 2005, justo al inicio de la época seca. Durante la época lluviosa, los flujos de N_2O , tuvieron mayores fluctuaciones, pero en la época seca los flujos se estabilizaron.

Se presentan variables físicas y químicas del suelo por profundidad (Figuras 16 y 17), las cuales fueron seleccionadas para ayudar a comprender el comportamiento de los flujos de los gases de efecto invernadero en los diferentes tratamientos.

El BS presenta los valores más bajos de Densidad Aparente (D_a) (Figura 16a), en los primeros 15 cm. TQ, SAQ <2 y SAQ >10 presentan valores similares de D_a cercanos a 1. SAQ 5-7 tuvo los valores más altos de D_a . La variable de D_a , tiene una relación inversa con la Porosidad Total y Macroporosidad (Figuras 16e y 16f). En la Permeabilidad del Aire (Figura 16b), nuevamente el BS presenta los niveles más altos y SAQ 5-7 los menores valores. TQ, SAQ <2 y SAQ >10 presentan valores intermedio.

La Susceptibilidad a la Compactación (Figura 16c) muestra que TQ es el menos susceptible a la compactación, indicando que estos suelos ya han sufrido procesos de compactación. SAQ 5-7 y SAQ >10, en los primeros 10 cm son los más susceptibles a la compactación. La susceptibilidad a la compactación presenta una relación inversa con la Porosidad Residual (Figura 16d).

Respecto al tamaño de los poros, se presentaron altos valores de Macroporosidad (Figuras 16f) (en el rango de 20 a 30%) y de Microporosidad (Figuras 16h) (en el rango de 20 a 25%) y un bajo porcentaje de Mesoporosidad (en el rango de 10 a 15%) (Figuras 16g). En mesoporosidad y microporosidad, se observó poca variabilidad entre tratamientos y homogeneidad en el perfil. En macroporosidad, hubo mayor variabilidad entre los tratamientos y a nivel de perfil, especialmente en los primeros 20 cm, con la macroporosidad presentándose en el BS.

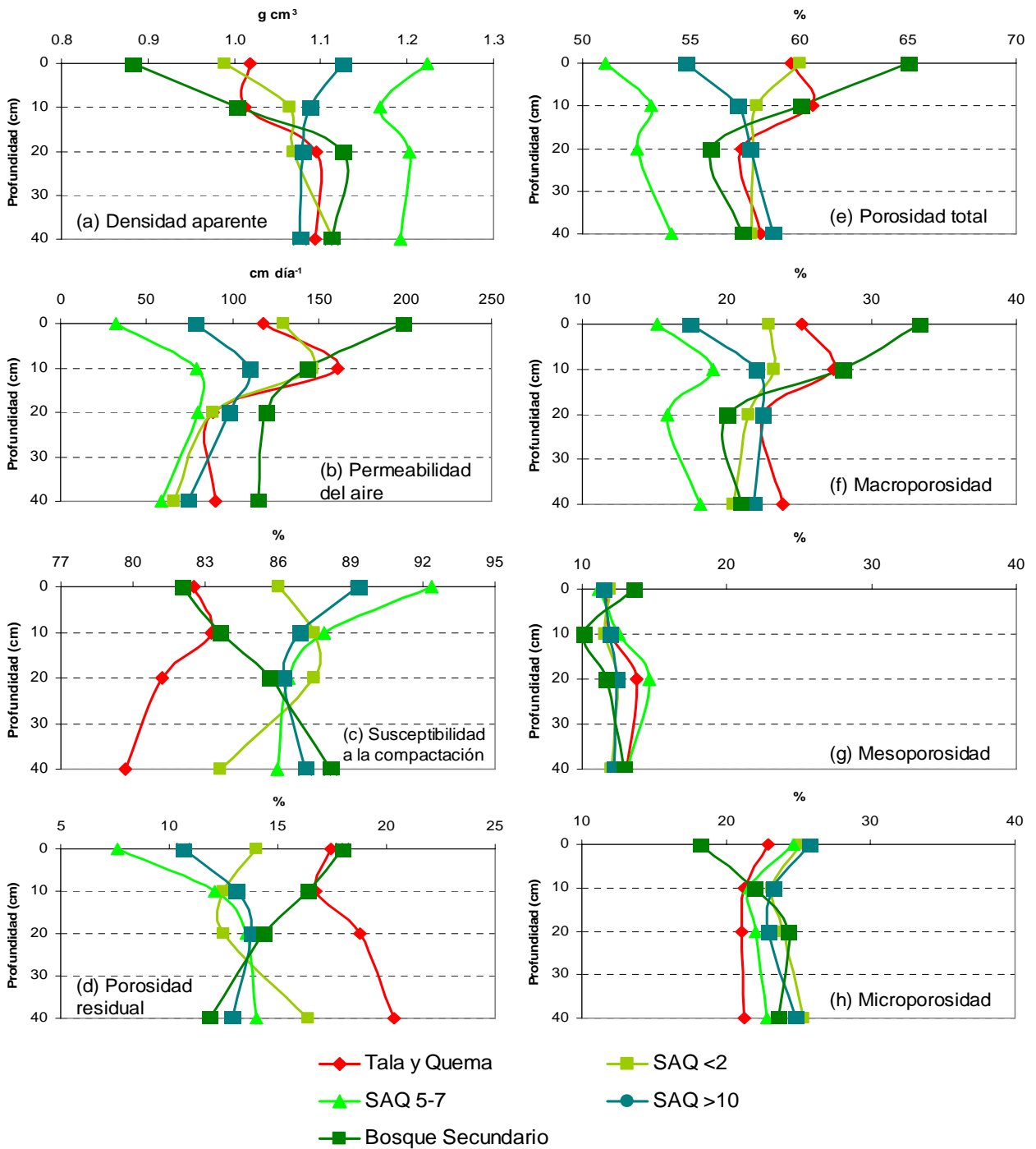


Figura 16. Variables físicas del suelo seleccionadas (a-h), por profundidad, en el estudio de GEI en sur de Lempira, Honduras. M. Rivera, 2005.

El BS tuvo los menores valores de Humedad Volumétrica (Figura 17i), principalmente en los primeros 20 cm del suelo, seguido por TQ, el cual presenta los menores valores en la profundidad de 20 a 40 cm. Las tres edades del SAQ, presentaron los mayores porcentajes de humedad en todo el perfil, con los mayores contenidos en los primeros 10 cm de profundidad y en la profundidad de 20 a 40 cm. La Conductividad Hidráulica Saturada (Figura 17m) presenta un comportamiento inverso a la humedad volumétrica, con el mayor valor en el BS en los primeros 20 cm. SAQ 5-7 presentó la menor conductividad hidráulica y poca variabilidad en el perfil.

En el caso de las clases texturales, los suelos presentaron contenidos de Arena (Figura 17j) en el rango de 40 a 50%, de Limo (Figura 17k) en el rango de 30 a 40% y de Arcilla (Figura 17l) en el rango de 10 a 30%. Se observaron valores similares entre los tratamientos y con poca variabilidad por profundidad. Se observa un aumento en el contenido de arcilla en el SAQ >10 en la profundidad de 20 a 40 cm. En general, los suelos fueron Francos.

El pH (Figura 17n) en TQ, BS y SAQ >10 presenta una disminución (en el rango de 1 unidad de pH), en los primeros 10 cm. SAQ >10 tuvo los suelos con el pH más bajo, principalmente en las mayores profundidades, por el contrario, los suelos más básicos se presentaron en TQ. SAQ <2 y SAQ 5-7 mostraron un comportamiento homogéneo en el perfil del suelo.

En Carbono (Figura 17ñ) y Nitrógeno Total (Figura 17o) se manifestó una acumulación progresiva de los contenidos en las mayores profundidades. Los mayores contenidos de carbono se presentaron en el SAQ <10 y los menores contenidos en el SAQ <2. En el caso del nitrógeno total, se presentó este mismo comportamiento.

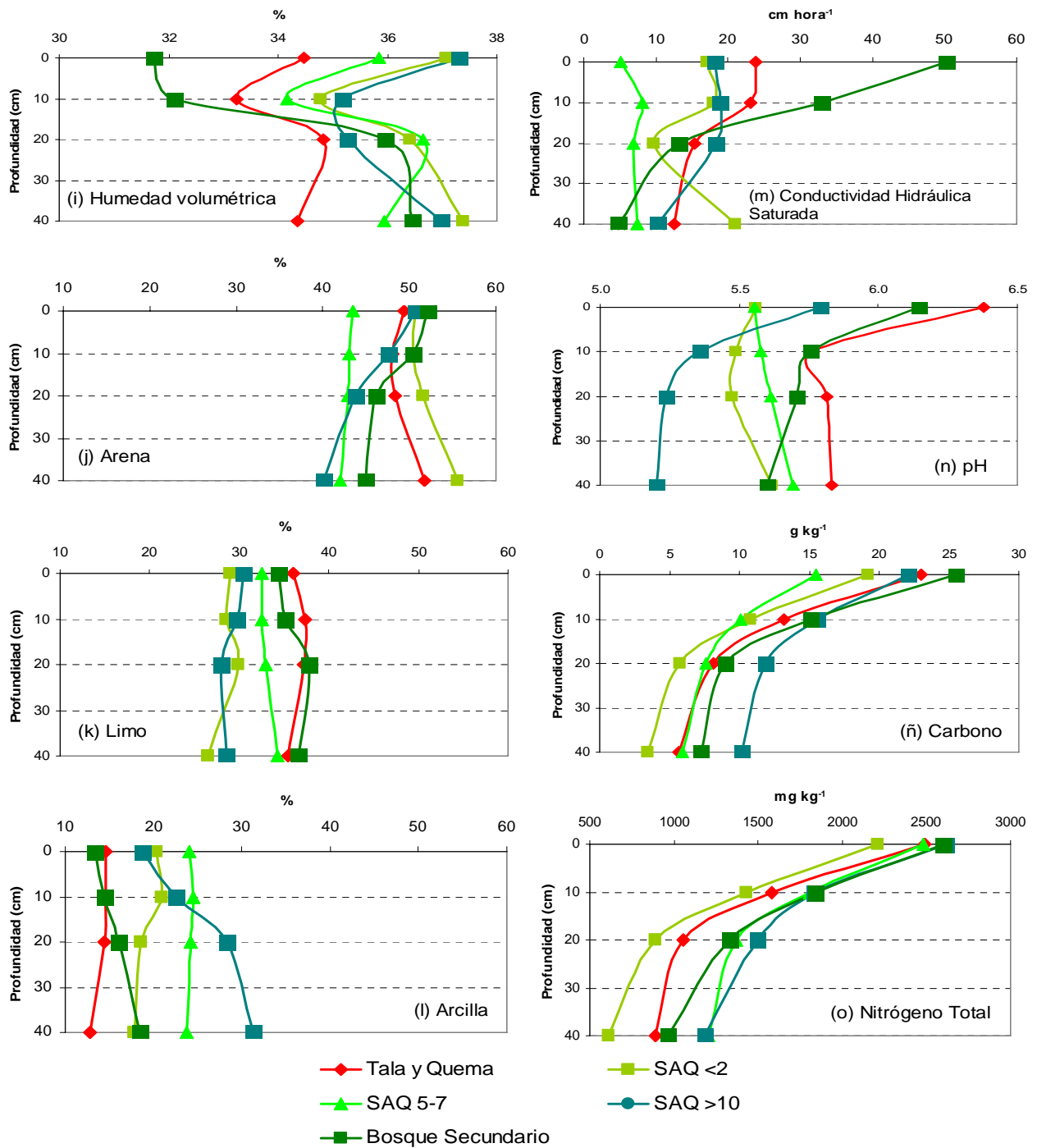


Figura 17. Variables físicas y químicas del suelo seleccionadas (i-o), por profundidad, en el estudio de GEI en sur de Lempira, Honduras. M. Rivera, 2005.

4.1.1.4 Análisis Estadístico de Flujos de Gases de Efecto Invernadero

En el análisis de componentes principales, se seleccionaron los primeros cuatro componentes, los cuales explican el 78.4% de la variabilidad de los datos (Tabla 5).

Tabla 5. Valores eigen y componentes principales de variables del suelo seleccionadas en estudio de GEI en sur de Lempira, Honduras.

	Valor Eigen			
	5,2641	3,1896	1,4021	1,1256
Probabilidad	0,376	0,228	0,100	0,080
Acumulado	0,376	0,604	0,704	0,784

Variable	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
Densidad Aparente	0,392	0,032	0,262	-0,045
pH	-0,209	0,313	0,339	-0,083
Macroporosidad	-0,400	-0,043	-0,065	0,120
Mesoporosidad	0,133	0,304	0,231	0,391
Permeabilidad	-0,351	-0,120	-0,179	0,261
Conductividad Hidráulica	-0,378	-0,039	0,004	-0,029
Susceptibilidad a Compactación	0,348	-0,014	-0,044	-0,444
Arena	-0,170	0,315	-0,029	-0,435
Arcilla	0,166	-0,402	-0,291	0,078
Nitrógeno Total	-0,203	-0,397	-0,034	-0,003
Fósforo	-0,222	-0,010	0,503	0,046
Potasio	-0,281	-0,165	0,150	-0,560
Calcio	-0,096	0,478	-0,234	0,140
Magnesio	-0,059	0,341	-0,555	-0,160

Los primeros cuatro componentes explican la variabilidad de los datos, así:

- El primer componente explica el 37.6% y está relacionado con el espacio poroso (altos valores de densidad aparente y susceptibilidad a la compactación y bajos valores de macroporosidad).
- El segundo componente explica el 22.8% y está relacionado con las bases (altos valores de calcio y magnesio y bajos valores de arcilla).
- El tercer componente principal explica el 10.0% y está relacionado con los la fertilidad (altos valores de fósforo y bajos valores de magnesio).
- El cuarto componente explica el 8.0% y está relacionado con bajos niveles de potasio y altos niveles de mesoporosidad.

En el primer plano principal (Figura 18), las variables de Densidad Aparente y Susceptibilidad a la Compactación presentan una alta correlación entre sí y con el primer componente. Las variables de Porosidad, Macroporosidad, Conductividad Hidráulica y Permeabilidad del Aire, presentan una alta correlación entre sí y con el primer componente principal, con un comportamiento opuesto al del grupo anterior. Otras relaciones que se observaron son: Arena tiene un comportamiento opuesto a Arcilla. Densidad Aparente con un comportamiento opuesto a Porosidad y Conductividad Hidráulica.

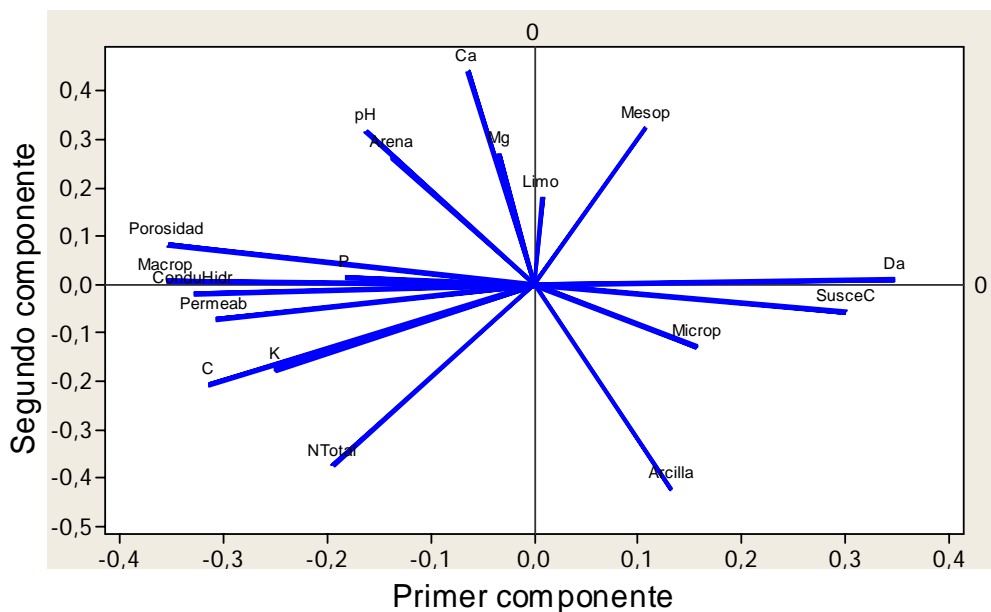


Figura 18. Representación en primer plano principal de variables del suelo seleccionadas, en el estudio de GEI en sur de Lempira, Honduras

Este análisis permite comprender mejor el comportamiento de las variables físicas y químicas del suelo seleccionadas en este estudio, para explicar la incidencia de estas variables en la emisión de los gases de efecto invernadero.

Al correlacionar los flujos de gases de efecto invernadero con las variables físicas y químicas del suelo seleccionadas (Tabla 6), se observaron pocas correlaciones de metano y óxido nitroso con las variables del suelo y en el caso del dióxido de carbono, no se encontró correlación con ninguna variable del suelo.

Tabla 6. Correlación y probabilidad de flujos de gases de efecto invernadero con variables seleccionadas del suelo, en estudio de GEI en sur de Lempira, Honduras. Ver Anexo A.

	Metano	Óxido Nitroso	Dióxido Carbono
Óxido Nitroso	0.273		
	0.169		
Dióxido de Carbono	-0.436	-0.249	
	0.023	0.211	
Densidad Aparente	-0.265	0.460	0.228
	0.182	0.016	0.253
pH	0.560	-0.008	-0.266
	0.002	0.970	0.179
Porosidad Total	0.277	-0.472	-0.219
	0.161	0.013	0.272
Macroporosidad	0.200	-0.342	-0.304
	0.316	0.081	0.124
Mesoporosidad	0.059	-0.122	0.220
	0.771	0.543	0.269
Permeabilidad	0.126	-0.439	-0.290
	0.531	0.022	0.142
Conductividad Hidráulica	0.242	-0.322	-0.258
	0.224	0.101	0.194
Susceptibilidad a Compactación	-0.466	0.254	0.320
	0.014	0.201	0.104
Arena	0.181	-0.206	-0.163
	0.366	0.302	0.417
Arcilla	-0.187	0.062	0.279
	0.350	0.759	0.159
Nitrógeno Total	0.241	-0.042	-0.126
	0.226	0.833	0.530
Carbono	0.307	-0.320	-0.158
	0.119	0.104	0.431
Fósforo	0.260	0.012	-0.150
	0.190	0.952	0.456
Potasio	0.213	-0.100	-0.060
	0.286	0.619	0.765
Calcio	0.263	-0.324	-0.059
	0.186	0.099	0.770
Magnesio	0.128	-0.260	-0.108
	0.523	0.191	0.593

Al relacionar el metano con las características físicas y químicas del suelo (Figura 19), se observan correlaciones significativas estadísticamente entre el metano y las variables de pH y susceptibilidad a la compactación.

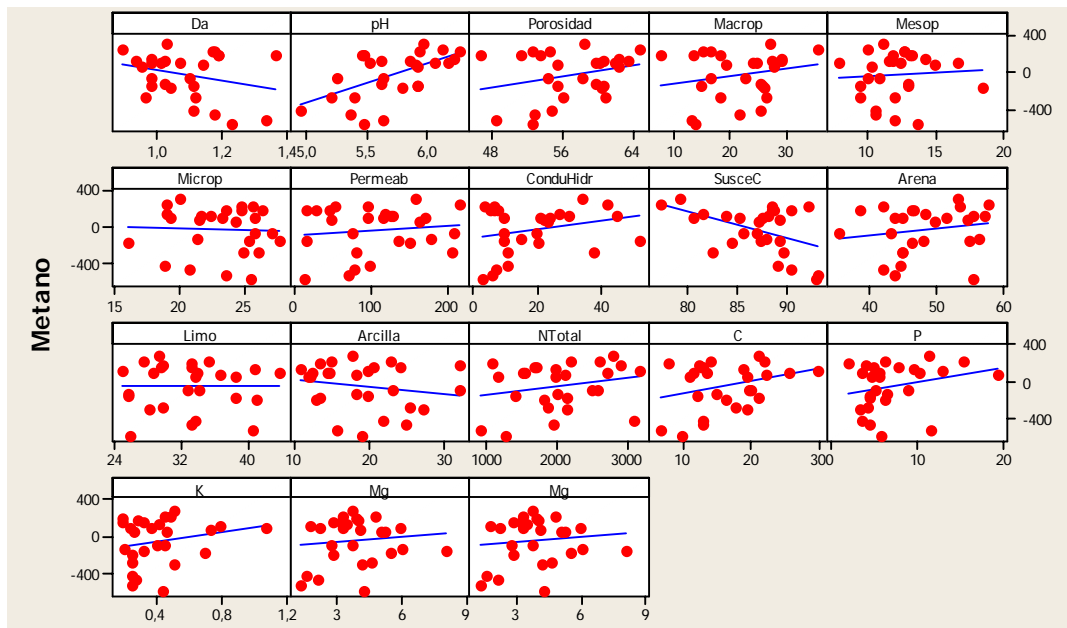


Figura 19. Relación del metano y las variables del suelo seleccionadas en el estudio de GEI en sur de Lempira, Honduras.

En el caso de las relaciones con el óxido nitroso (Figura 20), se encontraron relaciones con la densidad aparente, porosidad y la permeabilidad del aire.

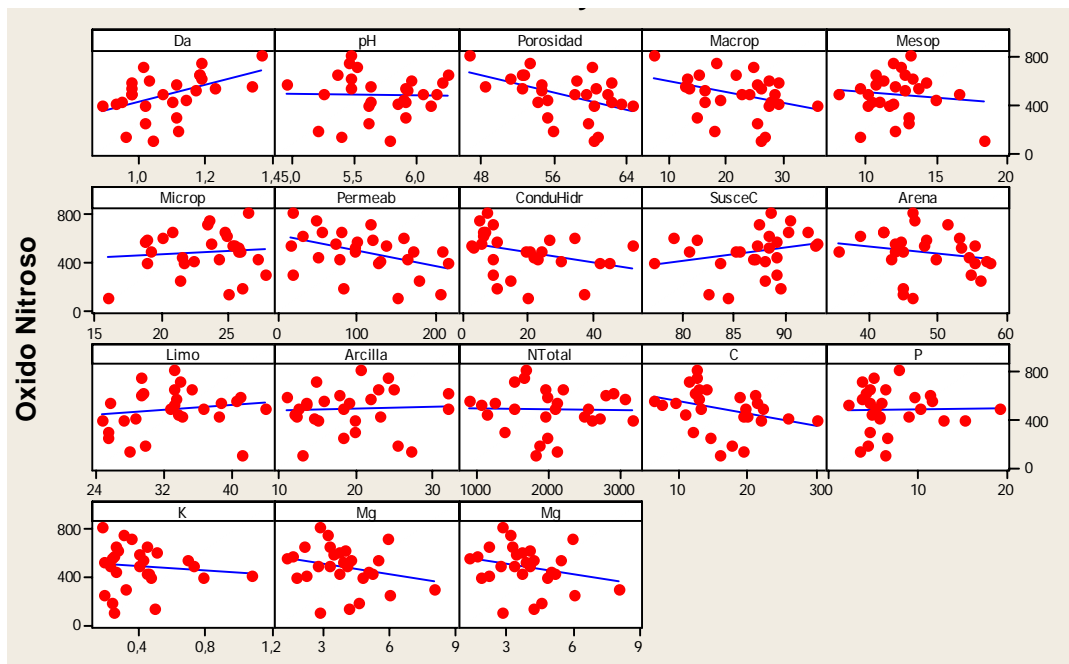


Figura 20. Relación del óxido nitroso y las variables del suelo seleccionadas en el estudio de GEI en sur de Lempira, Honduras.

Para dióxido de carbono (Figura 21), no se encontraron relaciones claras entre las emisiones de CO₂ y las características físicas y químicas del suelo.

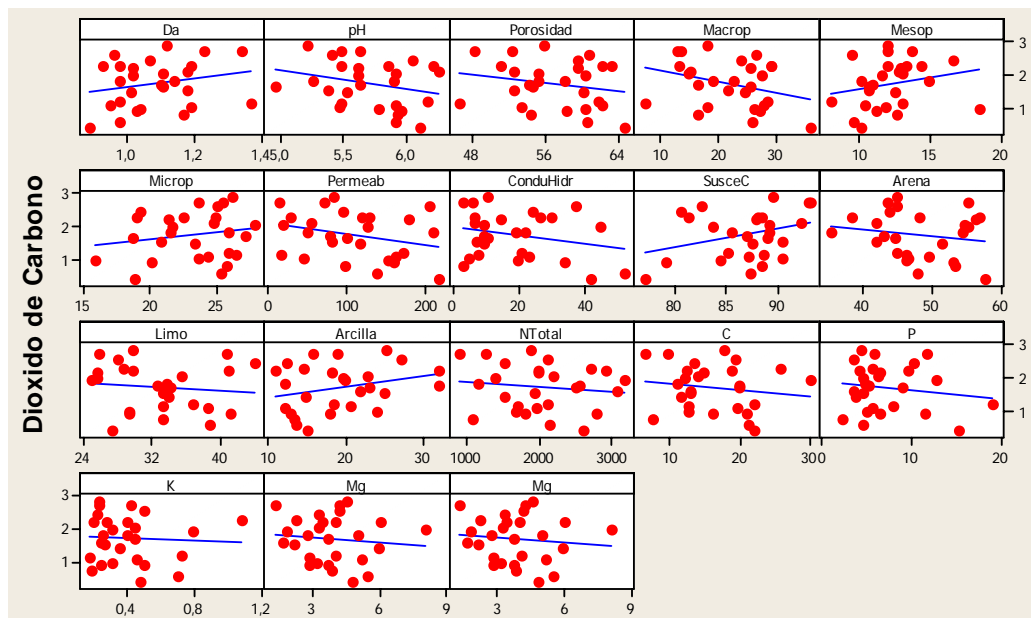


Figura 21. Relación del dióxido de carbono y las variables del suelo seleccionadas en el estudio de GEI en sur de Lempira, Honduras.

Al analizar el comportamiento de los individuos, que en este caso son los tratamientos ubicados en diferentes fincas, se observan dos grandes grupos asociados a las fincas donde se realizó el experimento (Figura 22).

En el caso del SAQ, el tratamiento SAQ 5-7 con y sin fertilización, con sus tres repeticiones, todas las fincas están ubicadas en el mismo grupo, SAQ >10 tiene cuatro fincas en el mismo grupo y las otras dos están un poco distantes y en el SAQ <2, las fincas están aún más dispersas. Para el tratamiento de TQ, hay más cercanía entre las fincas. En BS, las fincas están un poco separadas. Al hablar de cercanía o lejanía en los tratamientos, se refiere a la similitud o diferencia de las características físicas y químicas del suelo para los sitios donde se probaron estos tratamientos.

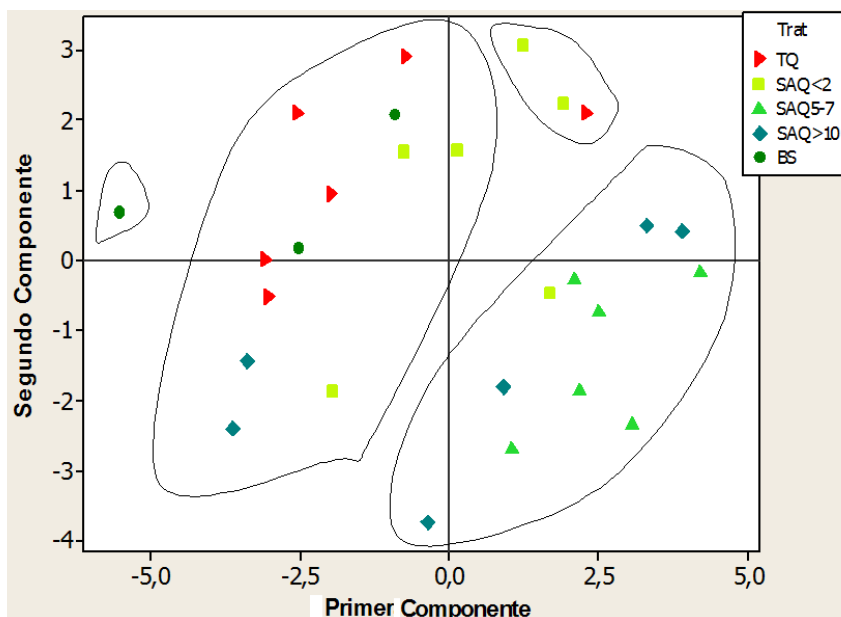


Figura 22. Representación de los individuos en el primer plano principal en el estudio de GEI en sur de Lempira, Honduras.

Se determinaron los modelos ajustados para los gases de efecto invernadero.

La ecuación de la regresión para metano fue:

$$\text{Metano} = - 360 + 338 (\text{pH}) - 18.5 (\text{Susceptibilidad a Compactación})$$

$$S = 205.44, R^2 = 39.10\% \text{ y } R^2 = 34\%$$

Las emisiones de metano se explican sólo en 34% por características del suelo.

Para óxido nitroso se consideraron dos modelos:

$$\text{Óxido nitroso} = - 258 + 684 (\text{Densidad Aparente})$$

$$S = 162.80 \text{ y } R^2 = 21\%$$

$$\text{Óxido nitroso} = 623 - 1.29 (\text{Permeabilidad del Aire})$$

$$S = 164.68 \text{ y } R^2 = 19\%$$

La densidad aparente y la permeabilidad del aire, explican la variabilidad del óxido nitroso en 21% y 19%, respectivamente.

Para dióxido de carbono, no se encontraron variables de suelo que se relacionaran con los flujos.

4.1.2 Flujos Acumulados de Gases de Efecto Invernadero

Se presentan los flujos acumulados anuales, para conocer los balances netos de los gases de CH₄, CO₂ y N₂O en cada uno de los tratamientos. Los flujos acumulados fueron calculados a partir de los flujos de gases de efecto invernadero (Figura 13), de julio 2005 a junio 2006, para los tratamientos de TQ, SAQ <2, SAQ 5-7, SAQ >10 y BS y expresados en mg m⁻² año⁻¹ para CH₄ y N₂O y kg m⁻² año⁻¹ para CO₂, considerando parcelas fertilizadas y no fertilizadas (Figura 23).

4.1.2.1 Flujos Acumulados de Metano

Los acumulados de metano (Figura 23 a) muestran claramente que TQ es el único de los cinco tratamientos del estudio, que es emisor neto de metano. Los otros tratamientos: SAQ <2, SAQ 5-7, SAQ >10 y BS son sumideros netos de metano. No se observaron diferencias entre las parcelas fertilizadas y no fertilizadas. Los flujos acumulados de metano tuvieron un amplio rango, con una emisión de 176.81 mg CH₄ m⁻² año⁻¹ para TQ fertilizado y un sumidero de -180.05 mg CH₄ m⁻² año⁻¹ en el SAQ <10 fertilizado. De las tres edades del SAQ, los mayores sumideros de CH₄ se encontraron en el SAQ >10, seguido por el SAQ <2 y SAQ 5-7. El BS también es sumidero a un nivel similar al de SAQ 5-7.

En el caso de los flujos acumulados de metano, SAQ 5-7 nuevamente difiere de SAQ <2 y SAQ >10. El origen de estas diferencias se podría encontrar en las propiedades físicas, químicas o biológicas de las parcelas utilizadas en el muestreo, como se observa en la Figura 23, donde los individuos de SAQ 5-7 forman un grupo que difiere del otro grupo de individuos que se forma.

Los flujos anuales acumulados de CH₄ en este estudio, son similares a los reportados en Perú e Indonesia: con bosque -350 mg CH₄ m⁻² año⁻¹, agroforestería -292 mg CH₄ m⁻² año⁻¹, cultivos con bajos insumos -234 mg CH₄ m⁻² año⁻¹ y cultivos con altos insumos 175 mg CH₄ m⁻² año⁻¹ (Murdiyarso *et al.* 2002).

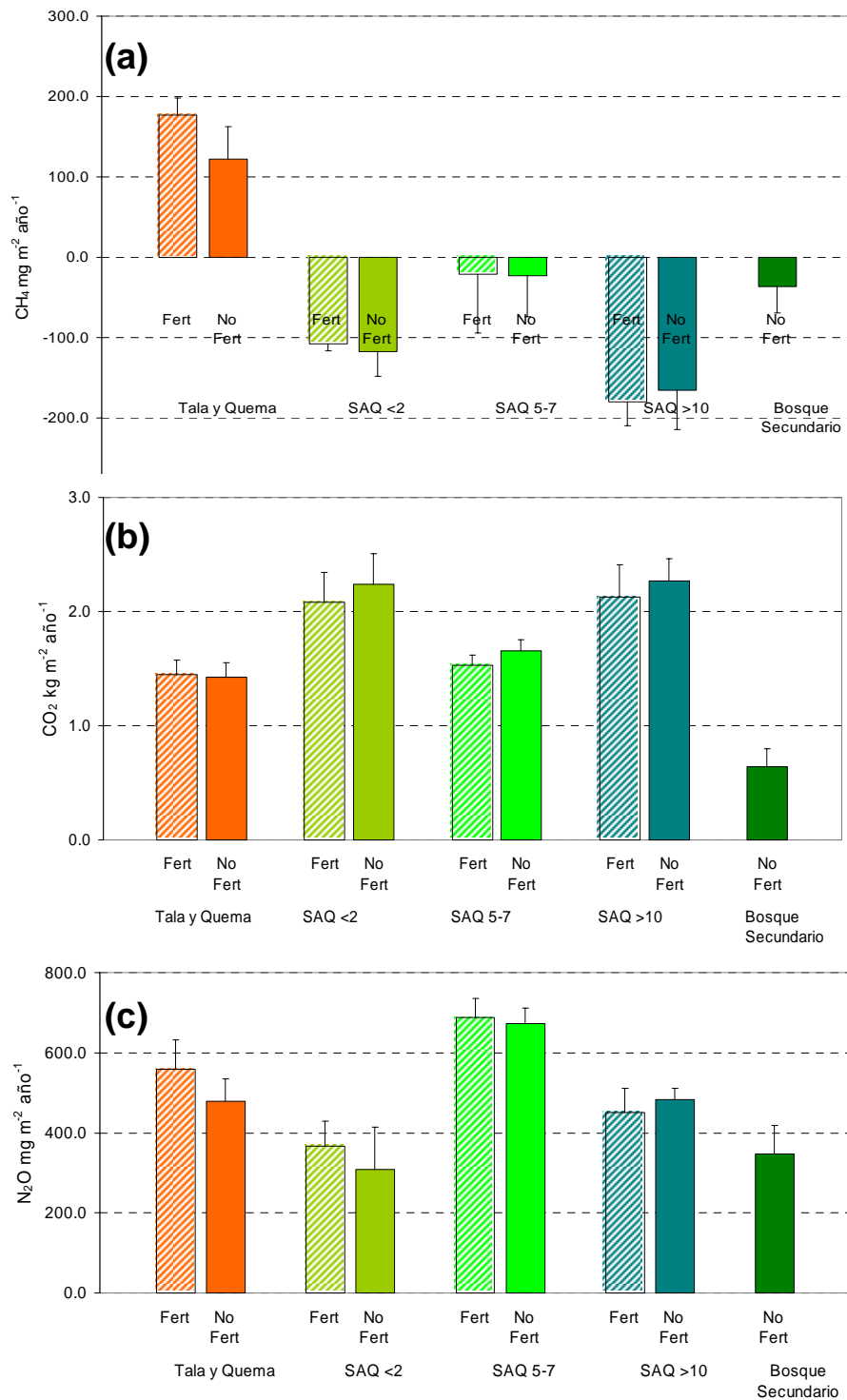


Figura 23. Flujos acumulados anuales de gases de efecto invernadero: (a) CH₄, (b) CO₂ y (c) N₂O, en cinco tratamientos y dos niveles de fertilización, en el estudio de GEI en sur de Lempira, Honduras. Barras de error representan desviación estándar de la media.

4.1.2.2 Flujos Acumulados de Dióxido de Carbono

En los acumulados de dióxido de carbono (Figura 23 b), se observa que todos los tratamientos son emisores de CO₂. Las emisiones más altas están en SAQ >10 y SAQ <2, seguidos por SAQ 5-7 y TQ y con la menor emisión neta, el BS. Para los flujos acumulados para CO₂, no se observaron diferencias entre fertilizado y no fertilizado. Las emisiones de dióxido de carbono estuvieron en un rango entre 2.27 kg CO₂ m⁻² año⁻¹ en SAQ <10 no fertilizado y 0.64 kg CO₂ m⁻² año⁻¹ en el BS. Nuevamente, las emisiones de N₂O del tratamiento SAQ 5-7 difieren de las emisiones de las otras edades del SAQ.

En el estudio llevado a cabo en Perú e Indonesia, el flujo de CO₂ acumulado que se reporta para bosque y agroforestería es de 1.75 kg CO₂ m⁻² año⁻¹ (Murdiyarso *et al.* 2002), valor muy cercano a los valores del SAQ en este estudio.

4.1.2.3 Flujos Acumulados de Óxido Nitroso

Los acumulados de N₂O (Figura 23 c) muestran que todos los tratamientos son fuentes netas de óxido nitroso. Claramente se observa que la mayor emisión se presenta en SAQ 5-7, seguido por TQ y SAQ <10. Las menores emisiones de N₂O están en SAQ <2 y BS. No se observaron diferencias entre fertilizado y no fertilizado. El rango de las emisiones varía desde 687.56 mg N₂O m⁻² año⁻¹ para SAQ 5-7 fertilizado a 307.4 mg N₂O m⁻² año⁻¹ en SAQ <2 no fertilizado. Nuevamente, SAQ 5-7 difiere de las otras dos edades del SAQ.

Los flujos acumulados de N₂O reportados para Perú e Indonesia, son bosque 69 mg N₂O m⁻² año⁻¹, agroforestería 96 mg N₂O m⁻² año⁻¹, cultivos con bajos insumos 207 mg N₂O m⁻² año⁻¹ y cultivos con alto insumo 344 mg N₂O m⁻² año⁻¹ (Murdiyarso *et al.* 2002). En los Llanos Orientales, el bosque tiene 150 mg N₂O m⁻² año⁻¹ y el cultivo de arroz 300 mg N₂O m⁻² año⁻¹ (Rondón, 2002). Algunos de los valores de flujos acumulados reportados en otros estudios son menores a los obtenidos en este estudio.

4.1.2.4 Análisis Estadístico de los Flujos Acumulados de Gases de Efecto Invernadero

En este estudio, al no tenerse una estructura factorial completa, la mejor forma de comparar los tratamientos es a partir de contrastes ortogonales (Tabla 7 y Anexo I).

Los contrastes que se utilizaron fueron:

- El primer contraste compara el BS con los otros sistemas
- El segundo contraste compara TQ versus SAQ, sin importar la edad
- El tercer contraste compara SAQ<2 versus otros SAQ (SAQ 5-7 y SAQ >10)
- El cuarto contraste compara el efecto de la fertilización

Tabla 7. Contrastes ortogonales de los flujos acumulados de CH₄, CO₂ y N₂O en estudio de GEI en sur de Lempira, Honduras. Ver Anexo F.

Contrastes ortogonales para CH ₄	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Pr > F
Bosque versus otros	30.09	30.09	0.00	0.98 NS
TQ versus SAQ	286124.69	286124.69	3.95	0.06 *
SAQ <2 versus otros SAQ	58161.36	58161.36	0.80	0.38 NS
SAQ 5-7 versus SAQ >10	10773.61	10773.61	0.15	0.70 NS
Fertilizado versus no fertilizado	996.52	996.52	0.01	0.90 NS

Contrastes ortogonales para CO ₂	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Pr > F
Bosque versus otros	3.90	3.90	11.33	0.003 ***
TQ versus SAQ	1.35	1.35	3.93	0.06 *
SAQ <2 versus otros SAQ	1.36	1.36	3.95	0.06 *
SAQ 5-7 versus SAQ >10	0.004	0.004	0.01	0.90 NS
Fertilizado versus no fertilizado	0.06	0.06	0.18	0.67 NS

Contrastes ortogonales para N ₂ O	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Pr > F
Bosque versus otros	62399.52	62399.52	2.82	0.11 NS
TQ versus SAQ	2653.80	2653.80	0.12	0.73 NS
SAQ <2 versus otros SAQ	309284.28	309284.28	13.98	0.001 ***
SAQ 5-7 versus SAQ >10	50468.86	50468.86	2.28	0.14 NS
Fertilizado versus no fertilizado	5710.33	5710.33	0.26	0.61 NS

4.2 POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL

4.2.1 PCG de TQ, SAQ y BS

El potencial de calentamiento global (PCG) es un valor que integra los balances de los gases de efecto invernadero y proporciona la contribución al calentamiento global de los diferentes usos de la tierra. El PCG se expresa en kg de equivalentes de CO₂. Para su cálculo se utilizan los flujos acumulados de CH₄, N₂O y las mediciones del Δ en el C orgánico del suelo o SOC (*Soil Organic Carbon*) y en el C acumulado en la biomasa arbórea (Tabla 8).

Tabla 8. PCG anual por fuente de emisión para TQ, SAQ y BS para un horizonte de tiempo de 20 años, en estudio de PCG en sur de Lempira, Honduras.

Fuente de emisiones	TQ		SAQ		BS	
	Flujo kg ha ⁻¹ año ⁻¹	Equivalente de CO ₂ kg año ⁻¹	Flujo kg ha ⁻¹ año ⁻¹	Equivalente de CO ₂ kg año ⁻¹	Flujo kg ha ⁻¹ año ⁻¹	Equivalente de CO ₂ kg año ⁻¹
Metano del Suelo ^a	1.62	116.38	0.46	-79.68	0.36	-28.05
Óxido nitroso del Suelo ^a	5.60	1736.54	0.74	1655.24	0.76	1163.48
Δ Almacenamiento de C del Suelo ^b	1014.55	3720.00	347.27	1273.33	0	0
Δ C en Biomasa Arbórea ^b	3433.64	12590.00	2095.45	7683.33	0	0
Metano por Termitas ^c	4.80E-04	0.03	3.63E-03	0.26	9.61E-04	0.07
Óxido nitroso por Termitas ^c	5.14E-07	1.59E-04	3.88E-06	1.20E-03	1.03E-06	3.19E-04
Metano por Quemas ^d	131.74	9485.57	0	0	0	0
Óxido nitroso por Quemas ^d	1.98	612.61	0	0	0	0
Dióxido de carbono por Quemas ^d	12680.36	12680.36	0	0	0	0
PCG [Total kg en equivalentes de CO₂]		40941.49		10532.50		1135.50

^a Para metano y óxido nitroso del suelo, se utilizaron los flujos acumulados en kg ha⁻¹ año⁻¹

^b Para Δ C acumulado en el suelo y en biomasa arbórea, se utilizó la tasa anual de pérdida del SOC y de la biomasa arbórea en ton ha⁻¹, considerando al BS como control (Tablas 26, 27 y 28)

^c Para metano y óxido nitroso por termitas, se consideraron las emisiones de las termitas subterráneas en kg ha⁻¹ año⁻¹ (Rondón, 2000) y la densidad de termitas en el SAQ (Pauli, 2006)

^d Para metano, óxido nitroso y dióxido de carbono por quema de biomasa, se calcularon con la biomasa seca que se corta y quema en ton ha⁻¹, C y N por hectárea y los factores de emisión.

Los resultados del potencial de calentamiento global (Figura 24), muestran claramente que el mayor valor de PCG está en TQ, seguido por el SAQ y el BS. Es importante destacar que el SAQ tiene un PCG 42% menor que TQ. El alto valor de PCG en TQ, nos indica que es un sistema con altas emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global y por lo tanto, no es amigable con el ambiente. El BS tiene un PCG muy bajo, por ser un sistema en equilibrio y no disturbado. El SAQ también tiene un nivel bajo de PCG, si se compara con TQ. El SAQ se presenta como una alternativa en la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, ante el sistema tradicional de TQ.

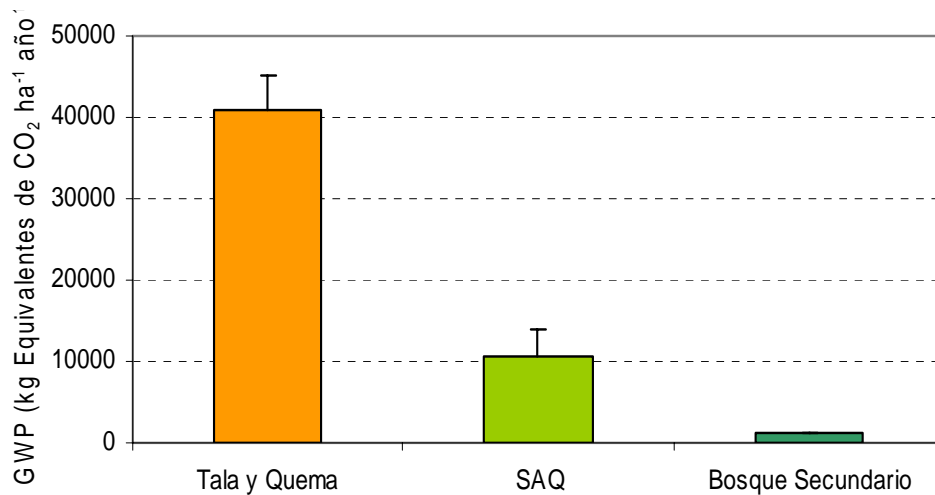


Figura 24. PCG de TQ, SAQ y BS, para horizonte de tiempo de 20 años en estudio de PCG en sur de Lempira, Honduras. Barras de error representan la desviación estándar de la media.

4.2.2 Almacenamiento de Carbono

El carbono almacenado en el suelo en diferentes tratamientos y profundidades (Figura 25), muestra que los niveles más altos de acumulación de C están en el SAQ >10, seguido por el BS, SAQ 5-7 y TQ, estos últimos poseen niveles de C similares entre sí. Los menores niveles de C acumulado en el suelo se encuentran en el SAQ <2. Es importante destacar el aumento del C acumulado a mayor edad del SAQ. Se puede considerar que uno de los mayores beneficios ambientales que aporta el SAQ es el secuestro de carbono, en el suelo como en la biomasa.

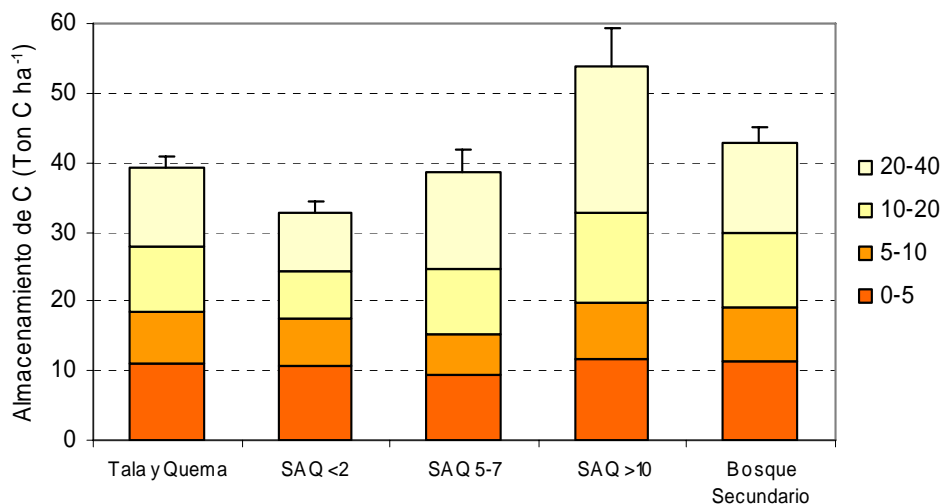


Figura 25. Almacenamiento de C en el suelo en diferentes usos de la tierra y profundidades en el estudio de PCG en sur de Lempira, Honduras.

Al considerar la acumulación de C en la parte aérea (biomasa arbórea) y en la subterránea (SOC) (Figura 26), se observan las diferencias entre los sistemas. El BS presenta el mayor almacenamiento de C acumulado en la biomasa arbórea, seguido por SAQ de diferentes edades y por último TQ, con menores valores de C. A nivel general, SAQ >10 tiene valores muy similares de almacenamiento de C con el BS.

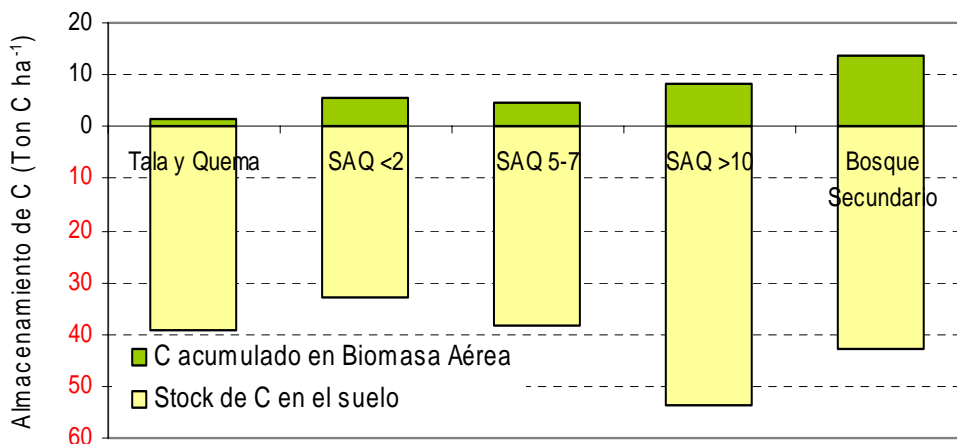


Figura 26. Almacenamiento de C en el suelo y en la biomasa arbórea en los diferentes usos de la tierra en el estudio de PCG en sur de Lempira, Honduras

Para el cálculo del PCG, se utilizó la tasa promedio anual de cambio de los tratamientos, en relación al BS (Figura 27), tanto en el almacenamiento de C en el suelo (SOC) como el C acumulado en la biomasa arbórea.

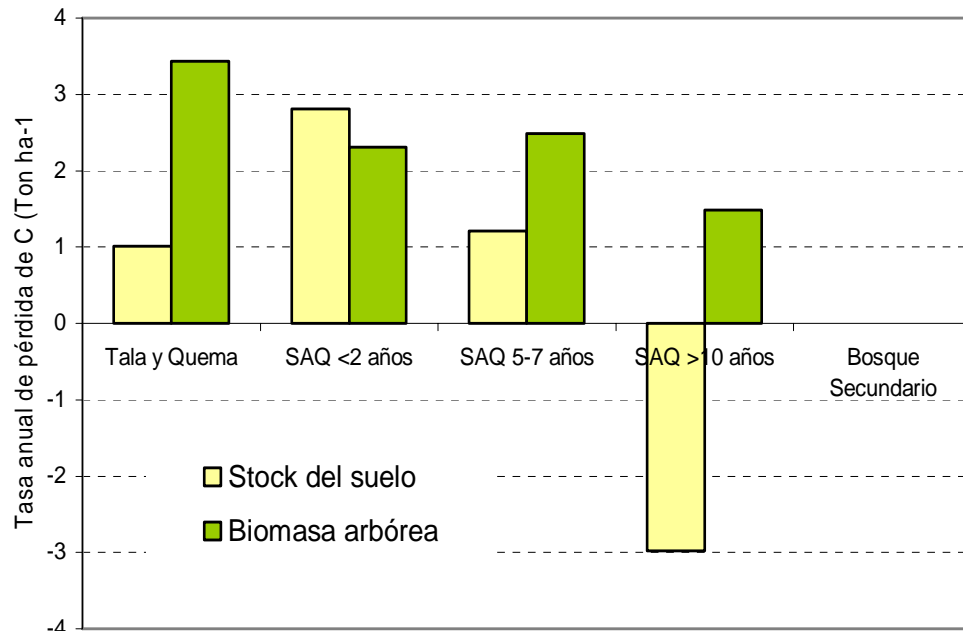


Figura 27. Tasa anual de pérdida de C en el suelo y en biomasa arbórea, considerando al BS como control, en el estudio de PCG en sur de Lempira, Honduras. Datos negativos representan un incremento de C.

Las tasas anuales de pérdida se expresaron en toneladas de C por hectárea. Los resultados muestran que en TQ se pierde anualmente 1 ton ha⁻¹ de C del suelo y 3.5 ton ha⁻¹ de C, por la eliminación de la biomasa arbórea.

Respecto al SAQ, en el SAQ <2 existe una pérdida de casi 3 ton ha⁻¹ y más de 2 ton ha⁻¹ en la biomasa arbórea. En SAQ 5-7, se pierden más de 1 y 2.5 ton ha⁻¹ en el almacenamiento del suelo y en la biomasa arbórea, respectivamente. En SAQ >10, se pierde 1.5 ton ha⁻¹ en la biomasa aérea, pero se presenta un incremento del SOC de 3 ton ha⁻¹, respecto al BS.

4.2.3 Extrapolación del PCG al Sur de Lempira, Honduras

La región del Sur de Lempira, Honduras se compone de 12 municipios (Figura 28): Candelaria, Gualcinse, Virginia, Piraera, Mapulaca, La Virtud, Valladolid, Tomalá, Tambla, Guarita, San Juan Guarita y Cololaca, con un área de 1143 km², una población de 67000 habitantes y una densidad poblacional de 59. En estos municipios, la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) intervino en 1992 y como una de las actividades, se implementó el Sistema Agroforestal Quesungual por el Proyecto Lempira Sur (FAO, 2004).

Actualmente, se estima que 6000 productores en 7000 hectáreas han adoptado el SAQ (Wélchez *et al.*, 2006), aunque el área total con SAQ no se conoce con certeza. La mayor adopción del SAQ se presenta en el municipio de Candelaria; en los otros municipios, el nivel de adopción del SAQ varía.

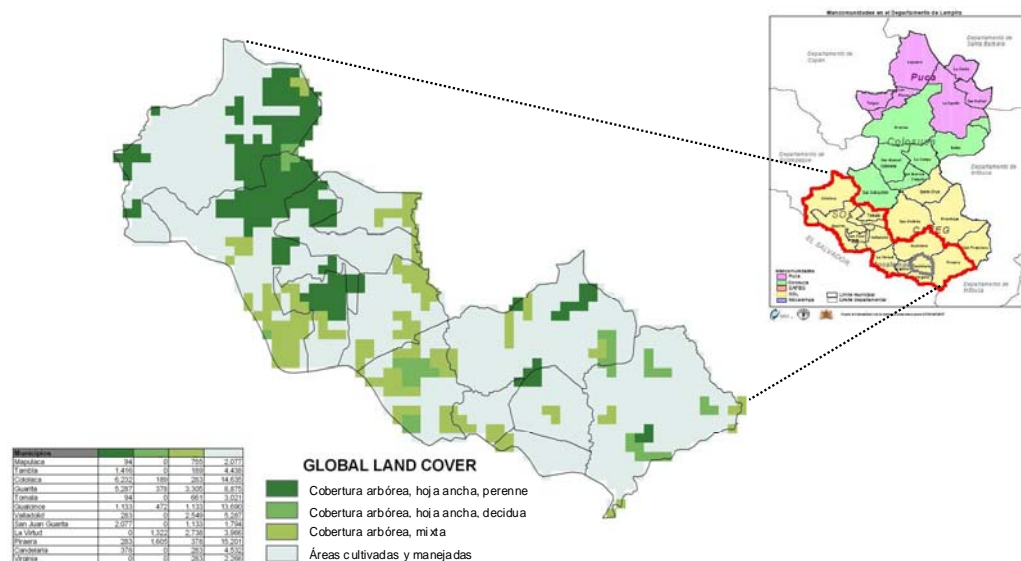


Figura 28. Mapa de uso de la tierra del área a extrapolar en el estudio de PCG en sur de Lempira, Honduras.

Se recopiló información del número de hectáreas con quema en la región y del porcentaje de otras coberturas presentes en la región, en este caso, las pasturas y los cultivos (sin quema ni agroforestería) (PASOLAC, 2005).

Con esta información, se obtuvo el porcentaje de las coberturas de la región del sur de Lempira para el año 2006 (Figura 29). El Bosque (31%), las Pasturas (30%) y los Cultivos (28%) fueron las coberturas más frecuentes, seguido por el SAQ (10%) y por último el sistema tradicional de TQ, el cual se ha reducido en los últimos años hasta un 1%.

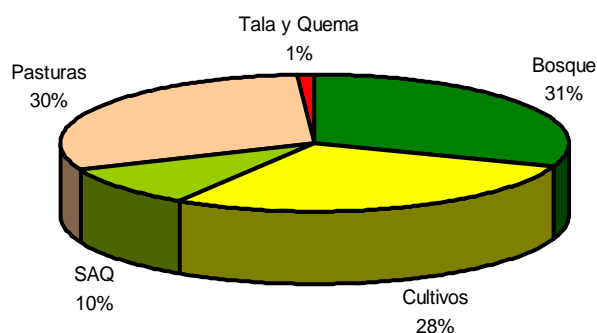


Figura 29. Uso de la tierra en % para el sur de Lempira, Honduras en el año 2006.

4.2.3.1 Balance de los Gases de Efecto Invernadero

Para determinar en el suelo, las contribuciones de las coberturas al balance de los flujos de CH₄ y N₂O (Tabla 9), se utilizó el área de cada cobertura y la tasa anual de emisión en g ha⁻¹ año⁻¹, lo que resulta en la emisión total de metano y óxido nitroso en ton año⁻¹ del suelo del sur de Lempira.

Tabla 9. Contribución de usos de tierra al balance de CH₄ y N₂O del suelo en estudio de PCG en sur de Lempira, Honduras

Cobertura	% del área	Área ha	Tasa de emisión CH ₄ g ha ⁻¹ año ⁻¹	Emisión anual de CH ₄ ton	Tasa de emisión N ₂ O g ha ⁻¹ año ⁻¹	Emisión anual de N ₂ O ton
Bosque	30.47	34839	-389.57	-13.57	3753.16	130.76
Cultivos ^a	28.47	32552	-1217.10	-39.62	3638.27	118.43
SAQ	9.62	10999	-1106.61	-12.17	5339.50	58.73
Pasturas ^a	30.44	34805	1915.00	66.65	1266.00	44.06
TQ	1.00	1143	1616.38	1.85	5601.73	6.40
Total Sur de Lempira	100.00	114338	27.42	3.14	3134.45	358.39

^a Para Cultivos y Pasturas, se utilizaron tasas de emisión referenciadas por Rondón, 2000

Los componentes que afectan el balance de gases de efecto invernadero en el sur de Lempira, son el suelo, las quemas, el ganado y las termitas. Para cada uno de estos actores, se determinaron los flujos netos de CH₄ y N₂O en ton año⁻¹, tomando el área que cada componente afecta (Tabla 10), obteniéndose el flujo total de metano y óxido nitroso para el Sur de Lempira, en Tg año⁻¹.

Tabla 10. Flujos totales anuales de CH₄ y N₂O, por factor contribuyente en el estudio de PCG en sur de Lempira, Honduras.

Factor contribuyente	Flujo de CH ₄ g ha ⁻¹ año ⁻¹	Flujo de N ₂ O g ha ⁻¹ año ⁻¹	Área total afectada en ha	Flujo neto de CH ₄ ton año ⁻¹	Flujo neto de N ₂ O ton año ⁻¹
Suelo	-27.42	3134.45	114338	-3.14	358.39
Quemas	131744.00	1976.16	1143	150.63	2.26
Efecto en suelo de quemas	1616.38	5601.73	1143	1.85	6.40
Ganado	17850	0	11434	204.09	0
Termitas	4.368	4.68E-03	72033	0.31	3.37E-04
Total Sur de Lempira			114338	353.76	367.05
Flujo Total Sur de Lempira Tg/año				3.54E-04	3.67E-04

4.2.3.2 Proyecciones

Se realizó una proyección en el tiempo del comportamiento del PCG en la región del sur de Lempira, de acuerdo al cambio en el uso de la tierra. Con datos históricos del uso de la tierra (PASOLAC, 2005), se realizó una proyección del uso de la tierra para el año 2026 (Figura 30), donde TQ desaparece y el SAQ se incrementaría a más de 20%. BS se mantiene constante durante todo el período.

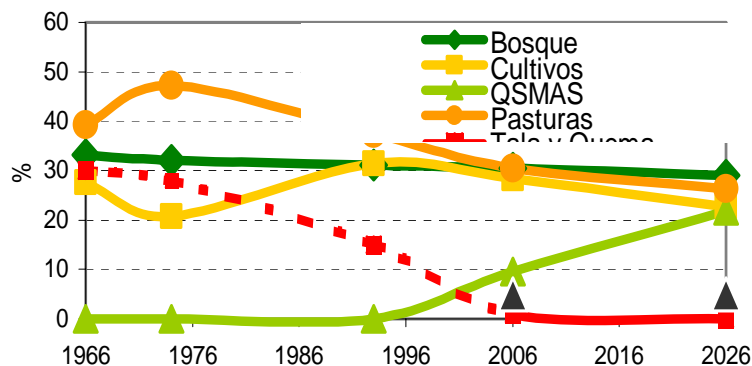


Figura 30. Tendencia en el tiempo en el uso de la tierra en el sur de Lempira, Honduras. Datos históricos de 1965 a 2006. Proyección a 2026.

Se determinó el PCG de las diferentes coberturas para la región del sur de Lempira, incluyendo las coberturas de Cultivo y Pasturas (Figura 31), utilizando dos horizontes de tiempo: 20 y 100 años.

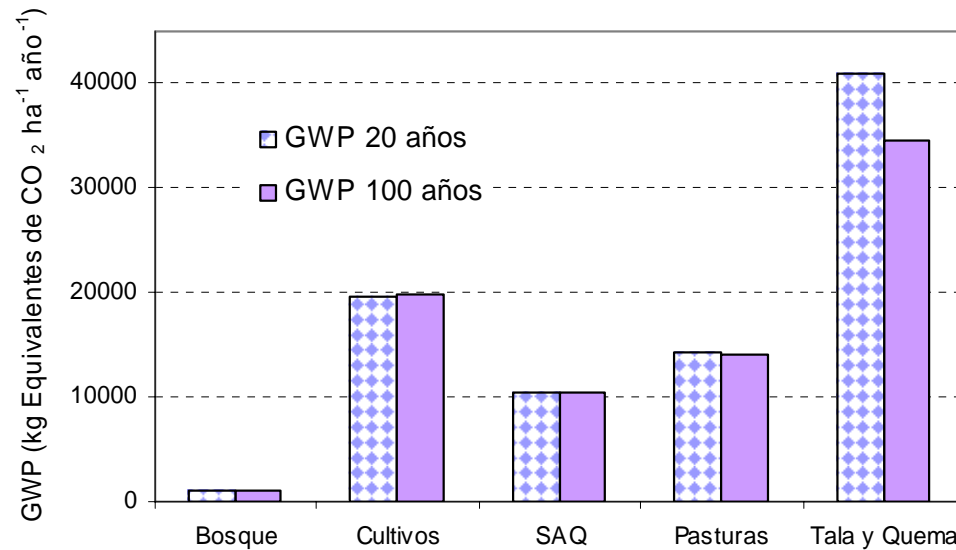


Figura 31. PCG para los diferentes usos de la tierra en el sur de Lempira, Honduras, para los horizontes de tiempo de 20 y 100 años.

Con base al uso actual de la tierra (año 2006) y las proyecciones para el año 2026, y los valores de PCG de las diferentes coberturas calculado a un horizonte de 20 años, se calculó los valores de PCG integrados de la región del sur de Lempira, en Tg de Equivalentes de CO₂ (Tabla 11).

Tabla 11. PCG integrado para el sur de Lempira, Honduras, con el uso de la tierra actual y el proyectado, para un horizonte de tiempo de 20 años. Valores de PCG integrados están expresados en Tg de Equivalentes de CO₂.

Uso de la Tierra	2006	2026	PCG 20 años	2006	2026
	Área ha	Área ha	kg equivalentes CO ₂ ha ⁻¹	PCG integrado	PCG integrado
Bosque	34839	33233	1135.75	0.04	0.04
Cultivos	32552	25940	19721.96	0.64	0.51
SAQ	10999	25000	10532.55	0.12	0.26
Pasturas	34805	30165	14248.26	0.50	0.43
TQ	1143	0	40941.77	0.05	0
Total Sur de Lempira	114338	114338		1.34	1.24

Para calcular el efecto del uso de la tierra actual y el proyectado para el 2026 en el sur de Lempira, se utilizó un horizonte de 20 años (Figura 32).

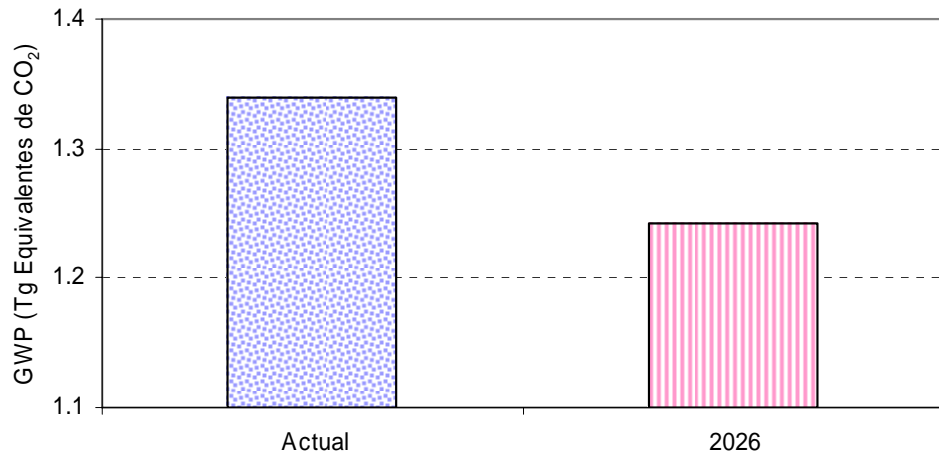


Figura 32. PCG integrado actual y proyectado a 20 años para el sur de Lempira, Honduras, expresado en Tg de equivalentes de CO₂.

Al realizar la proyección a 20 años, del PCG del sur de Lempira, de acuerdo a los cambios en el uso de la tierra supuestos y los registros históricos, se estima una disminución de 0.10 Tg de equivalentes de CO₂. Esta disminución en el PCG podría ser más alta, pero los valores de PCG más determinantes están en TQ, el cual ha sido una práctica que ha ido desapareciendo de la región del sur de Lempira y actualmente representando solo el 1% del área total.

4.3 EVALUACIÓN DE EMERGÍA

4.3.1 DIAGRAMAS

Los diagramas de los sistemas TQ, SAQ y BS (Figuras 33, 34 y 35), indican los principales componentes e interacciones de cada uno de los sistemas.

En los diagramas de los sistemas de TQ, SAQ y BS se observan las entradas de la naturaleza, como la luz del sol, la lluvia y las semillas, los cuales son recursos renovables y obtenidos localmente; y las entradas de la economía, como los suministros (insumos) y la mano de obra, los cuales son recursos importados no renovables. También se observan los dispositivos de almacenamiento de energía, como el suelo, las semillas y el dinero que guardan los productores como producto de transacciones. Las salidas de los sistemas, se presentan como: (i) Suelo Erosionado, el cual se considera como un recurso no renovable, (ii) Pérdida de energía (por entropía) y (iii) en la Producción de los sistemas (productos exportados) como maíz, frijol y leña, entre otros.

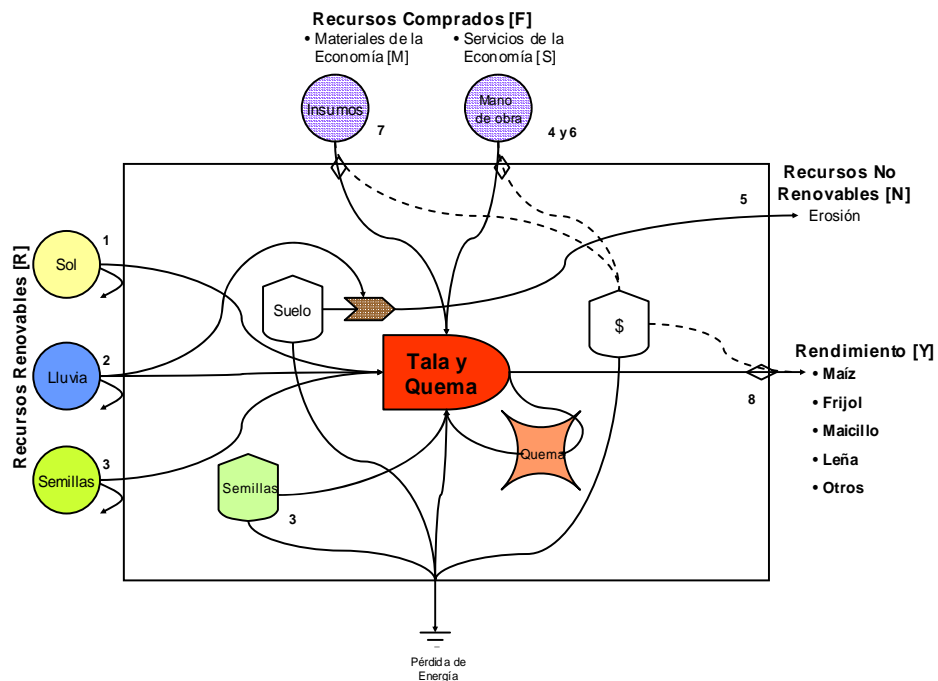


Figura 33. Diagrama de TQ en el estudio de emergía en sur de Lempira, Honduras.

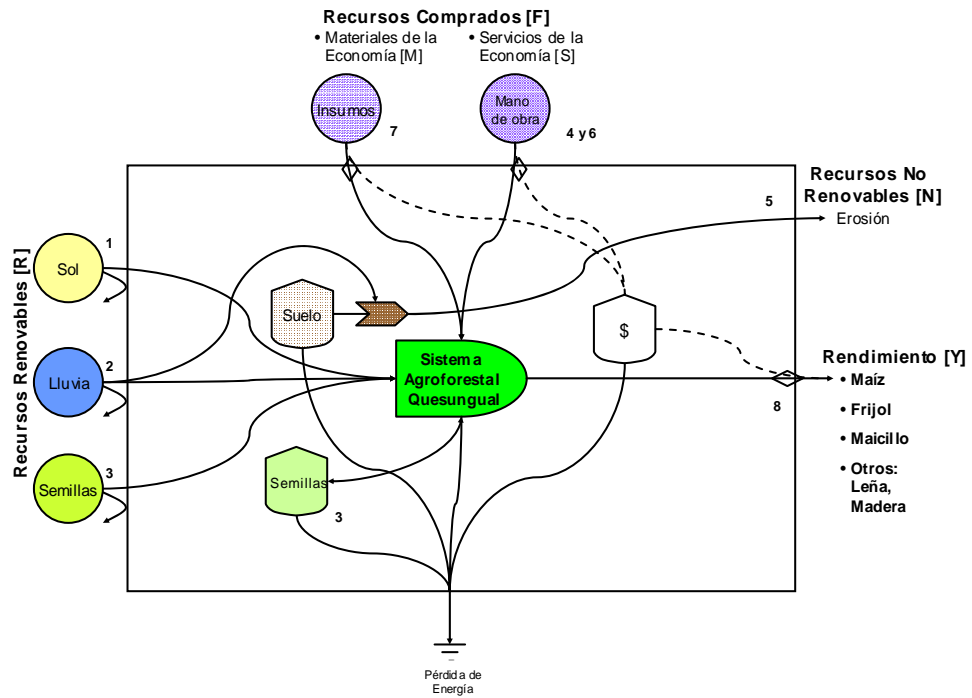


Figura 34. Diagrama del SAQ en el estudio de emergía en sur de Lempira, Honduras.

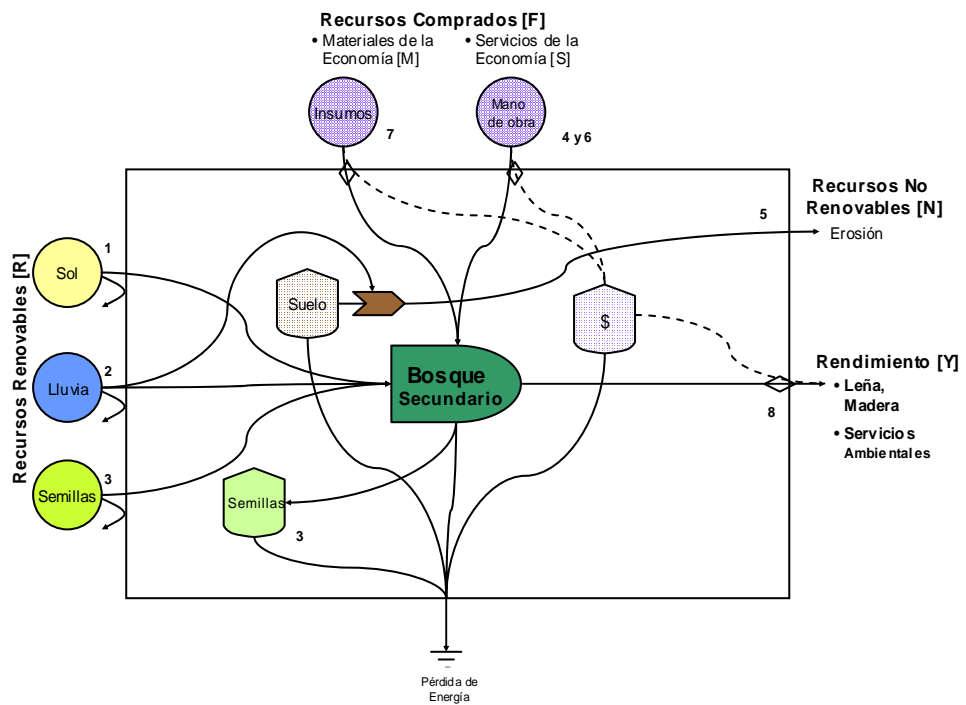


Figura 35. Diagrama del BS en el estudio de emergía en sur de Lempira, Honduras.

En la Evaluación de Emergía (Tablas 12, 13 y 14) se presentan los valores de energía, transformicidades, emergía por año y hectárea, emdólares (Em\$) y los flujos de energía de cada uno de los sistemas, especificándose los Recursos Renovables, No Renovables y los Comprados, los cuales fueron identificados en los anteriores diagramas de los sistemas (Figuras 33, 34 y 35). Los detalles de los cálculos y referencias de emergía se incluyen en los Anexos B, C y D.

Tabla 12. Evaluación de Emergía en TQ en sur de Lempira, Honduras. Datos para el año 2006. Para detalles de cálculos ver Anexo B.

Nota	Ítem	Unidad	Valor	Transformicidad ²	Emergía	Emergía	Em\$
			unidad/ año	sej/ unidad	sej/ año	sej/ha/año E13	2006 \$/año ¹
RECURSOS RENOVABLES							
1	Luz Solar	J	1.97E+12	1.00E+00	1.97E+12	6.55	3.88
2	Lluvia	J	2.22E+09	1.82E+04	4.05E+13	134.86	79.80
3	Semillas	J	6.59E+03	3.64E+05	2.40E+09	0.01	0.005
4	Mano de obra (renovable)	h	5.60E+01	6.99E+12	9.04E+12	30.14	17.83
	<i>Máximo de entradas renovables [R]</i>				4.05E+13	134.86	
RECURSOS NO RENOVABLES							
5	Suelo Erosionado [N]	J	3.60E+08	6.25E+04	2.25E+13	74.92	44.33
	<i>Suma de entradas renovables y no renovables [I]</i>				6.29E+13	209.78	
RECURSOS COMPRADOS							
Entradas de servicios							
6	Mano de obra (no renovable) [S]	h	5.60E+01	6.99E+12	2.70E+12	9.00	5.33
Entradas de materiales							
7	Suministros [M]	\$	5.45E+00	1.88E+12	1.02E+13	1.02	0.61
	<i>Suma de entradas compradas [F]</i>				1.29E+13	10.03	
	<i>Emergía Total [Y]</i>				7.59E+13	219.81	
RECURSOS EXPORTADOS							
8	Productos múltiples	J	2.79E+08			0.001	0.003

¹1.69E13, en sej/\$: Índice Nacional Monetario de Emergía para Honduras, 2000, Sahel Project-UFL

²sej: solar emjoule o emjulio solar

En TQ (Tabla 12), el suelo erosionado tiene un valor de emergencia alto, con 74.92E13 sej/ha/año, en comparación con SAQ y BS, con 10.20E13 y 0.63E13 sej/ha/año, respectivamente (Tabla 13 y 14).

Tabla 13. Evaluación de Emergencia en SAQ en sur de Lempira, Honduras. Datos para el año 2006. Para detalles de cálculos ver Anexo C.

Nota	Ítem	Unidad	Valor	Transformicidad ²	Emergencia	Emergencia	Em\$
			unidad/ año	sej/ unidad	sej/ año	sej/ha/año E13	2006 \$/año ¹
RECURSOS RENOVABLES							
1	Luz Solar	J	1.97E+12	1.00E+00	1.97E+12	6.55	3.88
2	Lluvia	J	2.22E+09	1.82E+04	4.05E+13	134.86	79.80
3	Semillas	J	6.59E+03	3.64E+05	2.40E+09	0.01	0.005
4	Mano de obra (renovable)	h	4.50E+01	6.99E+12	7.27E+12	24.22	14.33
	<i>Máximo de entradas renovables [R]</i>				4.05E+13	134.86	
RECURSOS NO RENOVABLES							
5	Suelo Erosionado [N]	J	4.90E+07	6.25E+04	3.06E+12	10.20	6.03
	<i>Suma de entradas renovables y no renovables [I]</i>				4.35E+13	145.06	
RECURSOS COMPRADOS							
Entradas de servicios							
6	Mano de obra (no renovable) [S]	h	4.50E+01	6.99E+12	2.17E+12	7.23	4.28
Entradas de materiales							
7	Suministros [M]	\$	5.45E+00	1.88E+12	1.02E+13	1.02	0.61
	<i>Suma de entradas compradas [F]</i>				1.24E+13	8.26	
	<i>Emergencia Total [Y]</i>				5.59E+13	153.32	
RECURSOS EXPORTADOS							
8	Productos múltiples	J	4.74E+09			0.02	0.01

¹1.69E13, en sej/\$: Índice Nacional Monetario de Emergencia para Honduras, 2000, Sahel Project-UFL

²sej: solar emjoule o emjulo solar

En los tres sistemas, la Lluvia, proporciona valores de emergía de 134.86E13 sej/ha/año, seguido de Luz solar y Semillas, con 6.55E13 y 0.01E13 sej/ha/año, respectivamente.

Tabla 14. Evaluación de Emergía en BS en sur de Lempira, Honduras. Datos para el año 2006. Para detalles de cálculos ver Anexo D.

Nota	Ítem	Unidad	Valor	Transformicidad ²	Emergía	Emergía	Em\$
			unidad/ año	sej/ unidad	sej/ año	sej/ha/año E13	2006 \$/año ¹
RECURSOS RENOVABLES							
1	Luz Solar	J	1.97E+12	1.00E+00	1.97E+12	6.55	3.88
2	Lluvia	J	2.22E+09	1.82E+04	4.05E+13	134.86	79.80
3	Semillas	J	6.59E+03	3.64E+05	2.40E+09	0.01	0.00
4	Mano de obra (renovable)	h	5.00E+00	6.99E+12	8.07E+11	2.69	1.59
	<i>Máximo de entradas renovables [R]</i>				4.05E+13	134.86	
RECURSOS NO RENOVABLES							
5	Suelo Erosionado [N]	J	3.01E+06	6.25E+04	1.88E+11	0.63	0.37
	<i>Suma de entradas renovables y no renovables [I]</i>				4.06E+13	135.49	
RECURSOS COMPRADOS							
Entradas de servicios							
6	Mano de obra (no renovable) [S]	h	5.00E+00	6.99E+12	2.41E+11	0.80	0.48
Entradas de materiales							
7	Suministros [M]	\$	5.45E+00	1.88E+12	1.02E+13	1.02	0.61
	<i>Suma de entradas compradas [F]</i>				1.05E+13	1.83	
	<i>Emergía Total [Y]</i>				5.11E+13	137.32	
RECURSOS EXPORTADOS							
8	Productos múltiples	J	5.16E+09			0.02	0.01

¹1.69E13, en sej/\$: Índice Nacional Monetario de Emergía para Honduras, 2000, Sahel Project-UFL

²sej: solar emjoule o emjulo solar

Con los datos de emergía (sej ha⁻¹ año⁻¹), se elaboró un diagrama de emergía por entrada (Figura 36), para comparar las entradas de cada uno de los sistemas.

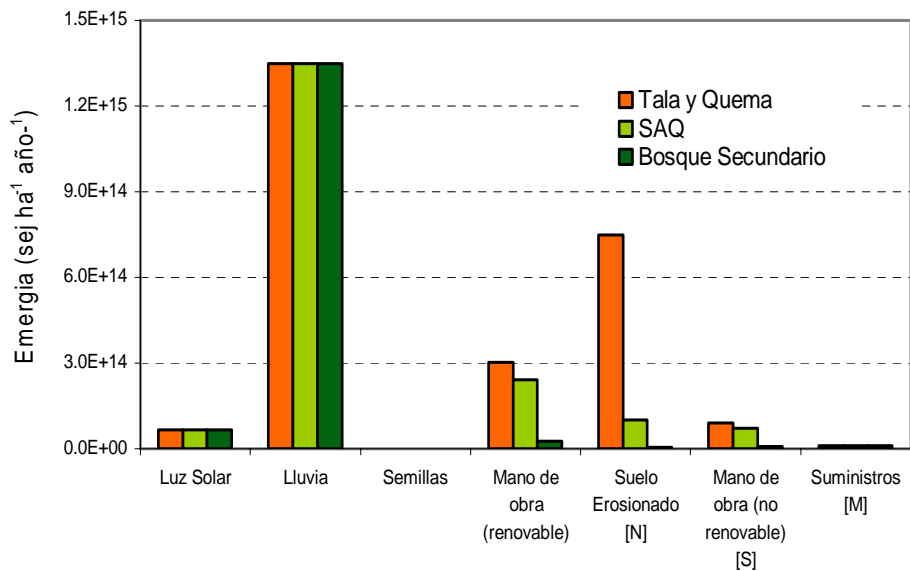


Figura 36. Diagrama de energía por entrada en los tres sistemas del estudio de energía en sur de Lempira, Honduras.

La Lluvia fue la entrada de energía que más influyó en los sistemas evaluados. En Suelo Erosionado se presentó la mayor diferencia entre los sistemas, seguido de Mano de Obra Renovable, y en ambos casos, TQ presentó los valores de energía más altos. Las variables de Suministros y Semillas, tuvieron valores mínimos.

En los diagramas totales de los sistemas TQ, SAQ y BS (Figuras 37, 38 y 39) permiten comparar las contribuciones de los flujos de entrada de energía renovables, no renovables y comprados, en cada uno de los sistemas.

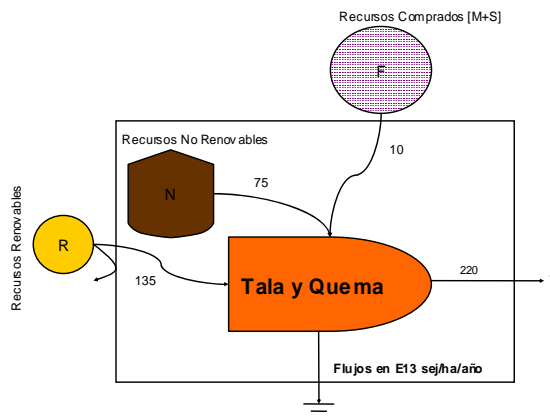


Figura 37. Diagrama total de TQ en estudio de energía en sur de Lempira, Honduras.

Tala y Quema (Figura 37) presentó los mayores valores en el uso de Recursos No Renovables y Comprados, con 75E13 y 10E13 sej/ha/año, respectivamente. Seguido de SAQ (Figura 38), con 10E13 y 5E13 sej/ha/año, respectivamente. Por último, el BS (Figura 39) tuvo niveles muy bajos, con 0.6E13 y 2E13 sej/ha/año, respectivamente. Los Recursos Comprados incluyen Insumos y Mano de Obra.

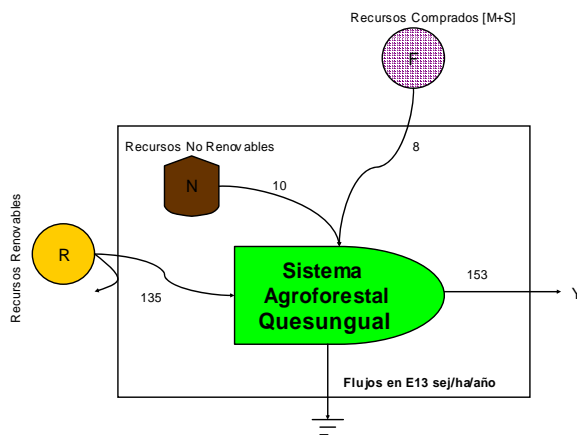


Figura 38. Diagrama total del SAQ en estudio de energía en sur de Lempira, Honduras.

Los flujos de entrada de energía de Recursos Renovables (Lluvia, Luz Solar y Semillas) fueron constantes en los tres sistemas, con 135E13 sej/ha/año. La mayor energía total (Y) se observó en el sistema de TQ, con 220E13 sej/ha/año, en SAQ fue de 153E13 y en BS fue de 137E13 sej/ha/año.

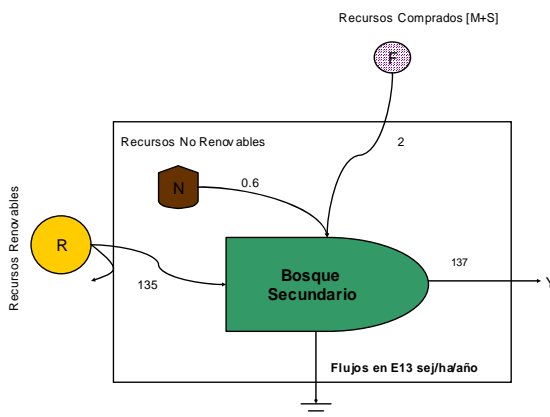


Figura 39. Diagrama total de BS en estudio de energía en sur de Lempira, Honduras.

4.3.2 ÍNDICES DE EMERGÍA

Los índices de emergencia (Tabla 15), se calcularon con los datos (Recursos Renovables, No Renovables y Comprados) de las tablas de evaluación de emergencia de los sistemas (Tablas 12, 13 y 14).

Tabla 15. Índices de Emergencia para los tres tratamientos del estudio de emergencia en sur de Lempira, Honduras.

No.	Índice	TQ	SAQ	BS
1	Flujo de Emergencia Renovable (sej/ha/año)	1.35E+15	1.35E+15	1.35E+15
2	Flujo de Emergencia No Renovable (sej/ha/año)	7.49E+14	1.02E+14	6.28E+12
3	Flujo de Emergencia Comprado (sej/ha/año)	1.00E+14	8.26E+13	1.83E+13
4	Densidad de Potencia de Emergencia (sej/ha/año)	2.20E+15	1.53E+15	1.37E+15
5	Radio de Producción de Emergencia	21.92	18.56	75.10
6	Radio de Inversión de Emergencia	0.05	0.06	0.01
7	Radio de Carga Ambiental	0.63	0.14	0.02
8	Índice de Emergencia Renovable Capturada	13.45	16.33	73.76
9	Fracción Renovable	0.61	0.88	0.98
10	Índice Monetario de Emergencia	130.06	90.72	81.25
11	Índice de Huella Ecológica	1.63	1.14	1.02
12	Índice de Sostenibilidad de Emergencia	34.80	135.63	4123.79

El Bosque Secundario presenta el mayor Radio de Producción y el menor Radio de Inversión. Tala y Quema presenta la mayor carga sobre el ambiente, como lo indica el mayor valor en el Radio de Carga Ambiental y en el Índice de Huella Ecológica. La mayor presión sobre el ambiente, está relacionada con el menor uso de recursos renovables, como lo demuestra en el bajo valor en el Índice de Emergencia Renovable Capturada y en la Fracción Renovable. De acuerdo al Índice de Sostenibilidad, el SAQ es un sistema más sostenible que el sistema tradicional de TQ. El BS presenta el mayor índice de sostenibilidad (Tabla 15 y Figuras 40 y 41).

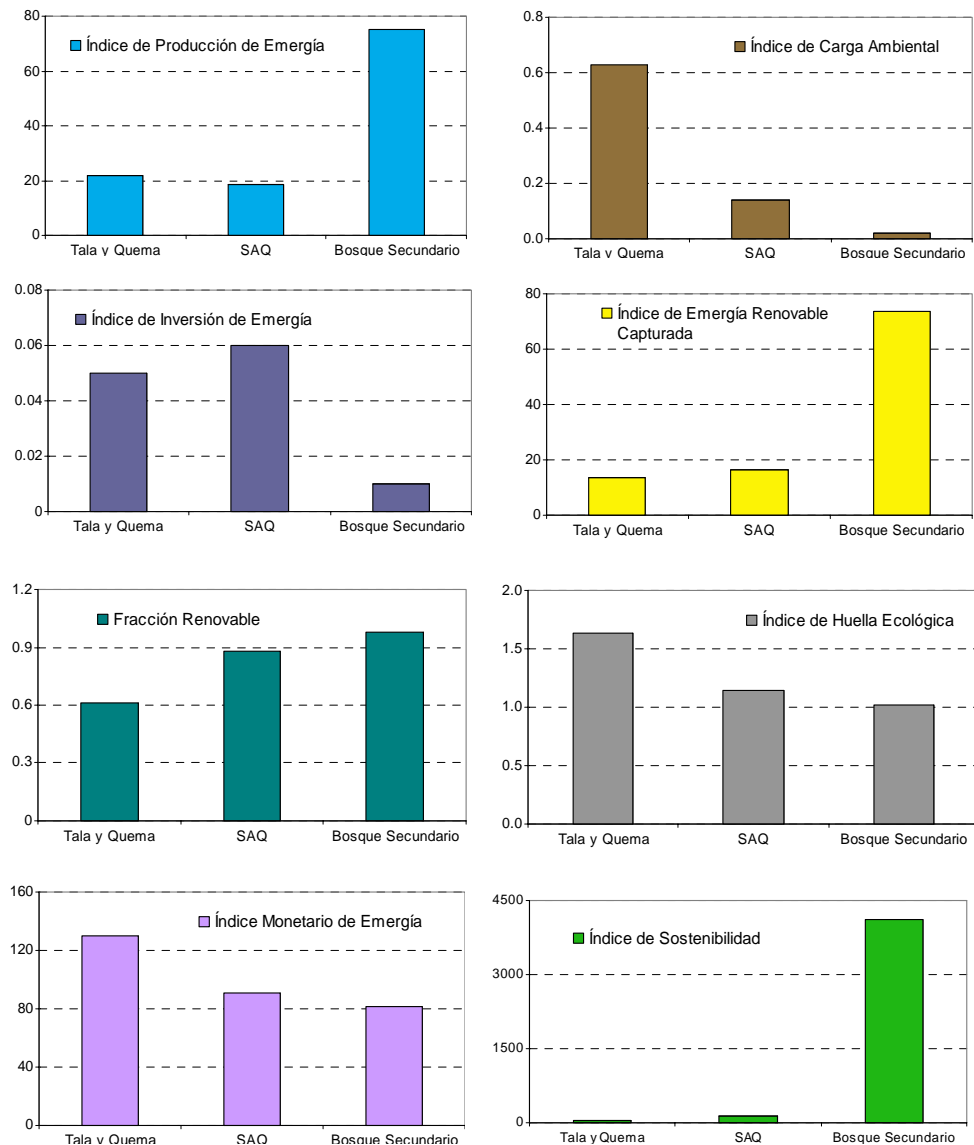


Figura 40. Índices de energía para los tres sistemas en el estudio de energía en sur de Lempira, Honduras.

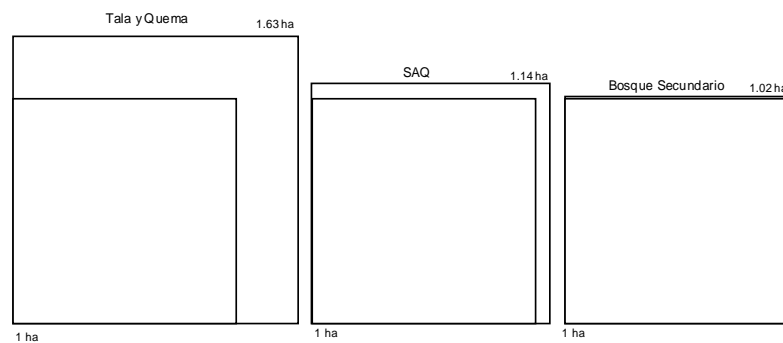


Figura 41. Ilustración de la Huella Ecológica de Energía en los tres sistemas en el estudio de energía en sur de Lempira, Honduras.

5. CONCLUSIONES

Los flujos de gases de efecto invernadero tuvieron un comportamiento estacional, observándose mayores emisiones en la época lluviosa.

El SAQ y el BS fueron sumideros netos de metano. La única fuente neta de metano fue TQ, siendo el metano un buen indicador de un manejo adecuado del suelo y de sistemas poco disturbados.

Las variables del suelo que más influyeron sobre el comportamiento de los flujos de CH₄, son el pH y la susceptibilidad a la compactación. Para el N₂O, son la densidad aparente, la porosidad total y la permeabilidad del aire.

El SAQ presentó un PCG menor que el sistema de TQ, el cual posee altas emisiones de gases de efecto invernadero.

La región del sur de Lempira, no está influyendo negativamente en los balances regionales de los gases de efecto invernadero, ya que se favorece usos de la tierra más amigables al ambiente como el BS y el SAQ.

El SAQ y el BS presentaron valores similares de almacenamiento de carbono en el suelo y en biomasa de los árboles, destacándose la progresiva acumulación de C al aumentar la edad del SAQ.

El SAQ es un sistema sostenible, que favorece ampliamente el uso de recursos renovables y locales. Por el contrario, el sistema de TQ afecta los recursos y presenta un índice de sostenibilidad bajo.

Se observaron mayores beneficios ambientales y ventajas del SAQ sobre el sistema tradicional de TQ.

6. RECOMENDACIONES

Difundir el SAQ con sus principios de manejo, los cuales permiten reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero.

Favorecer el uso del SAQ en la región del sur de Lempira, como una alternativa de uso de la tierra ambientalmente amigable, con capacidad de asegurar la seguridad alimentaria y al mismo tiempo proteger los recursos naturales de la región.

Validar el SAQ en otras áreas con condiciones biofísicas y socioeconómicas similares, eliminando los sistemas de TQ, por las múltiples desventajas ambientales que presenta. Proteger los recursos forestales de la región, por los importantes bienes y servicios que brindan.

Evitar el uso de la ganadería en el sistema, ya que ésta provoca disturbios en los suelos frágiles de las laderas y su respiración es una fuente importante de metano.

Implementar políticas y normativas que permitan el uso adecuado de los recursos naturales de la región, incluyendo sanciones contra la tala y la quema.

Gestionar proyectos para incentivar el pago por los servicios ambientales del SAQ, como la captura de carbono y la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero, considerando a los beneficiarios directos e indirectos en la cuenca binacional del río Lempa.

Determinar el balance de los flujos de gases de efecto invernadero en otros sitios de validación del SAQ para comparar el efecto de nuevos componentes adaptados en cada sitio.

7. BIBLOGRAFÍA

- Boeckx P., Cleemput O., Villaralvo I. 1997. Methane oxidation in soils with different textures and land use. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 49. pp. 91-95
- Bronson K., Mosier A. 1994. Suppression of methane oxidation in aerobic soil by nitrification inhibitors. *Biology and Fertility Soils* 17. pp. 263-268
- Cambio climático global: Efecto invernadero. BBC Mundo.
<http://www.bbc.co.uk/spanish/especiales/clima>. 30-03-2008
- Conrad S. 1995. Soil microbial processes involved in production and consumption of atmospheric trace gases. *Advances in Microbial Ecology* 14, pp. 207-250
- Delmas R. 1997. Tropical sources and sinks of traces gases. NATO Advanced Study Institute. pp. 72.
- Diemont S., Martin J., Levy S. 2006. Emergy evaluation of Lacandon Maya indigenous swidden agroforestry in Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems* 66. pp. 23-42
- Dixon R. 2004. Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gases?. *Agroforestry Systems* 31. pp. 99-116
- Dusenbury M., Engel R., Miller P., Lemke R., Wallander R. 2008. Nitrous oxide emissions as influenced by nitrogen management and cropping systems. *Journal of Environmental Quality* 37. pp. 542-550
- Emergy Indices: Honduras, 2000. Sahel Project-University of Florida.
http://sahel.ees.ufl.edu/database_resources.php. 01-03-2008

- FAO. 2004. Historia de un proceso de desarrollo: Metodología del programa Lempira Sur. Programa Lempira Sur/Proyecto Gobernabilidad Local en Lempira. pp. 122
- FAO. 2005. El sistema agroforestal Quesungual: una opción para el manejo de suelos en zonas secas de ladera. Sistema de Extensión Lempira. pp. 49
- Freney J. 1997. Emissions of nitrous oxide from soils used for agriculture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 49. pp. 1-6
- Gas Chromatography: Diagram of a gas chromatograph. Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Gas_chromatography. 29-03-2008
- Hellin J., Welchez L., Cherrett I. 1999. The Quesungual system: an indigenous agroforestry system from western Honduras. *Agroforestry Systems* 46. pp. 229-237
- Haden A. 2002. Emery Analysis of Food Production at S&S Homestead Farm. S&S Center for Sustainable Agriculture. pp. 33
- Holland E., Robertson G., Greenberg J. Groffman P., Boone R., Gosz J. 1999. Soil CO₂ N₂O and CH₄ exchange. En: Standard soil methods for long-term ecological research. Oxford University Press. pp. 185-201
- Hlidkvist B. 2005. Primary emery evaluation of Iceland. M.Sc. Thesis. Lund University. Sweden. pp. 48
- IPCC. 1996. The science of climate change. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. pp. 572
- IPCC. 2001. The scientific basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. pp. 881

- IPCC. 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories, Volume 4: Agriculture, forestry and other land use. Intergovernmental Panel on Climate Change. Institute for Global Environmental Strategies. pp. 450
- Jensen L., McQueen D., Shepherd T. 1996. Effects of soil compaction on N-mineralization and microbial C and N: field measurements. *Soil and Tillage Research* 38 (3-4). pp. 175-188
- Keller M., Reiners W. 1994. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide, nitric oxide and methane under secondary succession pasture to forest in the Atlantic lowlands of Costa Rica. *Global Biogeochemistry Cycles* 8 (4). pp. 399-409
- Lomas P., Martín B., Louit C., Montoya D., Montes C., Álvarez S. 2005. Serie Monografías N° 1: Guía práctica para la valoración económica de los bienes y servicios de los ecosistemas. Universidad Autónoma de Madrid. pp. 76
- Lal R., Kimble J., Levine E. 1994. Soil Processes and greenhouse effect. USDA-Soil Conservation Service. pp. 1-5
- Linn D., Doran W. 1984. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils. *Soil Scientific Society American Journal* 48. pp. 1267-1272
- Montenegro J., Abarca S. 2002. Los sistemas silvopastoriles y el calentamiento global: un balance de emisiones. *Agronomía Costarricense* 26 (1). pp. 17-24
- Mosier A., Schimel D., Valentine D., Bronson K., Parton W. 1991. Influence of agricultural nitrogen on atmospheric methane and nitrous oxide. *Chemistry and Industry* 23. pp. 874-877
- Mosier A., Duxbury J., Freney J., Heinemeyer O., Minami K. 1995. Nitrous oxide emissions from agricultural fields: assessment, measurements and mitigation. *Plant and Soil* 204 (2). pp. 175-183

- Mosier A., Delgado J., Keller M. 1998, Methane and nitrous oxide fluxes in an acid oxisol in Puerto Rico: Effects on tillage, liming and fertilization. *Global Biogeochemistry Cycles* 30 (14). pp. 2087-2098
- Murdiyarso D., Tsuruta H., Ishizuka S., Hairiah K., Palm C. 2005. Greenhouse gas fluxes in slash-and-burn and alternative land use practices. En: *Slash-and-burn agriculture*. Columbia University Press. pp. 64-82
- Odum H. 1994. *Ecological and general systems: An introduction to systems ecology*. Colorado University Press. pp. 644
- Odum H. 1995. *Self-Organization and Maximum Empower*. Colorado University Press. pp. 330
- Odum H. 1996. *Environmental accounting, emergy and decision making: Emergy evaluation*. University of Florida. pp. 370
- Ordóñez. J. 2004. Main factors influencing maize production in the Quesungual agroforestry system in southern Honduras: An exploratory study. M.Sc. Thesis. Wageningen. Netherlands. pp. 96
- PASOLAC. 2005. *Desarrollo de políticas participativas para el sistema de producción maíz-frijol: Estudio de caso en Lempira Sur y Santa Bárbara, Honduras*. SARD-FAO. pp. 206
- Pauli N. 2005. The effects of the Quesungual agroforestry system of western Honduras on soil macrofauna. *Sociedade & Natureza* (Special Issue). pp. 466-477
- Pol V., Dasselaar A., Beusichem M., Oenema O. 1998. Effects on soil moisture content and temperature on methane uptake by grassland on sandy soils. *Plant and Soil* 204 (2). pp. 213-222

- Poth M., Cofman I., Sinatora H., Miranda A., Riggan P. 1995. The magnitude and persistence of soil NO, N₂O, CH₄ y CO₂ fluxes from burned tropical savanna in Brazil. *Global Biogeochemistry Cycles* 9 (4). pp. 503-513
- Powlson D., Goulding K., Willison T., Webster C., Hutsch B. 1997. The effect of agriculture on methane oxidation in soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 49. pp. 59-70
- Ulgiati S., Odum H., Bastianoni S. 1994. Emergy use, environmental loading and sustainability. *Ecological Modeling* 73. pp. 215-268
- Rondón. M. 2000. Land use and balances of greenhouse gases in Colombian Tropical Savannas. Ph.D. Thesis. Cornell University. USA. pp. 211
- Rondón M., Fernandes E., Wandelli E., Da Silva R. 2001. Fluxes of methane from soils in the Central Amazon: The role of agroforestry systems. Department of Crop and Soil Sciences. Cornell University
- Rondón M., Duxbury K., Thomas R. 2002. Effects of land use change in the Llanos of Colombia on fluxes of methane and nitrous oxide and on radiativa forcing of the atmosphere. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (in review). pp. 573-596
- Trujillo. H. 1998. Sustainability of ecotourism and traditional agricultural practices in Chiapas, México. Ph.D. Thesis. University of Florida. USA. pp. 246
- UN. 1992. Rio Declaration on Environment and Development. United Nations Publication. pp. 19
- UNFCCC. 2002. Para comprender el cambio climático: Guía de la Convención Marco de las Naciones Unidas y el protocolo de Kyoto. Secretaría de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. pp. 35

UNFCCC. 2004. Cambio climático: Carpeta de información. Secretaría de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. pp. 30

Wélchez L., Ayarza M., Amézquita E., Barrios E., Rondón M., Rao I. 2006. Unravelling the mysteries of the Quesungual slash and mulch agroforestry. Paper presented at 18th World Congress of Soil Science, Philadelphia.

Anexo A. Correlación y probabilidad de los flujos de gases de efecto invernadero con variables físicas y químicas del suelo, en el estudio de GEI en sur de Lempira, Honduras.

	Metano	Óxido Nitroso	Dióxido Carbono	Densidad Aparente	pH	Porosidad Total	Macro poros	Meso poros	Permeabilidad	Conduct. Hidraul.	Suscept. Compact.	Arena	Arcilla	Nitrógeno Total	Carbono	Fósforo	Potasio	Calcio
Óxido Nitroso	0,273 0,169																	
Dióxido Carbono	-0,436 0,023	-0,249 0,211																
Densidad Aparente	-0,265 0,182	0,460 0,016	0,228 0,253															
pH	0,560 0,002	-0,008 0,970	-0,266 0,179	-0,298 0,131														
Porosidad Total	0,277 0,161	-0,472 0,013	-0,219 0,272	-0,969 0,000	0,392 0,043													
Macroporos	0,200 0,316	-0,342 0,081	-0,304 0,124	-0,906 0,000	0,283 0,153	0,927 0,000												
Mesopopos	0,059 0,771	-0,122 0,543	0,220 0,269	0,283 0,153	0,161 0,421	-0,155 0,441	-0,250 0,209											
Permeabilidad	0,126 0,531	-0,439 0,022	-0,290 0,142	-0,817 0,000	0,139 0,488	0,788 0,000	0,832 0,000	-0,386 0,047										
Conduct. Hidraul.	0,242 0,224	-0,322 0,101	-0,258 0,194	-0,720 0,000	0,333 0,090	0,733 0,000	0,741 0,000	-0,257 0,196	0,647 0,000									
Suscept. Compact	-0,466 0,014	0,254 0,201	0,320 0,104	0,675 0,000	-0,370 0,057	-0,692 0,000	-0,715 0,000	0,033 0,870	-0,667 0,000	-0,701 0,000								
Arena	0,181 0,366	-0,206 0,302	-0,163 0,417	-0,264 0,183	0,326 0,097	0,371 0,057	0,309 0,117	0,098 0,628	0,075 0,709	0,299 0,129	-0,165 0,411							
Arcilla	-0,187 0,350	0,062 0,759	0,279 0,159	0,226 0,257	-0,625 0,000	-0,403 0,037	-0,354 0,070	-0,353 0,071	-0,112 0,578	-0,293 0,138	0,231 0,246	-0,600 0,001						
Nitrógeno Total	0,241 0,226	-0,042 0,833	-0,126 0,530	-0,463 0,015	-0,160 0,425	0,330 0,093	0,457 0,017	-0,393 0,043	0,393 0,043	0,444 0,020	-0,406 0,036	-0,125 0,536	0,392 0,043					
Carbono	0,307 0,119	-0,320 0,104	-0,158 0,431	-0,728 0,000	0,189 0,345	0,692 0,000	0,673 0,000	-0,403 0,037	0,601 0,001	0,771 0,000	-0,574 0,002	0,157 0,435	0,007 0,971	0,719 0,000				
Fósforo	0,260 0,190	0,012 0,952	-0,150 0,456	-0,200 0,317	0,473 0,013	0,276 0,164	0,353 0,071	-0,205 0,306	0,311 0,115	0,350 0,074	-0,491 0,009	0,111 0,583	-0,226 0,256	0,201 0,316	0,431 0,025			
Potasio	0,213 0,286	-0,100 0,619	-0,060 0,765	-0,568 0,002	0,301 0,128	0,556 0,003	0,504 0,007	-0,443 0,021	0,356 0,068	0,622 0,001	-0,233 0,241	0,283 0,153	-0,116 0,564	0,496 0,009	0,792 0,000	0,338 0,085		
Calcio	0,263 0,186	-0,324 0,099	-0,059 0,770	-0,193 0,335	0,480 0,011	0,298 0,131	0,120 0,551	0,294 0,136	0,075 0,712	0,133 0,508	-0,266 0,180	0,461 0,016	-0,500 0,008	-0,477 0,012	-0,124 0,537	0,069 0,731	-0,248 0,212	
Magnesio	0,128 0,523	-0,260 0,191	-0,108 0,593	-0,273 0,168	0,264 0,183	0,253 0,202	0,030 0,882	-0,012 0,954	0,006 0,975	0,053 0,794	-0,051 0,799	0,396 0,041	-0,172 0,392	-0,282 0,154	-0,100 0,620	-0,192 0,338	-0,103 0,610	0,742 0,000

Anexo B. Cálculos y referencias de Emergía para TQ en el estudio de emergía en sur de Lempira, Honduras.

Nota	Ítem	Valor	Unidad	Fuente
1	Luz Solar			
	Superficie de parcela	3E+02	m ²	
	Insolación	1.80E+02	kcal cm ² año ⁻¹	Trujillo, 1998; Diemont, 2006
	Albedo	0.13		Trujillo, 1998; Diemont, 2006
	3E+02 m ² x 1.80E+02 kcal cm ² año ⁻¹ x (1-0.13) x 1E+04 cm ² m ⁻² x 4184 J kcal ⁻¹	1.97E+12	J año⁻¹	
2	Transformicidad	1	sej J ⁻¹	Por definición
	Lluvia			
	Superficie de parcela	3E+02	m ²	
	Precipitación	1.50	m año ⁻¹	
	Densidad del agua	1000	kg m ⁻³	
3	Energía libre del agua [Gibbs]	4940	J kg ⁻¹	
	3E+02 m ² x 1.50 m año ⁻¹ x 1000 kg m ⁻³ x 4940 J kg ⁻¹	2.22E+09	J año⁻¹	
	Transformicidad	1.82E+04	sej J ⁻¹	Odum, 1996; Diemont, 2006
	Semillas			
	Superficie de parcela	3E+02	m ²	
4	Tasa de distribución	1.50E+01	kg ha ⁻¹	Trujillo, 1998; Diemont, 2006
	Contenido de energía	3.50	kcal g ⁻¹	
	0.03 ha x 1.50E+01 kg ha ⁻¹ x 3.5 kcal g ⁻¹ x 4184 J kcal ⁻¹	6.59E+03	J año⁻¹	
	Transformicidad	3.64E+05	sej J ⁻¹	Trujillo, 1998; Diemont, 2006
	Mano de obra (renovable)			
5	Superficie de parcela	3E+02	m ²	
	Tiempo	56	h año ⁻¹	
	% Renovable	0.77		Trujillo, 1998; Diemont, 2006
	0.03 ha x 56 h año ⁻¹ x 0.77 x 6.99E+12 sej h ⁻¹	9.04E+12	sej año⁻¹	
	Transformicidad (% Renovable)	6.99E+12	sej h ⁻¹	Trujillo, 1998; Diemont, 2006
5	Suelo Erosionado			
	Superficie de parcela	3E+02	m ²	
	Tasa de erosión	1910	g m ² año ⁻¹	
	% Suelo Orgánico	0.03		Ulgati, 1994; Diemont, 2006
	Contenido de energía por g Suelo Orgánico	5	kcal g ⁻¹	Ulgati, 1994; Diemont, 2006
5	3E+02 m ² x 1910 g m ² año ⁻¹ x 0.03 x 5 kcal g ⁻¹ x 4184 J kcal ⁻¹	3.60E+08	J año⁻¹	
	Transformicidad	6.25E+04	sej J ⁻¹	Ulgati, 1994; Diemont, 2006

6	Mano de obra (no renovable)			
	Superficie de parcela	3E+02	m ²	
	Tiempo	56	h año ⁻¹	
	% No Renovable	0.23		Trujillo, 1998; Diemont, 2006
	0.03 ha x 56 h yr ⁻¹ x 0.23 x 6.99E+12 sej h ⁻¹	2.70E+12	sej año⁻¹	
	Transformicidad (% No Renovable)	6.99E+12	sej h ⁻¹	Trujillo, 1998; Diemont, 2006
7	Suministros			
	Costo anual	5.45	\$	
	Transformicidad	1.88E+12	sej J ⁻¹	Trujillo, 1998; Diemont, 2006
8	Productos múltiples			
	Producto	Masa (g)	kcal g ⁻¹	J año⁻¹
	Maíz [<i>Zea mays</i>]	3.96E+04	8.60E-01	1.43E+08
	Frijol [<i>Phaseolus vulgaris</i>]	9.63E+03	3.37E+00	1.36E+08
	Maicillo [<i>Sorghum bicolor</i>]	2.32E+04	3.39E+00	3.29E+08
	Total			2.79E+08

Anexo C. Cálculos y referencias de Energía para SAQ en el estudio de emergencia en sur de Lempira, Honduras.

Nota	Ítem	Valor	Unidad	Fuente
1	Luz Solar			
	Superficie de parcela	3E+02	m ²	
	Insolación	1.80E+02	kcal cm ² año ⁻¹	Trujillo, 1998; Diemont, 2006
	Albedo	0.13		Trujillo, 1998; Diemont, 2006
	3E+02 m ² x 1.80E+02 kcal cm ² año ⁻¹ x (1-0.13) x 1E+04 cm ² m ⁻² x 4184 J kcal ⁻¹	1.97E+12	J año⁻¹	
2	Transformicidad	1	sej J ⁻¹	Por definición
	Lluvia			
	Superficie de parcela	3E+02	m ²	
	Precipitación	1.50	m año ⁻¹	
	Densidad del agua	1000	kg m ⁻³	
3	Energía libre del agua [Gibbs]	4940	J kg ⁻¹	
	3E+02 m ² x 1.50 m año ⁻¹ x 1000 kg m ⁻³ x 4940 J kg ⁻¹	2.22E+09	J año⁻¹	
	Transformicidad	1.82E+04	sej J ⁻¹	Odum, 1996; Diemont, 2006
	Semillas			
	Superficie de parcela	3E+02	m ²	
4	Tasa de distribución	1.50E+01	kg ha ⁻¹	Trujillo, 1998; Diemont, 2006
	Contenido de energía	3.50	kcal g ⁻¹	
	0.03 ha x 1.50E+01 kg ha ⁻¹ x 3.5 kcal g ⁻¹ x 4184 J kcal ⁻¹	6.59E+03	J año⁻¹	
	Transformicidad	3.64E+05	sej J ⁻¹	Trujillo, 1998; Diemont, 2006
	Mano de obra (renovable)			
5	Superficie de parcela	3E+02	m ²	
	Tiempo	45	h año ⁻¹	
	% Renovable	0.77		Trujillo, 1998; Diemont, 2006
	0.03 ha x 45 h año ⁻¹ x 0.77 x 6.99E+12 sej h ⁻¹	7.27E+12	sej año⁻¹	
	Transformicidad (% Renovable)	6.99E+12	sej h ⁻¹	Trujillo, 1998; Diemont, 2006
5	Suelo Erosionado			
	Superficie de parcela	3E+02	m ²	
	Tasa de erosión	260	g m ² año ⁻¹	
	% Suelo Orgánico	0.03		Ulgati, 1994; Diemont, 2006
	Contenido de energía por g Suelo Orgánico	5	kcal g ⁻¹	Ulgati, 1994; Diemont, 2006
5	3E+02 m ² x 260 g m ² año ⁻¹ x 0.03 x 5 kcal g ⁻¹ x 4184 J kcal ⁻¹	4.90E+07	J año⁻¹	
	Transformicidad	6.25E+04	sej J ⁻¹	Ulgati, 1994; Diemont, 2006

6	Mano de obra (no renovable)			
	Superficie de parcela	3E+02	m ²	
	Tiempo	45	h año ⁻¹	
	% No Renovable	0.23		(Trujillo, 1998; Diemont, 2006)
	0.03 ha x 45 h año ⁻¹ x 0.23 x 6.99E+12 sej h ⁻¹	2.17E+12	sej año⁻¹	
	Transformicidad (% No Renovable)	6.99E+12	sej h ⁻¹	(Trujillo, 1998; Diemont, 2006)
7	Suministros			
	Costo anual	5.45	\$	
	Transformicidad	1.88E+12	sej J ⁻¹	(Trujillo, 1998; Diemont, 2006)
8	Productos múltiples			
	Producto	Masa (g)	kcal g ⁻¹	J año⁻¹
	Maíz [<i>Zea mays</i>]	4.17E+04	8.60E-01	1.50E+08
	Frijol [<i>Phaseolus vulgaris</i>]	1.51E+04	3.37E+00	2.13E+08
	Maicillo [<i>Sorghum bicolor</i>]	2.32E+04	3.39E+00	3.29E+08
	Leña de diversos árboles	6.55E+04	4.50E+00	1.24E+09
	Madera de diversos árboles	1.50E+05	5.00E+00	3.14E+09
	Total			4.74E+09

Anexo D. Cálculos y referencias de Emergía para BS en el estudio de emergía en sur de Lempira, Honduras.

Nota	Ítem	Valor	Unidad	Fuente
1	Luz Solar			
	Superficie de parcela	3E+02	m ²	
	Insolación	1.80E+02	kcal cm ² año ⁻¹	Trujillo, 1998; Diemont, 2006
	Albedo	0.13		Trujillo, 1998; Diemont, 2006
	3E+02 m ² x 1.80E+02 kcal cm ² yr ⁻¹ x (1-0.13) x 1E+04 cm ² m ⁻² x 4184 J kcal ⁻¹	1.97E+12	J año⁻¹	
	Transformicidad	1	sej J ⁻¹	Por definición
2	Lluvia			
	Superficie de parcela	3E+02	m ²	
	Precipitación	1.50	m año ⁻¹	
	Densidad del agua	1000	kg m ⁻³	
	Energía libre del agua [Gibbs]	4940	J kg ⁻¹	
	3E+02 m ² x 1.50 m yr ⁻¹ x 1000 kg m ⁻³ x 4940 J kg ⁻¹	2.22E+09	J año⁻¹	
	Transformicidad	1.82E+04	sej J ⁻¹	Odum, 1996; Diemont, 2006
3	Semillas			
	Superficie de parcela	3E+02	m ²	
	Tasa de distribución	1.50E+01	kg ha ⁻¹	Trujillo, 1998; Diemont, 2006
	Contenido de energía	3.50	kcal g ⁻¹	
	0.03 ha x 1.50E+01 kg ha ⁻¹ x 3.5 kcal g ⁻¹ x 4184 J kcal ⁻¹	6.59E+03	J año⁻¹	
	Transformicidad	3.64E+05	sej J ⁻¹	Trujillo, 1998; Diemont, 2006
4	Mano de obra (renovable)			
	Superficie de parcela	3E+02	m ²	
	Tiempo	5	h año ⁻¹	
	% Renovable	0.77		Trujillo, 1998; Diemont, 2006
	0.03 ha x 45 h yr ⁻¹ x 0.77 x 6.99E+12 sej h ⁻¹	8.07E+11	sej año⁻¹	
	Transformicidad (% Renovable)	6.99E+12	sej h ⁻¹	Trujillo, 1998; Diemont, 2006
5	Suelo Erosionado			
	Superficie de parcela	3E+02	m ²	
	Tasa de erosión	16	g m ² año ⁻¹	
	% Suelo Orgánico	0.03		Ulgianti, 1994; Diemont, 2006
	Contenido de energía por g Suelo Orgánico	5	kcal g ⁻¹	(Ulgianti, 1994; Diemont, 2006
	3E+02 m ² x 250 g m ² yr ⁻¹ x 0.03 x 5 kcal g ⁻¹ x 4184 J kcal ⁻¹	3.01E+06	J año⁻¹	
	Transformicidad	6.25E+04	sej J ⁻¹	Ulgianti, 1994; Diemont, 2006

6	Mano de obra (no renovable)			
	Superficie de parcela	3E+02	m ²	
	Tiempo	5	h año ⁻¹	
	% No Renovable	0.23		Trujillo, 1998; Diemont, 2006
	0.03 ha x 45 h yr ⁻¹ x 0.23 x 6.99E+12 sej h ⁻¹	2.41E+11	sej año⁻¹	
	Transformicidad (% No Renovable)	6.99E+12	sej h ⁻¹	Trujillo, 1998; Diemont, 2006
7	Suministros			
	Costo anual	5.45	\$	
	Transformicidad	1.88E+12	sej J ⁻¹	Trujillo, 1998; Diemont, 2006
8	Productos múltiples			
	Producto	Masa (g)	kcal g ⁻¹	J año⁻¹
	Leña de diversos árboles	5.15E+04	4.50E+00	9.71E+08
	Madera de diversos árboles	2.00E+05	5.00E+00	4.19E+09
	Total			5.16E+09

Anexo E. Imágenes del estudio de GEI, PCG y emergía en sur de Lempira, Honduras.



1. Muestreo de gases utilizado la técnica de la cámara cerrada



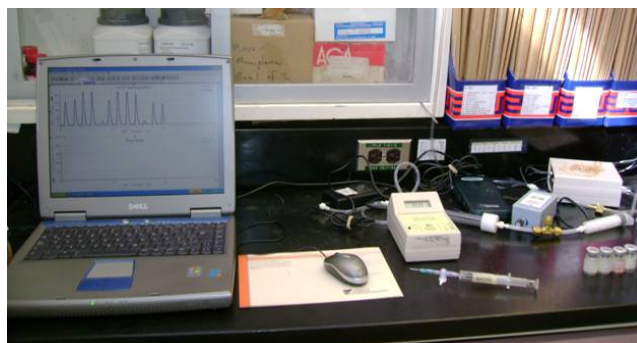
2. Muestra de aire en el laboratorio



3. Extracción de muestra de aire



4. Inyección de muestra en cromatógrafo de gases



5. Equipo analizador de CO₂



6. Bosque Secundario



9. Don Juan Mejía en su finca en la comunidad de El Obrajito, Candelaria



7. Sistema Agroforestal Quesungual



10. L. A. Wélchez en la comunidad de Quesungual en el sur de Lempira, Honduras



8. Sistema tradicional de Tala y Quema



11. El productor Lindolfo Arias en su finca en Camapara, Lempira

Anexo F. Análisis de Varianza de los flujos acumulados en el estudio de GEI en sur de Lempira, Honduras.

Variable Dependiente: CO₂

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Pr > F
Modelo	8	6.72013333	0.84001667	2.44	0.0555 *
Error	18	6.20213333	0.34456296		
Total Corregido	26	12.92226667			

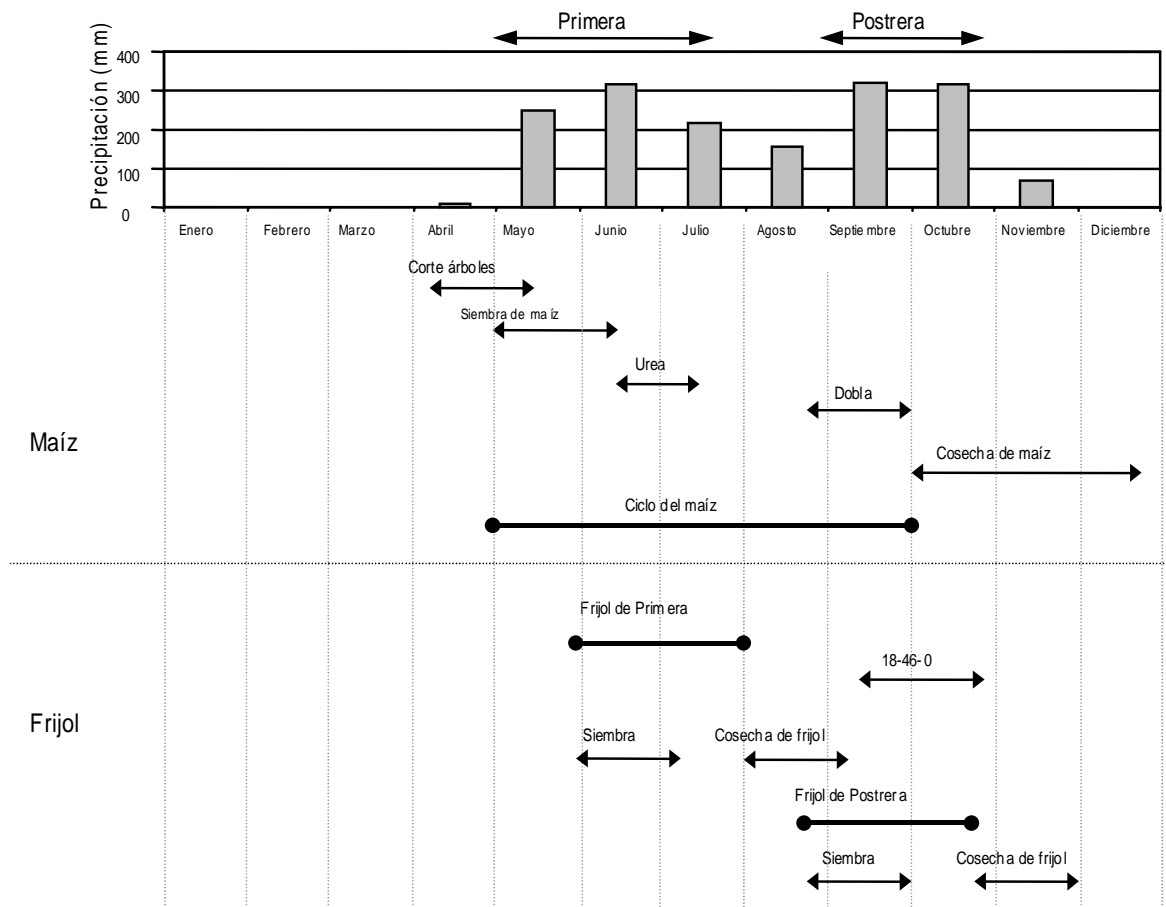
Variable Dependiente: N₂O

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Pr > F
Modelo	8	441940.0244	55242.5031	2.50	0.0509 *
Error	18	398195.1298	22121.9517		
Total Corregido	26	840135.1542			

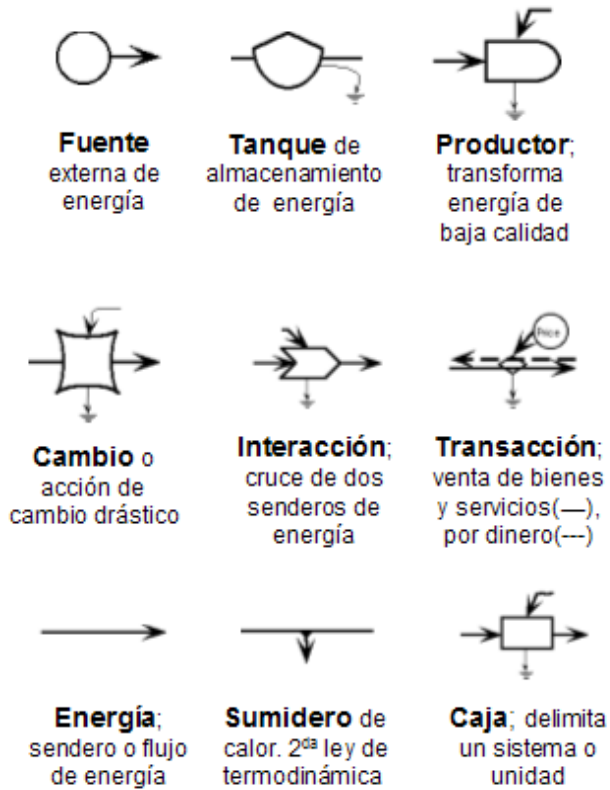
Variable Dependiente: CH₄

Fuente	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor de F	Pr > F
Modelo	8	359981.625	44997.703	0.62	0.7491 NS
Error	18	1302899.714	72383.317		
Total Corregido	26	1662881.339			

Anexo G. Cronograma de actividades en cultivos de maíz y frijol en el SAQ, en sur de Lempira, Honduras (Modificado de Ordóñez, 2004)



Anexo H. Simbología propuesta por Odum, 1971 y utilizada en elaboración de diagramas de sistemas (Odum, 1994)



Anexo I. Flujos acumulados de CH₄, CO₂ y N₂O por tratamiento y nivel de fertilización en el estudio de GEI en sur de Lempira, Honduras

No.	Tratamiento	Finca	Repetición	Fertilización	Metano mg CH ₄ m ⁻² año ⁻¹	Dióxido de carbono kg CO ₂ m ⁻² año ⁻¹	Óxido Nitroso mg N ₂ O m ⁻² año ⁻¹
1	TQ	Juan Mejía	1	Fertilizado	300.08	0.89	604.42
2	TQ	Lindolfo Arias	2	Fertilizado	138.70	2.25	587.82
3	TQ	Miguel Cruz	3	Fertilizado	91.65	1.20	486.26
4	TQ	Juan Mejía	1	No Fertilizado	209.57	0.77	524.26
5	TQ	Lindolfo Arias	2	No Fertilizado	103.71	2.44	487.10
6	TQ	Miguel Cruz	3	No Fertilizado	54.38	1.06	422.56
7	SAQ <2	Juan Mejía	1	Fertilizado	-135.03	2.20	250.56
8	SAQ <2	Lindolfo Arias	2	Fertilizado	100.92	1.45	716.47
9	SAQ <2	Miguel Cruz	3	Fertilizado	-289.73	2.58	132.16
10	SAQ <2	Juan Mejía	1	No Fertilizado	-149.34	2.01	300.45
11	SAQ <2	Lindolfo Arias	2	No Fertilizado	70.22	1.83	434.97
12	SAQ <2	Miguel Cruz	3	No Fertilizado	-273.28	2.88	186.86
13	SAQ 5-7	Juan Sibrián	1	Fertilizado	225.21	2.06	649.58
14	SAQ 5-7	Camilo Mejía	2	Fertilizado	170.63	1.00	753.59
15	SAQ 5-7	Santos Vargas	3	Fertilizado	-458.19	1.53	659.50
16	SAQ 5-7	Juan Sibrián	1	No Fertilizado	181.15	2.23	625.28
17	SAQ 5-7	Camilo Mejía	2	No Fertilizado	175.64	1.14	815.71
18	SAQ 5-7	Santos Vargas	3	No Fertilizado	-426.96	1.61	575.32
19	SAQ >10	Juan Miguel	1	Fertilizado	-581.66	2.72	537.06
20	SAQ >10	Bernarda Laínez	2	Fertilizado	119.76	1.97	390.70
21	SAQ >10	José Lino	3	Fertilizado	-78.25	1.70	423.26
22	SAQ >10	Juan Miguel	1	No Fertilizado	-532.48	2.72	552.35
23	SAQ >10	Bernarda Laínez	2	No Fertilizado	115.08	2.28	409.45
24	SAQ >10	José Lino	3	No Fertilizado	-78.25	1.80	486.87
25	BS	Juan Mejía	1	No Fertilizado	238.38	0.38	397.57
26	BS	Lindolfo Arias	2	No Fertilizado	-182.39	0.94	100.67
27	BS	Miguel Cruz	3	No Fertilizado	-164.22	0.59	544.42