



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS
UNIDAD ZACATENCO**



**MANEJO SUSTENTABLE DE RESIDUOS
(NEJAYOTE Y ESTIÉRCOL)
PARA MEJORAR EL AGROECOSISTEMA DE MAÍZ:
VISIÓN TRANSDISCIPLINARIA**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA DE SISTEMAS**

**PRESENTA:
M. EN I. MARTHA ELENA DOMÍNGUEZ HERNÁNDEZ**

**DIRECTORAS DE TESIS:
DRA. ROSALBA ZEPEDA BAUTISTA
DRA. MARÍA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO**

CIUDAD DE MÉXICO, DICIEMBRE 2017

MANEJO SUSTENTABLE DE RESIDUOS (NEJAYOTE Y ESTIÉRCOL) PARA MEJORAR EL AGROECOSISTEMA DE MAÍZ: VISIÓN TRANSDISCIPLINARIA

RESUMEN

El maíz es el principal cultivo en México por su importancia económica y cultural. Existe la necesidad de mejorar el agroecosistema para obtener grano en cantidad y calidad suficientes para satisfacer las demandas de la población y la agroindustria, con la disminución del impacto ambiental que la agricultura genera. Una alternativa, es la utilización de desechos de sistemas agroindustriales y pecuarios en forma de fertilizantes orgánicos. Los objetivos son: 1) Caracterizar el agroecosistema maíz en el municipio de Ahuazotepec, Puebla, con el enfoque sistémico que plantea el Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS), 2) Caracterizar química y físicamente los fertilizantes orgánicos producto de las combinaciones entre concentraciones de nejayote y estiércol de ovino, 3 y 4) Cuantificar el efecto de la aplicación de los fertilizantes orgánicos nejayote – estiércol de ovino sobre el rendimiento, la calidad de grano, la eficiencia energética y la relación costo–beneficio; y el contenido de microorganismos, las propiedades físicas y químicas del suelo de un agroecosistema maíz, y 5) identificar las concentraciones de los fertilizantes orgánicos que maximicen la respuesta en cada variable de estudio. El análisis del sistema permitió identificar tres conglomerados: Tradicional Bajo, Tradicional Medio y Transición. Los grupos fueron diferentes en: rendimiento de grano, ingreso, edad del productor, escolaridad, organización, prácticas de producción y actividades económicas complementarias. La productividad fue el atributo que afectó a la sustentabilidad de los tres grupos. Las características físicas y químicas de los fertilizantes orgánicos muestran que pueden ser utilizados en sustitución de la fertilización inorgánica tradicional; disminuyen el potencial contaminante del nejayote y del estiércol y permiten la recuperación de agua utilizada en el proceso de nixtamalización. La aplicación de los fertilizantes nejayote–estiércol de ovino mejoran el rendimiento de grano y la resiliencia del sistema; generan una relación beneficio costo positiva de 6.71 y mejoran la eficiencia energética en 28 % con respecto a la fertilización inorgánica (120N-60P-30K). Las combinaciones nejayote-estiércol incrementan 88.2 % el contenido de nitrógeno amoniacal, 13.9 % el nitrógeno nítrico, 99 % el contenido de potasio y 29 % el contenido de fósforo comparados con la dosis 120N-60P-30K; además aumentan el contenido de materia orgánica (5.9 %) y el número de unidades formadoras de colonias (32.9 %), indicando mejoras en la fertilidad del suelo. Los fertilizantes nejayote–estiércol de ovino evaluados son una alternativa sustentable para el agroecosistema maíz y el manejo de los residuos evaluados.

Palabras clave: *Zea mays* L., estiércol, nejayote, MESMIS, fertilizantes orgánicos.

SUSTAINABLE MANAGEMENT OF WASTE (LIME WATER AND MANURE) TO IMPROVE THE MAIZE AGROECOSYSTEM: A TRANS-DISCIPLINARY VISION

ABSTRACT

Maize is the main crop in Mexico and given its economic and cultural relevance, there is a need for improvements of the agroecosystem, which should lead to the production of grain in sufficient quantity and quality to satisfy the country's demand, but at the same time reducing the environmental impact of conventional agriculture. An alternative is the utilization of agroindustrial and livestock waste in the form of organic fertilizers. The aims of this research were: 1) to characterize the maize agroecosystem in the municipality of Ahuazotepec, Puebla, considering the systemic approach proposed by the Framework for Assessing the Sustainability of Natural Resource Management Systems (MESMIS, for its acronym in Spanish); 2) to evaluate the physical and chemical characteristics of the organic fertilizers obtained from different combinations of lime water and sheep manure; 3) to assess the effect of lime water-manure fertilizer application on maize yield, grain quality, energy efficiency, benefit to cost ratio 4) microbial counts and physicochemical properties of soil in the maize agroecosystem, and 5) to identify what proportions of lime water and manure can maximize the response of each variable, using the response surface method. The analysis of the agroecosystem allowed the identification of three subsystems: Low-Traditional, Medium-Traditional and Transition, which differed in grain yield, income, farmer's age and education, participation in farmer organizations, production practices, and supplementary income generating activities. Productivity was the attribute that affected sustainability the most in the three groups. The results of the characterization of the organic fertilizers showed their nutrient composition can substitute inorganic fertilizers; furthermore, by using these waste products this way, the potential for contamination of the nixtamalization process and livestock production is reduced. Results of the evaluation of maize yield, grain quality, energy efficiency and cost-benefit ratio indicate that the application of organic fertilizers improve the yields and system resilience, generate a cost benefit ratio of 6.71 and produce a 27 % increase in energy efficiency, compared to the conventional fertilization. The results of the soil properties evaluation indicate that combinations nejayote - manure increased the inorganic nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$, +88.2% and $\text{NO}_3^-\text{-N}$, +13.9%), as well as potassium and phosphorus contents (+99% and +29% respectively), compared to a chemical fertilizer dose of 120N - 60P - 30K. In addition, the increases in organic matter content (+ 5.9%) and number of colony forming (+32.9%) indicate an improvement in the soil fertility when using nejayote-manure mixture. Based on these results, fertilization applying mixtures of lime water and manure seems like a sustainable alternative to be used in the maize agroecosystem.

Keywords: *Zea mays* L., manure, lime water, MESMIS, organic fertilizer.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
GLOSARIO	xiii
ACRÓNIMOS	xvi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. CONTEXTO Y FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.1 Contexto físico	6
1.2 Contexto de la Sistémica en la historia	9
1.2.1 Enfoque sistémico	12
1.2.2. Paradigma de la complejidad	12
1.2.3. Paradigma de la Complejidad y transdisciplinariedad	13
1.3. Contexto histórico del manejo de los desechos de la agroindustria	13
1.3.1 Nejayote	15
1.4. Contexto histórico del manejo de los residuos de la producción pecuaria	16
1.5. Fertilizantes orgánicos	18
1.6. Uso de nejayote y estiércol de ovino como fertilizante	21
1.7. Contexto histórico del maíz	24
1.7.1. Origen y clasificación botánica	24
1.7.3. Producción mundial de cereales	24
1.7.3.1. Producción de maíz en América	28
1.7.3.2. Producción nacional	29

1.7.3.3. Producción de maíz para grano en Puebla y Ahuazotepec	32
1.8. Tecnología de producción del maíz	33
1.8.1. Requerimientos edáficos y climáticos	33
1.8.2 Factores que afectan la producción de maíz	35
1.8.3 Tecnología utilizada en los sistemas de producción de maíz	35
1.9. Justificación y originalidad del trabajo de investigación	37
1.10. Objetivos e hipótesis	38
1.11. Tabla de congruencias	40
CAPÍTULO 2. MARCO METODOLÓGICO Y TEÓRICO	41
2.1 Marco Metodológico	41
2.1.1 Metodología sistémica – transdisciplinaria	42
2.1.2.1 Fase I: Etapa de focalización	45
2.1.2.2 Fase II: Investigación del sujeto que investiga	47
2.1.2.3 Fase III: Investigación experimental	47
2.1.2.4 Fase IV. Etapa de impactos en el mundo real	50
2.2 Marco Teórico	51
2.2.1. Sistémica	52
2.2.1.1 La investigación sistémica en la agricultura	52
2.2.2 Agronomía	56
2.2.2.1 Sustentabilidad y Agricultura sustentable	57
2.2.3 Edafología	58
2.2.3.1 Sistema suelo	59
2.2.4 Estadística	61
2.2.4.1 Experimentos factoriales	61

CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA	64
3.1 Fase I. Etapa de focalización. Análisis de la sustentabilidad del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla	64
3.1.1 Resumen	64
3.1.2 Introducción	64
3.1.3 Objetivos	66
3.1.4 Hipótesis	66
3.1.5 Materiales y métodos	66
3.1.5.1 Población objetivo	66
3.1.5.2 Tipificación de los productores	67
3.1.5.3 Análisis de la sustentabilidad	68
	70
3.1.6 Resultados	70
3.1.6.1 Tipología de los productores de maíz	70
3.1.6.2 Indicadores de sustentabilidad	72
3.1.7 Discusión	76
3.2 Fase II. Sujeto que investiga. Análisis FODA del sujeto que investiga	82
3.3. Fase III. Investigación experimental	83
3.3.1. Caracterización física y química de los fertilizantes orgánicos producto de las combinaciones entre concentraciones de nejayote y estiércol de ovino	83
3.3.1.1. Resumen	83
3.3.1.2. Introducción	83
3.3.1.3. Objetivo	92
3.3.1.4. Hipótesis	92
3.3.1.5. Materiales y métodos	92

3.3.1.6. Resultados y discusión	95
3.3.2. Cuantificación del efecto de la aplicación de los fertilizantes nejayote – estiércol sobre el rendimiento, la calidad física del grano, la eficiencia energética y la relación beneficio–costo y selección de concentraciones óptimas para cada variable de respuesta.	102
3.3.2.1 Resumen	102
3.3.2.2. Introducción	103
3.3.2.3. Objetivos	106
3.3.2.4. Hipótesis	106
3.3.2.5. Materiales y métodos	106
3.3.2.6. Resultados	110
3.3.2.7 Discusión	121
3.3.3 Cuantificación del efecto de la aplicación de los fertilizantes nejayote–estiércol sobre el contenido de microorganismos y las propiedades físicas y químicas del suelo.	125
3.3.3.1 Resumen	125
3.3.3.2 Introducción	126
3.3.3.2 Objetivo	127
3.3.3.3 Hipótesis	127
3.3.3.4 Materiales y Métodos	128
3.3.3.5 Resultados	129
3.3.3.5.1 Microbiota del suelo y porcentaje de materia orgánica	129
3.3.3.5.2 Propiedades físicas	131
Densidad aparente, densidad real y porcentaje de espacio poroso	131
3.3.3.5.3 Propiedades químicas	133

pH potencial y pH real	133
Nitrógeno amoniacal y nítrico	135
Potasio	136
Fósforo	137
Calcio y magnesio	137
Capacidad de intercambio catiónico total (CICT) y Conductividad Eléctrica (CE)	140
Porcentaje de saturación de bases	142
3.3.3.5 Discusión	142
Microbiota del suelo y porcentaje de materia orgánica	142
Propiedades físicas	142
Propiedades químicas	143
3.4 Fase IV. Impactos en el mundo real	144
3.4.1 Elaboración de manual técnico para productores: Tecnología para la producción de maíz en el municipio de Ahuazotepec, Puebla.	144
3.4.2 Curso de capacitación para productores: Tecnología para mejorar la producción de maíz para grano	145
3.4.3. Planeación y ejecución del Programa para el incremento de la sustentabilidad económica del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla	146
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	149
4.1. Análisis de sustentabilidad del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla.	150
4.2 Caracterización física y química de los fertilizantes orgánicos producto de las combinaciones entre concentraciones de nejayote y estiércol de ovino	150
4.3 Cuantificación del efecto de la aplicación de los fertilizantes nejayote–estiércol sobre el rendimiento, la calidad física del grano, la eficiencia energética y la relación beneficio–costo y selección de concentraciones óptimas para cada variable de respuesta	151

4.4 Cuantificación del efecto de la aplicación de los fertilizantes nejayote–estiércol sobre el contenido de microorganismos y las propiedades físicas y químicas del suelo.	152
4.5 Trabajos futuros	152
REFERENCIAS	154
ANEXOS	171
Anexo 1. Productividad	171
Anexo 2. Encuesta para el diagnóstico de la situación actual del agroecosistema maíz en el municipio de Ahuazotepec, Puebla.	176
Anexo 3. Resultados pruebas de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia Ahuazotepec, Puebla, 2015	179

ÍNDICE DE TABLAS

Características fisiográficas, edáficas, hidrográficas y climáticas de Ahuazotepec, Puebla a partir de INEGI (2009).	8
Clasificación botánica del maíz a partir de Krishna (2013).	24
Principales usos del maíz a partir de Salazar y Godínez (2010).	25
Mega-ambientes para la producción del maíz a partir de Gerpacio (2001).	34
Tabla de congruencias de la investigación.	40
Atributos e indicadores de sustentabilidad usados en el MESMIS.	49
Indicadores económicos, ambientales y sociales con las unidades de referencia utilizadas para el análisis de la sustentabilidad del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla, 2015.	69
Indicadores económicos, ambientales y sociales con las unidades de referencia utilizadas para el análisis de la sustentabilidad del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla, 2015.	70

Valores agrupados por clúster para los indicadores económicos seleccionados utilizados para el análisis de sustentabilidad MESMIS del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla, 2015.	73
Valores agrupados por clúster para los indicadores ambientales seleccionados utilizados para el análisis de sustentabilidad MESMIS del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla, 2015	74
Valores agrupados por clúster para los indicadores sociales utilizados en el análisis de sustentabilidad MESMIS del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla, 2015.	75
FODA personal.	82
Contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en estiércoles de diferentes especies animales con datos de Lorimor <i>et al.</i> (2008).	84
Características del Nejayote colectadas en el Estado de México en 2012, Valderrama-Bravo <i>et al.</i> (2012).	86
Fertilizantes orgánicos producto de las combinaciones entre concentraciones de nejayote y estiércol de ovino. Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	93
Características del estiércol de ovino utilizado en la elaboración de fertilizantes orgánicos con nejayote. Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	96
Características de fertilizantes orgánicos producto de las combinaciones entre concentraciones de nejayote y estiércol de ovino. Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	97
Extracción de nutrientes secundarios y micronutrientes por maíz con un rendimiento promedio de 10.5 Mg·ha ⁻¹ de acuerdo con Bundy (1998).	102
Características agronómicas del híbrido AS-722.	107
Equivalencia energética de los insumos y productos del sistema de producción de maíz para grano en Ahuazotepec, Puebla.	109
Costos de producción de maíz para grano en Ahuazotepec, Puebla en los ciclos primavera-verano de 2015 y 2016.	109
Rendimiento de grano de maíz cultivado con fertilizantes orgánicos producto de las combinaciones de nejayote-estiércol de ovino. Ahuazotepec, Puebla. 2015 y 2016.	110
Peso hectolítrico del grano de maíz cultivado con fertilizantes orgánicos, combinación de nejayote y estiércol, en Ahuazotepec, Puebla, PV 2015 y 2016.	113

Porcentaje de grano grande más grano mediano de maíz cultivado con fertilizantes orgánicos, combinación de nejayote y estiércol, en Ahuazotepec, Puebla. 2015 y 2016.	115
Eficiencia energética en el sistema de producción maíz cultivado con fertilizantes orgánicos, combinación de nejayote y estiércol. Ahuazotepec, Puebla. 2015 y 2016.	117
Relación Beneficio-Costo en el sistema de producción maíz cultivado con fertilizantes orgánicos, combinación de nejayote y estiércol. Ahuazotepec, Puebla. 2015 y 2016.	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Contexto físico de la investigación.	6
Ubicación geográfica de Ahuazotepec, Puebla.	7
Producción agrícola en Ahuazotepec con datos de INEGI (2014) y SIAP (2015).	9
Enfoques para el estudio de la Teoría de Sistemas de acuerdo con Johansen, (2013).	10
Características de un sistema de acuerdo con Meadows (2008).	11
Aplicaciones prácticas de la Teoría General de Sistemas de acuerdo con Johansen (2013).	14
Contexto histórico de la investigación sobre el manejo del nejayote.	17
Contexto histórico de la investigación sobre uso de estiércol como fertilizante.	22
Producción mundial de maíz 2004-2015 con datos de FAOSTAT (2016) y USDA (2016).	26
Producción de maíz por continente 2004-2014 con datos de FAOSTAT, (2016).	27
Principales países productores de maíz 2004-2014 con datos de FAOSTAT, (2016).	27
Producción de maíz en el Continente Americano 2004-2014 con datos de FAOSTAT (2016).	28
Producción de maíz en la franja maicera de Estados Unidos de América 2015 con datos de USDA (2016).	29
Producción y superficie sembrada de maíz en México 2004-2015 con datos de SIAP (2016).	30

Superficie de riego y temporal cultivadas con maíz en México con datos de SIAP (2016).	30
Producción estatal de maíz en México 2004-2015 con datos de SIAP (2016).	31
Producción de maíz en el estado de Puebla con datos de SIAP (2016).	32
Superficie sembrada y producción de maíz en Ahuazotepec 2004 -2015 con datos de SIAP (2016).	33
Factores que afectan al sistema de producción de maíz.	36
Jerarquía ascendente de solución de problemas utilizada en la Espiral de Hawkesbury.	43
Marco metodológico utilizado en la investigación modificado con base en lo propuesto por Hernández-Aguilar (2007), Astier <i>et al.</i> (2008), Checkland y Poulter (2010).	44
Etapas de focalización.	46
La sistémica en la Agricultura.	54
Componentes funcionales de un agroecosistema Gliessman (2015).	56
Perfil del suelo de acuerdo con Biondo y Lee (1997).	60
Diagrama de AMIBA para los indicadores de sustentabilidad medidos en los tres clústeres de Ahuazotepec, Puebla, 2015.	77
Tipos de compostaje de acuerdo con Misra <i>et al.</i> (2003).	87
Fases del proceso de compostaje de acuerdo con Moreno-Casco y Mormeneo-Bernat (2008).	89
Proceso de preparación de fertilizantes orgánicos (nejayote y estiércol), Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	94
pH del estiércol, nejayote y fertilizantes orgánicos. Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	98
Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes, adaptado de Lambert <i>et al.</i> (1947).	99
Conductividad eléctrica del nejayote, estiércol y los fertilizantes orgánicos. Ahuazotepec, Puebla 2015-2016.	100
Contenido de nitrógeno y potasio en los fertilizantes orgánicos y el nejayote. Ahuazotepec, Puebla 2015 -2016.	101

Rendimiento de grano de maíz cultivado con fertilizantes orgánicos producto de las combinaciones de nejayote-estiércol de ovino. Ahuazotepec, Puebla 2015 y 2016.	111
Gráfica de contorno y superficie de respuesta para el rendimiento de grano de maíz obtenido con la aplicación de fertilizantes orgánicos nejayote - estiércol. Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	112
Peso hectolítrico del grano de maíz cultivado con fertilizantes orgánicos, combinación de nejayote y estiércol, en Ahuazotepec, Puebla. 2015 y 2016.	113
Gráfica de contorno y superficie de respuesta para el peso hectolítrico de grano de maíz cultivado con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	114
Tamaño de grano de maíz cultivado con fertilizantes orgánicos, combinación de nejayote y estiércol, en Ahuazotepec, Puebla. 2015 y 2016.	115
Gráfica de contorno y superficie de respuesta para tamaño de grano de maíz cultivado con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	116
Eficiencia energética obtenida en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	117
Gráfica de contorno y superficie de respuesta para la eficiencia energética de los diferentes fertilizantes orgánicos (combinaciones entre nejayote y estiércol de ovino) en la producción de maíz en Ahuazotepec, Puebla 2015 y 2016.	118
Relación Beneficio-Costo obtenida en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	119
Gráfica de contorno y superficie de respuesta para la relación Beneficio Costo de los fertilizantes orgánicos aplicados en maíz en Ahuazotepec, Puebla en los ciclos Primavera - Verano 2015 y 2016.	120
Unidades formadoras de colonias (UFC) en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	130

Porcentaje de materia orgánica en suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	131
Porcentaje de espacio poroso en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	132
pH potencial del suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	133
pH real del suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	134
Nitrógeno amoniacal en suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	135
Potasio en suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	136
Fósforo en suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	137
Contenido de Calcio en suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	138
Contenido de Magnesio en suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	139
Capacidad de intercambio catiónico total en suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	140
Conductividad eléctrica en suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016.	141

Manual sobre la tecnología para la producción de maíz en el municipio de Ahuazotepec, Puebla.	145
Curso de capacitación para productores: Tecnología para mejorar la producción de maíz para grano. Ahuazotepec, Puebla. 2016.	146
Programa para el incremento de la sustentabilidad económica del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla. 2017.	147

GLOSARIO

Adaptabilidad: es la capacidad de un sistema para seguir funcionando cuando experimenta cambios internos o externos irreversibles (Astier, Masera y Galván, 2008)

Agroecosistema: es una extensión de un cultivo que está bien adaptado a una región geográfica definida, contiene recursos naturales que son manejados por humanos con el propósito de satisfacer sus necesidades de comida y de otros productos útiles. Sus componentes son el cultivo, el terreno, el suelo, los nutrientes, el clima, el agua, el hombre y los factores económicos (Krishna, 2014).

Autogestión: es la capacidad del sistema para regular y controlar sus interacciones con el exterior (Masera, Astier y López-Ridaura, 1999)

Clúster: colección de datos u objetos que comparten ciertos atributos o características (Han, Kamber y Pei, 2012).

Compostaje aeróbico: es el proceso de compostaje que se lleva a cabo en presencia de oxígeno (Misra, Roy y Hiraoka, 2003)

Compostaje anaeróbico: es el proceso de compostaje que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno (Misra, Roy y Hiraoka, 2003)

Compostaje: es el proceso natural de descomposición de la materia orgánica por microorganismos bajo condiciones controladas; mediante este proceso materiales orgánicos como residuos de cosechas, desechos de animales, basura de comida, desechos municipales y algunos desechos industriales incrementan su capacidad para ser utilizados como una fuente de fertilización (Misra, Roy y Hiraoka, 2003; USDA, 2010a) .

Conductividad eléctrica en suelo: permite determinar en forma cuantitativa la concentración de sales solubles que contiene el agua o el suelo, se mide en decisiemens por metro (Jackson, 1970).

Confiabilidad: es la capacidad del sistema para mantenerse en niveles cercanos al equilibrio ante perturbaciones normales del ambiente (Masera, Astier y López-Ridaura, 1999).

Diagrama de AMIBA: es un espacio cartesiano multidimensional que representa distintos valores obtenidos a través de evaluaciones de sustentabilidad (Astier, Masera y Galván, 2008)

Eficiencia en el uso del agua: es el cociente entre el rendimiento del cultivo y el volumen de agua aplicada, las unidades son kg m^{-3} (Welde y Gebremariam, 2016).

Eficiencia energética: es el cociente entre la energía producida por el sistema (MJ ha^{-1}) y la energía consumida (MJ ha^{-1}) (Banaeian y Zangeneh, 2011).

Estabilidad: es la propiedad del sistema para tener un estado de equilibrio dinámico estable, es decir, que se mantenga la productividad en un nivel no decreciente a lo largo del tiempo bajo condiciones promedio o normales (Masera, Astier y López-Ridaura, 1999).

Estiércol: está compuesto por heces de animales y orina; adicionalmente puede contener residuos de alimentos, de sustratos utilizados como piso de corrales y agua; contiene nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, cobre, manganeso y zinc (Manitoba Agriculture Food and Rural Development, 2015)

Experimento factorial: estrategia experimental en la que se incluyen combinaciones de dos o más factores cada uno con dos o más niveles, permite conocer efectos principales e interacciones (Petersen, 1994; Montgomery, 2009).

Fertilizante: compuesto que contiene diferentes elementos que son indispensables para las plantas y que en proporciones adecuadas permiten que éstas logren un desarrollo normal (Primo y Carrasco, 1973).

Fertilizante orgánico: pueden ser residuos de origen animal, estiércoles, compostas, vermicompostas, abonos verdes, residuos de cosechas, residuos orgánicos industriales, aguas negras y sedimentos orgánicos que son usados como fuente de nutrientes para los cultivos (Trinidad-Santos, 2007).

Gráfica de contorno: es una representación que permite explorar la relación potencial entre tres variables; x y y son variables predictoras y z es la variable de respuesta que se representa mediante líneas rectas si no hay interacción entre los factores y con curvas cuando hay interacción (Montgomery, 2009).

Indicador: son variables cualitativas o cuantitativas que permiten evaluar diferentes dimensiones y atributos de un sistema permitiendo el monitoreo de cambios a través del tiempo (Astier, Maser y Galván, 2008).

Índice de Shannon: expresión matemática que permite medir la diversidad de especies en una comunidad específica, se basa en el número de especies presente y el número de individuos por especie (Dalsgaard, Lightfoot y Christensen, 1995).

Ingreso neto: son los beneficios totales en un periodo de tiempo, normalmente un año (Astier, Maser y Galván, 2008).

Macronutrientes: son los que se encuentran en mayor proporción en los tejidos de la planta, en concentraciones del 0.2 % en base seca. Los principales son carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O) que se obtienen del dióxido de carbono y agua; además se encuentran los macronutrientes minerales nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) que se conocen como nutrientes primarios y calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) que se conocen como macronutrientes secundarios (McGrath, Spargo y Penn, 2014).

Micronutrientes: se encuentran en proporciones menores a 0.01 % en los tejidos de la planta; éstos son: cobre (Cu), manganeso (Mn), hierro (Fe), boro (B), níquel (Ni), molibdeno (Mo), cloro (Cl) y Zinc (Zn) (McGrath, Spargo y Penn, 2014).

Materia orgánica: son todos los materiales orgánicos que se encuentran en el suelo y que son parte o han sido parte de organismos vivos, es un conjunto de materiales en diversas etapas de transformación debido a procesos bióticos y abióticos; contribuye a la fertilidad del suelo, es una reserva de nutrientes, es la base de la actividad biológica, incrementa la capacidad de retención del agua y reduce la erosión (Chenu, Rumpel y Lehmann, 2015).

Mineralización: es el proceso biológico en el cual microorganismos convierten los nutrientes a formas asimilables para las plantas; puede ser modificado por la temperatura, las propiedades del suelo y por las características del estiércol utilizado (Eghball *et al.*, 2002; Pettygrove, Heinrich y Crohn, 2009).

Nejayote: es un líquido de desecho del proceso de nixtamalización, contiene sólidos de maíz y calcio (Valderrama-Bravo *et al.*, 2012).

Peso hectolítrico: también se conoce como densidad o masa hectolítrica; es el contenido de masa en un volumen y se expresa en kilogramos por hectolitro (NMX-FF-034/1-SCFI-2002, 2002).

pH: es el logaritmo a la inversa de la concentración de iones hidrógeno; pH menor a 7 se considera ácido, 7 es neutro y mayor que 7 se considera alcalino (López-Ritas y López-Melida, 1985).

Productividad: es la habilidad de un agroecosistema para proveer de un nivel requerido de bienes y servicios (Matera, Astier y López-Ridaura, 1999).

Relación Beneficio Costo: es el cociente entre los beneficios totales y los costos totales del sistema (Astier, Maser y Galván, 2008).

Rendimiento: es la cantidad de biomasa producida por unidad de área (Astier, Maser y Galván, 2008).

Resiliencia: es la capacidad del sistema para absorber cualquier tipo de perturbación y reorganizarse tras ese momento conservando su misma función, estructura e identidad (Matera, Astier y López-Ridaura, 1999)

Superficie de respuesta: es una gráfica tridimensional que representa la relación entre la variable de respuesta y los factores de estudio (Montgomery, 2009).

Sustentabilidad: desarrollo que permite satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades (World Commission on Environment and Development, 1987)

ACRÓNIMOS

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FAOSTAT: División de Estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FODA: Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática

NMX: Norma Oficial Mexicana

MESMIS: Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo incorporando Indicadores de Sustentabilidad.

ONU: Organización de las Naciones Unidas.

PROAGRO: Programa de fomento a la agricultura de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

SAGARPA: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

SIAP: Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera.

TMAC: Tasa Media Anual de Crecimiento.

USDA: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Politécnico Nacional, por el espacio académico brindado durante el Doctorado en Ingeniería de Sistemas.

A la SEPI-ESIME Zacatenco por la formación académica recibida durante el Doctorado en Ingeniería de Sistemas.

A los Profesores del Programa de Doctorado en Ingeniería de Sistemas por los conocimientos y apoyo otorgados para cumplir con los objetivos de esta investigación.

INTRODUCCIÓN

I.1 Presentación de la tesis

En el mundo hay alrededor de mil millones de personas en pobreza extrema, 750 millones dependen directamente de la agricultura para subsistir; entonces la tendencia que tenga la seguridad alimentaria en el mundo dependerá de las afectaciones que el cambio climático y los conflictos sociales y económicos de cada región, tengan en la agricultura (FAO, 2016b). Entonces, la erradicación de la pobreza en zonas rurales vulnerables dependerá de que los sistemas de producción agrícola se vuelvan sustentables y resilientes a los fenómenos socioambientales (Foley *et al.*, 2011; Godfray *et al.*, 2012; FAO, 2016b).

El maíz es un grano clave para la seguridad alimentaria mundial, junto con el trigo y el arroz proveen el 30 % de la ingesta calórica de 40.5 billones de personas en 94 países en desarrollo; se estima que para el 2025 será el grano básico más sembrado en el mundo (Renard y Storr, 2014). En 2015, en México el maíz ocupó el 48.7 % de la superficie nacional agrícola que fue de 5.6 millones de hectáreas (SIAP, 2016a); su importancia incluye contextos que van desde lo económico, hasta lo político, social, histórico y cultural. Por ello, el maíz no sólo es el grano básico en la alimentación de los mexicanos, sino fuente importante de insumos para elaborar alimentos de animales y productos industriales (Sweeney *et al.*, 2013; Eakin, Bausch y Sweeney, 2014). En 2014, el maíz, junto con el frijol, representaron entre 54.4 y el 87 % de los productos para autoconsumo en México; en el Estado de Puebla entre 19.9 y 52.4 % de la producción de maíz (960 mil 406 Mg) fue para autoconsumo (SIAP, 2016c). Por ello, el agroecosistema es parte fundamental de la producción de alimentos a nivel local y nacional (Reganold, Papendick y Parr, 1990; Gliessman, 2000).

México, igual que el resto del mundo, enfrenta la necesidad de hacer sustentable la producción de alimentos de cara a los problemas relacionados con el cambio climático, el suministro de energía, la globalización y la escasez de recursos naturales y el crecimiento de la población (Tilman *et al.*, 2002; Ewert *et al.*, 2009). El aumento de la sustentabilidad en la agricultura es una condición clave para el crecimiento del resto de la economía de

una región (Ruttan, 2002) y su rentabilidad a largo plazo (Dantsis *et al.*, 2010), sin provocar detrimento del ambiente (Vasileiadis *et al.*, 2013; Mafongoya *et al.*, 2016; Fantin *et al.*, 2017). Un agroecosistema será considerado sustentable si conserva los recursos naturales y continúa satisfaciendo las necesidades de los beneficiarios del sistema a través del tiempo (Gliessman, 2015).

Debido a que los agroecosistemas son dinámicos y complejos por la interacción entre los procesos sociales, económicos y ambientales (Conway, 1987; Altieri, 2002), el mejoramiento del agroecosistema maíz debe realizarse integrando dichos procesos o dimensiones, por medio de un enfoque holístico. La evaluación permite compartir las soluciones con los implicados y autoridades locales, convirtiéndoles en actores principales en el proceso de desarrollo (López-Ridaura, Masera y Astier, 2002; Reed, Fraser y Dougill, 2006; Mascarenhas *et al.*, 2010; Measham *et al.*, 2011).

La mayoría de la investigación en el área agrícola está organizada por disciplinas y se orienta a segmentos puntuales de un todo. Francis *et al.* (2008) mencionan que, si bien el enfoque disciplinario ha logrado incrementar la producción, no está acorde con la sustentabilidad de los agroecosistemas. La Sistémica contiene métodos construidos con base en puntos de vista incluyentes que contemplan a la ciencia como un proceso de aprendizaje social lo que conduce a adoptar enfoques transdisciplinarios para efectuar la investigación (Alrøe y Kristensen, 2001) lo que permite tener una perspectiva holística, procesos de investigación participativos, soluciones que simulan las funciones y estructuras de los ecosistemas, considerar las limitantes y pre-requisitos locales, adaptación de los sistemas ecológicos y sociales mediante aprendizaje y garantiza diversidad en el uso de herramientas y seguridad (Eksvärd *et al.*, 2009).

La agricultura tiene un rol importante en el cambio climático, la degradación de suelo, la contaminación del agua y la pérdida de biodiversidad. De las actividades agrícolas, la ganadería es una de las que tiene mayor impacto ambiental por la cantidad de desechos que genera, los gases de efecto invernadero que emite a nivel mundial, incluyendo toda la cadena de suministro, se estiman en 7.1 gigatoneladas de CO₂ equivalente por año lo que representa el 14.5 % de las emisiones generadas por la humanidad (Gerber *et al.*, 2013).

En México, se reporta que el sector agropecuario emitió 382.6 Gg CO₂ equivalente en 2014 (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2014).

La agroindustria para el procesamiento de maíz genera diariamente entre 1500 y 2000 metros cúbicos de nejayote para nixtamalizar 600 toneladas de grano, esto es un volumen cercano a 1.2 millones de metros cúbicos mensuales (Salmerón-Alcocer *et al.*, 2003). El nejayote es desechado a los drenajes sin recibir tratamiento previo generando problemas de contaminación por su composición química. Los métodos comunes de tratamiento de agua no representan una alternativa viable para recuperar el agua contenida en el nejayote y métodos como la filtración y microfiltración o tratamientos oxidativos han sido utilizados únicamente para pequeños volúmenes (Valderrama-Bravo *et al.*, 2013; Castro-Muñoz y Yáñez-Fernández, 2015; García-Zamora *et al.*, 2015).

En la agricultura tradicional y en los sistemas con enfoque agroecológico, los estiércoles y residuos de cosechas han sido aplicados con el fin de proporcionar nutrientes a los cultivos, para mantener los rendimientos y la fertilidad del suelo. Sin embargo, en la agricultura y ganadería intensivas los estiércoles pasaron de ser recursos a ser desechos de los sistemas de producción con lo que se provocan impactos ambientales negativos debido a la emisión de gases contaminantes y la contaminación de cuerpos hídricos, la disminución de contenido de carbono, de la actividad microbiana y la capacidad de retención de humedad en el suelo (Karlen, Russell y Mallarino, 1998; Pinos-Rodríguez *et al.*, 2012).

Una opción para disminuir el potencial contaminante del estiércol es el procesamiento de desechos; por ejemplo a través del compostaje, con el fin de generar fertilizantes orgánicos que permitan cerrar el ciclo de nutrientes generado por la producción animal; funciona mejor cuando la producción agrícola y pecuaria se encuentran combinadas localmente (Tilman *et al.*, 2002). La utilización de estiércol como fertilizante ha sido evaluada en diferentes investigaciones: Miron *et al.* (2011), Mucheru-Muna *et al.* (2014) y Wang *et al.* (2017) y han encontrado que la aplicación de estiércoles incrementa el rendimiento de grano de maíz entre 4 y 67 %.

El maíz requiere la aplicación de nutrimentos para lograr rendimientos mayores, los principales son el nitrógeno, el fósforo y el potasio; se pueden obtener del suelo o a través de fertilizantes químicos, estiércoles y residuos de cosecha (Salazar-Sosa *et al.*, 2009). Por otra parte, los residuos y subproductos agroindustriales contienen materia orgánica constituida por diferentes porcentajes de celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina, los cuales pueden ser utilizarlos como sustrato para la producción fermentativa de metabolitos de interés, sustrato para la generación de bioenergéticos, mejoradores o acondicionadores de suelo y suplemento alimenticio para animales (Velasco-Martinez *et al.*, 1997; Saval, 2012).

Entonces, las prácticas de manejo que aseguren la recuperación y el reciclaje de nutrimentos y energía que contienen el estiércol y los desechos agroindustriales es una opción de mitigación; las prácticas pueden mejorar la productividad y contribuir a la seguridad alimentaria y el alivio de la pobreza en un planeta con necesidades para alimentar a una población creciente (Gerber *et al.*, 2013).

Con base en lo anterior, se diseñó y evaluó una alternativa sustentable para satisfacer las necesidades nutrimentales del maíz mediante la combinación de dos residuos para elaborar un fertilizante orgánico; los residuos fueron, el nejayote obtenido del proceso de nixtamalización de la industria de la masa y la tortilla, y el estiércol de ovino generado de un proceso de producción pecuaria. Las variables evaluadas fueron rendimiento, eficiencia energética, relación beneficio/costo, evaluadas en el agroecosistema maíz, propiedades físicas y químicas del suelo y de los fertilizantes orgánicos y contenido de microorganismos en suelo.

I.2 Presentación del documento de Tesis

La Tesis está conformada por cuatro capítulos, referencias bibliográficas y anexos. En el Capítulo 1, se presenta el contexto y fundamento de la investigación que incluye el contexto físico, el contexto sistémico en la historia, el contexto histórico del manejo de los desechos de la agroindustria y de los residuos de la producción pecuaria; el uso de estiércoles y nejayote como fertilizantes, el contexto histórico del maíz y su tecnología de producción; así como la justificación, objetivos, hipótesis y tabla de congruencias.

En el Capítulo 2 se presenta el marco metodológico y el marco teórico utilizados en la investigación. Se incluye una revisión de literatura sobre la investigación sistémica en la agricultura, las metodologías sistémicas y las disciplinas utilizadas.

En el Capítulo 3, se incluye la aplicación de la metodología sistémica-transdisciplinaria que contiene el análisis de la sustentabilidad del agroecosistema maíz en la zona de estudio, el análisis FODA del sujeto que investiga, la investigación experimental que incluye la caracterización física y química de los fertilizantes orgánicos producto de las combinaciones entre concentraciones de nejayote y estiércol de ovino, la cuantificación del efecto de la aplicación de dichos fertilizantes en el rendimiento, la calidad física del grano, la eficiencia energética, la relación costo beneficio, las propiedades físicas, químicas y microflora del suelo; cada apartado incluye resumen, introducción, materiales y métodos, resultados. Finalmente, se incluyen los impactos en el mundo real.

En el Capítulo 4, se presentan las conclusiones para el análisis de sustentabilidad y de la investigación experimental en cada una de las actividades realizadas como parte del cumplimiento de los objetivos de la investigación así como, la perspectiva para trabajos futuros.

CAPÍTULO 1

CONTEXTO Y FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN



CAPÍTULO 1. CONTEXTO Y FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se presenta el contexto físico e histórico de la investigación; asimismo, se establecen la justificación, los objetivos e hipótesis que condujeron a una tabla de congruencias donde se incluyen las preguntas de investigación.

1.1 Contexto físico

El trabajo se llevó a cabo en la República Mexicana en tres entidades federativas: la Ciudad de México, dentro de las instalaciones de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) Unidad Zacatenco, dentro de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación; en el Estado de México se trabajó en el municipio de Cuautitlán Izcalli dentro de las instalaciones de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán UNAM en los laboratorios L-211 y L-104 y en el estado de Puebla se realizó en el municipio de Ahuazotepec, en la localidad Laguna Seca dentro de la unidad de producción denominada Rancho Laguna Seca (Figura 1. 1).

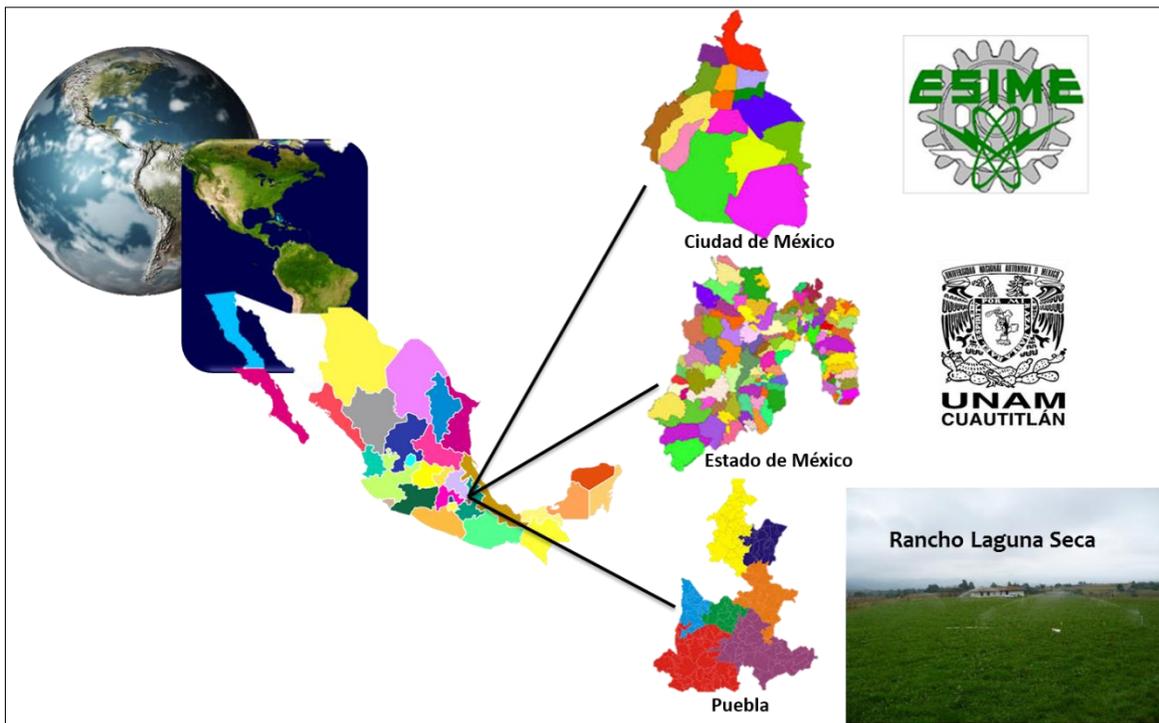


Figura 1. 1 Contexto físico de la investigación (Elaboración propia, 2016).

Ahuazotepec

Ahuazotepec, es un municipio del estado de Puebla, tiene una superficie de 110.99 km² y se localiza en la parte centro-oeste del estado, sus coordenadas geográficas son: 20° 00' 06" – 20° 07' 06" de Latitud Norte y 98° 03' 42" – 98° 10' 24" de Longitud Oeste. El municipio colinda al Norte con Huauchinango, al Sur y Oeste con Zacatlán y al Este con el estado de Hidalgo. La altura sobre el nivel del mar es de 2280 m (INEGI, 2014b). En la Figura 1. 2 se muestra el límite municipal y las localidades que integran al municipio.

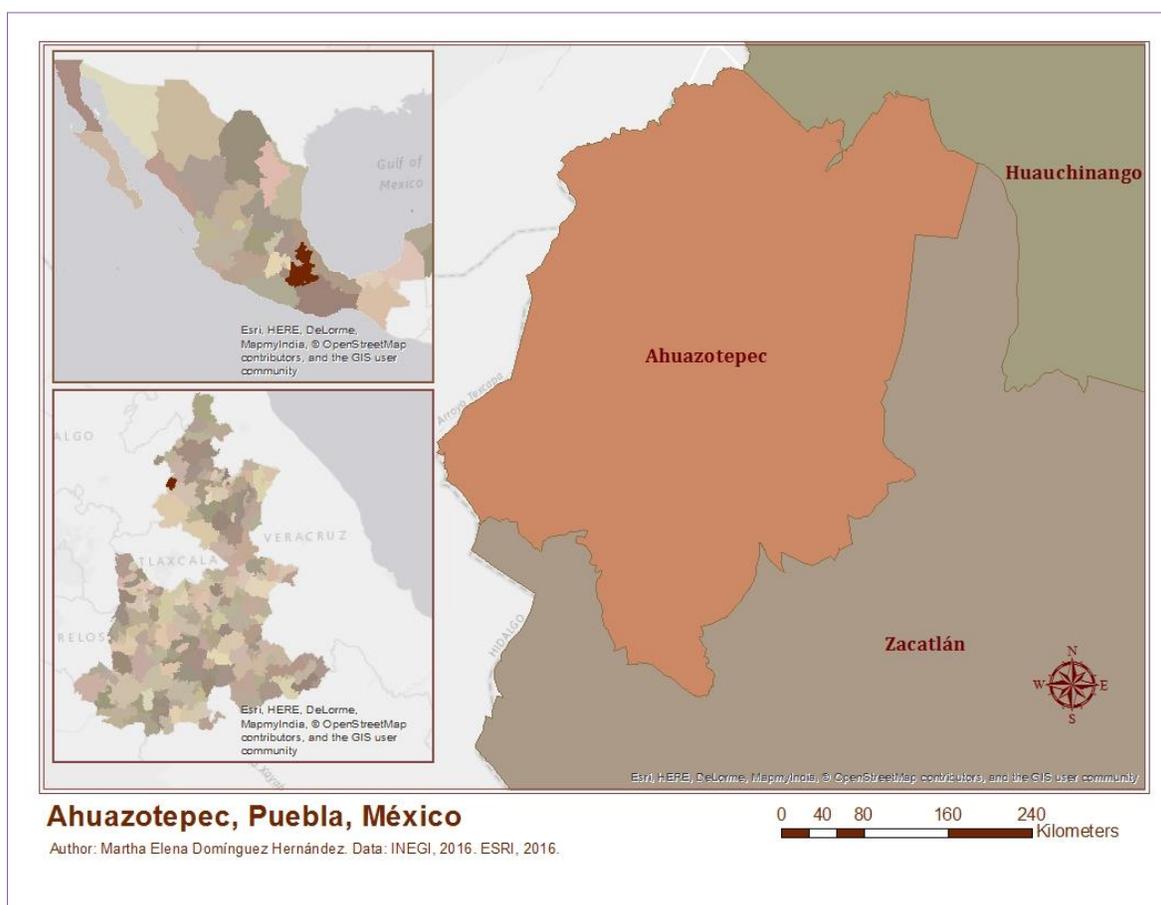


Figura 1. 2. Ubicación geográfica de Ahuazotepec, Puebla (Elaboración propia, 2016).

La población total en el Municipio de Ahuazotepec, de acuerdo con el censo de población y vivienda 2010, es de 10 mil 457 habitantes; 5 mil 127 son hombres y 5 mil 330 son mujeres. El 67.6 % se considera Población Económicamente Activa, el 39.2 % realiza actividades relacionadas con el sector primario; la población restante está comprendida en la Industria Manufacturera con 29.4 %, en el comercio con 13.5 % y la construcción 13

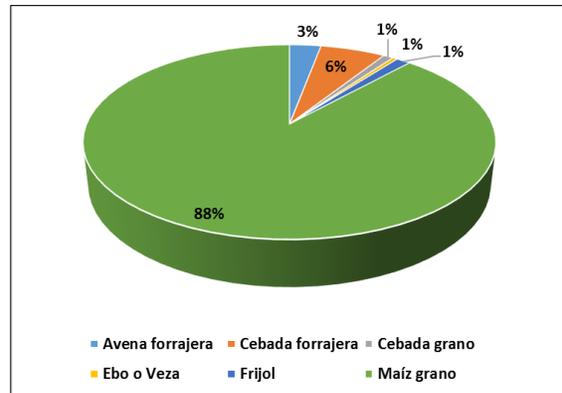
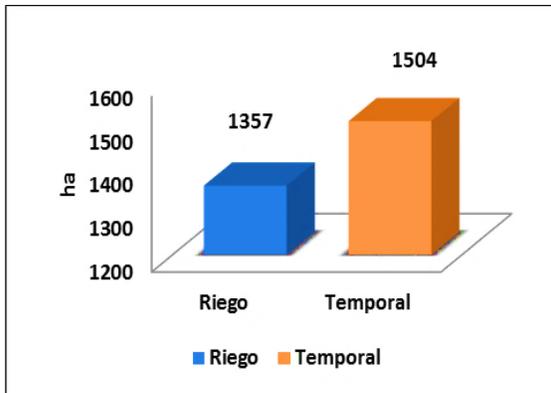
%; el resto de la población realiza actividades no especificadas (INEGI, 2014b). En la Tabla 1.1 se presentan las características geográficas del municipio.

Tabla 1. 1. Características fisiográficas, edáficas, hidrográficas y climáticas de Ahuazotepec, Puebla a partir de INEGI (2009), (Elaboración propia, 2016).

AHUAZOTEPEC	
Fisiografía	Se ubica en la porción occidental de la Sierra de Puebla, que forma parte de la Sierra Madre Oriental
Suelo	Andosol órtico de textura media, con potencial de uso agrícola y pecuario; mecanizables.
Hidrografía	Ríos: Totolapa y Tlachinalco Corrientes intermitentes: El Arroyo, Piedras Encimadas. 17 fuentes de abastecimiento provenientes de cinco pozos profundos y 12 manantiales, lo cual conforma la Región Hidrológica número 27.
Clima	C(m), templado húmedo, con abundantes lluvias en verano, con temperatura media anual de 14.4 °C, con máximas de 27.5 °C en el mes de abril y mínimas de hasta -6.6 °C en el mes de febrero y una precipitación total anual de 1064.9 mm

El INEGI (2014) menciona que, en 2012, el área de riego representaba el 47.4 % de la superficie; mientras que, la de temporal representa el 52.6 % (Figura 1.3a), existen 1806 ha que cuentan con mecanización, el 63.1 % del total municipal. En 2014, la superficie sembrada y cosechada en el municipio fue de 1475 ha, de las cuales 1241 fueron sembradas con maíz para grano (Figura 1.3b) (SIAP, 2015).

El valor de la producción de los principales cultivos fue de 13 millones 664 mil pesos, la producción de maíz para grano fue de 2 mil 245 toneladas, avena forrajera 131 t, cebada en verde 1889 t y veza 138 t (SIAP, 2015). La producción forestal maderable, en metros cúbicos rollo es de 4 mil 731 lo que representa un ingreso bruto de 3 millones 697 mil pesos (INEGI, 2014).



a) Superficie sembrada y cosechada en hectáreas

b) Superficie sembrada por cultivo

Figura 1. 3. Producción agrícola en Ahuazotepec con datos de INEGI (2014) y SIAP (2015), (Elaboración propia, 2016).

Vías de comunicación: se localiza sobre la carretera federal 119 México-Tuxpan, lo que permite acceso a centros de abasto regionales como Huauchinango, Zacatlán o Tulancingo y a ciudades como México, Pachuca y Puebla. Además, cuenta con una red de caminos vecinales que permiten comunicación con 18 comunidades aledañas a la cabecera municipal (INEGI, 2014).

Comercio: existen cuatro unidades de comercio y abasto: dos tianguis, un mercado al aire libre y un centro receptor de productos básicos. En el municipio se tienen tres tortillerías y dos molinos de nixtamal, de acuerdo con información obtenida en el Directorio estadístico nacional de unidades económicas (DENUE) del INEGI (2015), estas unidades están manejadas por menos de cinco personas y de acuerdo con información obtenida directamente de los propietarios, cada tortillería procesa entre 300 y 500 kilogramos de maíz lo que genera un promedio de 400 litros de nejayote diariamente.

1.2 Contexto de la Sistémica en la historia

La Teoría General de Sistemas, surge en 1954 con la creación de la Sociedad para el avance de la Teoría General de Sistemas (Society for the Advancement and General Systems Theory), la cual, en 1957, cambió su nombre por Sociedad para la Investigación General de Sistemas (Society for General Systems Research), esta sociedad publicó *Sistemas Generales* en 1956 donde se incluía un artículo de Ludwig von Bertalanffy que contenía los propósitos de esta nueva disciplina. Estos propósitos incluían la integración de

diferentes ciencias naturales y sociales en una Teoría General de Sistemas que sería un medio para llegar a la teoría exacta de los campos no físicos de la ciencia, considerando el desarrollo de principios unificados que puedan conducir a la integración de la educación científica (Von-Gigch, 2012). La Teoría General de Sistemas tiene dos enfoques complementarios que permiten su desarrollo, en la Figura 1.4 se muestra una descripción breve de cada uno:



Figura 1. 4. Enfoques para el estudio de la Teoría de Sistemas de acuerdo con Johansen, (2013), (Elaboración propia, 2016).

Entre las disciplinas que acogieron esta teoría se encuentran la Cibernética con los estudios de Wiener y de Ashby; la Teoría de juego, la Ingeniería de Sistemas y la Investigación de Operaciones. Esta teoría tiene un enfoque multidisciplinario que permite ser aplicado a cualquier sistema natural o artificial, también busca un marco de referencia a una estructura de sistemas donde colgar la “carne y la sangre” de las disciplinas particulares en el cuerpo del conocimientos, por ello Boulding la llamó el “esqueleto de las ciencia”.

Un sistema, puede definirse como un conjunto de elementos o partes coherentemente organizadas e interconectadas siguiendo un patrón o estructura que produce un arreglo característico de comportamientos que pueden ser clasificados como su función o propósito (Meadows, 2008). En la Figura 1. 5 se muestran algunas características de los sistemas.

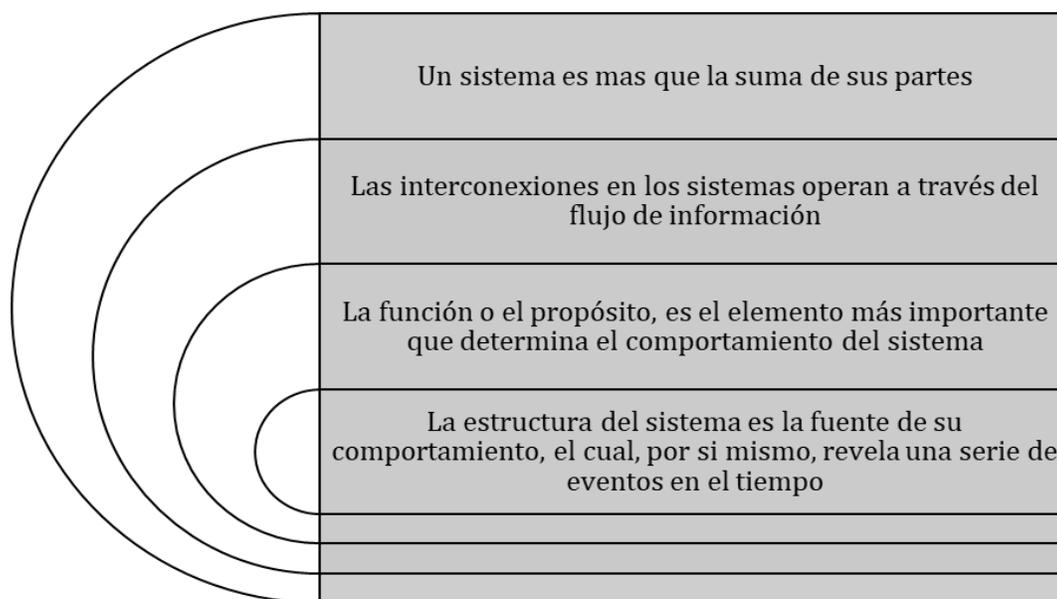


Figura 1. 5. Características de un sistema de acuerdo con Meadows (2008), (Elaboración propia, 2016).

El pensamiento sistémico permite encontrar patrones que se repiten en los acontecimientos lo que hace posible concebir previsiones en la solución y estudio de problemas; proporciona métodos más eficaces y mejora las estrategias de pensamiento; es la base de un razonamiento claro y una buena comunicación. Entonces, en vez de observar por separado áreas de conocimiento cuya comprensión requiere años de estudio, el pensamiento sistémico permite estudiar la conexión que existe entre las diversas disciplinas para predecir el comportamiento de los sistemas (O'Connor y McDermott, 1998). De modo que, utilizar este enfoque permite estudiar los agroecosistemas de una manera integral haciendo posible encontrar soluciones a los problemas inherentes a la producción y manejo de los mismos.

Con base en la Teoría General de Sistemas, han surgido varias tendencias que buscan su utilización a través de las ciencias aplicadas, entre las principales tendencias están las que se muestran en la Figura 1.6.

1.2.1 Enfoque sistémico

El enfoque sistémico, es un marco de trabajo conceptual multidisciplinario, cuyo objetivo es buscar similitudes de estructura y de propiedades; fenómenos comunes que ocurren en sistemas de diferentes disciplinas con el fin de encontrar generalizaciones referentes a la forma en que están organizados los elementos, a los medios por los cuales se recibe, almacena, procesa y recupera información; así como la forma en que se comportan, responden y adaptan ante diferentes entradas del medio. Este enfoque busca encontrar la relación de métodos de solución, a fin de extender su dominio de aplicación y facilitar la comprensión de nuevos fenómenos (Von-Gigch, 2012).

La complejidad es la condición de un sistema cuando está compuesto por numerosas partes que actúan en un modo no simple, cuando sus causas, efectos o estructura son desconocidos, cuando requiere mucha información, tiempo o energía para ser manejado o cuando produce efectos que son al mismo tiempo deseables e indeseables, o difíciles de controlar. Es directamente proporcional a la cantidad de los elementos, de los estados de dichos elementos y a la cantidad de vínculos entre los elementos (Herrscher, 2008).

1.2.2. Paradigma de la complejidad

El paradigma de la complejidad considera que es necesario combinar los conocimientos teóricos con los de acción, conocer para crear nuevos conocimientos más allá del saber técnico-aplicacionista y poner a prueba las categorías conceptuales con las que el científico o el tecnólogo trabajan para hacer inteligible o manipulable la realidad que se desea estudiar o sobre la que se desea intervenir. Entonces, los valores epistémicos que motivan este paradigma son: conocer para hacer, conocer para innovar y conocer para repensar lo conocido o pensado (Romero, 2003).

El Paradigma de la Complejidad postula la necesidad de organizar el conocimiento científico desde la transdisciplinariedad con el fin de comprender el mundo presente a partir de la unidad del conocimiento (Nicolescu, 2002).

1.2.3. Paradigma de la Complejidad y transdisciplinariedad

Los esfuerzos interdisciplinarios, aun cuando ayudan a prevenir los excesos de la especialización del saber, no resultan suficientes para dar cuenta de la complejidad de los fenómenos que ocurren en los sistemas, de modo que, la interdisciplinariedad no resulta una estrategia válida para dar cuenta del entrelazamiento de las múltiples dimensiones sobre las que se organiza la realidad como un todo (Romero, 2003).

Por otra parte, en la investigación transdisciplinaria no sólo se comparte un contenido, sino que los propios temas se transforman y van acoplándose de la manera más completa, lógica y natural. Entonces, el objeto y problemas de investigación pueden cambiar o redefinirse a medida que el complejo proceso de investigación transcurre (De la Herran, 2011).

1.3. Contexto histórico del manejo de los desechos de la agroindustria

Los residuos agroindustriales son materiales sólidos o líquidos que se generan a partir del consumo directo de productos primarios o de su industrialización y que ya no son de utilidad para el proceso que los generó, pero que son susceptibles de aprovechamiento o transformación para generar otro producto con valor económico que pueda ser de interés comercial y/o social (Saval, 2012).

Los residuos o subproductos agroindustriales comparten una característica principal que es el contenido de materia orgánica, constituida por diferentes porcentajes de celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina. Los subproductos o residuos de procesos agroindustriales pueden utilizarse como sustratos para la producción fermentativa de metabolitos de interés, como sustrato para la generación de bioenergéticos, mejoradores o acondicionadores de suelo obtenidos mediante composteo y suplemento alimenticio para animales. La mayor parte de los estudios para el aprovechamiento de residuos se realiza a nivel de laboratorio, no se experimenta el escalamiento para llegar a condiciones reales (Saval, 2012).

Teoría general de sistemas



Cibernética

Desarrollada por Robert Wiener, se basa en los principios de retroalimentación (o causalidad circular) y de homeóstasis; explica los mecanismos de comunicación y control entre seres vivos y máquinas para comprender el comportamiento generado por los sistemas. Se le llama también ciencia de la organización efectiva.



Teoría de la información

La información es una cantidad mensurable, mediante una expresión isomórfica con entropía negativa, Miller determinó que mientras más complejos son los sistemas más energía destinan a la obtención, procesamiento, decisión, almacenaje y/o comunicación de la información.



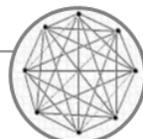
Teoría de juegos

Desarrollada por von Newman y Morgenstern; esta teoría trata de analizar, mediante un marco de referencia matemático, la competencia que se produce entre dos o más sistemas racionales que buscan maximizar sus ganancias y minimizar sus pérdidas.



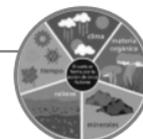
Teoría de la decisión

Busca analizar la selección racional de alternativas dentro de los sistemas mediante la consideración de un gran número de situaciones y sus posibles consecuencias determinando, mediante procedimientos estadísticos, una decisión que optimice el resultado.



Topología o matemática relacional

Es aplicada al estudio de las interacciones entre las partes de los sistemas, permite ilustrar las partes de un sistema y las propiedades de las conexiones entre estos elementos. Spier, mediante la teoría de grafos establece un método para comprender la conducta.



Análisis factorial

Considera el aislamiento, mediante análisis matemático, de los factores en problemas multivariados. El planteamiento o trata de determinar las principales dimensiones de los sistemas, mediante la identificación de sus elementos claves.



Ingeniería de Sistemas

Se refiere a la planeación, diseño, evaluación y construcción científica de sistemas hombre-máquina. El interés teórico se concentra en que las entidades con componentes heterogéneos pueden ser analizadas como sistemas. Hall la propone como una técnica para estudiar sistemas complejos.



Investigación de operaciones

Stafford Beer la define como el control científico de los sistemas para desarrollar modelos que incorporen factores como el azar o el riesgo, con los cuales se puede predecir y comparar los resultados de las diferentes decisiones y estrategias o controles.

Figura 1. 6. Aplicaciones prácticas de la Teoría General de Sistemas de acuerdo con Johansen (2013), (Elaboración propia, 2016).

Existen diversos desechos y subproductos de la agroindustria, sin embargo, la información sobre la factibilidad de usar compostas o biopreparados hechas a partir de estos residuos es escasa. Garcia-Gomez, Bernal y Roig (2002) proponen la utilización de compostas obtenidas a partir de residuos de la industria cervecera y de podas en olivo como sustratos para cultivo de plantas ornamentales. En México, uno de los procesos agroindustriales que genera residuos con potencial para utilizarse en la agricultura es la nixtamalización de maíz para elaborar tortilla.

1.3.1 Nejayote

El proceso de nixtamalización requiere un volumen aproximado de 75 L de agua por cada 50 kilogramos de grano de maíz, generando un volumen similar de nejayote (Niño-Medina *et al.*, 2009). En México, diariamente, se generan entre 1500 y 2000 metros cúbicos de nejayote para el procesamiento de 600 toneladas de grano, esto es un volumen cercano a 1.2 millones de metros cúbicos mensuales (Salmerón-Alcocer *et al.*, 2003).

El nejayote, es un líquido de desecho del proceso de nixtamalización, rico en sólidos de maíz y calcio, se considera contaminante debido a sus características químicas y a la alta demanda de oxígeno. Este efluente tiene un pH de 11.39, 2.28 % de sólidos totales, 0.767 % de cenizas, 0.86 % de carbohidratos, conductividad eléctrica de $4510.12 \mu\text{S cm}^{-1}$, 8342.5 mg L^{-1} sólidos suspendidos totales, turbidez de 963.3 NTU y demanda de oxígeno de $40058.14 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ (Valderrama-Bravo *et al.*, 2012). La composición química y las demandas química y biológica de oxígeno, demuestran que el efluente puede contribuir a la contaminación ambiental porque es desechado a los drenajes sin recibir un tratamiento previo. Los métodos comunes de tratamiento de agua no representan una alternativa viable para recuperar el agua contenida en el nejayote debido a su alto costo y baja accesibilidad (Valderrama-Bravo *et al.*, 2013).

Existen algunas investigaciones orientadas al tratamiento del nejayote para disminuir su efecto contaminante, sin embargo, son pruebas realizadas en laboratorio y que utilizan bajos volúmenes de líquido (Figura 1.7). Entre los procesos que se proponen están la filtración y microfiltración (Castro-Muñoz y Yáñez-Fernández, 2015), el filtrado para eliminación de sólidos suspendidos (Valderrama-Bravo *et al.*, 2013) y el tratamiento

oxidativo en presencia de quitosán (García-Zamora *et al.*, 2015). Además, del tratamiento del efluente para separación de partículas, se han realizado trabajos para obtener sustancias que pueden ser utilizadas como aditivos para la industria alimenticia; Acosta-Estrada *et al.* (2014) demostraron que el aditivo hecho con nejayote y gluten mejora el contenido de fibra, calcio y las propiedades nutraceuticas del pan de caja; mientras que, Velasco-Martinez *et al.* (1997) estudiaron la utilización del nejayote en alimentación de aves. Rojas-García *et al.* (2012) y Acosta-Estrada, Serna-Saldívar y Gutiérrez-Urbe (2015) detectaron y obtuvieron sustancias anticancerígenas a partir de sólidos de nejayote. Entre las alternativas para reutilizar los residuos de los procesos agroindustriales se encuentran el composteo y la producción de biopreparados o biofertilizantes.

1.4. Contexto histórico del manejo de los residuos de la producción pecuaria

Los estiércoles y residuos de cosechas han sido aplicados al suelo con el fin de proporcionar nutrientes a las plantas, mantener los rendimientos y la fertilidad del suelo; sin embargo, en años recientes, pasaron de ser recursos a ser un desecho de los sistemas de producción pecuaria; este problema se incrementó cuando la agricultura y la ganadería se separaron y se volvieron intensivas (Gil, Carballo y Calvo, 2008; Gliessman, 2015). Una de las consecuencias de la disminución de aplicaciones de estiércoles al suelo, es la disminución del contenido de carbono en el suelo con el consecuente detrimento en la estabilidad del agua en los agregados del suelo, de la actividad microbiana, de la población de lombrices y de la capacidad de retención de agua (Karlen, Russell y Mallarino, 1998). Esto conduce a generar un ambiente biológico, químico y físico menos propicio para los cultivos.

El estiércol generado en los sistemas ganaderos puede provocar impactos ambientales negativos si no existe un control en el almacenamiento, el transporte o la aplicación, debido a la emisión de gases contaminantes hacia la atmosfera, y la acumulación de micro y macronutrientes en el suelo y en los cuerpos hídricos superficiales (Pinos-Rodríguez *et al.*, 2012).

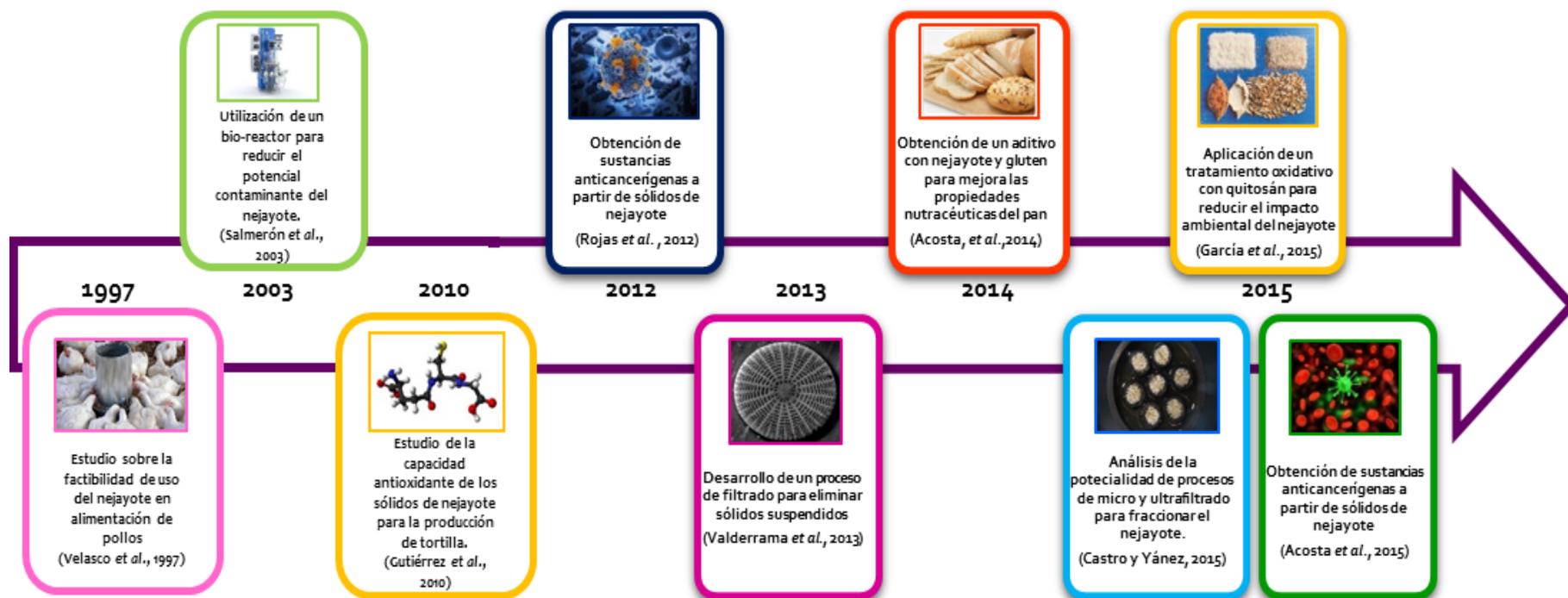


Figura 1. 7. Contexto histórico de la investigación sobre el manejo del nejayote (Elaboración propia, 2016).

El método de tratamiento de estiércol más usado en México es el secado al aire libre sin recibir manejo para llevar a cabo el compostaje, esto lleva a que el proceso de descomposición requiera entre ocho y doce meses para completarse generando problemas de proliferación de moscas, malos olores y dispersión de partículas finas en el aire. Pinos-Rodríguez *et al.* (2012) reportan que, aplicar un proceso de biofermentación a las excretas reduce 66 % las emisiones de metano y óxido nitroso y 98 % de los olores, lo cual genera beneficios ambientales y sociales.

El estiércol, por sus características orgánicas aumenta la capacidad de retención de agua, el intercambio catiónico, la capacidad de filtración de agua al subsuelo y reduce la erosión; la fracción líquida de este desecho ayuda a disminuir las pérdidas de nitrógeno, carbono y azufre en sus formas gaseosas en el suelo, por lo que podría ser una fuente para sustituir el uso de fertilizantes químicos (Powell y Williams, 1993; Capulín-Grande *et al.*, 2001). La aplicación de estiércoles compostados adicionados con minerales, además de disminuir los problemas de contaminación de suelos y agua causados por manejo inadecuado; mejora las propiedades químicas y el contenido de nutrientes en el suelo y puede ser una alternativa para mejorar el contenido de materia orgánica del suelo y sustituir la fertilización mineral en cultivos como el maíz (Gil, Carballo y Calvo, 2008).

1.5. Fertilizantes orgánicos

El incremento en el costo de los fertilizantes químicos y la contaminación que algunos propician en el ambiente cuando se utilizan irracionalmente, hace necesario encontrar nuevas alternativas de fertilización, que sean económicas y eficientes. Una de estas alternativas es la utilización de las fuentes orgánicas locales y regionales como las excretas producidas en sistemas de producción ganadera. Estos desechos contienen nutrimentos que los cultivos pueden utilizar, pero poseen altas concentraciones de coliformes fecales que pueden producir enfermedades infecciosas; por ello, para utilizarlas como fertilizantes, es necesario darles un tratamiento previo que elimine estos agentes infecciosos, entre las formas de hacerlo están el composteo, la biofermentación y la biodigestión (Soria-Fregoso *et al.*, 2001; Gutiérrez *et al.*, 2008)

Muchos de los abonos orgánicos utilizados en la agricultura se obtienen de excretas de animales, principalmente bovinos, porcinos, aves y ovinos; pueden ser usados directamente al mezclarse con el suelo o después de un proceso de descomposición como el compostaje o la fermentación (Fortis-Hernández *et al.*, 2009). Cuando se utilizan frescos, deben ser mezclados con agua y aplicados al suelo alrededor de la planta para evitar daños. Estos materiales tienen un alto valor económico en la producción de alimentos ya que son recursos renovables y son más baratos que los fertilizantes inorgánicos (Ibeawuchi *et al.*, 2015). En Ahuazotepec, Puebla de acuerdo con información obtenida con vendedores, en marzo de 2016 el precio de la tonelada de urea fue de 6 mil 540 pesos y la de gallinaza de mil pesos.

El compostaje es una opción para obtener abonos de buena calidad a partir de desechos orgánicos; sin embargo, el proceso tarda entre 6 y 8 meses en completarse. Otra opción es el vermicomposteo que requiere la utilización de lombrices, dicho proceso tarda entre 1 y 2 meses para generar un abono de buena calidad y requiere un manejo más cuidadoso que el composteo tradicional (Roy *et al.*, 2010). La biofermentación requiere entre 20 y 30 días para generar un abono de buena calidad y su manejo es simple comparado con los métodos mencionados anteriormente.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2013a), definió un biofertilizante como el resultado de la descomposición o fermentación, mediante la acción de microorganismos de materia orgánica disuelta en agua; este proceso transforma elementos que no podrían ser aprovechados directamente por las plantas en sustancias fácilmente asimilables. Los biofertilizantes pueden ser aeróbicos cuando se producen en presencia de oxígeno y anaeróbicos que se producen en ausencia de este elemento. La utilización de biofertilizantes, solos o en combinación con otros productos bioactivos mejora el balance nutricional de las plantas, incrementa el rendimiento y la calidad de frutos como en el caso de la asociación tomate-maíz (Terry, Leyva y Díaz, 2006).

El proceso de fermentación aerobia se lleva a cabo en presencia de microorganismos, principalmente hongos y bacterias, que pueden ser utilizados como fungicidas o inoculantes. Kupper *et al.* (2006) determinaron que, un biofertilizante producido con estiércol de bovino a una concentración del 10 % favorece el control de la mancha negra

de los cítricos causada por el hongo *Guignardia citricarpa*. Asimismo, se reportó que la composta obtenida de estiércol bovino o de aves tiene potencial en la reducción de la incidencia de la mancha gris en el maíz, esto sugiere que, adicionalmente al beneficio de la aplicación en el suelo, los abonos pueden ser utilizados en el manejo de enfermedades, lo que conduciría a una producción más sustentable de maíz (Lyimo, Pratt y Mnyuku, 2012). Además, la inoculación microbiana con bacterias presentes en el biofertilizante, incrementa la asimilación de N, P y K de la planta y mejora las propiedades del suelo, principalmente el contenido de materia orgánica y el nitrógeno total (Wu *et al.*, 2005).

El maíz requiere nutrientes para satisfacer sus necesidades; éstos son obtenidos del suelo y dependen de la fertilidad que tenga por lo que se generan variaciones en el tiempo y la disponibilidad. Los principales nutrientes que demanda el maíz son nitrógeno, fósforo y potasio; normalmente se aplican a través de fertilizantes químicos y en algunas ocasiones mediante estiércoles y residuos de cosecha (Salazar-Sosa *et al.*, 2009). Cuando se dispone de algún desecho orgánico es necesario buscar la manera más adecuada de aprovecharlo. Salazar-Sosa *et al.* (2003) determinaron que la incorporación de residuos de cosecha en campos de maíz incrementa el contenido de nitrógeno total a través del tiempo; asimismo, Trejo-Escareño *et al.* (2013) reportan que la aplicación de estiércol bovino incrementa el contenido de materia orgánica en el suelo y mejora la producción de forraje hasta ser más alta que con fertilización química, lo que permite considerarlo una alternativa para satisfacer la demanda del cultivo.

Las prácticas de fertilización apropiadas juegan un rol crítico en los rendimientos de los cultivos, en estudios realizados se demuestra que, aplicar una fertilización nitrogenada con fuentes químicas por un largo tiempo genera una tendencia negativa en el rendimiento; mientras que, si se aplican estiércoles o combinaciones de estos con dosis bajas de fertilizantes químicos, se logra mantener el comportamiento positivo del rendimiento y se mejora el contenido y disponibilidad de carbono, y macronutrientes como el N, P y K (Parsons *et al.*, 2009).

La disponibilidad de micronutrientes en el suelo puede afectar la producción y calidad de los cultivos; sin embargo, en las recomendaciones de fertilización tradicionales casi nunca

se toman en cuenta; la adición de estiércoles mejora la disponibilidad de estos elementos, principalmente de zinc y fierro (Jiang-Tao y Zhang, 2007).

La sustentabilidad del sistema maíz bajo aplicación de estiércol se atribuye a la mejora de la calidad y las propiedades mecánicas del suelo; sin embargo, para incrementar los rendimientos y la calidad del suelo debe recomendarse la aplicación de abonos combinados con fertilización inorgánica con NPK (Jiang-Tao y Zhang, 2007; Huang *et al.*, 2010) porque las aplicaciones de abonos orgánicos y una cantidad baja de fertilizantes químicos favorecen la biomasa y actividad microbiana, la cantidad de carbono y la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Liu *et al.*, 2009; Nazli *et al.*, 2014). De modo que, sembrar maíz en suelos donde se aplicaron estiércoles líquidos genera incrementos en el rendimiento y contribuye a un mejor balance entre los nutrientes que consume y que genera la planta (Schröder *et al.*, 2015).

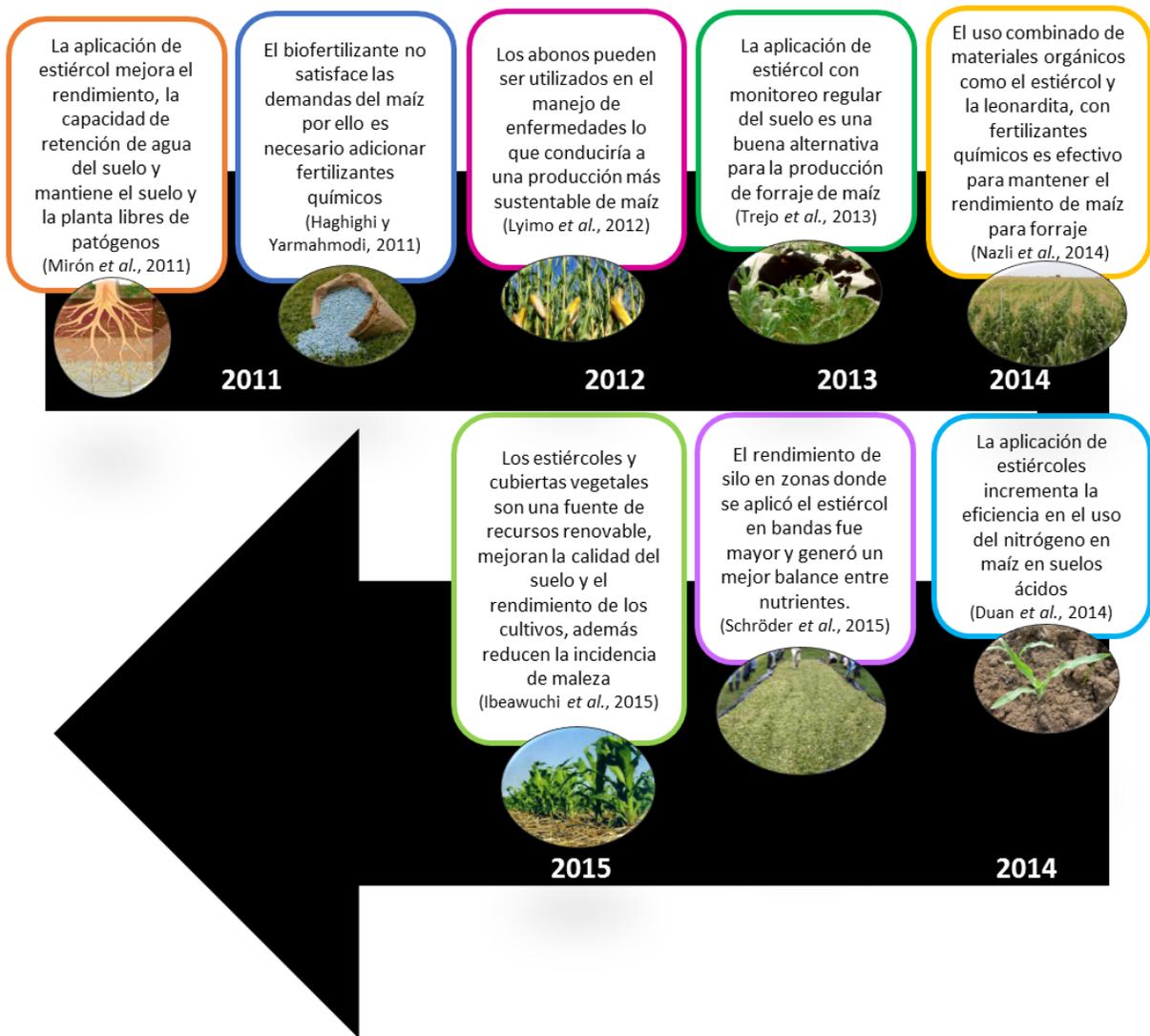
Reemplazar la fertilización química con la aplicación de estiércoles favorece el incremento del rendimiento y el valor nutritivo de las plantas, mejora la capacidad de retención de agua del suelo, reduce la incidencia de maleza y mantiene el suelo y la planta libres de patógenos como lo reportan Miron *et al.* (2011) y Parsons *et al.* (2009) en experimentos realizados en trigo y maíz; además, la aplicación de estiércoles incrementa la eficiencia en el uso del nitrógeno en maíz en suelos ácidos (Duan *et al.*, 2014).

1.6. Uso de nejayote y estiércol de ovino como fertilizante

En la revisión de literatura científica sobre el uso de nejayote y estiércol como fertilizantes, se encontró que en la mayoría de los trabajos se reportan los resultados de investigaciones donde se evaluaron, en forma puntual, los efectos de algunos biofertilizantes en el rendimiento, las características físicas y químicas del suelo o en el control de enfermedades (Figura 1.8).



Figura 1. 8. Contexto histórico de la investigación sobre uso de estiércol como fertilizante (Elaboración propia, 2016).



Continuación Figura 1.8. Contexto histórico de la investigación sobre uso de estiércol como fertilizante (Elaboración propia, 2016).

1.7. Contexto histórico del maíz

1.7.1. Origen y clasificación botánica

El maíz es originario de Mesoamérica, es una especie domesticada a partir del Teocintle hace 8000 años. México es considerado como el centro de diversidad del maíz cultivado; esta gramínea ha podido evolucionar en diversos hábitats a partir de mutaciones acumulativas obtenidas mediante selección humana y natural (Mera y Caballero, 2010). La clasificación botánica se muestra en la Tabla 1.2 (Krishna, 2013):

Tabla 1. 2. Clasificación botánica del maíz a partir de Krishna (2013), (Elaboración propia, 2016).

Clasificación botánica	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Poales
Familia	Poaceae
Género	Zea
Tribu	Maydae
Especie	Mays

El maíz, el arroz y el trigo son los tres cereales más importantes a nivel mundial; la producción en 2014 de acuerdo con datos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) fue de 10.3, 2.89 y 1.47 billones de toneladas respectivamente (USDA, 2016). El maíz, además de ser utilizado como alimento para humanos y animales, es también una materia prima básica de la industria de transformación (Krishna, 2013). Después del petróleo, es el producto natural que más usos tiene, por ello, es considerado el recurso renovable más importante del mundo. En la Tabla 1.3 se presentan los usos más importantes del maíz de acuerdo con Salazar y Godínez (2010).

1.7.3. Producción mundial de cereales

Los cereales, que incluyen trigo, arroz, cebada, maíz, centeno, mijo y sorgo, son la principal fuente de alimento para los humanos y ocupan más de la mitad de la superficie de cultivo del mundo; el rendimiento de estos cultivos ha disminuido alrededor de un 2 % con respecto a la década de los noventa (FAO, 2013b). La producción total mundial, que es de

2561.8 millones de toneladas, 1080.2 millones de t se destinan al consumo humano; 889.8 millones de t a la alimentación animal y 531.2 millones son procesadas para uso industrial y semilla (FAO, 2016a).

Tabla 1. 3. Principales usos del maíz a partir de Salazar y Godínez (2010), (Elaboración propia, 2016).

Uso	Descripción
Humano	Elotes
	Granos para pozole, palomitas y atoles.
	Maíz nixtamalizado para tortillas y sus derivados, harinas, masas para tamales.
	Brácteas para envolver otros alimentos como tamales y chocolates.
	Dulces y botanas
	Aceites
	Bebidas alcohólicas
Animal	Forraje
	Preparación de silo
Industrial	Grano quebrado, molido o entero
	Almidones y derivados químicos
	Dextrosa y fructuosa para jarabes
	Fibras y plásticos
	Productos de belleza como jabones, geles, lociones y cosméticos
	Colorantes
	Productos farmacéuticos
Biocombustibles	Saborizantes y jaleas
	Etanol

El maíz, junto con el arroz y el trigo, proveen al menos el 30 % de la ingesta calórica para más de 40.5 billones de personas en 94 países en desarrollo. El maíz se consume tanto de manera directa como indirecta (Tabla 1.3). Actualmente, es el cultivo más importante en África Sub-Sahariana, América Latina y el Caribe, y es un cultivo clave en Asia. El consumo anual per cápita promedio es de 20 kg por año en países desarrollados; sin embargo, en América Latina y el Caribe el valor se incrementa a 47.6 kg, en África Sub-Sahariana es de 39.7 kg y en Asia es de 9.3 kg por año (Renard y Storr, 2014).

La demanda del maíz para grano, particularmente maíz amarillo, está creciendo en forma significativa. El principal productor de este grano es Estados Unidos de América, país que está utilizando una gran parte de su producción para la obtención de etanol; se estima que

aproximadamente el 40 % de su producción está comprometida para la elaboración de etanol, esto llevará a un incremento en los precios del grano a nivel global (Romero-Padilla *et al.*, 2015).

El incremento de la población mundial y la incorporación de cantidades más altas de carne, aves y productos lácteos en la dieta diaria; hacen que la demanda de maíz se incremente, por lo que se estima que, para el 2025, el maíz será el cultivo más sembrado en el mundo, mientras que entre 2015 y 2050 la demanda de maíz en los países en desarrollo será del doble (Renard y Storr, 2014)

En 2015, la producción de maíz fue de 1013.6 millones de toneladas de acuerdo con datos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2016). En el periodo entre 2004 y 2015 (Figura 1.9), la tasa media anual de crecimiento fue de 4.2 %. El área cosechada se incrementó de 144.7 a 185.1 millones de hectáreas entre 2004 y 2013 (FAOSTAT, 2016), lo que representa una tasa de crecimiento promedio de 2.8 %.

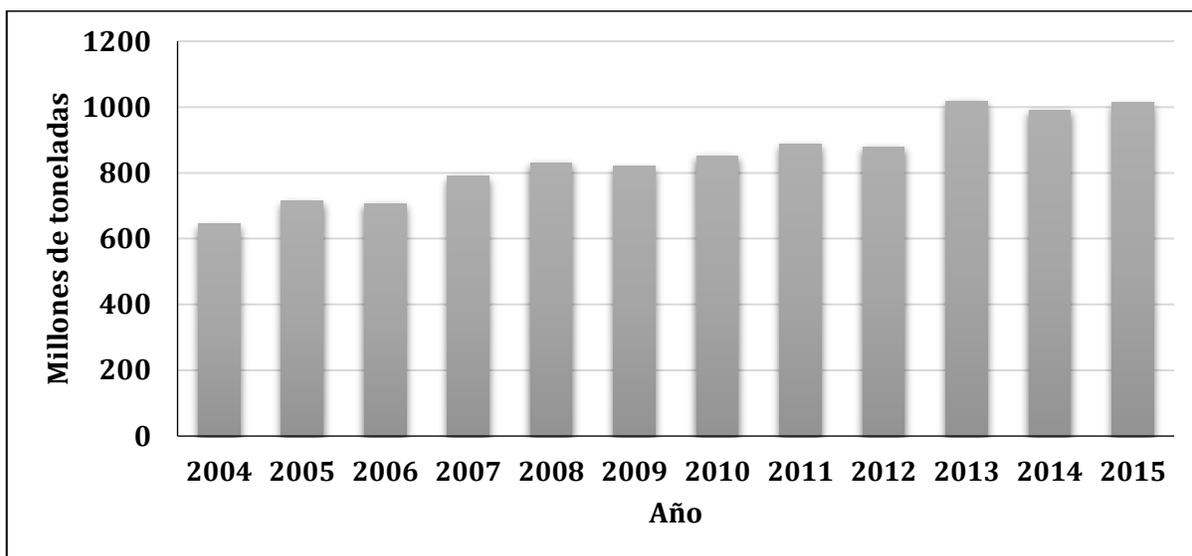


Figura 1. 9. Producción mundial de maíz 2004-2015 con datos de FAOSTAT (2016) y USDA (2016), (Elaboración propia, 2016).

La producción de maíz mayor ocurre en países del Continente Americano; sin embargo, es un cultivo importante en Asia, Europa y África. En el periodo 2003–2014, las tasas medias anuales de crecimiento fueron de 5.1 % para Asia, 5 % en África, 2.8 % en América, 1.1 % en Oceanía y 1.6 % en Europa (Figura 1.10).

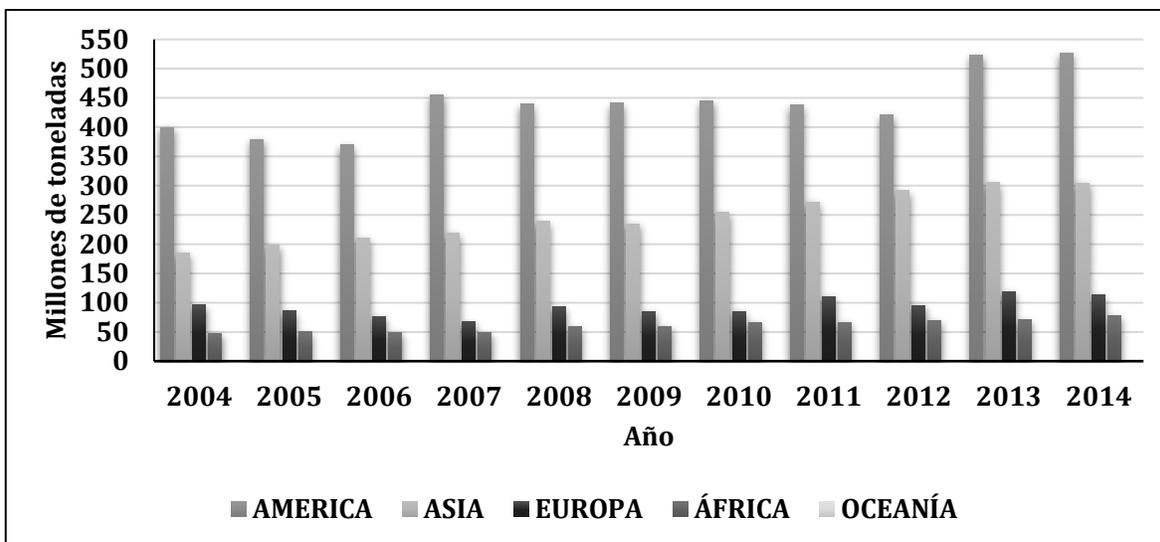


Figura 1. 10. Producción de maíz por continente 2004-2014 con datos de FAOSTAT, (2016), (Elaboración propia, 2016).

Los principales países productores son Estados Unidos de América, con un volumen de 361 millones de toneladas, China con 215.8, Brasil con 79.8, México con 23.3, Argentina con 33, India con 23.7 y Rusia con 11.3 (Figura 1.11) (FAOSTAT, 2016).

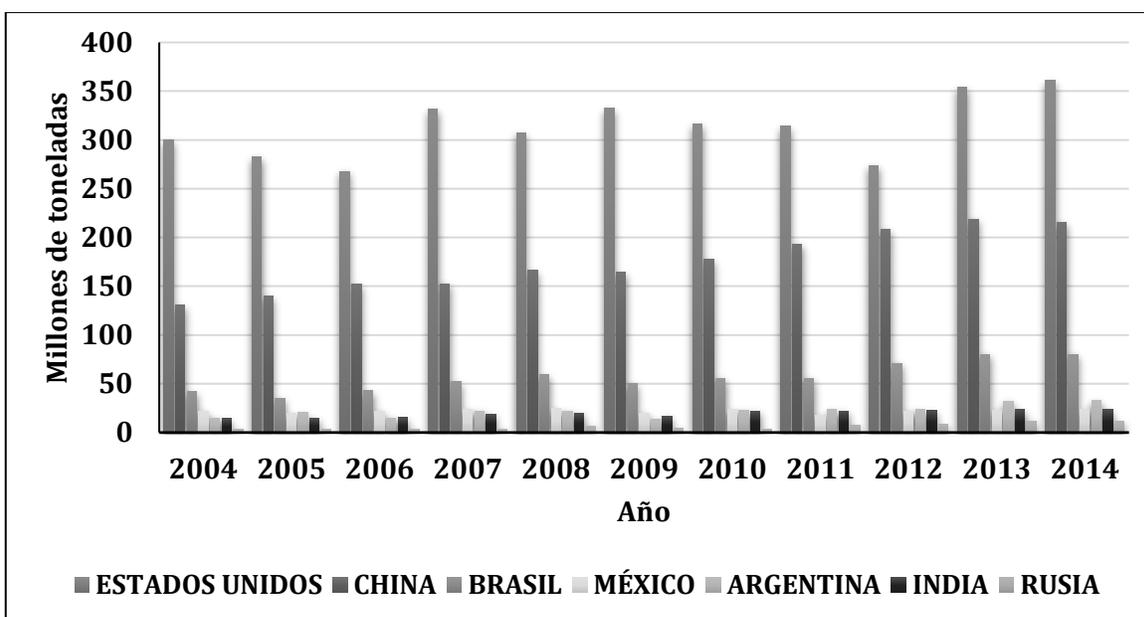


Figura 1. 11. Principales países productores de maíz 2004-2014 con datos de FAOSTAT, (2016), (Elaboración propia, 2016).

La producción de maíz en los países antes mencionados presenta tasas de crecimiento positivas; en el periodo 2004 a 2014, los países que presentaron los valores máximos para este indicador fueron Rusia (12.4 %) y Argentina (8.2 %), mientras que, México y Estados

Unidos tuvieron los menores crecimientos con 0.7 % y 1.9 %, respectivamente. China presenta una tasa de crecimiento de 5.2 %, la India de 5.3 % y Brasil de 6.7 %.

1.7.3.1. Producción de maíz en América

El Continente Americano se divide geográficamente en cuatro regiones: América del Norte, América del Sur, América Central y el Caribe; en todas se produce maíz y el continente tiene cuatro países dentro de los principales productores del grano a nivel mundial: Estados Unidos, Brasil, México y Argentina. En el periodo 2004–2014, América del Sur y el Caribe tuvieron las tasas medias anuales de crecimiento mayores en la producción del grano con valores de 6.8 % y 2.1 %, respectivamente; en América del Norte esta tasa fue de 1.9 % y en América Central de 1 % (Figura 1.12).

El principal productor a nivel mundial es Estados Unidos, también es el mayor productor del norte del Continente Americano. En este país se localiza la franja maicera que es el área geográfica comprendida por los estados de Iowa, Illinois, Indiana, Sur de Michigan, Oeste de Ohio, Este de Nebraska, Este de Kansas, Sur de Minnesota y algunas partes de Missouri.

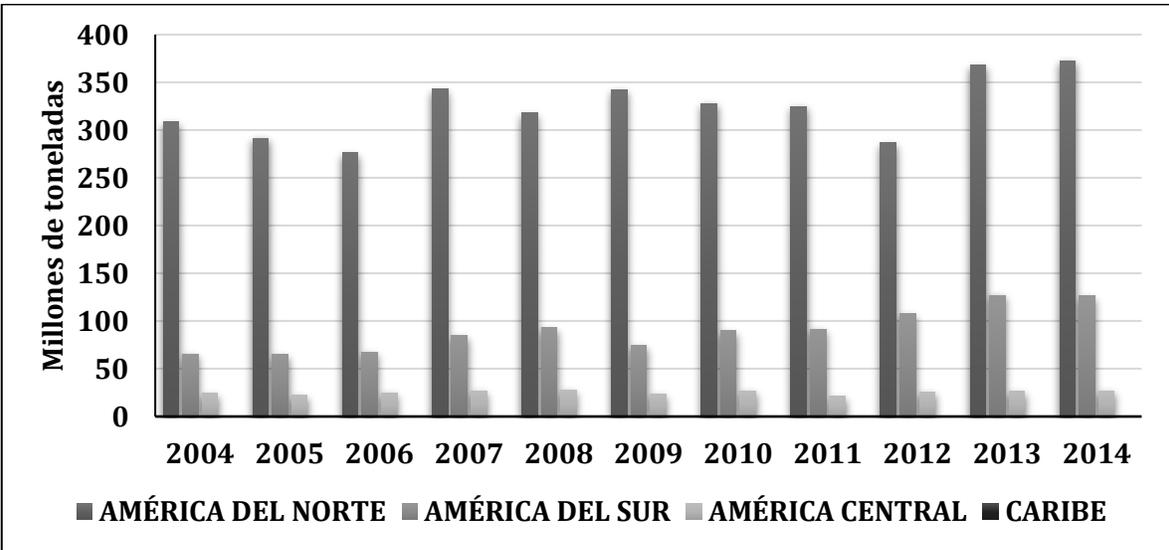


Figura 1. 12. Producción de maíz en el Continente Americano 2004-2014 con datos de FAOSTAT (2016), (Elaboración propia, 2016).

La producción de esta región en el 2015 fue de 280.7 millones de toneladas, lo que representa el 75.8 % de la producción total del país y su distribución se muestra en la Figura 1.13.

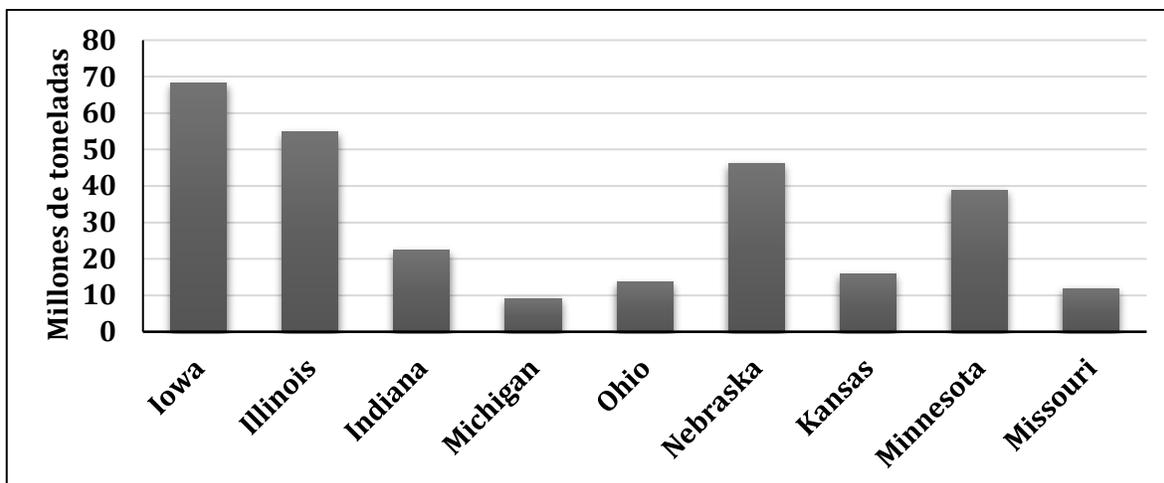


Figura 1. 13. Producción de maíz en la franja maicera de Estados Unidos de América 2015 con datos de USDA (2016), (Elaboración propia, 2016).

1.7.3.2. Producción nacional

En México, el maíz es un grano básico para la alimentación de la mayor parte de la población y un insumo importante para la alimentación del ganado y para la elaboración de diferentes productos industriales. Sin embargo, la producción en el país no es suficiente para satisfacer la demanda por lo que las importaciones de grano se han incrementado en los últimos años. La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), a través del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), reporta que, en el 2015 se sembraron 15 millones 614 mil 533 ha, de las cuales se cosecharon 14 millones 721 mil 432 ha. La actividad agrícola generó un valor de producción de 258 mil 337 millones 14 mil pesos. El maíz para grano ocupa el 48.7 % de la superficie nacional agrícola, del total la superficie de temporal es de 6 millones 99 mil 689 ha y la de riego es de 1 millón 500 mil 763 ha; su valor de producción es el 32.7 % del total nacional con 84 mil 523 millones 647 mil pesos.

La producción nacional de maíz en 2015 fue de 24.7 millones de toneladas (SIAP, 2016c), la tasa media anual de crecimiento del periodo 2004–2015 fue de 1.2 %, si bien hubo un incremento en la cantidad producida, la superficie sembrada tiene una tasa de crecimiento negativa de 0.9 % en el mismo periodo (Figura 1.14).

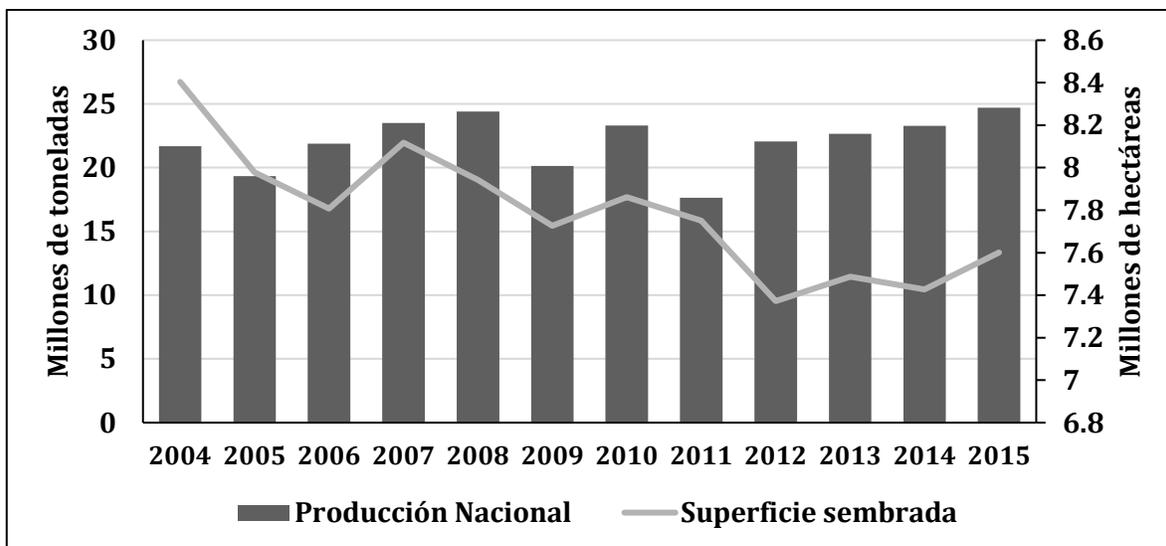


Figura 1. 14. Producción y superficie sembrada de maíz en México 2004-2015 con datos de SIAP (2016), (Elaboración propia, 2016).

La superficie de temporal en el 2015 fue de 6.1 millones de hectáreas; mientras que, la de riego fue de 1.5 millones (Figura 1.15). En el periodo 2004–2015, la superficie de riego tuvo una tasa de crecimiento promedio de 1.1 % y la de temporal fue de 1.3 % negativa.

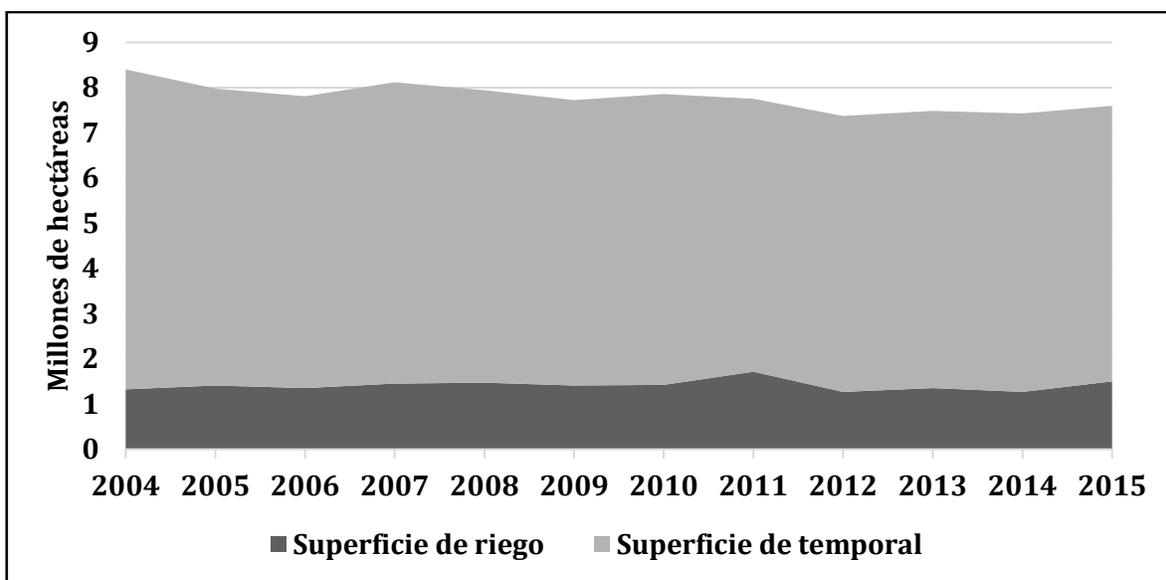


Figura 1. 15. Superficie de riego y temporal cultivadas con maíz en México con datos de SIAP (2016), (Elaboración propia, 2016).

El precio medio rural por tonelada se ha incrementado un promedio de 6.7 % en el periodo 2004–2015. En el 2015, año el precio fue de 3 mil 423 pesos. El maíz se produce en todas las entidades federativas; sin embargo, el 64.5 % del volumen de producción se concentra

en Sinaloa, que es el principal productor de México junto con Jalisco, Michoacán, Estado de México, Chiapas, Guerrero y Veracruz (Financiera Rural, 2014).

Los principales estados productores en México son Sinaloa (región Pacífico), Jalisco y Michoacán (región Occidente), Estado de México (región Valles Altos), Guerrero, Veracruz y Chiapas (región Sur). El SIAP (2016) reporta que para el 2015 la producción fue de 5.4 millones de toneladas en Sinaloa, 3.3 mdt en Jalisco, 2 mdt en el Estado de México, 1.7 mdt en Michoacán, 1.2 mdt en Veracruz, 1 mdt en Chiapas y 0.97 mdt en Guerrero. En la Figura 1.16 se muestra el comportamiento de la producción de grano en los principales estados durante el período 2004–2015.

En el periodo comprendido entre 2004 y 2015, las tasas de crecimiento promedio de la superficie sembrada con maíz son positivas para Sinaloa y Veracruz con incrementos de 0.08 % y 0.01 %, respectivamente y son negativas para el Estado de México, Jalisco, Chiapas, Michoacán y Guerrero. El rendimiento tuvo un incremento de 3.3 % en Michoacán y de 2.6 % en el Estado de México; mientras que la producción se incrementó en 2.7 % en Sinaloa.

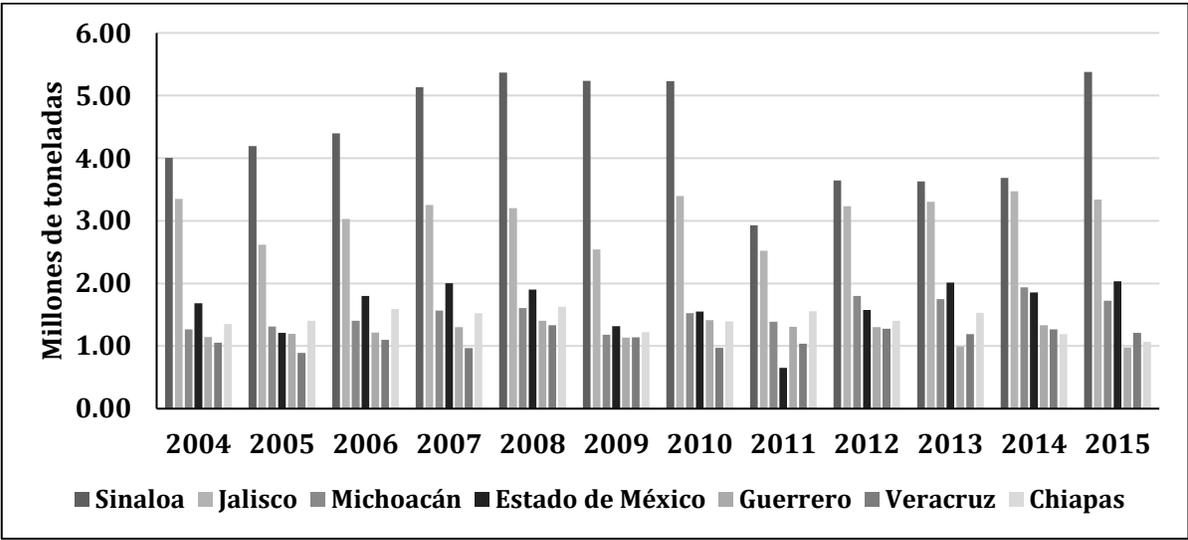


Figura 1. 16. Producción estatal de maíz en México 2004-2015 con datos de SIAP (2016), (Elaboración propia, 2016).

1.7.3.3. Producción de maíz para grano en Puebla y Ahuazotepec

El estado de Puebla tiene una superficie agrícola de 802 mil 943 ha cuyo valor de producción en el 2015 fue de 10 mil 204 millones 455 mil pesos. El maíz para grano ocupa el 69.2 % de la superficie estatal sembrada y genera el 37.2 % del valor de la producción estatal con 3 mil 797 millones 692 mil pesos. El rendimiento promedio estatal es de 1.9 t ha⁻¹, en superficies de riego este valor es de 4.7 y en temporal es de 1.6 t ha⁻¹. El precio medio rural por tonelada es de 3 mil 790 pesos (SIAP, 2016).

El volumen de producción de maíz para grano en el estado de Puebla en el 2015 fue de 1 millón 2 mil 155 toneladas. El estado cuenta con 50 mil 578 hectáreas de riego y 505 mil 618 ha de temporal dedicadas al cultivo de maíz (SIAP, 2016). En el periodo 2004–2015, se tuvo una tasa de crecimiento negativa de 0.14 % en la superficie sembrada con maíz (Figura 1.17); mientras que, se presentó una tasa de crecimiento positivo de 1.4 % en la producción, de 0.7 % en el rendimiento y de 6.6 % en el precio medio rural por tonelada.

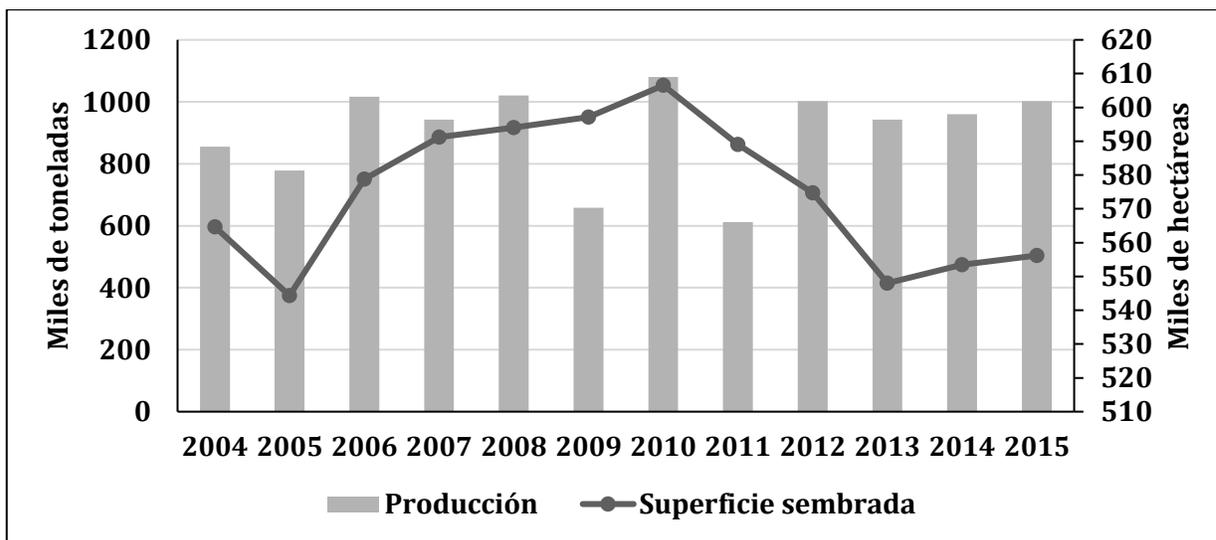


Figura 1. 17. Producción de maíz en el estado de Puebla con datos de SIAP (2016), (Elaboración propia, 2016).

El estado de Puebla se divide en 8 Distritos: Cholula, Huauchinango, Izúcar de Matamoros, Libres, Tecamachalco, Tehuacán, Teziutlán y Zacatlán. En el Distrito de Huauchinango se agrupan los municipios de Ahuazotepec, Chiconcuautla, Francisco Z. Mena, Hermenegildo Galeana, Honey, Huauchinango, Jalpan, Jopala, Juan Galindo, Naupan, Pahuatlán, Pantepec, San Felipe Tepatlán, Tlacuilotepec, Tlaola, Tlapacoya, Tlaxco, Venustiano Carranza,

Xicotepec y Zihuateutla. La producción de maíz para el 2015 en este Distrito fue de 41 mil 913 toneladas en una superficie de 26 mil 295 ha lo que representa el 88.5 % de la superficie distrital (SIAP, 2016).

El municipio de Ahuazotepec, tiene una superficie agrícola de 2834.6 ha, la superficie de temporal es de 1476.5 hectáreas y la de riego es de 1358.1 ha. En 2015 la producción de maíz para grano fue de 4 mil 75 t, con rendimiento promedio de 1.6 t ha⁻¹ y se reporta un precio medio rural de 4 mil 500 pesos por tonelada (SIAP, 2016).

En el periodo entre 2004 y 2015 (Figura 1.18), las tasas medias de crecimiento anual fueron negativas para la superficie sembrada (-0.11 %), la producción (-1.2 %) y el rendimiento (-1.14 %); sin embargo, el precio medio rural por tonelada tuvo una tasa de crecimiento de 6.4 %.

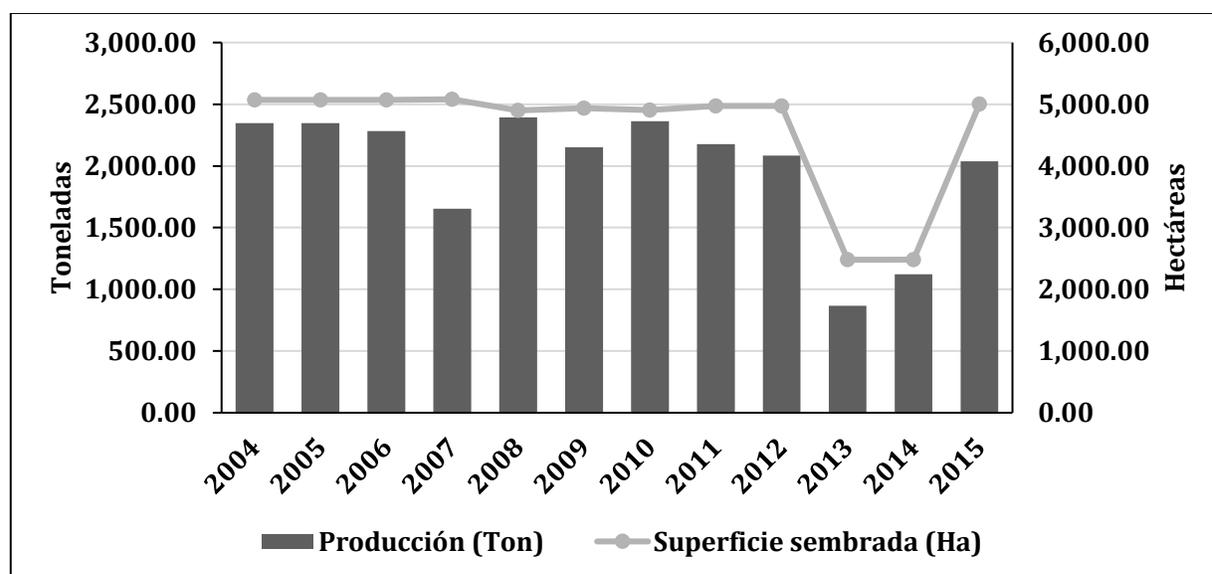


Figura 1. 18. Superficie sembrada y producción de maíz en Ahuazotepec 2004 -2015 con datos de SIAP (2016), (Elaboración propia, 2016).

1.8. Tecnología de producción del maíz

1.8.1. Requerimientos edáficos y climáticos

Las áreas de producción de maíz pueden ser enmarcadas bajo diversos criterios, entre ellos están las condiciones fisiográficas, de fertilidad del suelo o de productividad. Las áreas se conocen como Mega-ambientes, y se definen como áreas de producción no

necesariamente continuas que se encuentran delineadas por ciertas condiciones ecológicas, características del cultivo, ciertas restricciones bióticas y abióticas y por factores socioeconómicos específicos. Considerando las condiciones fisiográficas; Gerpacio (2001) clasifica las áreas como sigue:

Tabla 1. 4. Mega-ambientes para la producción del maíz a partir de Gerpacio (2001), (Elaboración propia, 2016).

Mega-ambiente	Latitud	Altitud (msnm)
Zonas tropicales bajas	0 – 25° N y S	<1000
Zonas tropicales altas	0 – 25° N y S	>1800
Subtrópicos	23 – 36° N y S	1000 – 1500
Zonas templadas	>36° N y S	Todas las altitudes

msnm= metros sobre el nivel del mar.

El maíz, es un cultivo globalmente distribuido, se encuentra en una gran variedad de condiciones de Latitud y Altitud (Tabla 1.4); los agroecosistemas altamente productivos se localizan en zonas planas; un claro ejemplo es la franja maicera o cinturón del maíz en los Estados Unidos, o bien la zona productora del estado de Sinaloa en México. Las condiciones climáticas y edáficas que favorecen el crecimiento del maíz son (Krishna, 2013):

- Temperatura y humedad relativa: Entre 19 y 23 °C, con periodos libres de heladas de entre 120 y 140 días, humedad relativa entre 30 y 60 % dependiendo de la zona de producción.
- Precipitación: Se adapta a diversos patrones de lluvia, para mejores rendimientos requiere un promedio de 450-500 mm. Soporta temporales erráticos y precipitaciones altas como las que ocurren en las regiones áridas y tropicales.
- Suelos: Arenosos con un contenido de arcillas menor al 10 % o suelos arcillosos con máximo 30 % de arcillas, contenido de materia orgánica del 20 %, una capa arable efectiva de al menos 30 cm, pH entre 5 y 7 y con drenaje adecuado para evitar encharcamientos.

1.8.2 Factores que afectan la producción de maíz

La producción de maíz es afectada por diversos factores, entre ellos los ambientales, políticos, sociales y culturales, económicos y tecnológicos y de manejo (Figura 1.19). Los factores ambientales son componentes que actúan directamente sobre los seres vivos; pueden ser bióticos como la predación o la competencia o abióticos como el clima o el suelo. Los factores políticos se refieren a las políticas públicas desarrolladas por el gobierno en diferentes niveles y a los esquemas de financiamiento de instituciones públicas y/o privadas que pueden afectar la producción de maíz; entre ellas están los planes de desarrollo nacional, estatal y municipal y apoyos gubernamentales como el Proagro.

Los factores sociales y culturales se refieren a los aspectos que realizan los habitantes de una zona geográfica para interactuar con su entorno y semejantes, entre ellos, están las tradiciones, el conocimiento transmitido de generación en generación y la interacción del individuo en la comunidad. Los factores económicos consideran aspectos referentes a los recursos monetarios y especiales con que cuenta el sistema para la producción, entre ellos, capital, tipo de tenencia de la tierra, tamaño de la unidad de producción y relación costo – beneficio.

Los factores tecnológicos y de manejo, consideran lo referente al impacto y desarrollo tecnológico y a las formas en que se lleva a cabo la producción dentro del sistema. Por ejemplo preparación del terreno, siembra, labores de cultivo, manejo de plagas y enfermedades, control de maleza, diversidad de especies, acceso a maquinaria y asesoría técnica.

1.8.3 Tecnología utilizada en los sistemas de producción de maíz

Los sistemas de producción pueden clasificarse en convencionales y tradicionales; los sistemas convencionales tienen como objetivo maximizar la producción y el beneficio económico, de modo que la producción de alimentos se trata como un proceso industrial basado en siete prácticas básicas: labranza intensiva, monocultivos, riego, aplicación de fertilizantes inorgánicos, control químico de plagas y maleza, manipulación genética de

variedades y unidades de producción intensiva; los sistemas tienen rendimientos altos pero baja sustentabilidad debido a la dependencia de insumos externos y baja diversidad (Gliessman, 2015).



Figura 1. 19. Factores que afectan al sistema de producción de maíz (Elaboración propia, 2016).

Los sistemas agrícolas tradicionales utilizan de manera intensiva los recursos naturales renovables que están disponibles localmente, están adaptados a las condiciones locales por lo que no requieren de la alteración y el control ambiental, mantienen el rendimiento sin sacrificar la capacidad productiva del sistema ni la disponibilidad de los recursos, mantienen la diversidad espacial y temporal, la producción está concebida para satisfacer

las necesidades locales y se realiza utilizando principalmente variedades locales. Además, el manejo agronómico utiliza prácticas basadas en el conocimiento y la cultura de los habitantes; el sistema tiene rendimientos bajos o medios pero son más sustentables debido a la baja dependencia de insumos externos y a la alta diversidad dentro de las unidades de producción (Altieri, 1987; Gliessman, 2015).

En México, de acuerdo con datos de la Encuesta Nacional Agropecuaria 2014 (INEGI, 2014a), el 82.2 % de las unidades de producción a cielo abierto utilizan semillas criollas, el 68.8 % fertilizantes químicos, el 27.5 % abonos naturales, 62.7 % herbicidas, 48.2 % insecticidas, 33.4 % sembradoras, 18.6 % cosechadoras, estos porcentajes indican que la mayoría de las unidades de producción se encuentran bajo manejo tradicional. Esto coincide con el porcentaje de unidades familiares de subsistencia que integran el 73 % del total de las unidades económicas rurales del país, que se concentran en los estados de México, Guerrero, Chiapas, Oaxaca y Veracruz, principalmente (SIAP, 2016a). En Sinaloa, que es el principal productor de maíz de México el porcentaje de sistemas para producción de maíz de autoconsumo es de 8.1 %; mientras que, en Oaxaca el valor se incrementa hasta 87.3 %, de acuerdo con SIAP (2016a).

1.9. Justificación y originalidad del trabajo de investigación

El nejayote, es un subproducto contaminante de la nixtamalización que contiene elevadas concentraciones de partículas solubles e insolubles, entre ellas están polisacáridos, almidón, fibra, calcio y proteínas. Para controlar la contaminación ocasionada se han desarrollado numerosas tecnologías como la filtración y microfiltración (Castro-Muñoz y Yáñez-Fernández, 2015), el filtrado para eliminación de sólidos suspendidos (Valderrama-Bravo *et al.*, 2013) y el tratamiento oxidativo en presencia de quitosán (García-Zamora *et al.*, 2015) son de difícil aplicación por el costo que representan y porque utilizan tecnología poco accesible, sobre todo para productores.

Una alternativa para reutilizar el nejayote es mezclarlo con un abono y someterlo a un proceso de fermentación con el fin de disminuir el pH inicial y la cantidad de patógenos que pudiera contener la mezcla; el objetivo de realizar esta fermentación es producir un biofertilizante que pueda utilizarse en maíz con el fin de mejorar las características físicas,

químicas y microbiológicas del suelo, incrementar el rendimiento y disminuir los costos por fertilización y de esta forma minimizar la contaminación por los efluentes de la nixtamalización de maíz para elaborar tortillas.

Tradicionalmente, la investigación en el área agrícola ha sido realizada para resolver problemas puntuales que son tratados desde una perspectiva disciplinaria, esto ha llevado a que las soluciones que se proponen tengan una aplicabilidad limitada; por ello, en este trabajo se propone utilizar un enfoque transdisciplinario en el proceso de investigación, basado en la sistémica, que genere una propuesta de solución integral para el mejoramiento del agroecosistema maíz a partir de la aplicación de un biofertilizante que garantice la reutilización de un volumen de 75 m³ de nejayote y 25 t de estiércol de ovino por hectárea en cada ciclo de producción. En el municipio de Ahuazotepec se podrían utilizar hasta 93 mil m³ de nejayote y 31 mil t de estiércol de ovino por ciclo de producción de maíz.

1.10. Objetivos e hipótesis

Objetivo General

Diseñar y evaluar una alternativa sustentable para satisfacer las necesidades nutrimentales del maíz mediante el manejo de dos residuos: el nejayote y el estiércol de ovino; con el fin de obtener un fertilizante orgánico que permita mejorar las condiciones actuales del agroecosistema maíz.

Objetivos particulares

- Caracterizar el agroecosistema maíz en el municipio de Ahuazotepec, Puebla, considerando el enfoque sistémico que plantea el Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS).
- Caracterizar química y físicamente los fertilizantes orgánicos producto de las combinaciones entre concentraciones de nejayote y estiércol de ovino.
- Determinar el efecto de la aplicación de los fertilizantes orgánicos nejayote-estiércol de ovino sobre el rendimiento, la calidad de grano, la eficiencia energética y la relación costo-beneficio de un agroecosistema de maíz.

- Cuantificar el efecto de la aplicación de los fertilizantes orgánicos nejayote– estiércol de ovino sobre el contenido de microorganismos y las propiedades físicas y químicas del suelo de un agroecosistema maíz.
- Identificar las concentraciones de nejayote y estiércol de ovino que maximicen la respuesta en cada variable de estudio mediante el método de superficie de respuesta.

Hipótesis

1. El agroecosistema maíz en Ahuazotepec tiene diferencias en el manejo y las prácticas de producción utilizadas, dichas diferencias tienen un efecto en el nivel de sustentabilidad de los subsistemas.
2. La caracterización química y física de los fertilizantes orgánicos, combinación entre concentraciones de nejayote y estiércol de ovino, permite cuantificar la aportación de nutrientes esenciales para la planta y consecuente dosis de aplicación en el sistema de producción de maíz y otros cultivos en función del rendimiento esperado.
3. La aplicación de los fertilizantes orgánicos nejayote – estiércol genera cambios en el rendimiento, la calidad física del grano, la eficiencia energética y la relación beneficio costo del maíz. Los cambios pueden ser cuantificados para determinar si la propuesta de manejo es sustentable.
4. La aplicación de los fertilizantes orgánicos nejayote – estiércol de ovino genera cambios en el contenido de microorganismos y las propiedades físicas y químicas del suelo de un agroecosistema maíz y estos cambios pueden ser cuantificados.
5. Utilizar el método de superficie de respuesta permite determinar la cantidad de nejayote y estiércol de ovino en el biofertilizante que optimice la respuesta de las variables estudiadas.

1.11. Tabla de congruencias

En la Tabla 1.5 se presenta la secuencia lógica de la investigación organizada en una tabla de congruencias.

Tabla 1.5. Tabla de congruencias de la investigación

<p>Problema de investigación Encontrar una alternativa sustentable para utilizar dos residuos, uno del proceso de nixtamalización (nejayote) y el estiércol de ovino (residuo de la producción pecuaria) para elaborar y caracterizar un fertilizante orgánico en el agroecosistema maíz.</p>	
<p>Justificación Para controlar la contaminación ocasionada por el nejayote se han propuesto tecnologías como la filtración y el tratamiento oxidativo, sin embargo son costosas y de difícil aplicación. Una alternativa para el manejo, es mezclarlo con un estiércol para producir un fertilizante orgánico que pueda usarse en maíz con el fin de mejorar las características del suelo, incrementar el rendimiento y disminuir los costos por fertilización. En este trabajo se propone utilizar un enfoque sistémico transdisciplinario, que genere una propuesta de solución integral para el mejoramiento del agroecosistema maíz a partir de la aplicación de un biofertilizante que garantice la reutilización de un volumen de 75 m³ de nejayote y 25 t de estiércol de ovino por hectárea en cada ciclo de cultivo.</p>	
<p>Objetivo general Diseñar y evaluar una alternativa sustentable para satisfacer las necesidades nutrimentales del maíz mediante la combinación de dos residuos; el nejayote, y el estiércol de ovino; con el fin de elaborar y caracterizar un fertilizante orgánico para aumentar la productividad, disminuir los costos de producción, mejorar las características físico químicas y biológicas del suelo y hacer un manejo de residuos con un enfoque transdisciplinario.</p>	
<p>Objetivo específico 1 Caracterizar el agroecosistema maíz en el municipio de Ahuazotepec, Puebla, considerando el enfoque sistémico que plantea el MESMIS. Preguntas de investigación ¿Cuál es la situación actual del agroecosistema maíz y cuáles son los puntos críticos para la sustentabilidad?</p>	<p>Objetivo específico 2 Caracterizar química y físicamente los fertilizantes orgánicos producto de las combinaciones entre concentraciones de nejayote y estiércol de ovino. Preguntas de investigación ¿Cuáles son las características químicas y físicas de cada combinación nejayote – estiércol?</p>
<p>Objetivo específico 3 Determinar el efecto de la aplicación de los fertilizantes orgánicos nejayote- estiércol de ovino sobre el rendimiento, la calidad de grano, la eficiencia energética y la relación costo – beneficio de en un agroecosistema de maíz. Preguntas de investigación ¿Existen diferencias en el rendimiento, la calidad de grano, la eficiencia energética y la relación costo – beneficio debidas a la aplicación de los fertilizantes orgánicos?</p>	<p>Objetivo específico 4 Cuantificar el efecto de la aplicación de los fertilizantes orgánicos nejayote – estiércol de ovino sobre el contenido de microorganismos y las propiedades físicas y químicas del suelo de un agroecosistema maíz. Preguntas de investigación ¿Hay diferencias en la microbiota y las propiedades físicas y químicas del suelo antes y después de la aplicación de los fertilizantes orgánicos?</p>
<p>Objetivo específico 5 Identificar las concentraciones de nejayote y estiércol de ovino que maximizan la respuesta en cada variable de estudio mediante el método de superficie de respuesta. Preguntas de investigación ¿Existe una concentración de nejayote y estiércol de ovino que mejore las respuestas de las variables estudiadas?</p>	
<p>Hipótesis 1. El agroecosistema maíz en Ahuazotepec tiene diferencias en el manejo y las prácticas de producción utilizadas, dichas diferencias tienen un efecto en el nivel de sustentabilidad de los subsistemas. 2. La caracterización química y física de los fertilizantes orgánicos nejayote y estiércol de ovino, permite cuantificar la aportación de nutrimentos esenciales para la planta y consecuente dosis de aplicación en el sistema de producción de maíz y otros cultivos en función del rendimiento esperado. 3. La aplicación de los fertilizantes orgánicos nejayote – estiércol genera cambios en el rendimiento, la calidad física del grano, la eficiencia energética y la relación beneficio costo del maíz. Los cambios pueden ser cuantificados para determinar si la propuesta de manejo es sustentable. 4. La aplicación de los fertilizantes orgánicos nejayote – estiércol de ovino genera cambios en el contenido de microorganismos y las propiedades físicas y químicas del suelo de un agroecosistema maíz y estos cambios pueden ser cuantificados. 5. Utilizar el método de superficie de respuesta permite determinar la cantidad de nejayote y estiércol de ovino en el biofertilizante que optimice la respuesta de las variables estudiadas.</p>	
<p>Características de la investigación El trabajo de investigación se desarrollará bajo la perspectiva sistémica transdisciplinaria siguiendo cuatro etapas: Focalización del problema, El investigador que investiga, Aplicación de la metodología e Impacto en el mundo real; que involucran investigación en campo, documental y experimental.</p>	

CAPÍTULO 2

MARCO METODOLÓGICO Y TEÓRICO



CAPÍTULO 2. MARCO METODOLÓGICO Y TEÓRICO

El presente capítulo aborda el marco metodológico y teórico utilizado para evaluar el efecto de un fertilizante orgánico en el agroecosistema maíz en el municipio de Ahuazotepec, Puebla. En forma breve, se presentan los métodos aplicados en cada una de las actividades de investigación que permitieron el logro de los objetivos planteados en el trabajo; asimismo, se presentan las disciplinas que dieron soporte a la investigación.

2.1 Marco Metodológico

La mayoría de la investigación en el área agrícola está organizada por disciplinas y se enfoca en segmentos puntuales de un todo; por ejemplo, las variables económicas como la producción se utilizan para hacer evaluaciones del agroecosistema en términos económicos en forma independiente a otros factores como el social y el ambiental. Francis *et al.* (2008) mencionan que, si bien este enfoque disciplinario ha logrado incrementar la producción, no está acorde con la sustentabilidad de los agroecosistemas y proponen que, la investigación en agricultura considere una perspectiva sistémica donde agricultores, académicos y estudiantes se comprometan en la búsqueda de información proveniente de experiencias y literatura; organicen, planeen y prueben nuevas alternativas y, finalmente, evalúen, comuniquen y apliquen los resultados ya sea a través de prácticas en las unidades de producción o mediante publicaciones.

En algunos casos, una de las limitantes de las metodologías reduccionistas que predominan en la investigación disciplinaria es que los factores de estudio se aíslan mientras se mantiene constante el resto del sistema, si bien esto genera datos que permiten obtener semillas, dosis de fertilización, paquetes para control de plagas, entre otros; restringe la aplicación de los resultados a las condiciones donde el experimento se realizó. Asimismo, este enfoque es que se vuelve difícil de aplicar cuando el número de factores e interacciones se incrementan debido a que es complejo determinar cuáles factores contribuyen o no al éxito del sistema. Utilizar un enfoque sistémico transdisciplinario permite tener una perspectiva holística, procesos de investigación participativos, soluciones que simulan las funciones y estructuras de los ecosistemas, considerar las limitantes y pre-requisitos locales, adaptación de los sistemas ecológicos y

sociales mediante aprendizaje y garantiza diversidad en el uso de herramientas y seguridad (Eksvård *et al.*, 2009).

Antes de describir las etapas de la investigación, es necesario realizar una revisión de las metodologías empleadas en investigación sistémica en agricultura.

2.1.1 Metodología sistémica – transdisciplinaria

La Metodología de Desarrollo Sistémico (Bawden, 1991), fue creada a partir de experiencias de aprendizaje y participación en la Facultad de Agricultura y Desarrollo Rural en la Universidad de Sídney Oriental Hawkesbury.

La base de la metodología de desarrollo sistémico es la Espiral de Hawkesbury, en ella se estructuran cinco niveles de enfoques metodológicos de resolución de problemas en una jerarquía de ciclos de aprendizaje que se mueven desde lo más complejo hasta problemas bien definidos, a saber: (1) Pensamiento crítico de sistemas, (2) Pensamiento de sistemas suaves, (3) Pensamiento de sistemas duros, (4) Ciencia aplicada y (5) Ciencia básica (Bawden, 1991). En la Figura 2.1, se puede observar la representación gráfica de tal metodología. Las fases utilizadas en el presente proyecto de investigación, que se enumerarán y describirán posteriormente, se construyeron con base en dichos ciclos y con ayuda de la Metodología de Sistemas Suaves (Checkland y Poulter, 2010).

La metodología sistémica puede ser usada en cualquier situación humana que conlleve a actuar con un propósito y es especialmente útil cuando se desea elevar el nivel de discusión de opiniones comunes y dogmas a niveles donde se interroga acerca de que tanto es posible dar por hecho esas opiniones. Esta metodología, es especialmente útil para investigar situaciones problemáticas existentes en el mundo real; el usuario aprende a partir de la situación con el fin de definir y tomar acciones que la mejoren. El conocimiento se genera a través de un proceso organizado, en el cual la situación real es explorada usando herramientas intelectuales que sirven para dar estructura a la discusión, modelos de actividades con el propósito de encapsular y establecer visiones enriquecidas puras (Checkland y Poulter, 2010).

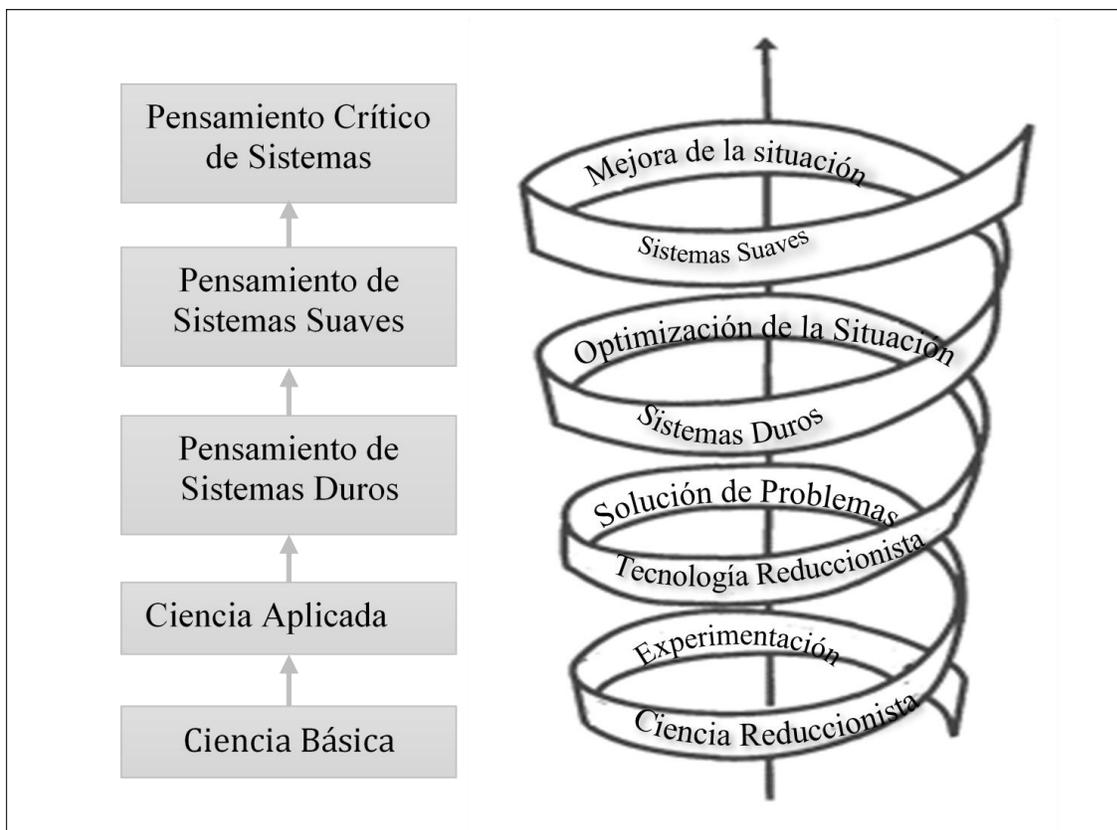


Figura 2. 1. Jerarquía ascendente de solución de problemas utilizada en la Espiral de Hawkesbury (Bawden, 1991), (Elaboración propia, 2016).

Abordar el presente proyecto de investigación en forma sistémica supone una visión completa, amplia, exhaustiva, integrada y conectada dinámicamente con el objeto de investigación (Bawden, 1991). Implica también pensar en incluir, al menos, tres dimensiones en el estudio: ecológica, social y económica. Con esto en mente y aplicando lo establecido por la Espiral de Hawkesbury, se diseñó un marco metodológico sistémico multidimensional y transdisciplinario. Esto último porque se utilizaron metodologías y conocimientos de distintas disciplinas como la Sistémica, la Agronomía, la Edafología, la Estadística y las ciencias económico-administrativas.

En esta investigación, además, se integró el Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS) con el fin de lograr los objetivos propuestos. El MESMIS, está diseñado para aplicarse a sistemas agrícolas, forestales y pecuarios, manejados tanto en forma colectiva como individual. Este es un marco que tiene una estructura flexible que puede ser adaptada a diferentes niveles de

información y tecnología; propone la comparación entre los sistemas de manejo vigentes y sistemas alternativos (Astier, Masera y Galván, 2008). En la Figura 2.2 se presenta el marco metodológico utilizado en esta investigación.

El proceso de investigación bajo una visión sistémica – trandisciplinaria de acuerdo con Hernández-Aguilar (2007) contempla cuatro fases: Fase I. Etapa de Focalización, Fase II. Sujeto que investiga, Fase III. Etapa de experimentación y Fase IV. Etapa de impacto en el mundo real.

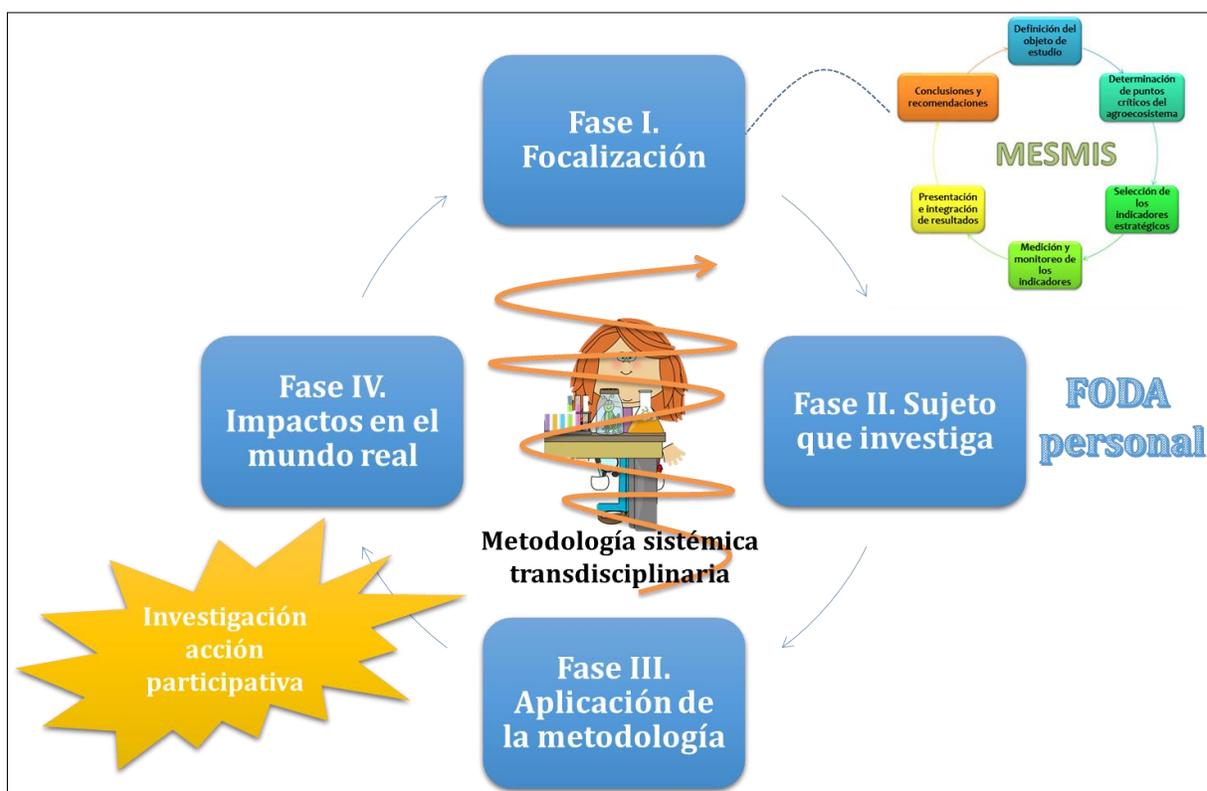


Figura 2. 2. Marco metodológico utilizado en la investigación modificado con base en lo propuesto por Hernández-Aguilar (2007), Astier *et al.* (2008), Checkland y Poulter (2010), (Elaboración propia, 2016).

El proceso de investigación bajo una visión sistémica-transdisciplinaria de acuerdo con Hernández-Aguilar (2007) contempla cuatro fases: Fase I. Etapa de Focalización, Fase II. Invstigación del sujeto que investiga, Fase III. Investigación experimental y Fase IV. Etapa de impactos en el mundo real. Cada una de las fases fueron modificadas y enriquecidas con metodologías y métodos propuestos por varios autores (Dyson, 2004; Bawden, 2007; Kanyama-Phiri *et al.*, 2008; Vasstrøm *et al.*, 2008; Astier *et al.*, 2008; Checkland y Poulter,

2010; Gutiérrez y De la Vara, 2012; Hernández-Sampieri, Fernández-Collado y Baptista-Lucio, 2014; Van Soest, 2014), estas fases se describen a continuación.

2.1.2.1 Fase I: Etapa de focalización

En la etapa de focalización, el objetivo es conceptualizar la investigación a partir de una visión holística que va de lo general a lo particular con el fin de determinar la situación actual del problema de estudio (Figura 2.3).

Una vez determinado el problema de investigación, se realizaron actividades de investigación que tienen como objetivo caracterizar el agroecosistema maíz en el municipio de Ahuazotepec bajo dos esquemas de manejo, el actual y el alternativo.

Existen un gran número de métodos para obtener información en una investigación, cuya elección depende de los objetivos del sujeto que investiga y de la pregunta de investigación (Hernández-Sampieri, Fernández-Collado y Baptista-Lucio, 2014). Entre estos métodos se encuentran encuestas, entrevistas, pruebas, evaluaciones de laboratorio, observaciones, revisión de registros existentes y toma de muestras.

Para obtener información relativa al agroecosistema maíz bajo el manejo tradicional se emplearon encuestas personales, con preguntas dirigidas a los participantes en la investigación, en este caso productores de maíz del municipio de Ahuazotepec. Las encuestas se estructuraron para tener información sobre muchas personas, conteniendo elección múltiple/forzada o preguntas abiertas (como información socio-económica, producción, cosecha, opiniones acerca del sistema y prácticas agrícolas, etc.). Utilizar encuestas personales implica establecer comunicación con los productores y al preguntar sus inquietudes y deseos, haciéndolos partícipes del proceso de innovación.

Para obtener información sobre el sistema de producción alternativo se emplearon métodos de laboratorio y experimentales, que permitieron conseguir datos imparciales; en el experimento se utilizaron parcelas en donde se evaluó el efecto de la aplicación del fertilizante a base de estiércol y nejayote; los resultados del proceso se podrán observar con mayor detalle en el capítulo 3. Se evaluaron en laboratorio características físicas, químicas y biológicas de los elementos del sistema de producción de maíz.

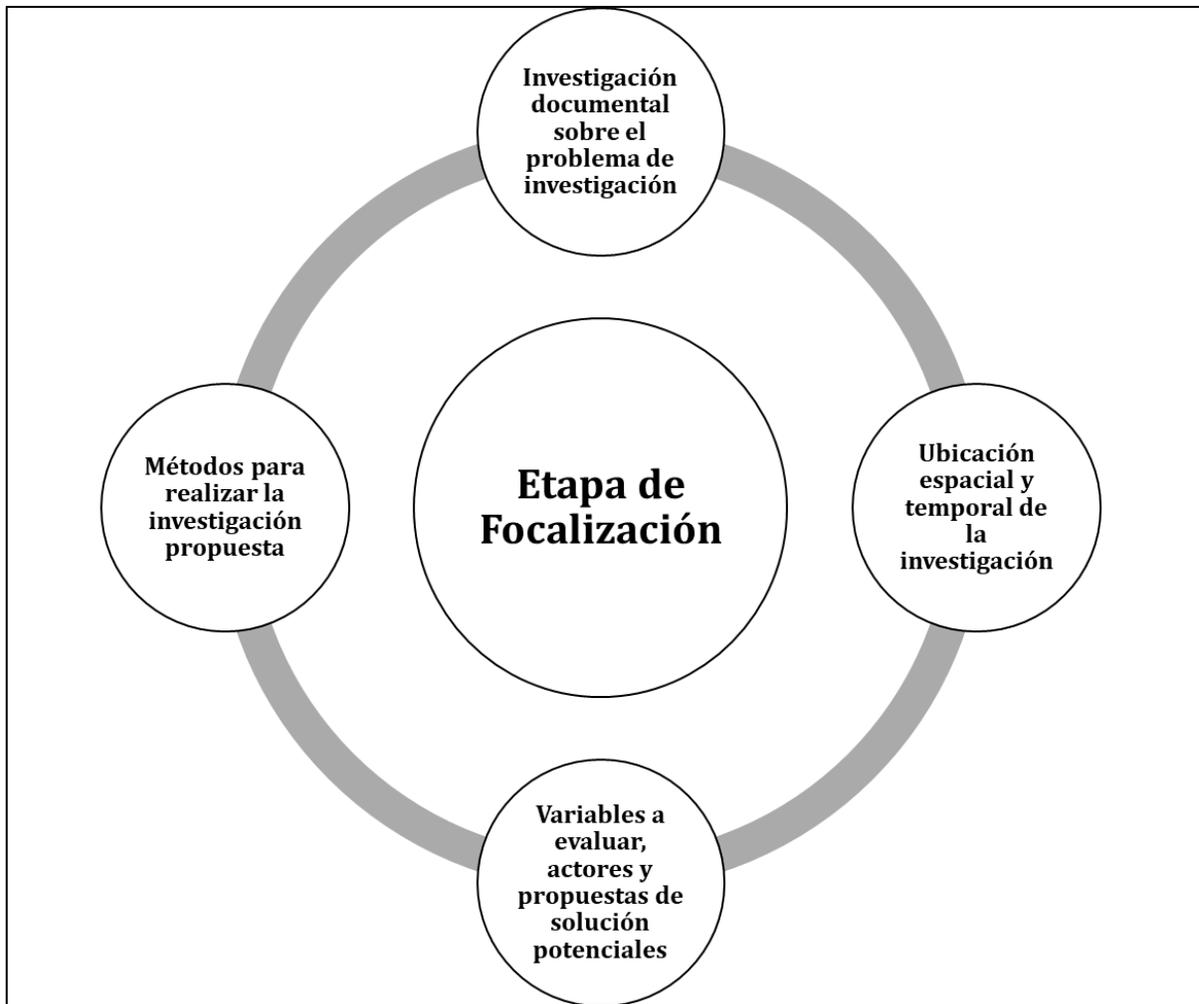


Figura 2. 3. Etapa de focalización (Elaboración propia, 2016).

Así mismo, se utilizó la revisión de registros de clima y estadísticas de producción disponibles. Este método tiene lugar cuando el investigador examina y extrae información de documentos que contienen datos sobre el sistema de interés; los registros pueden ser públicos o privados, en el caso presente se hizo uso de datos públicos. Adicionalmente, se tomaron registros de clima de carácter privado, por ser propiedad del sujeto que investiga.

Al recolectar información es de crucial importancia asegurar la precisión (confiabilidad), exactitud (validez) y un mínimo de errores (Hernández-Sampieri, Fernández-Collado y Baptista-Lucio, 2014; Van Soest, 2014). La calidad de los datos afecta, en última instancia, la integridad y utilidad del estudio realizado. En pocas palabras, la investigación será tan buena como los datos con que se construya.

2.1.2.2 Fase II: Investigación del sujeto que investiga

En las investigaciones realizadas bajo la metodología sistémica – transdisciplinaria, el sujeto que investiga también es auto-investigado (Hernández-Aguilar, 2007). Además de conducir la investigación, debe adaptar los principios y las técnicas de la metodología para organizar la forma en la que abordará e intervendrá en la situación, considerando como objetivo principal tomar parte de la acción para mejorar el problema, es decir, debe ser parte tanto de lo que afecta al sistema como de las salidas que genere la solución que propone (Checkland y Poulter, 2010). Por ello, es importante que el sujeto que investiga se conozca a sí mismo con el fin de interpretar y entender las habilidades, las limitantes, los conocimientos y los talentos que le permitan evolucionar e interrelacionarse con el entorno de la investigación. De esta manera, una actividad constante de acuerdo al nivel evolutivo es la auto-observación, mediante la auto-investigación y la respectiva auto-evaluación conducirá a lo que se conoce como actitud transdisciplinaria (Hernández-Aguilar, 2007).

Por ello, una actividad inicial sería el análisis FODA, que es un proceso para identificar las Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas de un sujeto u organización (Dyson, 2004). Este análisis recopila información de una evaluación ambiental y la separa en elementos internos (Fortalezas y Debilidades) y externos (Oportunidades y Amenazas) (Vasstrøm *et al.*, 2008). Las Fortalezas son las actividades y características dentro de las que la organización/individuo sobresale y que le dan ventaja competitiva. Las Debilidades previenen a la organización o individuo de desempeñarse a nivel óptimo. Las Oportunidades son factores externos que se pueden usar como una ventaja, mientras que las Amenazas tienen el potencial de afectar negativamente a la organización/individuo (Dyson, 2004)

La utilización de un análisis FODA del sujeto que investiga puede generar posibles estrategias para mejorar y optimizar el trabajo que ha de realizar.

2.1.2.3 Fase III: Investigación experimental

El éxito de un experimento radica en la calidad de su planeación, por ello, es importante contextualizar el problema y decidir una estrategia experimental adecuada para

abordarlo. De acuerdo con Gutiérrez y De la Vara (2012), la planeación y el análisis de un experimento consideran las etapas siguientes:

- **Planeación y diseño:** definir el problema, describir el contexto histórico, social y físico de la investigación, determinar lo que se ha hecho para tratar el problema, definir los objetivos, hacer un esquema de estudio donde se señalen el problema, las variables de respuesta y los parámetros del experimento. Determinar los factores de estudio y los niveles que se estudiarán; seleccionar las variables de respuesta que serán medidas, seleccionar el diseño experimental adecuado a los factores y objetivos del experimento, planear y organizar el trabajo experimental y realizar el experimento.
- **Análisis e interpretación:** realizar un análisis detallado de los resultados experimentales verificando los supuestos del modelo seleccionado, interpretar los resultados obtenidos y hacer corridas confirmatorias.
- **Conclusiones:** determinar las medidas para generalizar el resultado del estudio, resumir los principales resultados, hacer una evaluación de los logros obtenidos y diseñar una presentación para la difusión de la investigación.

Dentro del MESMIS primero se determinaron las metas y objetivos del estudio, así como los atributos de sustentabilidad. Los atributos son propiedades fundamentales de los agroecosistemas, características que sirven de guía para el análisis y cubren los aspectos más relevantes del sistema. Posteriormente, se identificaron los criterios de diagnóstico de cada atributo, que son reglas definidas que permiten valorarlos y delimitarlos cuantitativa o cualitativamente.

A partir de los atributos se pueden deducir indicadores únicos o conjuntos de indicadores para traducir dichos atributos y criterios en parámetros medibles cuantitativa o cualitativamente (Astier *et al.*, 2008). De acuerdo a Young (1997) no se puede diseñar un solo índice de sustentabilidad y sugiere que los indicadores seleccionados deben maximizar la cantidad de información única y minimizar redundancias.

El uso de indicadores representa una herramienta poderosa para evaluar de forma simple un sistema complejo (Binder *et al.*, 2010). Los indicadores pueden ser específicos, como

los que caracterizan partes únicas del sistema de interés; o sistémicos que describen funciones clave o procesos del sistema como un todo (von Wirén-Lehr, 2001; Binder *et al.*, 2010). Para evaluar la sustentabilidad de sistemas agrícolas es común que los indicadores sean específicos, pues son más simples y pueden medirse cuantitativamente (usando una ecuación, por ejemplo), mientras que, los indicadores sistémicos, por su carácter holístico, son mayormente cualitativos tal es el caso de la biodiversidad, pobreza, seguridad alimentaria, autogestión (Schianetz y Kavanagh 2008; Bell y Morse, 2008).

Existen dos métodos para deducir los indicadores a utilizar: la estimación y la deducción analítica. Los indicadores estimados son formulados por el sujeto que investiga, por expertos externos, o en colaboración por ambos. Con este método se obtienen indicadores estáticos y específicos al caso y sitio de estudio, muy adecuados para estudios de suelo, por ejemplo (Harger y Meyer, 1996; von Wirén-Lehr, 2001). En la Tabla 2.1 pueden observarse los atributos e indicadores usados en el análisis MESMIS, agrupados de acuerdo con su respectiva dimensión.

Tabla 2. 1. Atributos e indicadores de sustentabilidad usados en el MESMIS (Elaboración propia, 2016).

Dimensión	Atributo	Indicador	Fuente
Ecológica	Estabilidad	Diversidad de especies en la parcela	Pla (2006); Schianetz y Kavanagh (2008).
	Productividad	Costo-Beneficio	Astier <i>et al.</i> (2008); Young (1997).
Económica	Eficiencia	Eficiencia Energética	Astier <i>et al.</i> (2008).
	Autogestión	Índice de dependencia de insumos externos	Astier <i>et al.</i> (2008).
Social	Autosuficiencia	Porcentaje de gasto de alimento cubierto por la producción	Astier <i>et al.</i> (2008); Young (1997).

Los indicadores deducidos analíticamente resultan de la examinación científica de procesos, funciones, interacciones y estructuras dentro de los sistemas, dando origen a indicadores sistémicos. Estos indicadores deben cubrir las diferentes dimensiones de interés en el sistema (ecológica, económica y social), evitando traslapes y reflejando

cambios importantes en el sistema; así mismo, deben ser fáciles de medir y monitorear para obtener tendencias en el tiempo (Young, 1997).

Una vez que se determinaron los indicadores a evaluar, se realizó la medición y monitoreo de los mismos. Como ya se mencionó, en el sistema de manejo actual, la información se obtuvo a partir de las encuestas aplicadas y toma de registros; mientras que, en el manejo alternativo se obtuvo mediante un experimento controlado realizado durante dos ciclos consecutivos de producción.

2.1.2.4 Fase IV. Etapa de impactos en el mundo real

El proceso de investigación requiere tener conciencia de la realidad social en la que se encuentra la situación problemática, por ello, es necesario que los cambios que se realicen para mejorar o resolver la situación sean deseables y culturalmente factibles, es decir, que consideren la cultura local en un nivel más allá de puntos de vista individuales (Checkland y Poulter, 2010). En la Metodología de Sistemas Suaves (MSS), esta fase corresponde al Weltanschauung “visión del mundo” y es la fase más crucial de la MSS, en ella se predice el impacto de las acciones tomadas, de los problemas y de los sistemas involucrados.

El enfoque participativo en la investigación agrícola requiere dar atención a la síntesis, la reflexión y los ciclos de aprendizaje; estos son ingredientes clave para mantener la calidad y el rigor de las ciencias aplicadas que deben comprometerse con la complejidad del mundo real de la agricultura (Kanyama-Phiri *et al.*, 2008).

Entender los agroecosistemas como sistemas sociales–ecológicos permite hacer una evaluación de las cualidades, de los efectos a largo plazo de las diferentes entradas y salidas y, de la importancia del elemento humano en la producción; así como, las relaciones entre los componentes económicos y ecológicos de manejo en dichos agroecosistemas (Gliessman, 2014).

El proceso de investigación en esta fase remite a la Figura 2.2. La espiral de Hawkesbury puede dividirse en dos ciclos principales, uno suave y uno duro, el primero enfocado a considerar la situación como un todo desde tantas perspectivas como se pueda, definir lo que se puede mejorar del sistema, evaluar y proponer alternativas de solución a los

problemas encontrados, planificar, crear planes de acción, etcétera (Bawden, 1991; Bawden y Packham, 1993; Vasstrøm *et al.*, 2008). Mientras que, el segundo ciclo (duro), utiliza un enfoque más particular, definiendo los retos específicos del agroecosistema maíz al incrementar la producción, enfrentar un problema o establecer una estrategia concreta de innovación, como la utilización de un fertilizante orgánico.

Ambos ciclos poseen un enfoque interactivo y participativo entre el sujeto que investiga y los productores de maíz, lo cual les permite inscribirse en un proceso cognitivo de Sistémica de Tercer Orden (Bawden, 2007). Los ciclos empleados, pero especialmente el ciclo suave, se enfocan a estimular el aprendizaje de la situación actual, la toma de conciencia, el pensamiento crítico y el conocimiento de las limitaciones/posibilidades del sistema en los participantes de la investigación, creándoles competencias para enfrentar posibles cambios en el futuro (Vasstrøm *et al.*, 2008).

La principal actividad durante esta fase fue de vinculación; para ello, se requiere establecer una relación de confianza con los productores, con el fin de construir una comunidad de aprendizaje. Inicialmente, el investigador, al realizar las encuestas para recopilar datos, se sumergió en la situación del sistema, estableció comunicación con los productores por primera vez y les volvió co-partícipes del proceso. Esta primera etapa coincide con el ciclo suave donde se conoce la situación general del sistema. Posteriormente, el investigador incide directamente en la mejora del sistema y creación de competencias al impartir de cursos donde se hicieron recomendaciones y se dio capacitación a los productores y al producir materiales de consulta impresos. Esta etapa corresponde al segundo ciclo, pues es la información proveída es más específica.

2.2 Marco Teórico

El enfoque sistémico–transdisciplinario hace posible que la investigación realizada genere resultados que incidan en la situación problemática estudiada, para lograr esto, es necesario considerar un marco teórico que permita integrar conocimientos. La evaluación que se propone para determinar el efecto de la aplicación del fertilizante orgánico requiere utilizar diversos métodos que fueron integrados mediante el marco metodológico MESMIS y la Metodología Sistémica–Transdisciplinaria para generar la propuesta de manejo

aplicable para el agroecosistemas maíz en el municipio de Ahuazotepec, Puebla. Las disciplinas que brindan soporte al objetivo general y particulares de la investigación son: Sistémica, Agronomía, Edafología, Estadística y las Ciencias económico - administrativas.

2.2.1. Sistémica

La Sistémica es la ciencia que estudia los sistemas holísticos e intenta desarrollar marcos lógico matemático de ingeniería y filosofía, en los cuales los sistemas físicos, mentales, cognitivos, sociales y metafísicos puedan ser estudiados. La Sistémica contiene métodos construidos con base en puntos de vista incluyentes que contemplan a la ciencia como un proceso de aprendizaje social lo que conduce a adoptar enfoques transdisciplinarios para efectuar la investigación (Alrøe y Kristensen, 2001).

La sistémica puede ser usada en cualquier situación humana que conlleve a actuar con un propósito y es especialmente útil cuando se desea elevar el nivel de discusión de opiniones comunes y dogmas a niveles donde se interroga acerca de que tanto es posible dar por hecho esas opiniones. Esta metodología, es especialmente útil para investigar situaciones problemáticas existentes en el mundo real; el usuario aprende a partir de la situación con el fin de definir y tomar acciones que la mejoren. El conocimiento se genera a través de un proceso organizado, en el cual la situación real es explorada usando herramientas intelectuales que sirven para dar estructura a la discusión, modelos de actividades con el propósito de encapsular y establecer visiones enriquecidas puras (Checkland y Poulter, 2010).

2.2.1.1 La investigación sistémica en la agricultura

Desde una perspectiva básica de Sistemas, la primera decisión en una investigación bajo este enfoque se refiere a la identificación del sistema de interés y, la segunda, a la definición de lo que constituirá una mejora al sistema, tomando en cuenta las implicaciones e impactos que pueda tener sobre otros sistemas (supra-sistemas) en que el sistema de interés se halla inmerso (Høgh-Jensen, 1998; Vasstrøm *et al.*, 2008). Esto constituye la Sistémica de Primer Orden, que se relaciona con la investigación y desarrollo en sistemas “duros” o tangibles. En el contexto de agricultura, la Sistémica de Primer Orden puede referirse, por ejemplo, a volver un sistema más adaptable, resiliente o

sustentable de cara a turbulencias ambientales o perturbaciones tales como plagas o maleza. En este Orden, el ser humano se considera un regulador del agroecosistema más que un optimizador (Bawden, 1991; Bawden, 2007).

Otras consideraciones para el estudio son demasiado complejas para ser contenidas en la Sistémica de Primer Orden; entre ellas podemos incluir consideraciones de salud, bienestar, seguridad, calidad de productos, y todos aquellos problemas o retos que pueden producirse tras la transformación de la naturaleza (Beck, 1992). Todo esto requiere un nuevo Orden de Sistémica, donde se utilice un enfoque en el que se integren los elementos humanos y naturales, de los sistemas involucrados. Este punto de vista holístico puede denominarse Sistémica de Tercer Orden, donde el trabajo incluye los sistemas cognitivos que permiten transmitir, evaluar y adoptar conocimientos y nuevas perspectivas, es decir, el rediseño del sistema agrícola (Bawden, 1991; Bawden y Packham, 1993 y Bawden, 2007).

Entre las Sistémicas de Primer y Tercer Orden, se encuentra la de Segundo Orden que, esencialmente, se ocupa de las metodologías/métodos de la investigación y desarrollo sistémicos, y que involucra el trabajo con sistemas “suaves” (Bawden, 1991; Bawden y Packham, 1993 y Bawden, 2007). El trabajo de la Sistémica de Segundo Orden se trata, entonces, del desarrollo y empleo de metodologías sistémicas, proveyendo un enlace entre el primer orden, que desarrolla sistemas particulares, y el tercer orden, cuyas suposiciones cognitivas se ponen en juego en la intervención sistémica o rediseño.

Como se indica en la Figura 2.4, un gran número de metodologías sistémicas pueden ser identificadas para los diferentes Órdenes (particularmente Primero y Segundo) y sus dominios (en los sistemas duros, suaves y cognitivos). En dicho diagrama se observan claras interacciones entre los dominios y entre ciertas metodologías, lo cual resulta lógico si se siguen dichas conexiones hacia los fundamentos que les dieron origen (localizados a la izquierda). El diagrama, sin embargo, no pretende ser exhaustivo ni incluye a todas las metodologías y métodos que son empleados en la agricultura.

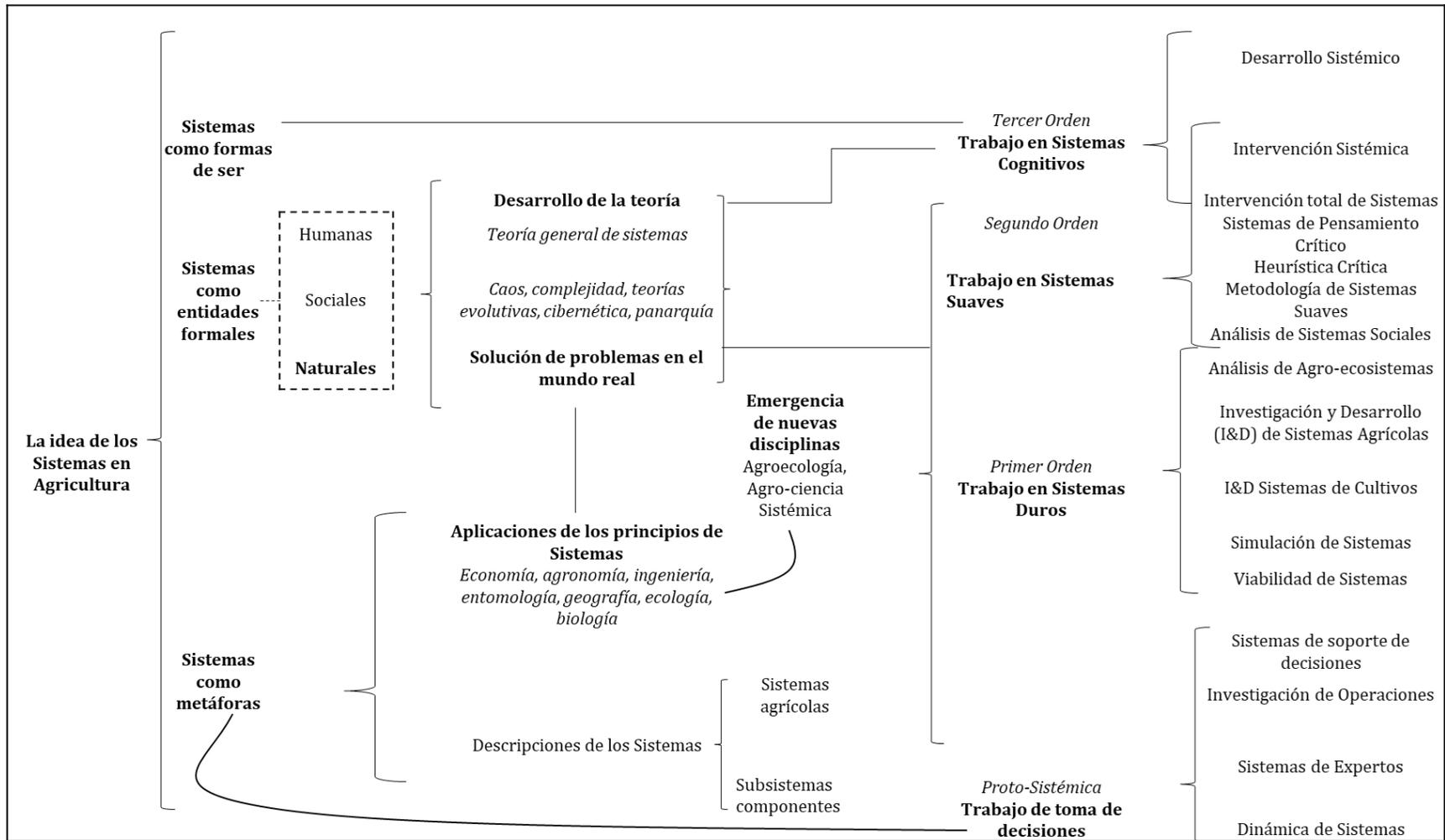


Figura 2. 4. La sistémica en la Agricultura (Rykiel, 1984; Bawden, 1991; Rykiel, 1996; Alrøe y Kristensen, 2002; Bawden, 2007; Sands, 2008; Binder *et al.*, 2010; Donatelli y Confalonieri, 2011), (Elaboración propia, 2016).

De acuerdo con diferentes autores, cada metodología típicamente conlleva un gran número de métodos que siempre están evolucionando (Rykiel, 1984; Rykiel, 1996; Bawden, 2007 y Sands, 2008). Por ejemplo, se pueden realizar simulaciones de sistemas de cultivos, usando modelos deterministas o empíricos, para diferentes propósitos: evaluar el rendimiento, uso de recursos, externalidades, etcétera, que se inscriben y están interrelacionados con diferentes supra-sistemas; cada simulación usando relaciones lineales o no-lineales, que provean de diferentes niveles de “insight” del sistema modelado (Donatelli y Confalonieri, 2011).

Es necesario tener en cuenta que, dado el carácter sistémico del tema descrito, la tipología del diagrama, a pesar de mostrarse lineal, posee en realidad muchos más grados de interconexión (Bawden, 1991; Alrøe y Kristensen, 2002 y Bawden, 2007). Además, las distinciones entre los elementos, que aparecen claramente en el diagrama, son en la práctica mucho más difusas, en algunos casos presentan sobreposición (Bawden, 1991; Alrøe y Kristensen, 2002; Bawden, 2007 Binder *et al.*, 2010).

Pareciera que la riqueza en metodologías y métodos disponibles para la Sistémica de Primer y Segundo Orden las convierten en las partes más importantes de la Investigación Sistémica; sin embargo, Bawden (2007) advierte que, de no aplicarse una metodología de la Sistémica de Tercer Orden, se anulan los esfuerzos del Primer y Segundo Órdenes, volviéndoles esencialmente iguales a los enfoques reduccionistas.

La Sistémica de Tercer Orden implica el desarrollo de capacidades sistémicas (cognición, pensamiento crítico, participación, acción, visión holística, entre otras) es de vital importancia para la sustentabilidad, pues con ellas se integra el conocimiento obtenido de los sistemas suaves (Segundo Orden) y duros (Primer Orden) dentro de un sistema cognitivo y de aplicación en el Mundo Real (Bawden, 2007).

2.2.1.2 Agroecosistemas

Un agroecosistema es un lugar o región geográfica definida dedicada a la producción agrícola, que contiene recursos naturales que son manejados por el hombre con el objetivo de satisfacer sus necesidades de comida y fibras; sus componentes funcionales son el

cultivo, el terreno, el suelo, los nutrientes, el clima, el agua, el hombre y los factores económicos (Figura 2.5) (Krishna, 2014; Gliessman, 2015).

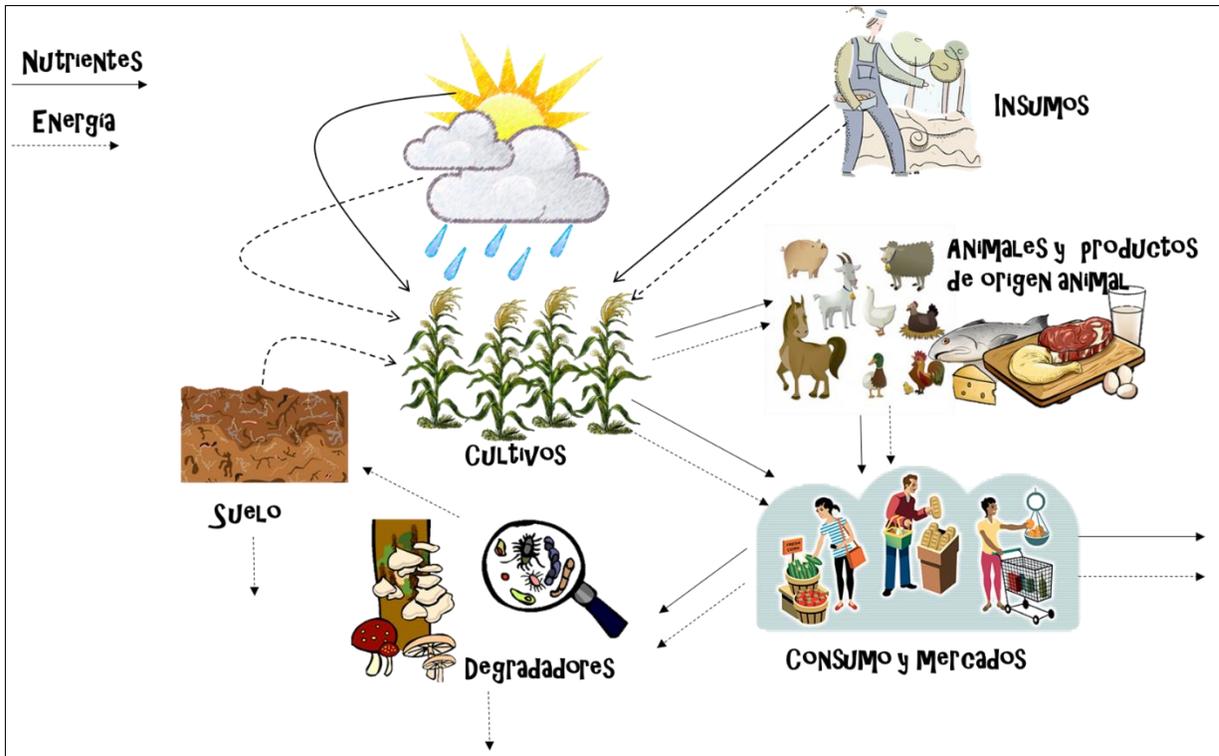


Figura 2. 5. Componentes funcionales de un agroecosistema Gliessman (2015), (Elaboración propia, 2017).

El pensamiento sistémico, concebido desde una perspectiva multidisciplinaria permite entender las interacciones que existen entre la agricultura y otros sectores de la sociedad, así mismo, facilita aislar dichas interacciones para llevar a cabo análisis particulares desde diversas disciplinas (Bland y Bell, 2009). En este trabajo se evaluó el efecto de un fertilizante orgánico en el agroecosistema maíz, por lo tanto, es indispensable contar con la Sistémica con el fin de conceptualizar y evaluar al objeto de estudio, identificando cada componente del sistema y las relaciones entre ellos.

2.2.2 Agronomía

La agronomía es una ciencia aplicada que estudia a la agricultura desde una perspectiva holística; su objetivo es entender las propiedades del suelo y su interacción con el crecimiento de los cultivos, qué nutrientes requiere el cultivo y cuándo aplicarlos; la forma en que los cultivos crecen y se desarrollan; cómo el clima y otros factores ambientales

afectan a los cultivos durante sus etapas de crecimiento y cuál es la mejor forma para controlar maleza, insectos, hongos y otros patógenos (American Society of Agronomy, 2016).

Las ciencias agronómicas proveen el fundamento para realizar la evaluación del efecto del fertilizante orgánico sobre el suelo y las plantas que forman parte del agroecosistema maíz. Se consideraron los conceptos relacionados con los componentes del rendimiento y la calidad de grano del maíz.

2.2.2.1 Sustentabilidad y Agricultura sustentable

La sustentabilidad no ha sido definida de manera puntual, sin embargo, la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, conocida como Comisión Brundtland, en 1987 acuñó el término de Desarrollo Sustentable definiéndolo como el desarrollo que permite satisfacer las necesidades actuales sin comprometer la habilidad de futuras generaciones para satisfacer las propias (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1987). Las necesidades básicas son comida y fibras, los productos obtenidos con la agricultura; actividad que ha tenido efectos diversos en el cambio climático, de modo que es inevitable pensar en el desarrollo sustentable sin considerar la agricultura sustentable (Yunlong y Smit, 1994).

La agricultura es un proceso complejo que se lleva a cabo en tres dimensiones: ambiental o biofísica, económica o tecno-económica y social o socio-política (Yunlong y Smit, 1994; Gliessman, 2015). La sustentabilidad en la agricultura considera perspectivas relacionadas con las limitaciones biofísicas, rendimientos sostenidos referidos a la cantidad producida que puede ser mantenida en forma continua, capacidad de carga que puede ser soportada a perpetuidad, viabilidad de la unidad de producción referida a la capacidad de los productores de permanecer en la agricultura, suministro de productos y seguridad enfocados a la integración de la oferta y la demanda y la equidad en lo concerniente a la distribución espacial y temporal de productos derivados del uso de recursos (Brklacich, Bryant y Smit, 1991; Yunlong y Smit, 1994).

El concepto de agricultura sustentable no tiene una definición precisa ya que implica tanto formas de pensar como prácticas de producción; de modo que lo que la gente cree y valora

hacen que dicho término cambie constantemente; existen dos visiones para lograr una agricultura sustentable, uno es hacer más eficiente el uso de recursos de modo que las entradas y salidas del sistema converjan, y el otro punto de vista implica cambios mayores tanto en la visión de los productores como en las prácticas de producción (Schaller, 1993).

De acuerdo con Gliessman (2015), la agricultura sustentable debe:

- Minimizar los efectos negativos en el ambiente ocasionados la emisión de sustancias tóxicas a la atmósfera y a cuerpos de agua superficiales o subterráneos.
- Preservar y mejorar la fertilidad del suelo, previniendo la erosión y manteniendo la salud ecológica del suelo.
- Utilizar el agua de forma tal que sea posible satisfacer la demanda de la población y permitir la recarga de acuíferos.
- Disminuir la dependencia de insumos externos.
- Trabajar para conservar la diversidad biológica considerando los servicios ecosistémicos que se brindan dentro del agroecosistema.
- Garantizar el acceso a prácticas de producción apropiadas, al conocimiento y las tecnologías; así como, permitir el control local de los recursos para la agricultura.

La agricultura sustentable debe abordarse desde las dimensiones económica, ambiental y social; considerando las interacciones entre los sistemas y subsistemas a diferentes escalas espaciales; además, las soluciones deben ser biofísicamente posibles, socialmente aceptables y económicamente factibles, de modo que el análisis o modificación de cualquier componente del agroecosistema implica la integración del pensamiento sistémico con una visión transdisciplinaria que permita la existencia del sistema propuesto o de los cambios sugeridos.

2.2.3 Edafología

La Ciencia del Suelo estudia a éste como un recurso natural de la superficie de la Tierra, incluye la formación, la clasificación y el mapeo, las propiedades físicas, químicas, biológicas y de fertilidad; así como, la relación que guardan con el uso y manejo del suelo. Una de sus principales ramas es la Edafología, que se encarga del estudio del suelo y su relación con organismos, principalmente las plantas (Edmondson, 2012).

El suelo, es la interface entre la litósfera y la atmósfera, es el recurso más básico que interactúa con la biósfera y la hidrósfera para dar soporte a la vida sobre la Tierra. El crecimiento de la población hace necesario que se incremente la producción de alimentos, fibras y combustibles; esto conduce a que, las tierras de cultivo se expandan y su manejo sea más intensivo y por ende al empobrecimiento del suelo. Los recursos agua y suelo son limitados; por ello, es necesario desarrollar e implementar sistemas de producción agrícolas que puedan generar altos rendimientos y ser sustentables. Es un recurso susceptible a la degradación que puede ser causada por la erosión eólica e hídrica, métodos de labranza convencionales, disminución del contenido de materia orgánica y el detrimento de la actividad y la diversidad biológica (Duiker, 2011).

2.2.3.1 Sistema suelo

Los componentes básicos son materiales minerales, agua, aire y materia orgánica; un suelo promedio contiene 45 % de materiales minerales (arenas, arcillas, limos), 5 % de materiales orgánicos, 25 % de aire y 25 % de agua. El suelo está compuesto por capas u horizontes cuya profundidad y grosor varían dependiendo de la ubicación geográfica y la formación depende de la acción del clima y microorganismos sobre la roca madre (Figura 2.6), la mayoría de las raíces de las plantas se encuentran en los primeros 30 cm del suelo (Biondo y Lee, 1997; Sheaffer y Moncada, 2012)

Las propiedades físicas del suelo incluyen la textura, la densidad aparente, la temperatura, la agregación y la estructura; cada una tiene efectos importantes en la composición del mismo y en la actividad microbiana. La textura se refiere a la proporción de arena, limo y arcilla que contiene el suelo; estas proporciones afectan la capacidad de retención de humedad y la capacidad de intercambio catiónico (Sheaffer y Moncada, 2012).

La densidad aparente se refiere al peso de los sólidos del suelo por unidad de volumen; los suelos con densidades menores a 1 g cm^{-3} son ligeros, con buena aireación y permiten mayor movimiento de microorganismos y penetración de raíces; mientras que, aquellos con densidades mayores a 1 g cm^{-3} son considerados suelos pesados y con tendencia a la compactación (Ball *et al.*, 2006); a medida que la densidad aparente se incrementa el

porcentaje de espacio poroso disminuye lo que afecta el movimiento de aire y agua en el suelo.



Figura 2. 6. Perfil del suelo de acuerdo con Biondo y Lee (1997), (Elaboración propia, 2017).

Las propiedades químicas de los suelos afectan el crecimiento de las plantas debido a que tienen influencia en la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes; entre las más importantes están, la capacidad de intercambio catiónico, el pH y la salinidad (Ball *et al.*, 2006; Sheaffer y Moncada, 2012).

La capacidad de intercambio catiónico mide la cantidad de cationes intercambiables que el suelo puede sostener, valores altos de esta propiedad incrementan la capacidad de retención de nutrientes y por tanto incrementan la fertilidad; el pH mide la concentración de iones hidrógeno en el suelo en una escala de 0 a 14; las plantas y microorganismos del suelo comúnmente se desarrollan en pH entre 6 y 7.5 debido a que en este rango favorece la disponibilidad de nutrientes y la salinidad mide el grado de acumulación de sales solubles como sulfatos, cloruros, carbonatos o bicarbonatos, éstas sales pueden causar

deshidratación en las plantas y la mayoría de los cultivos son poco tolerantes a la salinidad (Ball *et al.*, 2006; Sheaffer y Moncada, 2012).

La fertilidad del suelo es la habilidad que tiene para proveer de nutrientes a las plantas para su crecimiento. Entonces, dicha característica se refiere a la cantidad de nutrientes almacenada y la cantidad que está disponible para las plantas; un suelo ideal debe proveer a la planta de los nutrientes necesarios para su adecuado desarrollo (Biondo y Lee, 1997). En los suelos de zonas templadas uno de los mayores retos para el manejo de la fertilidad es la restauración de la materia orgánica y la mejora de la eficiencia en el uso de los nutrientes (Ball *et al.*, 2006; Gliessman, 2015).

La evaluación del efecto del fertilizante orgánico sobre el suelo se hizo considerando los métodos que propone la Edafología con el fin de determinar los cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas de este recurso en el agroecosistema maíz.

2.2.4 Estadística

La Estadística estudia los métodos que permiten el tratamiento de la información cuantitativa relacionada con hechos y sucesos de la realidad, está fundamentada en la organización y cómputo de la misma, con el propósito de generar conocimiento sobre el fenómeno de estudio (Alvarado, 2014).

La variabilidad de los datos experimentales requiere ser analizada matemáticamente con el fin de determinar posibles diferencias entre los tratamientos aplicados en los distintos experimentos (Montgomery, 2009). En esta investigación, se utilizó el análisis de varianza para probar la igualdad entre las medias de tratamientos para cada variable de respuesta.

2.2.4.1 Experimentos factoriales

Los experimentos factoriales son los más eficientes cuando se desea estudiar el efecto de dos o más factores cada uno con dos o más niveles; el número de tratamientos es el producto del número de niveles y todos los factores, es decir, el número total de combinaciones posibles. Este tipo de experimento, se utiliza en trabajos exploratorios, para estudiar relaciones entre factores y cuando se desea establecer recomendaciones en un rango amplio de condiciones (Petersen, 1994). En un experimento factorial es posible

estudiar los efectos principales y la interacción. El efecto principal es el cambio en la respuesta producido por un cambio en el nivel de dicho factor y la interacción ocurre cuando la diferencia en la respuesta entre niveles de un factor no es la misma en todos los niveles de los otros factores. La interacción se puede representar gráficamente con una superficie de respuesta o una gráfica de contorno (Montgomery, 2009). El modelo general de un experimento factorial 3^2 , como el utilizado en esta investigación es el siguiente:

$$y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + \gamma_k + (AB)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Dónde:

y_{ijk} = respuesta observada

μ = efecto de la media de todos los datos

A_i = efecto del volumen de nejayote ($i = 1, 2, 3$)

B_j = efecto de la cantidad de estiércol de ovino ($j = 1, 2, 3$)

γ_k = efecto de las diferencias en la parcela (factor de bloqueo; $k = 1, 2, 3$)

$(AB)_{ij}$ = efecto de la interacción entre el nejayote y el estiércol

ϵ_{ijk} = error aleatorio

La utilización de un análisis de varianza (ANOVA) para descomponer la variabilidad y determinar si existen o no diferencias entre los tratamientos requiere que se cumplan ciertos supuestos: que el error esté normal e independientemente distribuido, con media cero y varianza (σ^2) constante y desconocida; cuando estos supuestos se cumplen el análisis de varianza es una prueba adecuada para la hipótesis de no diferencia entre las medias de los tratamientos. Los procedimientos estadísticos utilizados para probar los supuestos fueron: Anderson – Darling (normalidad), Gráfica de residuales contra valores ajustados (independencia) y Bartlett (igualdad de varianzas).

2.2.5 Ciencias económico-administrativas

La Administración y la Economía forman parte de las Ciencias Sociales; la Administración estudia el conjunto ordenado de técnicas y procedimientos destinados a apoyar la

consecución de los objetivos de la empresa en forma eficiente y eficaz; mientras que, la Economía es la ciencia que estudia la aplicación de recursos escasos entre usos alternativos para la satisfacción de necesidades múltiples, describe y comprende los principios generales relacionados con la producción y distribución de los recursos (Rodríguez, 2009).

La relación beneficio/costo puede definirse como el cociente de los ingresos obtenidos y los costos de producción (Astier, Masera y Galván, 2008); en los sistemas de producción agrícolas los costos se derivan de los insumos (semillas, fertilizantes, combustibles, agroquímicos) y mano de obra utilizados. La viabilidad económica de un sistema de producción debe tener una distribución balanceada de los costos y los beneficios inherentes al proceso productivo.

Las ciencias económico-administrativas proveen el fundamento para realizar el análisis del estado financiero, determinar las actividades del sistema y los recursos que intervienen en cada una. Este fundamento, fue necesario para realizar la evaluación del atributo de productividad del sistema que contempla las variables: rendimiento, calidad del producto, eficiencia energética y relación beneficio–costo.

CAPÍTULO 3

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA



CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

En este capítulo se muestra la aplicación de la metodología propuesta en el capítulo dos; se presentan las actividades experimentales, correspondientes a cada una de las fases, realizadas para lograr el cumplimiento de los objetivos de la investigación.

3.1 Fase I. Etapa de focalización. Análisis de la sustentabilidad del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla

3.1.1 Resumen

El análisis de la sustentabilidad del agroecosistema maíz se realizó a partir de los resultados obtenidos de la aplicación de una encuesta a 100 productores de maíz del municipio en el periodo entre diciembre de 2015 y febrero de 2016. Este apartado examina la sustentabilidad del agroecosistema tradicional de maíz en el municipio de Ahuazotepec, Puebla, México, utilizando el enfoque de MESMIS, a partir de indicadores seleccionados que reflejan las dimensiones sociales, ambientales y económicas del sistema. También se utilizó un análisis de conglomerados jerárquico para obtener la tipología de los productores. El análisis generó tres clústers dentro del sistema: Tradicional Bajo, Tradicional Medio y Transición. Los clústers diferían en: rendimiento de grano, ingreso; edad del productor, escolaridad y organización; prácticas de producción y actividades económicas complementarias. La evaluación de sustentabilidad mostró los factores críticos a mejorar para hacer cada grupo más sustentable. La productividad fue el atributo que más afectó a la sustentabilidad de los tres grupos, ya que el rendimiento de grano determinó la eficiencia con que se utilizan los recursos de producción (fertilizantes químicos, agua y energía), lo que a su vez influye en algunos atributos ambientales y sociales. La clasificación en conglomerados permitió la formulación de sugerencias específicas para mejorar éste y otros atributos del sistema sin modificaciones extensivas o la adopción de tecnologías costosas.

Palabras clave: Sustentabilidad, MESMIS, Maíz, Análisis de cluster, Tipología

3.1.2 Introducción

Una de las metodologías más empleadas para analizar la sustentabilidad de los agroecosistemas en México y América Latina es el Marco de Evaluación de la

Sostenibilidad de los Sistemas de Gestión de Recursos Naturales (MESMIS) (López-Ridaura, Masera y Astier, 2000, 2002; Speelman *et al.*, 2007). En el MESMIS, la sustentabilidad del sistema se define por los atributos generales: productividad, estabilidad, resiliencia, confiabilidad, adaptabilidad y autosuficiencia, a partir de los cuales el investigador selecciona y mide un conjunto de indicadores cuantitativos y / o cualitativos. Este marco también permite integrar estos indicadores poniendo sus valores en una escala y comparándolos con los valores de otros sistemas o del mismo sistema a lo largo del tiempo (López-Ridaura, Masera y Astier, 2000). Según Gliessman (2015) esta metodología es una de las pocas que puede ofrecer una visión más completa del agroecosistema estudiado.

La inclusión de una estrategia de tipificación en la evaluación de la sustentabilidad de un agroecosistema podría ayudar a identificar las principales tendencias dentro de las prácticas agrícolas tradicionales y a mejorar la evaluación de la dimensión social (Hart, 1990; Köbrich, Rehman y Khan, 2003) que es una de las más complejas para analizar en el marco del MESMIS por su carácter altamente cualitativo (González *et al.*, 2006). En consecuencia, el marco de MESMIS puede mejorar el carácter, a menudo unidimensional, de la mayoría de los estudios de tipificación (Damián *et al.*, 2007; Moctezuma-López *et al.*, 2010; Lerner, Eakin y Sweeney, 2013; Osundare, 2013) mediante la inclusión de la dimensión ambiental. Una metodología de tipificación común es el análisis de conglomerados, que tiene una sólida base estadística y permite la condensación de grandes cantidades de datos para identificar los grupos dentro del sistema, de una manera cuantitativa y objetiva (Sokal, 1977).

Este estudio se centra en el municipio de Ahuazotepec, que puede ser un ejemplo de la situación actual del México rural y del agroecosistema tradicional de maíz en el norte del estado de Puebla, específicamente en los valles altos de la región montañosa de la Sierra Norte de Puebla (Van Dusen y Taylor, 2005; INEGI, 2014b). Aunque desde 1994 se disponen de subsidios gubernamentales para mejorar la productividad del maíz (Zarazúa-Escobar, Almaguer-Vargas y Ocampo-Ledesma, 2011), en el período comprendido entre 2004 y 2015 se han observado tendencias negativas de crecimiento para la superficie cultivada (-0.11%), la producción total (-1.2%) y el rendimiento (-1.14%) en el municipio

(SIAP, 2016b). En 2015, la producción de maíz fue de 4075 Mg de grano, con un precio medio rural de 4500 pesos por tonelada (SIAP, 2016b).

Conocer las condiciones que imperan a nivel local y que han llevado a los niveles actuales de productividad es, además, importante para la toma de decisiones y el diseño de acciones efectivas encaminadas hacia el desarrollo sustentable, ya que los gobiernos locales son identificados como el nivel más cercano entre el gobierno y la acción comunitaria (Mascarenhas *et al.*, 2010; Measham *et al.*, 2011). Bajo este esquema, es posible que se contribuya a la mejora de las comunidades siempre y cuando cuenten con políticas públicas adecuadas basadas en un esquema de abajo hacia arriba, es decir, tomando en cuenta las características particulares del sistema y entendiendo las interacciones entre sus diversos componentes (Reganold, Papendick y Parr, 1990; Altieri, 2002). Además de evaluar las políticas públicas aplicadas a la comunidad en forma más eficiente (Scipioni *et al.*, 2009; Schindler *et al.*, 2016).

3.13 Objetivos

- 1) Clasificar a los productores de maíz mediante análisis multivariable para determinar diferencias entre grupos y obtener la tipología para el municipio de Ahuazotepec, Puebla.
- 2) Caracterizar y analizar el agroecosistema del maíz, mediante el uso de indicadores económicos, sociales y ambientales para determinar los factores críticos que afectan la sustentabilidad en cada una de las tipologías obtenidas.

3.1.4 Hipótesis

El agroecosistema maíz en Ahuazotepec tiene diferencias en el manejo y las prácticas de producción utilizadas, dichas diferencias tienen un efecto en el nivel de sustentabilidad de los subsistemas.

3.1.5 Materiales y métodos

3.1.5.1 Población objetivo

El estudio se centró en los productores de maíz del municipio de Ahuazotepec, Puebla que se localiza en las coordenadas 20° 00' 06" – 20° 07' 06" N y 98° 03' 42" – 98° 10' 24" W en la Sierra Norte de Puebla. La altura sobre el nivel del mar es de 2280 m, sus suelos con caracterizados como Andosoles de textura media. El clima es templado húmedo con una

temperatura media anual de 14.4 °C y precipitación promedio anual de 1064.9 mm (INEGI, 2014). El tamaño de la muestra se determinó usando la siguiente ecuación:

$$n = \frac{z^2 \sigma^2 N}{(N - 1)E^2 + z^2 \sigma^2}$$

Dónde n es el tamaño de la muestra, z es la puntuación normal, σ es la desviación estándar, N es el tamaño de la población y E es el error de estimación (Badii, Castillo y Guillen, 2008). Considerando el número total de productores (N = 348) y la varianza poblacional para el rendimiento de grano ($\sigma^2 = 2.03$), obtenida a partir de una muestra piloto. El tamaño de la muestra fue de 100 productores, 28.7 % del total. Los productores incluidos en el estudio fueron seleccionados aleatoriamente de los registros disponibles en las oficinas del gobierno municipal.

3.1.5.2 Tipificación de los productores

Para recolectar los datos necesarios para la clasificación de los productores de la muestra, se diseñó una encuesta con preguntas agrupadas en seis secciones: Información general sobre el productor, Escolaridad, Información económica, Tenencia de la tierra e Información de campo y Prácticas de producción de maíz. La encuesta se aplicó a los agricultores seleccionados entre diciembre de 2015 y febrero de 2016. La información así recogida se procesó y se generó una base de datos utilizando Microsoft Access 2013 (Microsoft Corp., Redmond, Wash) para simplificar su manejo. El tratamiento de los registros se realizó utilizando estadística descriptiva para obtener las observaciones que se utilizaron en los siguientes análisis.

Posteriormente, las variables utilizadas para construir los conglomerados se seleccionaron mediante un Análisis de Componentes Principales, para reducir la dimensionalidad del sistema y facilitar la interpretación, visualización y comprensión de las interacciones entre las observaciones o variables (Sokal, 1977). Las variables seleccionadas: educación, ingreso total y rendimiento de maíz, fueron estandarizadas para propósitos de comparación.

Se utilizó un análisis de conglomerados para establecer la tipología de los sistemas de producción en el municipio de Ahuazotepec, Puebla (Sokal, 1977; Berdegué, Sotomayor y Zilleruelo, 1990; Köbrich, Rehman y Khan, 2003). Los modelos de agrupación jerárquica se crearon utilizando el método de distancia euclidiana para encontrar la distancia entre las observaciones y el criterio de Ward para optimizar la varianza mínima dentro de los grupos (Berdegué, Sotomayor y Zilleruelo, 1990; Köbrich, Rehman y Khan, 2003). Este análisis permite integrar y caracterizar las observaciones dentro de cada grupo, y luego obtener las medias y porcentajes de las variables estudiadas (Han, Kamber y Pei, 2012). El proceso de tipificación y todos los análisis estadísticos se realizaron en el software Minitab 17 ® (Minitab Inc., State College, PA, EE.UU.).

3.1.5.3 Análisis de la sustentabilidad

Para evaluar la sostenibilidad de cada uno de los clústeres obtenidos, se utilizó la metodología MESMIS (López-Ridaura, Masera y Astier, 2000; Astier, Masera y Galván, 2008). En este estudio se midieron 16 indicadores y se representaron tres dimensiones de sustentabilidad: económica, ambiental y social mediante seis atributos, definidos por López-Ridaura et al. (2002) (Tabla 3.1). Se seleccionó la productividad como principal atributo económico, para proporcionar información sobre el posible efecto que el rendimiento tiene en la decisión de plantar maíz y sobre la eficiencia en el uso de los recursos.

Se evaluaron los atributos ambientales/ecológicos de estabilidad, resiliencia y confiabilidad para evaluar la disponibilidad y conservación de los recursos de producción que aseguran la actividad económica a lo largo del tiempo; estos atributos también están relacionados con la adecuada integración de las actividades económicas con el medio ambiente, así como con la vulnerabilidad del sistema a los riesgos externos.

Los atributos de adaptabilidad y autogestión forman parte de la dimensión social. El primero proporciona una idea de la capacidad del sistema para evolucionar y aprender a adaptarse a las nuevas condiciones impuestas por el nuevo entorno físico y socioeconómico. Finalmente, el atributo de la autosuficiencia sirvió para evaluar la capacidad de control y la capacidad de respuesta de quienes manejan el sistema.

Tabla 3. 1 Indicadores económicos, ambientales y sociales con las unidades de referencia utilizadas para el análisis de la sustentabilidad del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla, 2015, (Elaboración propia, 2016).

Atributo	Indicador	Medición	Unidad de referencia
Productividad	Rendimiento de grano	Encuesta: t ha ⁻¹ producidas	3.5 t ha ⁻¹ (SIAP, 2016)
	Eficiencia energética	Estimación: MJ producidos/MJ consumidos	4.55
	Ingreso neto	Estimación: Ingreso bruto - Costos totales de producción	\$ 9857.7
	Tasa Beneficio/costo	Beneficios totales / Costos de producción totales	2.5
Estabilidad, resiliencia y confiabilidad	Diversidad de especies cultivadas	$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \log p_i$ Dónde: H' es el índice de Shannon y pi es el número de cultivos en la parcela	H'= 1 (Dalsgaard, Lightfoot y Christensen, 1995)
	Eficiencia en el uso del agua	Rendimiento de grano/ agua utilizada Considerando la precipitación media obtenida por datos climáticos de Ahuazotepec.	0.37 kg· m ⁻³
	Incidencia de plagas	Encuesta: número de productores que reportan incidencia de plagas en su parcela	50 % sin incidencia de plagas
	Incidencia de maleza	Encuesta: número de productores que reportan incidencia de maleza en su parcela	50 % sin incidencia de maleza
Adaptabilidad	Mano de obra familiar no remunerada y participación del productor	Encuesta: número de productores que utilizan mano de obra familiar y participan en la producción	50 % mano de obra familiar y participación del productor
	Asesoría técnica recibida	Encuesta: número de productores que han recibido asesoría técnica	50 % han recibido asesoría técnica
	Interés en recibir asesoría técnica	Encuesta: número de productores interesados en recibir asesoría	50 % de los productores interesados en recibir asesoría
	Alfabetismo	Encuesta: número de productores alfabetas	87.08 % valor medio municipal de alfabetismo

Continuación Tabla 3. 2 Indicadores económicos, ambientales y sociales con las unidades de referencia utilizadas para el análisis de la sustentabilidad del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla, 2015, (Elaboración propia, 2016).

Atributo	Indicador	Medición	Unidad de referencia
Autogestión	Dependencia de insumos externos (DIE)	$DIE = (\text{Costo de insumos externos} / \text{Costo total de insumos}) * 100$	62.7 % (DIE con rendimiento promedio)
	Nivel de autofinanciamiento (AF)	$AF = (\text{Subsidio gubernamental} / \text{Costos totales de producción}) * 100$	50 % de los productores se autofinancian
	Autosuficiencia de maíz	Estimación: número de productores que producen ≥ 1188 kg (consumo anual para una familia de 4 personas)	50 % de los productores satisfacen sus necesidades de maíz
	Organización de productores	Encuesta: número de productores que están asociados	50 % de los productores forman parte de una organización

Después de medir cada indicador, se comparó el valor con la unidad de referencia asignando así una puntuación (valor ponderado) entre 0 (peor) y 10 (mejor) a los indicadores de cada grupo. Se asignó un valor ponderado de 5 a los valores de referencia para crear una línea base. Los valores de referencia se obtuvieron de la literatura y / o se estimaron utilizando datos públicos.

3.1.6 Resultados

3.1.6.1 Tipología de los productores de maíz

El análisis de clúster clasificó a los productores de maíz de Ahuazotepec, Puebla en tres grupos; a cada uno se le asignó un nombre acorde con el sistema de producción que manejan, las tecnologías que utilizan y el rendimiento de maíz, estos grupos fueron Tradicional bajo (TB), Tradicional medio (TM) y Transición (Tr).

Clúster Tradicional Bajo

En el grupo se encuentran la mayoría de los productores encuestados (55 %), tienen edad promedio de 57 años, viven en localidades con alto grado de marginación lo que se refleja en el nivel de estudios (40 % tiene primaria incompleta y 16.4 % no reporta escolaridad); el porcentaje de analfabetismo del grupo que es de 14.5, lo que supera la media municipal reportada como 12.92 %. El nivel de ingresos máximo es de \$120.00 por día que es un

ingreso máximo de \$3600 mensuales. Las unidades de producción tienen un tamaño promedio de 2.3 ha y se clasifican como ejido; sin embargo, 40 productores tienen superficies menores o iguales a 2 ha; únicamente el 29.1 % de los productores pertenecen a un módulo de riego lo que les brinda la posibilidad de aplicar un riego antes de la siembra, el 70.9 % producen bajo condiciones de temporal.

El rendimiento de grano promedio es de 1.55 t ha⁻¹ y se utilizan variedades criollas que los productores siembran por la disponibilidad y por el sabor que se obtiene al procesarlo para elaborar tortillas. Si bien el rendimiento es menor que la media municipal, es importante mencionar que en estas unidades de producción se siembra al menos un cultivo adicional al maíz, generalmente frijol, avena o forraje aportando diversidad a la parcela. Los productores aplican estiércol o arena para mejorar sus suelos, también se utilizan fertilizantes químicos y herbicidas. Además de la agricultura, los productores realizan ganadería de traspatio, la mitad reporta en promedio de cuatro cabezas de ganado, principalmente ovinos y bovinos, que mantienen para autoconsumo y, eventualmente, para su venta en mercados locales.

Clúster tradicional medio

Este clúster agrupa al 41 % de los productores encuestados, la edad promedio fue 59 años, con primaria completa (61 %), únicamente 4 % no saben leer ni escribir. El tamaño promedio de la unidad de producción es de 3.5 ha y se reporta un ingreso mensual de entre \$ 3600 y \$7200; el 70 % tiene en promedio seis cabezas de ganado.

El rendimiento promedio de grano de 1.66 t·ha⁻¹, con manejo agronómico del cultivo es similar al grupo Tradicional bajo. Esto es, preparación del terreno en forma mecánica, siembra manual con dos o tres semillas por mata, fertilización con urea, control de maleza con yunta y herbicidas y cosecha manual; usan semilla de maíz criolla debido a la disponibilidad en el municipio y porque no genera costos para el productor. El 58.5 % de las unidades de producción pertenecen al ejido y únicamente 21 % forman parte de un módulo de riego como una forma de organización.

Clúster Transición

Está integrado por 4 % de los productores encuestados, tiene el mayor nivel de escolaridad (el 100 % tiene primaria completa y no hay analfabetismo), el ingreso máximo es de hasta \$400 por día y la edad promedio es de 56 años. Además de realizar actividades agrícola, se dedican a la ganadería, tienen en promedio 15 cabezas de ganado para producir leche o para venta en mercados locales. Utilizan mano de obra contratada en forma permanente y han recibido asesoría técnica para la producción de maíz o el manejo de ganado. El manejo agronómico del cultivo fue similar a los clústeres tradicionales; sin embargo, sólo 50 % de los productores utilizan semillas de variedades mejoradas y 25 % además práctica la labranza de conservación y aplica micorrizas. Las unidades de producción tienen un tamaño promedio de 4.5 ha, de las cuales únicamente 25 % está clasificado como ejido y pertenece al módulo de riego. El rendimiento promedio fue de 3.73 t ha⁻¹. El 75 % practican el monocultivo y no aplican estiércol.

3.1.6.2 Indicadores de sustentabilidad

Dimensión Económica

Los valores obtenidos para los indicadores económicos de los clústeres Tradicional Bajo y Tradicional Medio no alcanzan los valores de referencia, mientras que en el clúster de Transición los valores son marginalmente mayores (Tabla 3.2). Esto puede explicarse por los rendimientos obtenidos, que son la base para calcular los indicadores de ingresos netos y de beneficio/costo. Los rendimientos de grano reportados en la sección anterior para los clústeres TB y TM, una vez transformados en sus valores monetarios, representan un ingreso neto que, en ambos casos, es menor a lo que se podría obtener considerando el rendimiento promedio nacional de 3.5 t ha⁻¹ (SIAP, 2016). A pesar de que los costos de producción en los tres clústeres son similares (TB = \$5957.4, TM = \$6301.3, Tr = \$6543.8), los mayores rendimientos del clúster Tr producen un ingreso neto considerablemente mayor. Esto también significa una mayor relación beneficio-costo para el grupo de Transición, ya que los productores en él obtienen más dinero por cada peso invertido (Tabla 3.2).

Tabla 3. 3. Valores agrupados por clúster para los indicadores económicos seleccionados utilizados para el análisis de sustentabilidad MESMIS del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla, 2015, (Elaboración propia, 2016).

Indicadores	Tradicional Bajo	Tradicional Medio	Transición
Rendimiento de grano (t ha⁻¹)	1.55	1.66	3.73
Eficiencia energética	1.94	2.94	5.18
Ingreso neto (\$)	0.8	0.7	5.6
Relación Beneficio/costo	1.22	1.23	2.67

La eficiencia energética se calculó a partir de las unidades energéticas producidas por el grano y las de los insumos consumidos durante el ciclo de producción (Funes-Monzote, 2009, Gliessman, 1998, McLaughlin, 1999, Pimentel y Pimentel, 1996). De los insumos, el fertilizante químico representa la mayor parte de la energía utilizada en los clústers Tradicionales (TB = 71 % y TM = 73.7 %) y el de Transición (67.3 %); es el último grupo el de mayor eficiencia, ya que cada Mega Joule utilizado produce 4.18 MJ del maíz, en contraposición a los grupos TB y TM, donde la relación es prácticamente 1: 1 (Tabla 3.2).

Dimensión Ambiental

Los indicadores económicos contrastan con algunos de los indicadores ambientales mostrados en la Tabla 3.3. Los clústeres tradicionales obtuvieron mejores resultados que el grupo de Transición y con frecuencia tuvieron resultados por encima de los valores de referencia. Los dos clústeres Tradicionales donde es usual tener cultivos adicionales al maíz, presentan mayor diversidad que el grupo Transición, donde el 75 % de las unidades de producción se caracterizan por el monocultivo. La misma tendencia se observó con respecto a la incidencia de plagas, ya que los productores de los clústeres Tradicionales reportaron una ocurrencia considerablemente menor que el grupo de Transición. La principal plaga reportada fue el frailecillo (*Macrodactylus mexicanus*). Con respecto a la incidencia de maleza, los tres grupos informaron sobre especies vegetales indeseables en las unidades de producción (más del 70 % en todos los casos); la principal maleza fue el chayotillo (*Sicyos deppei* G. Don).

Tabla 3. 4. Valores agrupados por clúster para los indicadores ambientales seleccionados utilizados para el análisis de sustentabilidad MESMIS del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla, 2015, (Elaboración propia, 2016)

Indicadores	Tradicional		
	Bajo	Tradicional Medio	Transición
Diversidad de especies cultivadas (Índice de Shannon)	0.83	0.68	0.20
Eficiencia en el uso del agua (kg·m⁻³)	0.16	0.18	0.40
Incidencia de plagas (%)	16.4	26.8	75
Incidencia de maleza (%)	70.9	78	75

La eficiencia en el uso del agua se ve fuertemente afectada por los bajos rendimientos de grano de los grupos Tradicional Bajo y Tradicional Medio. El grupo de Transición utiliza 2.5 m³ de agua para producir un kilogramo de maíz, lo que representa entre 40 y 45% del volumen de agua utilizado por los otros grupos.

Dimensión Social

La dimensión social, es la que muestra una mayor variabilidad entre los subsistemas o clústeres. Los productores del grupo Tr suelen poseer algún tipo de instalación de almacenamiento de grano y / o maquinaria y equipo agrícola para ayudar en la producción y pueden contratar mano de obra para sustituir el trabajo familiar no remunerado; esto contrasta con los clústeres TB y TM, en los que menos del 28 % posee equipos y / o infraestructura pero sus productores participan más activamente en las actividades agrícolas. Como puede observarse en la Tabla 3.4, los productores del grupo Tradicional Bajo muestran la mayor implicación en la producción de maíz, con más del 90 % del trabajo realizado por el productor y sus familiares.

Los encuestados expresaron interés en recibir asesoría técnica para aumentar la producción de maíz (Tabla 3.4). Además, parece que, una vez que algunos productores reciben asesoría, se interesan más en adquirir conocimientos. Esto podría ser crítico para mejorar las prácticas agrícolas en el municipio; ya que las actuales de fertilización y control de maleza hacen que los productores dependan más de insumos externos, reduciendo así la rentabilidad de su clúster. En los grupos TM y Tr, donde al menos el 9.7

% de los productores han recibido asesoría técnica, el uso de herbicidas y urea se reduce y el valor de dependencia de los insumos externos es menor (Tabla 3.4).

Tabla 3. 5. Valores agrupados por clúster para los indicadores sociales utilizados en el análisis de sustentabilidad MESMIS del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla, 2015, (Elaboración propia, 2016).

Indicadores	Tradicional Bajo	Tradicional Medio	Transición
Mano de obra familiar no remunerada y participación del productor (%)	96.4	87.8	75
Asesoría técnica recibida (%)	0	9.7	25
Interés en recibir asesoría técnica (%)	69	61	75
Alfabetismo (%)	83.6	90.3	100
Dependencia de insumos externos (%)	64.9	59.7	47.7
Nivel de autofinanciamiento (%)	40	41.4	75
Autosuficiencia de maíz (%)	68.3	49.1	100
Organización de productores (%)	29.1	51.2	25

El nivel de autofinanciamiento es inferior al 50% en los clústeres Tradicionales, ya que la mayoría de los productores reciben subsidios gubernamentales, en contraposición al clúster Transición, donde sólo el 25% de los productores reciben PROAGRO. Sólo hay una estructura organizativa disponible para los productores: el módulo de riego, cuya única función es dar acceso ordenado a las fuentes de agua; aun así, la mayoría de los productores de los grupos Transición y Tradicional Bajo no son miembros del mismo (Tabla 3.4). Esta aparente limitación puede superarse con mayores ingresos. De hecho, al menos el 50% de los productores del grupo de transición pueden acceder al agua sin pertenecer al módulo (es decir, bombeando agua de las corrientes de agua cercanas) en caso de que lo necesiten.

El rendimiento de los granos afecta directamente a la autosuficiencia alimentaria de los clústeres menos productivos, ya que no todos los productores pueden satisfacer los requisitos de una familia de cuatro miembros (Tabla 3.4).

Con los resultados obtenidos, los indicadores fueron ponderados para generar un diagrama de AMIBA, que constituye la representación gráfica de la sustentabilidad del sistema.

Las tres gráficas radiales, o AMIBAs, corresponden a los clústeres evaluados y muestran, de acuerdo con los resultados mencionados en las secciones anteriores, si los indicadores de cada grupo han alcanzado el mejor valor posible (en este estudio, 10) o si alcanzaron el valor de referencia (con un valor de 5). Los atributos de sustentabilidad agrupan los indicadores como sigue: Productividad (indicadores 1 al 4), Estabilidad, resiliencia y confiabilidad (5 al 8), Adaptabilidad (9 al 11) y Autogestión (12 al 16). Las calificaciones generales de sustentabilidad son: 3.9 para el clúster Tradicional Bajo, 4 para el Tradicional medio y 5.4 para el de Transición (Figura 3.1).

3.1.7 Discusión

La productividad fue el atributo que más afectó la sustentabilidad de los tres grupos, ya que el rendimiento de los granos determinó la eficiencia con que se asignaron los recursos de producción (fertilizantes químicos, agua y energía). En la Figura 3.1, es posible ver cómo los indicadores de productividad se comparan con el valor de referencia y el mejor valor posible.

La productividad define el porcentaje de ingresos del productor originado por la producción de maíz, que en todos los grupos fue inferior al 10 %. Estos resultados coinciden con los hallazgos presentados en estudios sobre la producción periurbana y rural de maíz (Ayala *et al.*, 2013; Lerner *et al.*, 2013). La baja productividad también pone en peligro la autosuficiencia alimentaria: más del 30 % de los productores de los grupos de TB y TM no pueden cubrir las necesidades básicas de grano en sus familias. Esto a menudo significa que los productores y sus familias se convierten en compradores netos de sustitutos de grano de menor calidad (variedades importadas), nixtamal y tortillas (Van Dusen y Taylor, 2005).

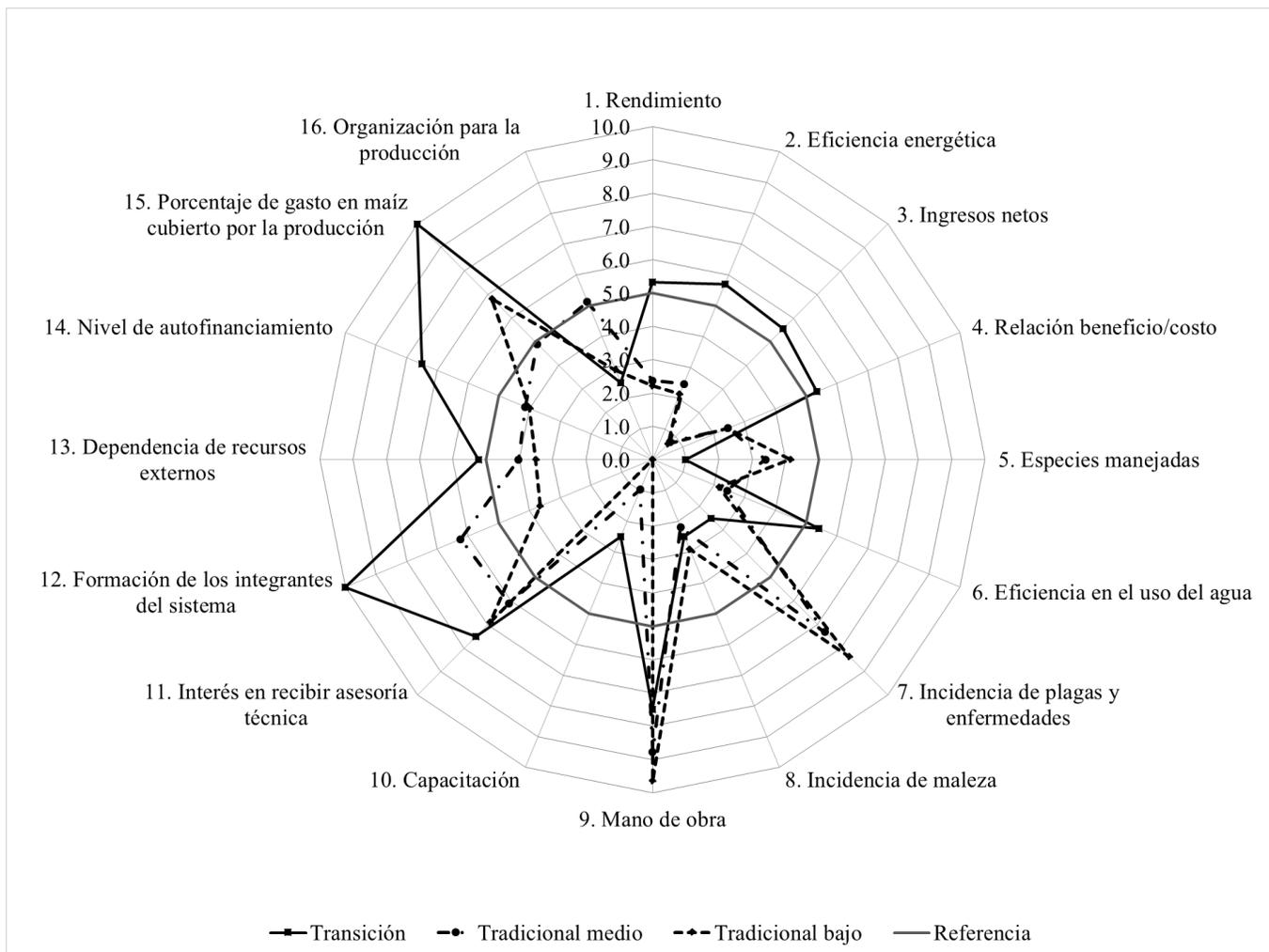


Figura 3. 1. Diagrama de AMIBA para los indicadores de sustentabilidad medidos en los tres clústeres de Ahuazotepec, Puebla, 2015. Los atributos de sustentabilidad agrupan los indicadores como sigue: Productividad (indicadores 1 al 4), Estabilidad, resiliencia y confiabilidad (5 al 8), Adaptabilidad (9 al 11) y Autogestión (12 al 16).

A partir del análisis MESMIS, se identificaron dos puntos críticos para la productividad: el primero fue la fertilización química y el segundo fue control de malezas, ambos representan entre 31.7 % y 41.9 % de los costos de producción en los conglomerados. La urea es el fertilizante más utilizado, aplicado en el 94 % de las unidades de producción, sin embargo, la aplicación se hace sin información sobre los requerimientos del cultivo o la disponibilidad de nutrientes en el suelo. El uso de herbicidas también se hace sin seguir las instrucciones del producto. A menudo, los productores aplican el producto cuando la altura de la planta de maleza es de 20 cm y no necesariamente garantizan una humedad adecuada del suelo, lo que podría reducir seriamente la efectividad de la sustancia. Además, dos veces durante el ciclo de producción, la mayoría de los productores tradicionales realizan cultivos con yunta lo que puede eliminar la maleza mecánicamente, esto hace que la aplicación del herbicida sea una actividad costosa y redundante.

El aumento de la productividad es un objetivo común de la agricultura. La mayoría de las veces, lograr esto implica un mayor uso de agroquímicos, nuevas tecnologías de riego y mejoramiento genético de las semillas (Chávez y Arriaga, 1999; Ruttan, 2002; Tilman *et al.*, 2002; Fantin *et al.*, 2017). Pero la aplicación de tales enfoques es limitada en las zonas altamente marginadas por razones monetarias; de hecho, sólo el 2 % de los productores de Ahuazotepec utilizan algunas de estas tecnologías (específicamente semillas híbridas).

Curiosamente, hubo productores que reportaron rendimientos por encima de 4 Mg·ha⁻¹ aun usando semillas criollas y algunas de las prácticas de producción descritas para los grupos Tradicionales Bajo y Medio. Gil-Muñoz *et al.* (2004) reportan rendimientos similares para las variedades criollas en el estado de Puebla, lo que podría explicarse porque las variedades autóctonas están adaptadas a las condiciones climáticas y edáficas del sitio, lo que puede representar una ventaja sobre las variedades híbridas. Con base en esto, las semillas no son un factor limitante del sistema, y podría ser posible aumentar el rendimiento del maíz e incluso superar la media nacional (3.5 Mg ha⁻¹) sin adoptar una tecnología costosa.

Se dice que las prácticas tradicionales para la producción de maíz siguen patrones que pueden considerarse ambientalmente sustentables (Gliessman, 2015), y esto podría ser el caso de las unidades de alta producción mencionadas anteriormente en Ahuazotepec. El

rasgo común entre ellos fue el uso de estiércol como fertilizante y una adecuada eliminación de las malas hierbas. Se ha demostrado que la aplicación de estiércol al suelo mejora su capacidad de retención de agua, reduce la incidencia de maleza, previene la erosión y favorece los aumentos de rendimiento (Capulín-Grande *et al.*, 2001; Parsons *et al.*, 2009; Miron *et al.*, 2011). Con respecto a la densidad de las plantas, las unidades tradicionales de alta producción no plantan maíz en matas, sino que utilizan un enfoque similar al de la Transición, lo que lleva a tener entre 60,000 y 75,000 plantas por hectárea.

La combinación de estiércol y dosis bajas de fertilizante químico beneficia la actividad microbiana y aumenta la disponibilidad de carbono y nutrientes en el suelo (Liu *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2010). Sin embargo, la mayoría de los productores encuestados (independientemente del grupo) aplican urea en el momento de la siembra, cuando la planta tiene menor capacidad para aprovechar nutrientes, aumentando así la probabilidad de pérdidas de fertilizante (Cheng *et al.*, 2015). Un enfoque más apropiado sería la aplicación de fertilizantes en múltiples ocasiones, en función de las necesidades y las etapas fenológicas de la planta, de hecho la mayor absorción de nitrógeno ocurre más tarde en la etapa vegetativa, cuando el cultivo crece más rápidamente (Krishna, 2013; Cheng *et al.*, 2015).

Otras características que aumentan la sustentabilidad ambiental de la producción tradicional de maíz (clústeres TB y TM) incluyen la presencia de más de un cultivo y la rotación de cultivos en la parcela (Arnés *et al.*, 2013; Vasileiadis *et al.*, 2013). Estas prácticas, que no están presentes en el clúster de Transición, también limitan su resiliencia y estabilidad, reduciendo su rentabilidad a largo plazo, aunque en la actualidad este grupo parece ser el más productivo.

El aumento de la eficiencia en el uso de agua y nutrientes también es crítico para incrementar la producción de manera sustentable (Mafongoya *et al.*, 2016). El grupo de Transición tiene un mejor desempeño en este indicador ambiental que los grupos tradicionales (Figura 3.1), aunque la mayoría de los productores de los grupos Tradicionales tienen acceso al agua del módulo de riego, optan por esperar la lluvia para realizar la siembra. Por lo tanto, la mayor eficiencia en el grupo Tr puede ser consecuencia

de una mejor planificación de las actividades en términos de los patrones de precipitación (Tilman *et al.*, 2002; Mafongoya *et al.*, 2016).

Independientemente de la ineficiencia de los sistemas tradicionales en algunos aspectos, éstos pueden proporcionar servicios ecosistémicos (como la polinización y actuar como depósitos de la diversidad genética del maíz) que pueden ser difíciles de evaluar cuantitativamente (Tilman *et al.*, 2002) ya que no proporcionan beneficios tangibles para los productores. Esto podría suponer un riesgo para el agroecosistema tradicional del maíz en Ahuazotepec, ya que algunos productores podrían sentirse desalentados por la baja productividad y abandonar la producción de maíz o cambiar a enfoques menos sustentables para aumentar la producción. Es entonces importante que los gobiernos locales reconozcan los servicios ecosistémicos proporcionados por las prácticas Tradicionales y alienten la adopción de prácticas de producción y conservación que sean rentables y sostenibles (Tilman *et al.*, 2002; Gliessman, 2015), a través de asesoría técnica y servicios que sean sensibles hacia este fin.

Otra posible limitación para la adopción de mejores prácticas de producción es la alta prevalencia del trabajo no remunerado. Los productores hacen lo que pueden para llevar a cabo las diferentes actividades agrícolas en sus unidades de producción, dependiendo en gran medida de la mano de obra familiar no remunerada, en particular de sus cónyuges e hijos menores, que sólo tienen tiempo limitado para contribuir (ya que también tienen trabajo doméstico o escolar propio). Esto significa que hay horas-hombre disponibles limitadas para adoptar cambios, tales como fertilizaciones múltiples y control de maleza, si no se contratan mano de obra adicional, lo que a su vez está limitado por la falta de recursos monetarios que prevalece en productores con baja productividad.

También se debe considerar el envejecimiento de los productores encuestados, ya que el 46 % tiene más de 60 años de edad (TB = 58.5 %, TM = 43.6 %, Tr = 25 %) y de esos 47.8 % son mayores de 70 años. La agricultura no es sólo una actividad de subsistencia, ya que está profundamente arraigada en la identidad de género, los valores y las tradiciones de los agricultores ancianos (Marotz-Baden *et al.*, 1995; Gullifer y Thompson, 2006) . Hay un elemento de orgullo y un profundo vínculo emocional con el cultivo del maíz dentro de los productores más viejos de Ahuazotepec, lo que se hace evidente por su participación

continúa en actividades tradicionales, incluso las más exigentes físicamente, independientemente del beneficio económico que puedan obtener. Esto representa un peligro para su salud y bienestar, ya que la propensión a las lesiones aumenta en los agricultores mayores de 50 años de edad (Amshoff y Reed, 2005). Con la incertidumbre de que una generación más joven asuma el control, también existe un riesgo latente para los atributos de estabilidad, autosuficiencia y adaptabilidad del agroecosistema, e incluso para su existencia futura. Por lo tanto, se deben poner en práctica políticas y asesoramiento adecuados para asegurar una salida satisfactoria (es decir, la jubilación anticipada y la transferencia del terreno) o la continuación adecuada de las actividades de producción (Potter and Lobley, 1992; Pietola *et al.*, 2003; Amshoff y Reed, 2005).

De acuerdo con Valentín-Garrido *et al.* (2016), las actuales estrategias de subsidios para el campo (PROAGRO) no logran mejorar la sustentabilidad económica (en términos de productividad) del sistema. En éste estudio hemos probado esta especulación mediante una prueba de Tukey para establecer si había diferencias en el rendimiento de cada grupo por recibir o no subsidios para la producción. El análisis reveló que la presencia o ausencia de la subvención no hace una diferencia real ni estadística en los rendimientos obtenidos de ninguno de los grupos ($P > 0.05$). Sin embargo, se necesitan subsidios para cubrir parte de los costos de producción por hectárea en los clústeres TB (21.8 %) y TM (20.6 %), donde la mayor parte del maíz se dedica al autoconsumo y los márgenes de rentabilidad son bajos.

Para mejorar la productividad y el atributo de la autosuficiencia, es importante promover la organización de los productores y su participación activa. Actualmente, la única organización existente es el módulo de riego, que no tiene ningún efecto real en la productividad del sistema. Las organizaciones de agricultores reales, como las cooperativas de compra, formales o informales, con objetivos y medios claros son necesarias en el municipio. Se ha demostrado que las organizaciones campesinas facilitan el acceso a mejores precios de insumos y equipos e incluso para acceder a créditos para comprar maquinaria (Hellin, Lundy y Meijer, 2009). Los agricultores organizados también pueden establecer un diálogo más eficaz con las autoridades locales, con lo que tienen

mayor influencia en la aplicación de los recursos municipales, por ejemplo para ampliar las estructuras de riego ya construidas para mejorar la eficiencia del uso del agua.

3.2 Fase II. Sujeto que investiga. Análisis FODA del sujeto que investiga

En las investigaciones realizadas bajo una visión sistémica–transdisciplinaria, el sujeto que investiga además de conducir la investigación, debe adaptar los principios y las técnicas de la metodología para organizar la forma en la que abordará e intervendrá en la situación, considerando como objetivo principal tomar parte de la acción para mejorar el problema, es decir, debe ser parte tanto de lo que afecta al sistema como de las salidas que genere la solución que propone (Checkland y Poulter, 2010). Por ello, es importante que el sujeto que investiga se conozca a sí mismo con el fin de interpretar y entender las habilidades, las limitantes, los conocimientos y los talentos que le permitan evolucionar e interrelacionarse con el entorno de la investigación.

El análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) es una herramienta que permite conformar un cuadro de la situación actual de la empresa o persona, permitiendo de esta manera obtener un diagnóstico preciso que permita analizar elementos internos o externos que influyen en el desempeño de la empresa o persona (Ponce, 2007). En la Tabla 3.5 se presenta el FODA personal del sujeto que investigó este trabajo.

Tabla 3. 6. FODA personal (Elaboración propia, 2016)

Fortalezas	Debilidades
Buen desempeño académico, habilidad para trabajar bajo presión, habilidades y conocimientos técnicos de cómputo y matemáticas, responsable, motivada por mi profesión, honesta, perseverante.	Autoexigente, indecisa, tímida.
Oportunidades	Amenazas
Vinculación con la comunidad y con un grupo de trabajo experto en diferentes disciplinas. Experiencia en el área agrícola por trabajos realizados previamente.	Poco interés de la comunidad en el área de estudio que propongo. Recursos materiales limitados.

3.3. Fase III. Investigación experimental

3.3.1. Caracterización física y química de los fertilizantes orgánicos producto de las combinaciones entre concentraciones de nejayote y estiércol de ovino

3.3.1.1. Resumen

La aplicación de fertilizantes orgánicos para la producción de maíz requiere la caracterización previa de los insumos utilizados con el fin de conocer su composición y determinar la cantidad adecuada a aplicar para lograr mejoras en el agroecosistemas. Por ello, en este apartado se caracterizaron física y químicamente los fertilizantes orgánicos obtenidos de las combinaciones de tres niveles de nejayote (0, 75 y 150 m³ ha⁻¹) y tres niveles de estiércol (0, 25 y 50 Mg ha⁻¹). Con los resultados obtenidos se determinó que la cantidad de nutrimentos contenida en las mezclas permite que sean utilizadas en sustitución de la fertilización inorgánica tradicional; además, con este manejo se disminuye el potencial contaminante del nejayote y del estiércol y permite la recuperación de agua utilizada en el proceso de nixtamalización.

Palabras clave: Estiércol, nejayote, compostaje

3.3.1.2. Introducción

Los abonos orgánicos pueden ser residuos de origen animal entre los que se incluyen, estiércoles, compostas, vermicompostas, abonos verdes, residuos de las cosechas, residuos orgánicos industriales, aguas negras y sedimentos orgánicos; sus características físicas y composición química son variables (Trinidad-Santos, 2007).

El estiércol es una valiosa fuente de nutrientes para los cultivos y puede mejorar la productividad del suelo. El estiércol está compuesto por heces de animales y orina; adicionalmente, puede contener residuos de alimentos, de sustratos utilizados como piso de corrales y agua. Es un fertilizante que contiene un amplio rango de nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes como cobre, manganeso y zinc (Manitoba Agriculture Food and Rural Development, 2015)

Tipos de estiércol y composición

El estiércol contiene principalmente nitrógeno, fósforo y potasio, pueden ser solubles o insolubles; los primeros se encuentran generalmente disponibles para que los cultivos los

utilicen y los insolubles requieren más de un año para estar disponibles. El 80 % del fósforo se encuentra en los sólidos y es insoluble; el mismo porcentaje del potasio se encuentra en la orina y es altamente soluble. El nitrógeno se distribuye en proporciones iguales en la orina y las heces, únicamente el 50 % es soluble (Lorimor, Powers y Sutton, 2008). El contenido de nutrientes varía entre las diferentes especies animales, el estiércol de aves tiene el mayor contenido de nitrógeno y fósforo; mientras que, el de ovino genera la mayor cantidad de potasio con promedio 9.8, 4.9 y 9.8 kilogramos de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente (Tabla 3.6).

Tabla 3. 7. Contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en estiércoles de diferentes especies animales con datos de Lorimor *et al.* (2008), (Elaboración propia, 2017).

Especie	Peso por cabeza (kg)	Estiércol producido por día (kg por cabeza)	N (kg·t⁻¹)	P₂O₅ (kg·t⁻¹)	K₂O (kg·t⁻¹)
Bovino para leche					
Becerras	68.1	5.4	5.0	0.8	4.2
	113.5	9.1	5.5	1.0	4.5
Novillas	340.5	20.4	5.1	1.8	5.1
	454.0	27.2	5.0	1.7	5.2
Vaca lactante	454.0	50.4	6.5	3.3	3.6
	635.6	70.4	6.5	3.4	3.7
Vaca seca	454.0	23.2	5.9	2.2	4.7
	635.6	32.2	5.9	2.1	4.6
	771.8	39.5	5.9	2.1	4.6
Ternera	113.5	3.0	4.5	3.0	7.6
Bovino para carne					
Becerras (confinado)	204.3	21.8	4.2	1.9	3.3
	295.1	31.3	4.2	1.9	3.3
Becerras terminados	340.5	16.8	7.3	2.2	4.6
	499.4	24.5	7.4	2.2	4.6
Vacas (confinadas)	454.0	41.8	3.8	2.0	3.2
Cerdos					
Crías	11.4	0.9	10.5	5.3	5.3
	18.2	1.4	10.0	3.3	6.7
Cerdos terminados	68.1	3.4	12.2	4.1	5.4
	81.7	4.0	11.2	4.5	5.6
	99.9	4.9	11.9	4.6	5.5
	118.0	5.8	11.7	3.9	6.3
	136.2	6.7	11.5	4.1	6.1
Cerdas gestantes	136.2	3.1	7.4	4.4	5.9

Continuación Tabla 3.6. Contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en estiércoles de diferentes especies animales con datos de Lorimor *et al.* (2008), (Elaboración propia, 2017).

Especie	Peso por cabeza (kg)	Estiércol producido por día (kg por cabeza)	N (kg·t⁻¹)	P₂O₅ (kg·t⁻¹)	K₂O (kg·t⁻¹)
	181.6	4.1	6.6	4.4	5.5
	227.0	5.2	7.0	4.4	5.3
Cerdas lactantes	170.3	7.9	9.7	6.3	7.4
	227.0	10.6	9.4	6.4	7.7
	272.4	12.8	9.6	6.4	7.5
Jabalí	136.2	2.8	6.5	4.8	4.8
	181.6	3.7	7.3	6.1	6.1
	227.0	4.7	6.8	5.8	5.8
Aves					
Pollos	0.9	0.1	11.1	7.4	5.3
Aves de corral	1.4	0.1	17.3	5.3	8.0
Pavo hembra	4.5	0.2	16.6	10.9	7.2
Pavo macho	9.1	0.3	15.0	10.0	6.5
Pato	1.8	0.2	9.8	7.7	5.9
Ovinos					
Corderos	45.41	1.9	9.8	4.9	9.8
Equino					
Sedentarios	454.0	24.7	3.3	1.1	1.1
Ejercicio intenso	454.0	25.2	5.4	2.7	4.1

Factores que afectan la composición del estiércol

La especie, etapa de crecimiento, etapa reproductiva y el objetivo de la producción son factores que modifican el tipo de alimentación y, en consecuencia, la composición del estiércol. En general, los animales excretan entre el 50 y el 90 % de los nutrientes con que son alimentados; por ejemplo, los animales que han concluido su crecimiento y que no están ganando peso, gestando o produciendo leche o huevos, excretan casi todos los nutrientes que contiene el alimento que consumen.

Otros factores que pueden modificar la composición del estiércol son el consumo de agua, los materiales usados para las camas de los establos, el clima y la forma en que se almacena (Gros y Domínguez-Vivancos, 1992; Manitoba Agriculture Food and Rural Development, 2015).

Mineralización

La mineralización es el proceso biológico donde microorganismos convierten los nutrientes a formas asimilables para las plantas (Pettygrove, Heinrich y Crohn, 2009). Este proceso es modificado por diferentes factores como la temperatura, las propiedades del suelo y las características del estiércol utilizado; lo que disminuye la precisión en las estimaciones que pueden realizarse para determinar el porcentaje de mineralización (Eghball *et al.*, 2002). La gallinaza y la porqueraza se mineralizan el 90 y 65 %, respectivamente durante el primer año; mientras que, el estiércol bovino, caprino y equino se mineralizan 35, 32 y 30 %, respectivamente en el mismo periodo (Trinidad-Santos, 2010).

Nejayote

El nejayote, es un líquido de desecho del proceso de nixtamalización, con residuos sólidos de maíz y calcio, se considera contaminante debido a sus características químicas (Tabla 3.7) y a la alta demanda de oxígeno; además, porque es desechado a los drenajes sin recibir un tratamiento previo (Valderrama-Bravo *et al.*, 2013). En México se generan entre 1500 y 2000 m³ de nejayote para el procesamiento de 600 t de grano (Salmerón-Alcocer *et al.*, 2003).

Tabla 3. 8. Características del Nejayote colectadas en el Estado de México en 2012, Valderrama-Bravo *et al.* (2012). Elaboración propia (2017).

Características del nejayote	
Sólidos totales (%)	2.28
Humedad (%)	97.72
pH	11.39
Densidad (kg/m ³)	1003.54
Grasa (%)	0.008
Ceniza (%)	0.767
Proteína cruda (%)	0.113
Fibra (%)	0.581
Carbohidratos (%)	0.862
Calcio (mg/L)	1526.21
Conductividad eléctrica (μS/cm)	4510.12

Las características del nejayote mostradas en la Tabla 3.7 fueron obtenidas de muestras colectadas en un molino comercial del Estado de México, donde se preparó una mezcla con 50 kg de maíz y 500 g de hidróxido de Calcio (Nixtocal) disueltos en 100 L de agua, la mezcla se cocinó a 92° C durante 38 minutos y un tiempo de reposo de 12 h; de este proceso se colectaron los 20 L de nejayote que fueron analizados (Valderrama-Bravo *et al.*, 2012).

Compostaje

El compostaje es el proceso natural de descomposición de la materia orgánica por microorganismos bajo condiciones controladas, puede ser anaeróbico o aeróbico. Una vez compostados, los materiales orgánicos como residuos de cosechas, desechos de animales, basura de comida, desechos municipales y algunos desechos industriales incrementan su capacidad para ser utilizados como una fuente de fertilización (Misra, Roy y Hiraoka, 2003). En la Figura 3.2 se presentan las características de cada uno.

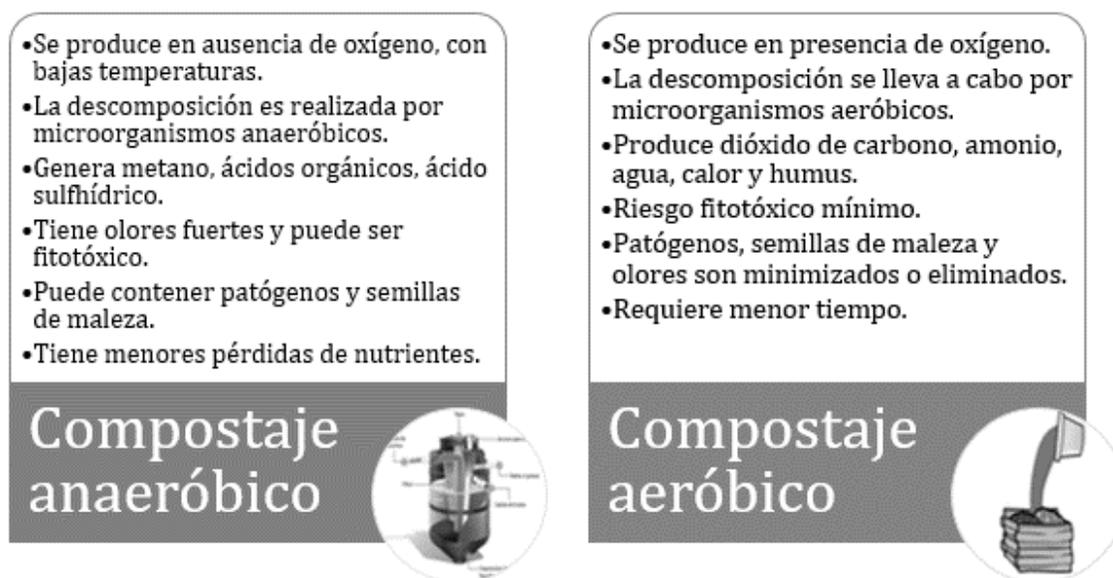


Figura 3. 2. Tipos de compostaje de acuerdo con Misra *et al.* (2003), (Elaboración propia, 2017).

Haug (1993) define la composta como un mejorador de suelos orgánico que ha sido estabilizado para formar un producto similar al humus, que está libre de patógenos, semillas de plantas, que no atrae insectos o vectores y que puede ser manejado o

almacenado sin inconvenientes para el usuario y que es benéfico para el crecimiento de las plantas.

El compostaje aeróbico es el proceso mediante el cual microorganismos descomponen sustratos orgánicos, convirtiendo la porción degradable de la materia orgánica en dióxido de carbono y agua; esta descomposición se lleva a cabo bajo condiciones que permiten el desarrollo de temperaturas termofílicas resultantes del calor producido biológicamente; generando un producto estable al cual se le han eliminado o minimizado olores indeseables, patógenos y semillas de maleza, la composta puede ser utilizada como enmienda para el suelo (Haug, 1993; USDA, 2010a). Existen diferentes métodos para compostaje, la elección depende de la calidad, el capital, el espacio, el tiempo y la disponibilidad del material a utilizar; para grandes cantidades es común utilizar el apilado y sistemas en recipientes (USDA, 2010a).

Proceso de compostaje

El proceso de compostaje puede dividirse en dos fases principales: compostaje activo o fase bio-oxidativa y la de maduración. En la fase mesófila, que ocurre en un rango de temperatura de entre 10 y 65 °C; se multiplican los microorganismos mesófilos (que se desarrollan en forma óptima entre 20 y 45 °C) debido a la disponibilidad de azúcares y aminoácidos del material fácilmente degradable, normalmente toma entre 2 o 3 días. Después la temperatura se incrementa arriba de 65 °C y da lugar a la fase termófila, en este momento la pila de composta está colonizada por diversos microorganismos que operan con la máxima eficiencia; se registra un incremento en la temperatura hasta 70 °C lo que facilita la destrucción de patógenos y semillas de maleza; además, ocurre la descomposición de materiales más complejos como la celulosa. El incremento de temperatura puede disminuir la eficiencia de la actividad microbiana favoreciendo el enfriamiento de la pila. La fase termófila dura entre 10 y 60 días. Una vez que la temperatura disminuye por debajo de los 40 °C inicia el periodo de maduración, que se caracteriza por la disminución de la actividad bacteriana y la formación de componentes húmicos y la formación de nitrógeno nítrico, esta fase dura entre 1 y 6 meses (Moreno-Casco y Mormeneo-Bernat, 2008; USDA, 2010a, 2010b).

En la Figura 3.3 se observa el proceso de compostaje en las diferentes fases, los microorganismos que llevan a cabo la degradación y algunas características como el pH y la relación C:N que se obtiene al final del proceso.

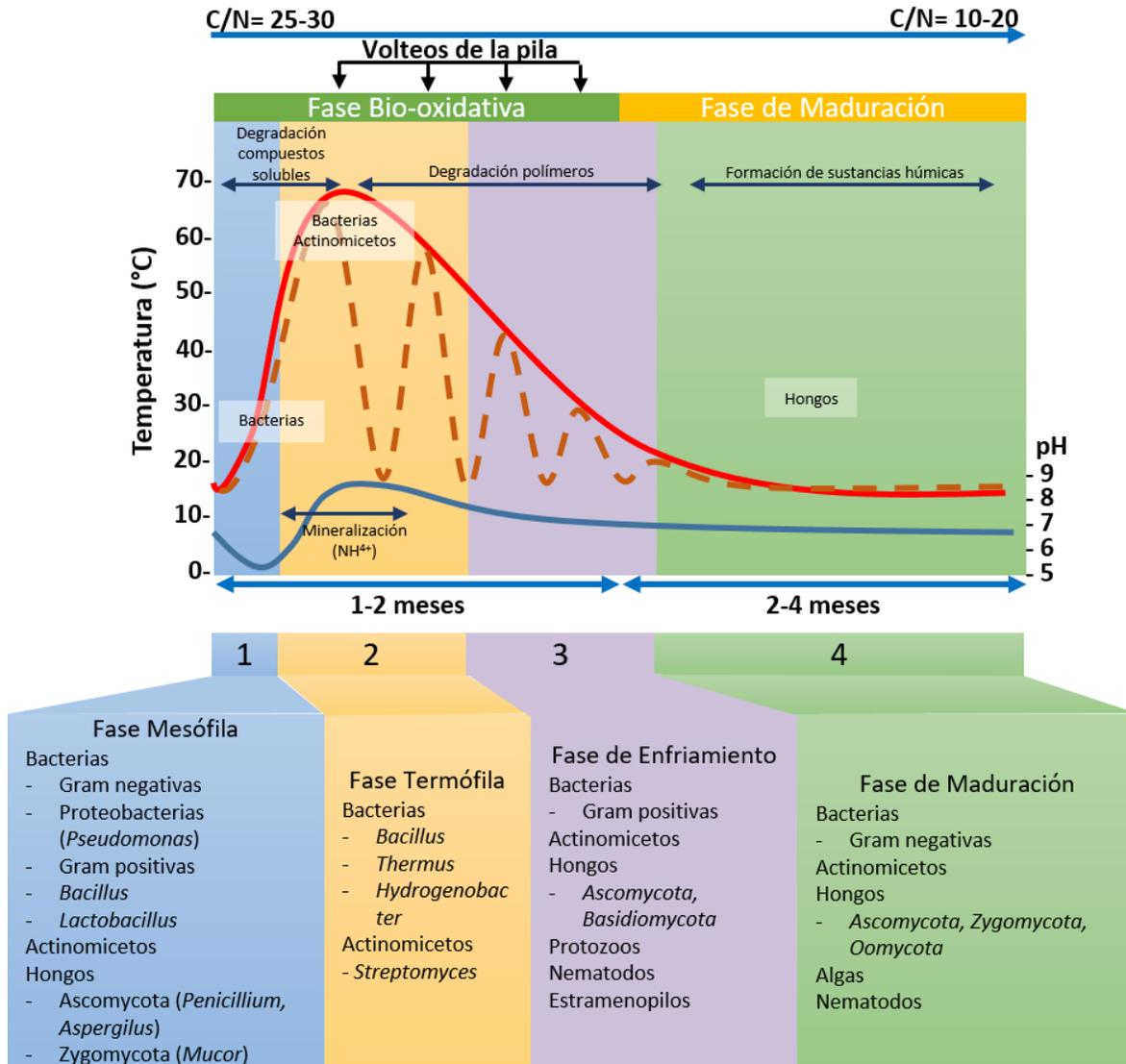


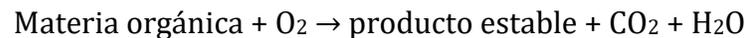
Figura 3. 3. Fases del proceso de compostaje de acuerdo con Moreno-Casco y Mormeneo-Bernat (2008), (Elaboración propia, 2017).

Los microorganismos que habitan en la composta pueden ser: bacterias, hongos y actinobacterias; la temperatura y la presencia de oxígeno son los factores que determinan las especies que se presentan. La descomposición inicial de azúcares ocurre por las bacterias, funcionan en un rango de pH entre 6 y 7.5 y son poco tolerantes a baja humedad y altas temperaturas. Los hongos se presentan durante todo el proceso; sin embargo,

utilizan ceras, proteínas complejas, hemicelulosa, lignina y pectina como alimento; son más tolerantes que las bacterias a cambios en la humedad y el pH, requieren oxígeno y temperaturas menores a 60 °C. Las actinobacterias o actinomicetos pueden romper ácidos orgánicos, azúcares, almidones, celulosa, hemicelulosa, proteínas, polipéptidos, aminoácidos e incluso ligninas; producen enzimas que pueden ayudar a la descomposición de sustancias para hacerlas disponibles para otros microorganismos, prefieren bajos niveles de humedad y pH alcalino (USDA, 2010a).

Transformaciones químicas durante el proceso de compostaje

El proceso de compostaje es una oxidación controlada de la materia orgánica para producir un producto humificado, la reacción química básica es (Waites *et al.*, 2001):



La reacción no ocurre en forma unitaria, sino a partir de muchas reacciones, por ello, es importante considerar los siguientes factores que son parte fundamental de la transformación (Waites *et al.*, 2001; Misra, Roy y Hiraoka, 2003; USDA, 2010a):

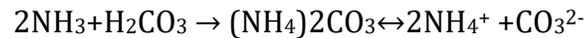
Relación C:N

1. Esta relación es fundamental para el proceso de compostaje ya que puede definir la cantidad de los otros nutrientes presentes en el material.
2. El carbono es usado como fuente de energía y para el crecimiento de microorganismos.
3. Una parte del carbono se pierde como dióxido de carbono, por ello al final del proceso se puede perder entre el 30 y el 50 % del total.
4. El nitrógeno es usado para la síntesis de material celular, aminoácidos y proteínas.
5. La relación inicial recomendada está entre 20:1 y 40:1

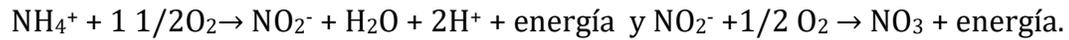
Nitrógeno

1. El nitrógeno se presenta en forma orgánica e inorgánica, los microorganismos mineralizan el nitrógeno orgánico en nitrógeno inorgánico, principalmente amonio, nitritos y nitratos que están disponibles para las plantas.
2. El pH de la pila hace que se produzcan dos reacciones:

a) Conversión de amoniaco en amonio



b) Nitrificación



3. El nitrógeno puede perderse durante el proceso de compostaje por emisiones gaseosas, lavado y desnitrificación.
4. El nitrógeno y carbono que queden formarán moléculas complejas.

Fósforo

1. El fósforo presente en el material sufre pocas pérdidas durante el compostaje
2. Forma parte de ácidos húmicos complejos

Oxígeno

1. Este elemento es necesario para mantener las condiciones aeróbicas del proceso.
2. La concentración mínima requerida es del 5 %.

Agua

1. Los microorganismos requieren un ambiente acuoso para garantizar el movimiento y transporte de nutrientes.
2. Se recomienda entre 40 y 65 % de humedad.

pH

1. El rango ideal para la actividad microbiana es entre 6.5 y 8, este valor es independiente del pH inicial de los componentes de la composta.
2. En los primeros días hay una disminución del pH por la formación de ácidos orgánicos
3. Se recomienda que el pH final sea menor que 8.5 para evitar pérdidas de nitrógeno por volatilización de amoniaco. Para aumentar el pH se utiliza hidróxido de calcio.

3.3.1.3. Objetivo

Caracterizar química y físicamente los fertilizantes orgánicos producto de las combinaciones entre concentraciones de nejayote y estiércol de ovino.

3.3.1.4. Hipótesis

La caracterización química y física de los fertilizantes orgánicos, combinación entre concentraciones de nejayote y estiércol de ovino, permite cuantificar la aportación de nutrimentos esenciales para la planta y consecuente dosis de aplicación en el sistema de producción de maíz y otros cultivos en función del rendimiento esperado.

3.3.1.5. Materiales y métodos

Origen del estiércol de ovino y del nejayote

El estiércol fue obtenido de la unidad de producción “Rancho Laguna Seca” ubicada en la localidad de Laguna Seca del municipio de Ahuazotepec, Puebla, México; propiedad del productor cooperante en la investigación Arnulfo Domínguez Cuevas. Los ovinos fueron machos estabulados, con peso promedio de 40 kg, alimentados con 1.4 kg de una mezcla de sorgo (35 %), cascarilla de soya (20 %), heno de pasto y trébol (43 %) y sal mineral (2 %); en los corrales se utiliza una cama de aserrín. Una vez recolectado el estiércol se utilizó el método de compostaje de pila pasiva durante seis meses, la pila fue volteada mensualmente para mantener la porosidad y evitar zonas anaeróbicas. El estiércol compostado fue molido y tamizado con una malla comercial de 10 mm para homogeneizar el producto.

El nejayote fue obtenido de la tortillería “Ahuazotepec” ubicada en la calle Miguel Hidalgo #6, Col. Centro, Ahuazotepec, Puebla, México. La unidad es propiedad del productor de tortilla cooperante en la investigación Gerardo Florentino Islas Toris. En el proceso de nixtamalización tradicional se utilizó en promedio 350 g de *Nixtocal*® (Hidróxido de Calcio) por cada 50 kg de maíz, estos se mezclan con 150 L de agua; el nixtamal se extrae para la molienda y elaboración de tortilla. El nejayote resultante de la cocción del maíz se recolectó diariamente en contenedores de plástico de 30 L, antes de mezclarlo con el estiércol se agitó para homogeneizar la distribución de los sólidos.

Preparación de fertilizantes orgánicos

Con base en el diseño de los fertilizantes orgánicos (Tabla 3.8), se prepararon las mezclas nejayote-estiércol de ovino en contenedores de plástico negro con capacidad de 200 y 300 L en función de la cantidad de cada componente. En el recipiente se colocaron 25 o 50 Mg por hectárea de estiércol de ovino y se agregaron 75 o 150 m³ por hectárea de nejayote según cada tratamiento (Tabla 3.8). Las mezclas fueron agitadas diariamente durante los primeros cinco días, periodo en el que se agregó el nejayote; en los quince días restantes, se agitaron cada tercer día. Las mezclas estuvieron en los contenedores durante 20 días (Figura 3.4) y se utilizó el método de composteo en contenedores (USDA, 2010).

Tabla 3. 9. Fertilizantes orgánicos producto de las combinaciones entre concentraciones de nejayote y estiércol de ovino. Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016 (Elaboración propia, 2017)

Fertilizante orgánico	Descripción (Dosis por hectárea)
1	0 m ³ Nejayote – 0 Mg Estiércol de ovino
2	0 m ³ Nejayote – 25 Mg Estiércol de ovino
3	0 m ³ Nejayote – 50 Mg Estiércol de ovino
4	75 m ³ Nejayote – 0 Mg Estiércol de ovino
5	75 m ³ Nejayote – 25 Mg Estiércol de ovino
6	75 m ³ Nejayote – 50 Mg Estiércol de ovino
7	150 m ³ Nejayote – 0 Mg Estiércol de ovino
8	150 m ³ Nejayote – 25 Mg Estiércol de ovino
9	150 m ³ Nejayote – 50 Mg Estiércol de ovino

El proceso de preparación de las muestras se realizó en campo utilizando cubetas graduadas para medir el volumen de nejayote y una báscula para pesar el estiércol necesario en cada contenedor (Figura 3.4).



Figura 3. 4. Proceso de preparación de fertilizantes orgánicos (nejayote y estiércol), Ahuazotepc, Puebla. 2015-2016 (Elaboración propia, 2017).

Para realizar la caracterización física y química, se tomaron dos muestras de cada una de las combinaciones nejayote-estiércol de ovino. Las muestras fueron analizadas en laboratorio utilizando las siguientes técnicas:

Muestras líquidas

- El pH se obtuvo con el método potenciométrico (Primo-Yuferá y Carrasco-Dorrien, 1973).
- La conductividad eléctrica se midió mediante el puente de conductividad (Jackson, 1970).
- La materia orgánica por el método de Walkley y Black (Primo-Yuferá y Carrasco-Dorrien, 1973).
- El nitrógeno por arrastre de vapor Kjeldahl (Jackson, 1970).
- El fósforo asimilable por el método de Bray (Jackson, 1970).
- Sodio y potasio por espectrofotometría de emisión de flama (Primo-Yuferá y Carrasco-Dorrien, 1973).

- Calcio, magnesio, hierro, cobre, zinc y manganeso por espectrofotometría de absorción atómica (Primo-Yufera y Carrasco-Dorrien, 1973).
- Boro por fotolorimetría con azometina H (Jackson, 1970).

Muestras sólidas

- El pH se midió con el método potenciométrico con una relación muestra agua de 1:5 (Primo-Yufera y Carrasco-Dorrien, 1973).
- El nitrógeno total fue digerado con mezcla diácida y determinado por arrastre de vapor Kjeldahl (Jackson, 1970).
- El nitrógeno inorgánico fue extraído con cloruro de potasio 2N y determinado por arrastre de vapor (Jackson, 1970).
- El fósforo fue digerado con una mezcla diácida y determinado por fotolorimetría por reducción con molibdato-vanadato (Jackson, 1970).
- La capacidad de intercambio catiónico fue determinada con acetato de amonio 1N pH 7 por arrastre de vapor (Chapman, 1981).
- La densidad aparente por el método de la probeta, la relación C:N por cálculo y el boro fue digerado con mezcla diácida y determinado por fotolorimetría con azometina H (Jackson, 1970).

Análisis estadístico.

Los datos obtenidos de los análisis físicos y químicos de los fertilizantes orgánicos más estiércol y nejayote, fueron analizados estadísticamente con un análisis de varianza y una prueba de Tukey para factores e interacciones que resultaron significativas en los fertilizantes orgánicos; se consideró un nivel de significancia del 5 %.

3.3.1.6. Resultados y discusión

En promedio, el estiércol utilizado para la elaboración de los fertilizantes orgánicos tuvo un pH de 8.73, esto hace que disminuya la disponibilidad de nitrógeno, fierro, manganeso, cobre y zinc; el aporte de nitrógeno inorgánico por hectárea en las dosis utilizadas fue de 12.19 kg y 24.4 kg para 25 y 50 toneladas, respectivamente (Tabla 3.9).

Tabla 3. 10. Características del estiércol de ovino utilizado en la elaboración de fertilizantes orgánicos con nejayote. Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016 (Elaboración propia, 2017)

Característica	Valor promedio
pH	8.73
CE (dS·m ⁻¹)	11.39
%MO	63.35
CIC	107.65
N total (%)	1.795
N inorgánico (mg·kg ⁻¹)	487.75
P (%)	0.6
K (%)	4.37
Na (%)	1.505
Ca (%)	1.92
Mg (%)	1.4
Fe (mg·kg ⁻¹)	202.55
Cu (mg·kg ⁻¹)	2.95
Zn (mg·kg ⁻¹)	9.15
Mn (mg·kg ⁻¹)	69
B (mg·kg ⁻¹)	204.55
Dap (t·m ⁻³)	0.49
C:N	20.5

N = Nitrógeno, CIC = Capacidad de Intercambio Catiónico, P = Fósforo, K = Potasio, Na = Sodio, Ca = Calcio, Mg = Magnesio, Fe = Hierro, Cu = Cobre, Zn = Zinc, Mn = Manganeso, B = Boro, Dap = Densidad aparente, C:N = Relación Carbono Nitrógeno.

En el nejayote se observó una disminución del pH de 11.39 (Valderrama-Bravo *et al.*, 2012) a 4.8 después de 20 días de compostaje debido a las reacciones químicas entre sus componentes. El nejayote, al ser combinado con estiércol en diferentes concentraciones modificó sus características químicas; la mezcla 150 m³ de Nejayote + 50 Mg de estiércol (150N + 50E) presentó el mayor contenido de nitrógeno (165.3 kg·ha⁻¹) con un pH de 6.9 que permite la máxima disponibilidad de todos los elementos (Lambert *et al.*, 1947); la combinación 75 m³ de Nejayote + 25 Mg de estiércol (75N+25N) tuvo un comportamiento similar; sin embargo, su contenido de nitrógeno fue 40 % menor, es decir, 71.7 kg (Tabla 3.10).

Entre fertilizantes orgánicos producto de las combinaciones entre concentraciones de nejayote y estiércol de ovino así como entre el nejayote y el estiércol solos se obtuvieron diferencias significativas (P < 0.05) para las características físicas y químicas.

Tabla 3. 11. Características de fertilizantes orgánicos producto de las combinaciones entre concentraciones de nejayote y estiércol de ovino. Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016, (Elaboración propia, 2017).

Característica	Nejayote	75N+25E	75N+50E	150N+25E	150N+50E
pH	4.8	6.8	7.5	5.7	6.9
CE (dSm ⁻¹)	5.5	22.7	28.2	16.9	21.0
%MO	3.6	1.6	1.7	1.0	1.2
N (mg·L ⁻¹)	514.0	956.0	951.7	1044.0	1102.0
P (mg·L ⁻¹)	3.5	389.9	2307.9	7.3	1095.0
K (mg·L ⁻¹)	1260.0	7308.0	7564.7	5975.5	7679.0
Na (mg·L ⁻¹)	280.5	1284.7	3173.3	1787.5	2709.0
Ca (mg·L ⁻¹)	73.5	983.2	901.5	1223.6	1188.7
Mg (mg·L ⁻¹)	8.7	372.1	367.4	551.4	471.6
Fe (mg·L ⁻¹)	8.7	3.4	3.0	5.8	4.0
Cu (mg·L ⁻¹)	ND	0.1	0.1	0.0	0.1
Zn (mg·L ⁻¹)	ND	0.0	0.1	0.2	0.0
Mn (mg·L ⁻¹)	ND	1.6	1.0	2.6	1.8
B (mg·L ⁻¹)	20.8	54.9	52.0	75.4	64.1

75 N = 75 m³ de nejayote, 150 N = 150 m³ de nejayote, 25 E = 25 Mg (toneladas) de estiércol de ovino, 50 E = 50 Mg de estiércol de ovino, CE = Conductividad eléctrica, %MO = Porcentaje de materia orgánica, N = Nitrógeno, P = Fósforo, K = Potasio, Na = Sodio, Ca = Calcio, Mg = Magnesio, Fe = Hierro, Cu = Cobre, Zn = Zinc, Mn = Manganeseo, B = Boro, mg = miligramos, L = litro, dS = decisiemens, m = metro.

pH

El pH tuvo diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre fertilizantes orgánicos con respecto al estiércol sólido y al nejayote. El pH promedio del estiércol sólido fue de 8.73; mientras que, las muestras de nejayote tuvieron un valor promedio de 4.82. La adición de estiércol generó incrementos en el valor del pH de las mezclas con nejayote; la mezcla 75 m³ de Nejayote + 50 Mg de estiércol (75N + 50E) tuvo el valor mayor (pH = 7.49), 14 % menor que el valor del estiércol sólido y 55 % mayor que el del nejayote compostado. Las combinaciones 75 m³ de Nejayote + 25 Mg de estiércol (75N + 25E) y 150 m³ de Nejayote + 50 Mg de estiércol (150N + 50E) fueron estadísticamente similares (Figura 3.5). Con base en el rango óptimo para el crecimiento y desarrollo del maíz que es entre 5 y 7 (Krishna, 2013), se concluye que los fertilizantes orgánicos 150N + 25E, 75N + 25E y 150N + 50E pueden ser utilizados con éxito para mejorar el sistema de producción de maíz disminuyendo su efecto negativo en el ambiente por manejo inadecuado.

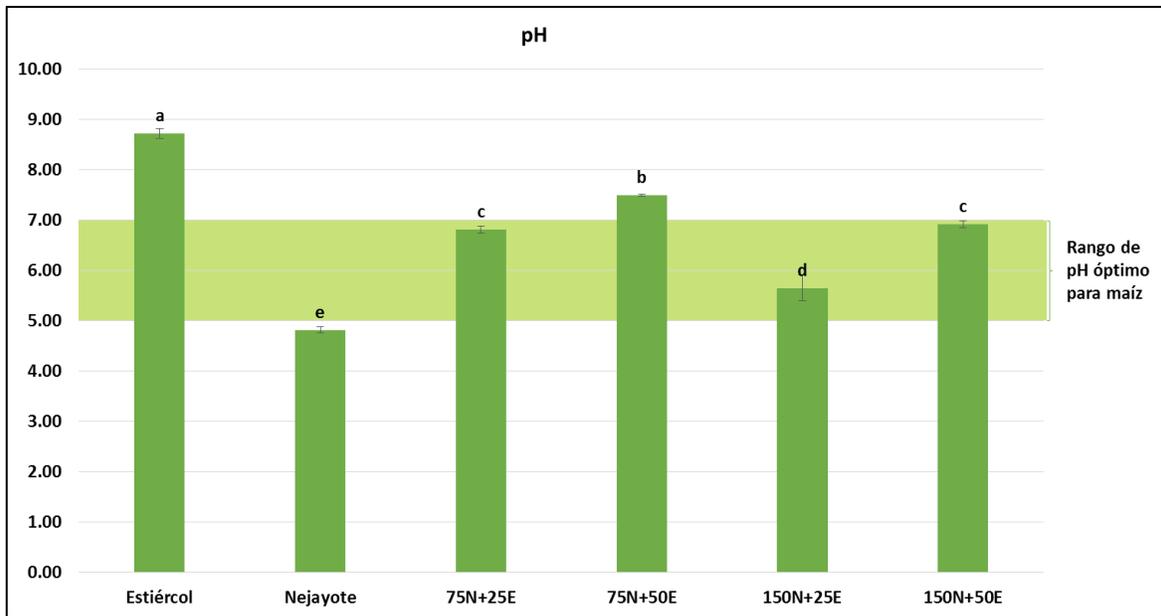


Figura 3. 5. pH del estiércol, nejayote y fertilizantes orgánicos. Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016. 75 N = 75 m³ de nejayote, 150 N = 150 m³ de nejayote, 25 E = 25 Mg (toneladas) de estiércol de ovino, 50 E = 50 Mg de estiércol de ovino. Las barras que no comparten letra son significativamente diferentes (DMSH = 0.62, $\alpha=0.05$) (Elaboración propia, 2017).

El pH es uno de los factores que modifica la disponibilidad de los nutrientes; el valor óptimo es alrededor de 6.5 (Foster *et al.*, 2016). Las mezclas 75 m³ de nejayote + 25 Mg de estiércol de ovino (75N + 25E) con pH = 6.8 y 150 m³ de nejayote + 50 Mg de estiércol de ovino (150N + 50E) con pH = 6.9 pueden tener mayor disponibilidad de macro y micronutrientes; mientras que, el nejayote tiene disponibilidad media de macronutrientes, el estiércol se comporta a la inversa, es decir, tiene menor disponibilidad de microelementos como cobre, zinc, manganeso y fierro (Figura 3.6). De ahí que, las mezclas tuvieron un pH que permite la mayor disponibilidad de nutrimentos esenciales (micro y macronutrientes) para el crecimiento y desarrollo del maíz y otros cultivos.

Conductividad Eléctrica

En los fertilizantes orgánicos con nejayote y estiércol se observó un incremento en la conductividad eléctrica en comparación con el estiércol y el nejayote solos. La combinación 75 m³ de nejayote + 50 Mg de estiércol de ovino (75N + 50E) presentó el valor promedio mayor (28.2 dS·m⁻¹), lo que indica que utilizar las dosis 150 m³ de nejayote y 50 Mg de estiércol incrementa la conductividad del fertilizante orgánico. El incremento de la conductividad en el nejayote después del compostaje fue de 0.97 dS·m⁻¹; mientras

que, en las mezclas aumentó hasta $16.8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ con respecto al estiércol sólido y $22.7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ con respecto al nejayote solo (Figura 3.7).

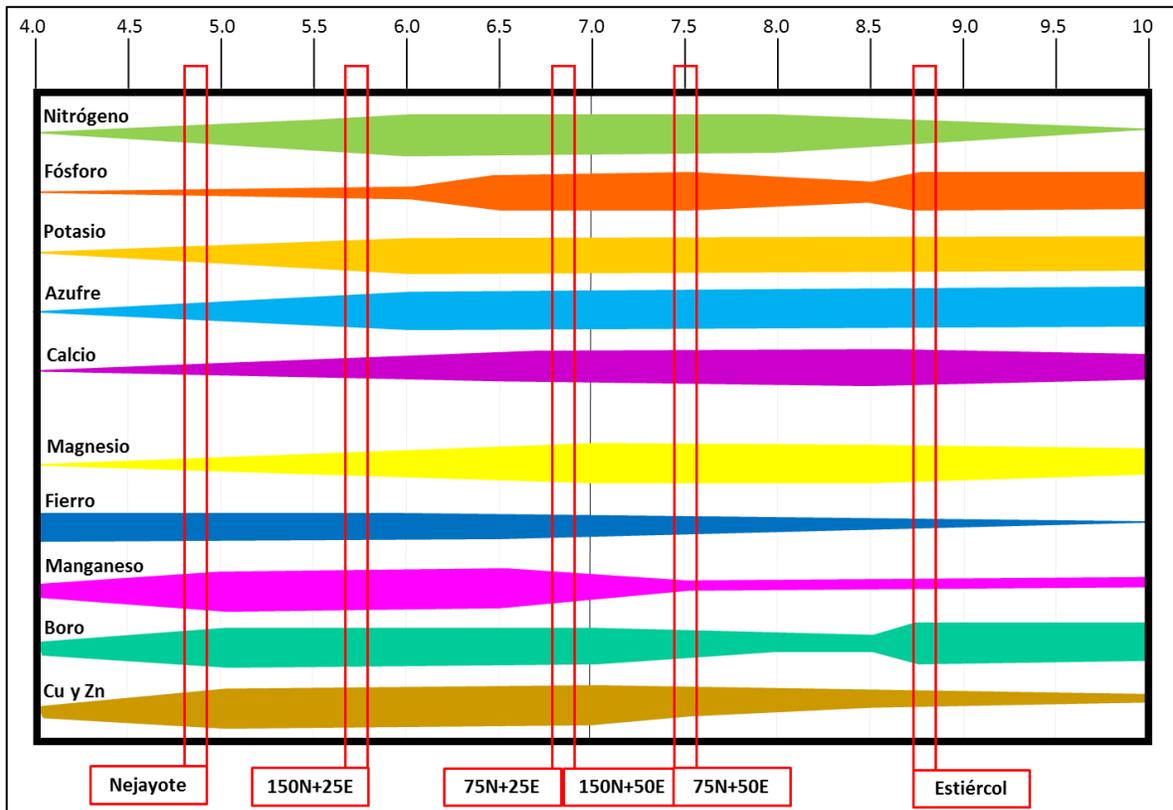


Figura 3. 6. Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes, adaptado de Lambert *et al.* (1947) (Elaboración propia, 2017). 75 N = 75 m³ de nejayote, 150 N = 150 m³ de nejayote, 25 E = 25 Mg (toneladas) de estiércol de ovino, 50 E = 50 Mg de estiércol de ovino.

La aplicación de una tonelada de estiércol puede aportar entre 15 y 50 kg de sales, dependiendo de la alimentación del ganado (Castellanos, 1986) lo que puede incrementar la conductividad eléctrica en el suelo. Salazar-Sosa *et al.* (2010) encontraron que la aplicación de 100 Mg ha^{-1} de estiércol de bovino incrementó la conductividad en $2.71 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Los valores de conductividad eléctrica encontrados son mayores de $5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$; por ello, es importante realizar un monitoreo de las aplicaciones con el fin de no incrementar los valores de conductividad del suelo hasta niveles que resulten inadecuados para el maíz, es decir mayores a $7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (López-Ritas y López-Melida, 1985).

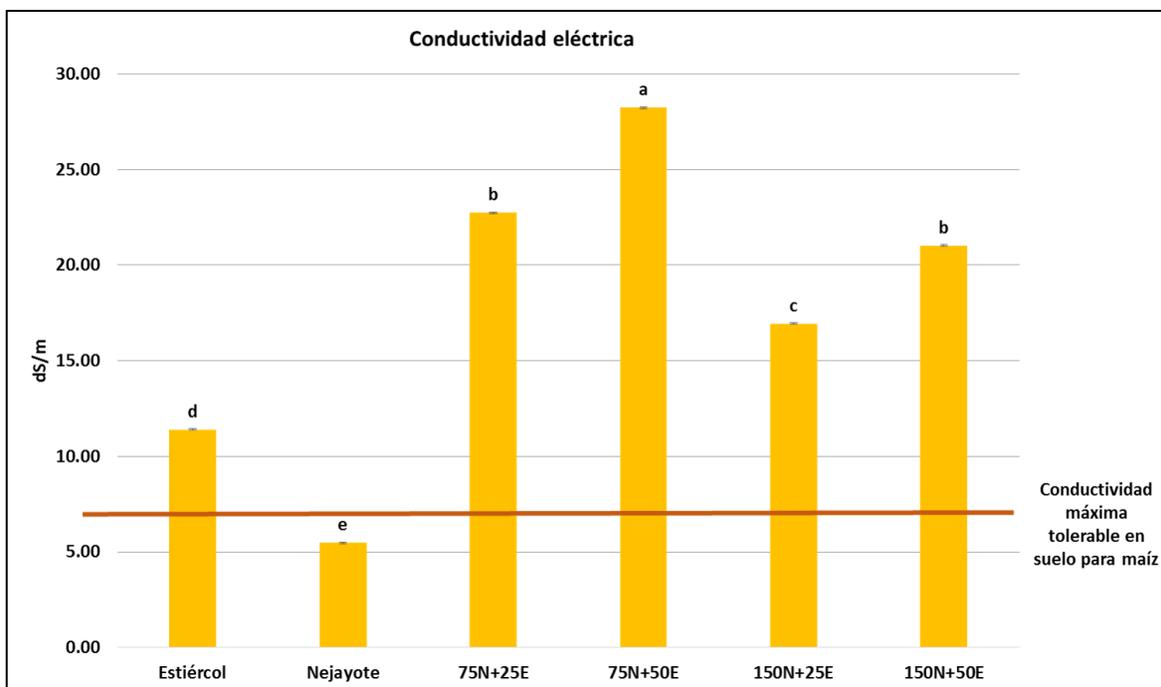


Figura 3. 7. Conductividad eléctrica del nejayote, estiércol y los fertilizantes orgánicos. Ahuazotepec, Puebla 2015-2016. 75 N = 75 m³ de nejayote, 150 N = 150 m³ de nejayote, 25 E = 25 Mg (toneladas) de estiércol de ovino, 50 E = 50 Mg de estiércol de ovino. Las barras que no comparten letra son significativamente diferentes (DMSH = 2.58, $\alpha=0.05$), (Elaboración propia, 2017).

Nitrógeno y Potasio (N y K)

El contenido de nitrógeno y potasio presenta diferencias estadísticamente significativas entre las mezclas y el nejayote ($P < 0.05$). La mezcla con mayor contenido de nitrógeno y potasio fue la 150 m³ de nejayote + 50 Mg de estiércol de ovino (150N + 50 E), con 1102 y 7679 mg L⁻¹, respectivamente (Figura 3.8).

Para un rendimiento promedio de 10.5 Mg ha⁻¹ considerando grano y forraje; se estima que el maíz extrae 191.7 kg de nitrógeno, 34.6 kg de fósforo, 174.7 kg de potasio por hectárea (Bundy, 1998). Las mezclas con nejayote tuvieron un mayor contenido de nitrógeno en comparación con el nejayote solo, el fertilizante orgánico 150 m³ de nejayote + 50 Mg de estiércol de ovino (150N + 50E) puede aportar hasta el 86.3 % de los requerimientos del maíz. El estiércol tiene un mayor contenido de potasio comparado con el nejayote y las mezclas (1092.5 kg para la dosis de 25 Mg y 2185 kg para la de 50 Mg);

asimismo, la cantidad extraída por la planta de maíz puede cubrirse con todos los fertilizantes orgánicos evaluados excepto con 75 m³ de nejayote (75N) cuyo aporte fue de 94.5 kg por hectárea.

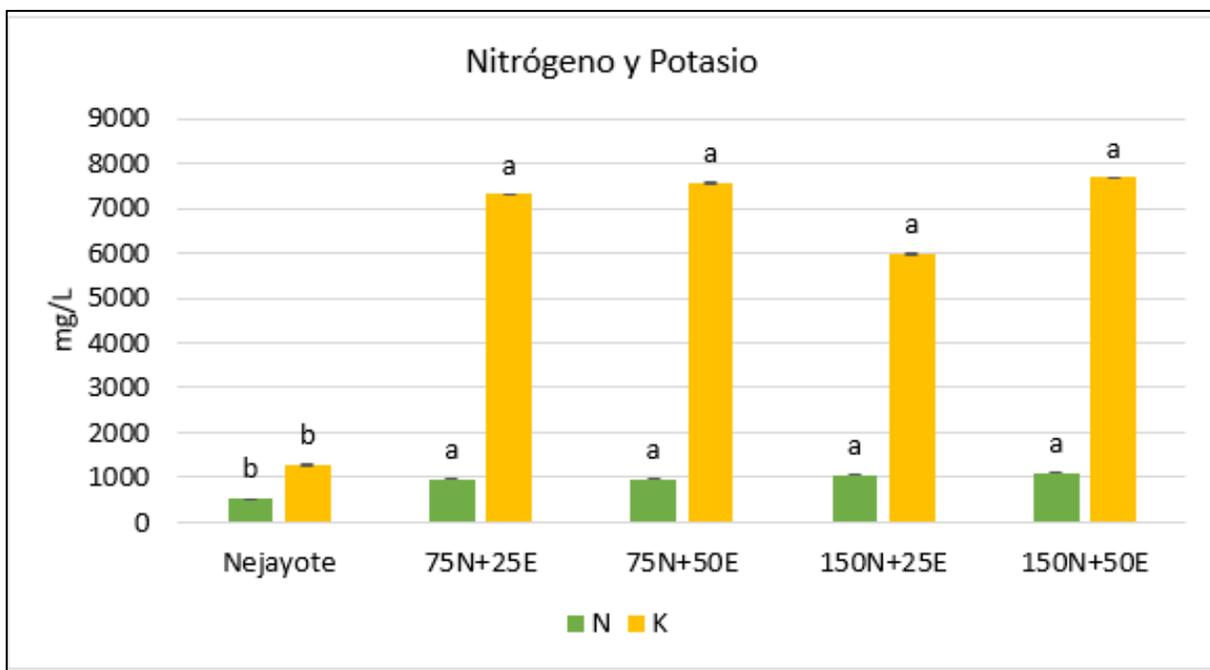


Figura 3. 8. Contenido de nitrógeno y potasio en los fertilizantes orgánicos y el nejayote. Ahuazotepec, Puebla 2015 -2016. 75 N = 75 m³ de nejayote, 150 N = 150 m³ de nejayote, 25 E = 25 Mg (toneladas) de estiércol de ovino, 50 E = 50 Mg de estiércol de ovino. Las barras que no comparten letra son significativamente diferentes (DMSH = 534.78 para nitrógeno, DMSH = 3242.88 para potasio, $\alpha=0.05$), (Elaboración propia, 2017).

Calcio, Magnesio y microelementos

El contenido de calcio, magnesio y microelementos (sodio, cobre, zinc, manganeso y boro) se incrementó en todas las combinaciones con respecto al nejayote ($P < 0.05$). El contenido de fierro disminuyó en todas las mezclas con respecto al contenido inicial del nejayote ($P < 0.05$). El contenido de nutrientes secundarios y microelementos en el estiércol, el nejayote y sus combinaciones es superior a la cantidad extraída por la planta de maíz que establece Bundy (1998). Entonces, se concluye que los elementos secundarios y microelementos no son restrictivos para la selección de la combinación nejayote y estiércol para la producción de grano de maíz (Tabla 3.11).

Tabla 3. 12. Extracción de nutrientes secundarios y micronutrientes por maíz con un rendimiento promedio de 10.5 Mg·ha⁻¹ de acuerdo con Bundy (1998), (Elaboración propia, 2017).

Nutriente	Grano kg·ha⁻¹	Forraje kg·ha⁻¹	Total kg·ha⁻¹
Calcio	1.1	32.5	33.6
Magnesio	9.0	23.5	32.5
Azufre	10.1	7.8	17.9
Zinc	0.1	0.2	0.3
Boro	0.0	0.1	0.1
Manganeso	0.1	0.4	0.4
Fierro	0.1	1.2	1.3
Cobre	0.0	0.1	0.1

Aporte de Agua

Una de las ventajas de utilizar como fertilizantes orgánicos para la producción de maíz, las combinaciones entre las concentraciones de nejayote y estiércol radica en que es posible recuperar el agua utilizada en el proceso de nixtamalización y evitar que sea desechada en el drenaje. En este trabajo, se consideraron entre 75 y 150 metros cúbicos de nejayote por hectárea dependiendo de la mezcla, esto equivale a aplicar entre 7.5 y 15 mm durante el ciclo, sin considerar la evaporación ni la eficiencia en la aplicación del riego. El maíz requiere entre 500 y 800 mm para un ciclo fenológico de entre 125 y 180 días (FAO, 2002), en promedio 4.27 mm por día. Por ejemplo, durante los meses de abril y junio de 2015, la precipitación promedio acumulada en Ahuazotepec fue de 195 mm, 86.8 menos que los que requiere el cultivo; por esto, la aplicación de las mezclas puede actuar como un riego de auxilio en periodos de escasez aportando entre 7.5 y 15 mm de agua.

3.3.2. Cuantificación del efecto de la aplicación de los fertilizantes nejayote - estiércol sobre el rendimiento, la calidad física del grano, la eficiencia energética y la relación beneficio-costos y selección de concentraciones óptimas para cada variable de respuesta.

3.3.2.1 Resumen

El maíz es el principal cultivo en México; por ello, existe la necesidad de buscar alternativas para el sistema de producción maíz que permitan obtener cantidad y calidad de grano y que disminuyan el impacto ambiental del sistema; una alternativa es la utilización de

desechos de sistemas agroindustriales y pecuarios en forma de fertilizantes orgánicos. Sin embargo, es importante considerar una visión multidimensional para evaluar los cambios propuestos con el fin de obtener una visión más completa de su efecto en el agroecosistema maíz. Por lo tanto, se cuantificó el efecto de la aplicación de los fertilizantes nejayote–estiércol sobre el rendimiento, la calidad física del grano, la eficiencia energética y la relación beneficio–costo durante los ciclos de producción agrícola 2015 y 2016 en Ahuazotepec, Puebla. Los resultados obtenidos indican que la aplicación de los fertilizantes nejayote–estiércol mejoran el rendimiento y la resiliencia del sistema; generan una relación beneficio costo positiva de 6.71 y mejoran la eficiencia energética 27 % con respecto a la fertilización química tradicional. Entonces, las fertilizaciones orgánicas propuestas pueden ser una alternativa sustentable para el agroecosistema maíz.

Palabras clave: Rendimiento, beneficio-costo, maíz, eficiencia energética

3.3.2.2. Introducción

La agricultura tiene un rol importante en el cambio climático, la degradación de suelo, la contaminación del agua y la pérdida de biodiversidad. De las actividades agrícolas, la ganadería es una de las que tiene mayor impacto ambiental por la cantidad de desechos que genera, los gases de efecto invernadero que emite a nivel mundial, incluyendo toda la cadena de suministro, se estiman en 7.1 gigatoneladas de CO₂ equivalente por año, lo que representa el 14.5 % de las emisiones generadas por la humanidad (Gerber *et al.*, 2013). En México, se reporta que el sector agropecuario emitió 382.6 Gg CO₂ equivalente en 2014 (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2014).

En México, el maíz es un grano básico para la alimentación de la población, junto con el frijol representan entre 54.4 y 87% de los productos de autoconsumo del país (Van Dusen y Taylor, 2005; SIAP, 2016a). Es un insumo importante para la alimentación del ganado y la elaboración de diferentes productos industriales. La producción nacional de maíz en 2015 fue de 24.7 millones de toneladas, ocupa el 48.7 % de la superficie nacional agrícola (SIAP, 2016b); de ahí que resulte importante considerar su papel en las emisiones del sector agropecuario junto con las del sector ganadero.

La agroindustria para el procesamiento de maíz genera diariamente entre 1500 y 2000 metros cúbicos de nejayote para la nixtamalización 600 toneladas de grano, esto es un volumen cercano a 1.2 millones de metros cúbicos mensuales (Salmerón-Alcocer *et al.*, 2003). Es desechado a los drenajes sin recibir tratamiento previo generando problemas de contaminación por su composición química. Los métodos comunes de tratamiento de agua no representan una alternativa viable para recuperar el agua contenida en el nejayote y métodos como la filtración y microfiltración o tratamientos oxidativos han sido utilizados únicamente para pequeños volúmenes (Valderrama-Bravo *et al.*, 2013; Castro-Muñoz y Yáñez-Fernández, 2015; García-Zamora *et al.*, 2015).

El maíz requiere la aplicación de nutrimentos para lograr rendimientos mayores, los principales son el nitrógeno, el fósforo y el potasio; se pueden obtener del suelo o a través de fertilizantes químicos, estiércoles y residuos de cosecha (Salazar-Sosa *et al.*, 2009). Por otra parte, los residuos y subproductos agroindustriales contienen materia orgánica constituida por diferentes porcentajes de celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina, por lo cual, es posible utilizarlos como sustratos para la producción fermentativa de metabolitos de interés, como sustrato para la generación de bioenergéticos, como mejoradores o acondicionadores de suelo y como suplemento alimenticio para animales (Velasco-Martínez *et al.*, 1997; Saval, 2012). La cantidad de sólidos contenidos en el nejayote está en función de las características físicas y químicas del grano de maíz (Zepeda-Bautista, Carballo-Carballo y Hernández-Aguilar, 2009), este valor generalmente es menor al 5 % (NMX-FF-034, 2002).

Entonces, existe la necesidad de buscar alternativas para el sistema de producción maíz que permitan obtener cantidad y calidad de grano y que disminuyan el impacto ambiental del sistema; una alternativa es la utilización de desechos de sistemas agroindustriales y pecuarios. Por ello, la integración de las evaluaciones económicas y de eficiencia energética, además de las referentes al rendimiento, permiten que el productor tenga una visión completa de las acciones que debe realizar dentro del sistema de producción con el fin de mejorar la sustentabilidad del mismo (Mucheru-Muna *et al.*, 2014).

En la agricultura tradicional y en los sistemas con enfoque agroecológico, los estiércoles y residuos de cosechas han sido aplicados con el fin de proporcionar nutrientes a los

cultivos, para mantener los rendimientos y la fertilidad del suelo. Sin embargo, en la agricultura y ganadería intensivas los estiércoles pasaron de ser recursos a ser desechos de los sistemas de producción con lo que se provocan impactos ambientales negativos debido a la emisión de gases contaminantes, la contaminación de cuerpos hídricos, la disminución de contenido de carbono y la actividad microbiana así como de la capacidad de retención de humedad en el suelo (Karlen, Russell y Mallarino, 1998; Pinos-Rodríguez *et al.*, 2012).

Una opción para disminuir el potencial contaminante del estiércol es el procesamiento de desechos; por ejemplo a través del compostaje, con el fin de generar fertilizantes orgánicos que permitan cerrar el ciclo de nutrientes generado por la producción animal; funciona mejor cuando la producción agrícola y pecuaria se encuentran combinadas localmente (Tilman *et al.*, 2002). La utilización de estiércol como fertilizante ha sido evaluada en diferentes investigaciones: Miron *et al.* (2011), Mucheru-Muna *et al.* (2014) y Wang *et al.* (2017) encontraron que la aplicación de estiércoles incrementa el rendimiento de grano de maíz entre 4 y 67 %.

La energía utilizada para la producción agrícola depende del nivel de mecanización, de la superficie cultivada; así como, de los insumos y mano de obra utilizados (Banaeian y Zangeneh, 2011). Por ello, para lograr cualquier mejora en la eficiencia con la que los recursos se utilizan en el sistema de producción será necesario cuantificar las entradas y salidas energéticas del sistema, no solo desde el punto de vista ambiental; sino relacionando la información con las dimensiones económica y social del sistema y poder lograr una producción sustentable. El uso eficiente de la energía en la agricultura es una de las condiciones para lograr una producción sustentable, para lograrlo se aplica el manejo integrado, la reducción de costos y el uso eficiente de recursos para la producción (Sartori *et al.*, 2005; Zangeneh, Omid y Akram, 2010)

La aplicación de abonos orgánicos tiende a incrementar el rendimiento del maíz en comparación con la fertilización proveniente de fuentes inorgánicas; sin embargo, la relación beneficio costo puede ser menor por los costos derivados de la aplicación y la adquisición del insumo si este no está disponible en la unidad de producción (Opala *et al.*, 2007; Mucheru-Muna *et al.*, 2014).

Entonces, las prácticas de manejo que aseguren la recuperación y el reciclaje de nutrimentos y energía que contiene el estiércol son una opción de mitigación; las prácticas pueden mejorar la productividad y contribuir a la seguridad alimentaria y el alivio de la pobreza en un planeta con necesidades para alimentar a una población creciente (Gerber *et al.*, 2013).

3.3.2.3. Objetivos

- Cuantificar el efecto de la aplicación de los fertilizantes nejayote–estiércol sobre el rendimiento, la calidad física del grano, la eficiencia energética y la relación beneficio–costo.
- Identificar las concentraciones de nejayote y estiércol de ovino que maximicen la respuesta en cada variable de estudio mediante el método de superficie de respuesta.

3.3.2.4. Hipótesis

La aplicación de los fertilizantes orgánicos nejayote–estiércol genera cambios en el rendimiento, la calidad física del grano, la eficiencia energética y la relación beneficio costo del maíz. Los cambios pueden ser cuantificados para determinar si la propuesta de manejo es sustentable.

Utilizar el método de superficie de respuesta permite determinar la cantidad de nejayote y estiércol de ovino en el biofertilizante que optimice la respuesta de las variables registradas.

3.3.2.5. Materiales y métodos

El trabajo de investigación se estableció en el municipio de Ahuazotepec, Puebla, México. La parcela experimental se localiza en las coordenadas 20° 01' 51.6" L. N. y 98° 07' 15.6" L. O. a una altitud de 2268 msnm. El sitio tiene clima templado húmedo C(m), con abundantes lluvias en verano, temperatura media anual de 14.4 °C y precipitación media anual de 1064.9 mm. Los suelos del municipio están caracterizados como Andosoles órticos de textura media, con potencial de uso agrícola y pecuario; mecanizables.

Durante los ciclos agrícolas primavera verano 2015 y 2016, se evaluaron diferentes fertilizantes orgánicos utilizando un experimento factorial con dos factores: Nejayote (N) con tres niveles $N0 = 0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, $N1 = 75 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y $N2 = 150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, Estiércol (E) con tres niveles $E0 = 0 \text{ Mg ha}^{-1}$, $E1 = 25 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $E2 = 50 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Tabla 3.8). Los tratamientos se arreglaron en bloques completos al azar considerando las diferencias en la parcela como factor de bloqueo. Cada tratamiento se replicó tres veces; la unidad experimental constó de seis surcos de diez metros de largo y 0.8 m de ancho, considerando como parcela útil a los dos surcos centrales. Adicionalmente, se establecieron tres parcelas con la dosis química 120N-60P-30K (Arellano-Vázquez, Virgen-Vargas y Avila-Perches, 2010), esta dosis se obtuvo con urea, fosfato diamónico y cloruro de potasio, como fuentes de nitrógeno, fósforo y potasio, respectivamente.

La preparación del terreno consistió en un barbecho, una rastra y surcado; estas labores y la siembra se realizaron en forma mecánica. Se sembró el híbrido de maíz AS-722 (Tabla 3.12) el 25 de abril en el ciclo primavera-verano 2015 y el 12 de mayo en el ciclo PV 2016, con una densidad de 75000 plantas por ha.

Tabla 3. 13. Características agronómicas del híbrido AS-722 (Elaboración propia, 2017).

Características de la variedad AS-722	
Uso	Grano y forraje
Tipo de cruza	Triple
Ciclo	Intermedio-Tardío
Modalidad	Buen temporal, riego
Días a floración	85 a 90
Días a madurez	140 a 145
Altura de la mazorca	1.40 a 1.50 m
Altura de la planta	2.40 a 2.50 m
Resistencia al acame	Excelente
Cobertura	Buena
Tipo de grano	Semi-dentado
Rango de adaptación	2300 a 2600 msnm
Zona de adaptación	Estado de México, Tlaxcala, Puebla, Hidalgo y Michoacán

El control de maleza fue químico con una aplicación de 2 L de Marvel por ha, 20 días después de la siembra. Las dosis de fertilización orgánica se dividieron en tres partes que fueron aplicadas en forma manual a los 20, 40 y 60 días después de la siembra. La

fertilización química se aplicó manualmente en tres partes: todo el fósforo y potasio a los 20 días, y cada mitad de la urea a los 40 y 60 días, respectivamente. La cosecha se realizó en forma manual.

Las variables medidas fueron: 1) Rendimiento de grano en kilogramos por hectárea con la fórmula:

$$\text{Rendimiento} = \frac{[\text{PC} \times \% \text{MS} \times \% \text{G} \times \text{FC}]}{8800}$$

Donde PC = peso de campo de mazorca, en kilogramos por parcela útil; % MS = porcentaje de materia seca, % G = porcentaje de grano; FC = factor de corrección obtenido al dividir una hectárea entre la superficie útil de la parcela; 8800 es un valor constante que permite estimar el rendimiento con humedad uniforme del 12 %.

2) Calidad física del grano considerando el peso hectolítrico y el tamaño del grano; el primero obtenido con una balanza digital de densidad de un litro marca Ohaus® donde los granos de maíz se vertieron libremente y se rasaron con una regla, después se colocó el recipiente en el fiel de la balanza y se determinó la masa específica del grano, y se expresó en $\text{kg} \cdot \text{hL}^{-1}$ (AACC, 1976). El tamaño del grano se obtuvo considerando el porcentaje de grano que pasa a través de cribas del número 20 y del número 18.

3) Eficiencia energética se calculó a partir de la equivalencia energética reportada en fuentes bibliográficas para cada uno de los insumos y labores utilizados en el proceso de producción; así como, del maíz producido (Tabla 3.13). El cálculo se hizo con la fórmula:

$$\text{Eficiencia Energética} = \frac{\text{MJ ha}^{-1} \text{ producidos}}{\text{MJ ha}^{-1} \text{ consumidos}}$$

4) La relación beneficio-costo se calculó a partir del registro de los costos de producción en la parcela experimental y rendimientos de grano obtenidos en cada ciclo con la fórmula:

$$\frac{\text{Beneficio}}{\text{Costo}} = \frac{Bt}{Ct}$$

Donde Bt son las utilidades obtenidas multiplicando el rendimiento de grano por hectárea por el precio de venta; Ct son los costos totales por hectárea de insumos, labores de cultivo

y mano de obra (Tabla 3.14). Se consideró un precio de venta por tonelada de grano de \$ 4690.00 obtenido de información proporcionada por productores que venden grano en el municipio.

Tabla 3. 14. Equivalencia energética de los insumos y productos del sistema de producción de maíz para grano en Ahuazotepec, Puebla.

Insumo o producto	Unidad	Equivalencia energética (MJ·unidad ⁻¹)
Urea	kg	36
Fosforo	kg	14
Potasio	kg	9.7
Nejayote	L	0.035
Estiércol	kg	0.30
Diésel	L	47.9
Herbicida	kg	465.1
Trabajo humano fuerte	h	1.67
Trabajo humano ligero	h	0.73
Trabajo animal	h	7.55
Energía producida por el maíz	kg	14.86

Pimentel y Pimentel, 1996; Gliessman, 1998; McLaughlin, 1999; Banaeian y Zangeneh, 2011, (Elaboración propia, 2017)

Tabla 3. 15. Costos de producción de maíz para grano en Ahuazotepec, Puebla en los ciclos primavera-verano de 2015 y 2016, (Elaboración propia, 2017).

Actividad o insumo	Costo (\$ · ha ⁻¹)
Barbecho	900
Rastra y surcado	500
Siembra	500
Aplicación de herbicida	180
Aplicación del fertilizante orgánico	2160
Recolección nejayote	1500
Cosecha	720
Herbicida	500
Semilla	1600
Estiércol*	0
Nejayote*	0
Fertilizante químico	4529

*El estiércol fue proporcionado por la unidad de producción “Rancho Laguna Seca” y el nejayote por la tortillería “Ahuazotepec”, en ambos casos no tuvieron costo.

Análisis estadístico

Los resultados obtenidos se analizaron estadísticamente con un análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de medias con el método de Tukey para los factores e interacciones que resultaron significativos; los cálculos se realizaron con el software Minitab 17 ® (Minitab Inc., State College, PA, EE.UU.).

3.3.2.6. Resultados

Rendimiento

El rendimiento de grano de maíz promedio en los ciclos de producción 2015 y 2016 fue de 8.9 Mg ha⁻¹ en el tratamiento 0 m³ de nejayote–0 Mg de estiércol de ovino (0N-0E) y 13.32 Mg ha⁻¹ en el tratamiento 75 m³ de nejayote–50 Mg de estiércol de ovino (75N–50E); las diferencias estadísticas fueron generadas por la aplicación de estiércol (P = 0.004 en 2015 y P = 0.001 en 2016); los incrementos observados por este factor en el primer ciclo son de hasta 3.4 Mg (tratamiento 75N–25E) , lo que representa el 29.3 % con respecto al tratamiento que no recibió nejayote ni estiércol; en el ciclo PV-2016 el incremento máximo fue de 5.7 Mg (tratamiento 75N–50E) lo que representa el 85.1 % con respecto al tratamiento 0N–0E (Tabla 3.15).

Tabla 3. 16. Rendimiento de grano de maíz cultivado con fertilizantes orgánicos producto de las combinaciones de nejayote-estiércol de ovino. Ahuazotepec, Puebla. 2015 y 2016 (Elaboración propia, 2017).

Tratamiento	PV-2015 (Mg·ha ⁻¹)	PV-2016 (Mg·ha ⁻¹)	Promedio (Mg·ha ⁻¹)
0N-0E	11.07	6.73	8.90
0N-25E	14.01	9.58	11.80
0N-50E	13.46	9.54	11.50
75N-0E	12.43	7.34	9.89
75N-25E	14.31	10.48	12.40
75N-50E	14.18	12.46	13.32
150N-0E	12.19	7.32	9.76
150N-25E	13.45	9.61	11.53
150N-50E	14.10	11.70	12.90
120N-60P-30K*	13.60	8.72	11.16

75N =75 m³ de nejayote ha⁻¹, 150N=150m³ de nejayote ha⁻¹, 25E= 25Mg (toneladas) de estiércol de ovino ha⁻¹, 50E=50 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹. *El tratamiento con fertilización química en la dosis 120N–60P–30K se consideró únicamente para fines de comparación.

En el segundo ciclo, todos los rendimientos resultaron afectados en forma negativa por un evento climático que provocó el acame de las plantas; sin embargo el incremento para tratamientos con estiércol fue de entre 2.7 y 4.1 toneladas por hectárea con respecto al tratamiento testigo (Figura 3.9); la fertilización química (120N-60P-30K) tuvo una disminución de 4.89 toneladas en segundo ciclo de producción que equivalen al 36 % con respecto al primer año.

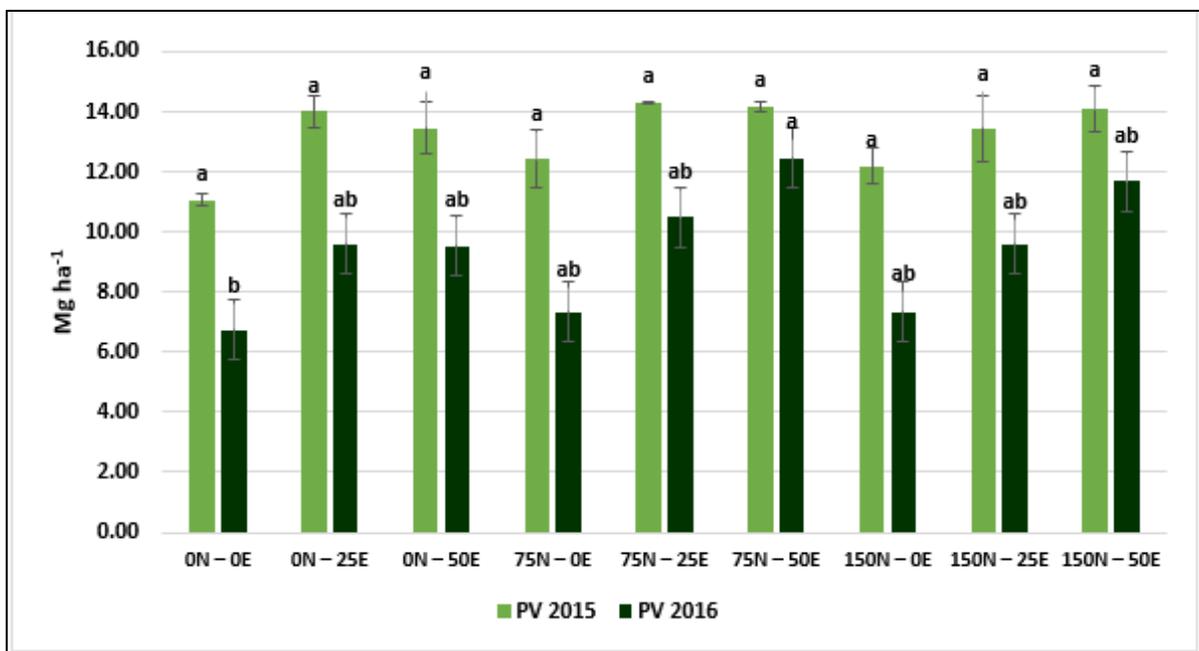


Figura 3. 9. Rendimiento de grano de maíz cultivado con fertilizantes orgánicos producto de las combinaciones de nejayote-estiércol de ovino. Ahuazotepec, Puebla 2015 y 2016. PV =Primavera -Verano, 75N=75 m³ de nejayote, 150N=150 m³ de nejayote, 25E=25Mg de estiércol de ovino, 50E=50Mg de estiércol de ovino, Mg=toneladas. Las barras que no comparten letra son significativamente diferentes (DMSH₂₀₁₅=3.09,DMSH₂₀₁₆=4.79,α=0.05). C.V₂₀₁₅=10.94, R²₂₀₁₅=55.18, C.V₂₀₁₆=26.25, R²₂₀₁₆=62.97 (Elaboración propia, 2017).

La Figura 3.10 muestra que el rendimiento de grano mejora con la dosis media de nejayote y la aplicación de estiércol de ovino, el incremento promedio es de 49.6 % con respecto al tratamiento sin aplicaciones y de 19.4 % con respecto a la fertilización química.

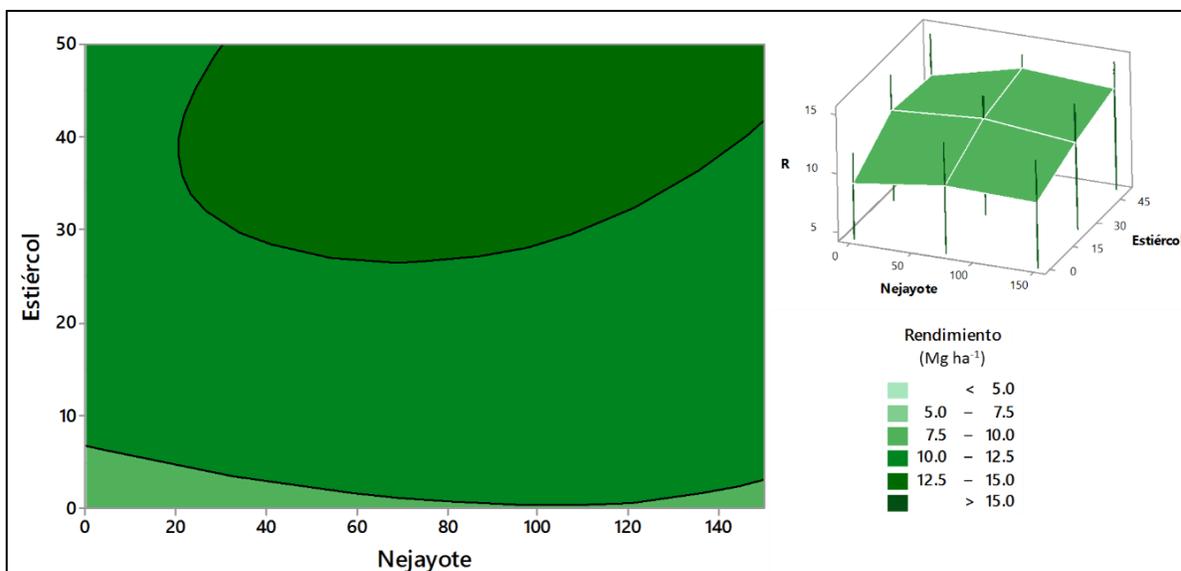


Figura 3. 10. Gráfica de contorno y superficie de respuesta para el rendimiento de grano de maíz obtenido con la aplicación de fertilizantes orgánicos nejayote - estiércol. Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016 (Elaboración propia, 2017).

Calidad física de grano

Peso hectolítrico

Las diferencias entre fertilizantes orgánicos para el peso hectolítrico no fueron estadísticamente significativas ($P=0.83$ en 2015 y $P=0.137$ en 2016); sin embargo, en el ciclo de producción PV 2016 hubo una disminución promedio para todos los tratamientos de 5 kg hL^{-1} (Figura 3.11). La aplicación de 75 m^3 de nejayote+ 50 Mg ha^{-1} de estiércol (75N-50E) presentó el valor menor del grupo (69.23 kg hL^{-1}), 6.4% menor que el permitido por la norma NMX-FF-034/1SCFI-2002 de maíz industrializado.

Los fertilizantes orgánicos, combinaciones entre niveles de estiércol y nejayote, presentaron los valores promedio menores a 74 kg hL^{-1} que es el valor mínimo establecido por la NMX-FF-034/1SCFI-2002. Con la fertilización química el valor de la variable fue de 74.74 kg hL^{-1} y con la aplicación de 150 m^3 de nejayote ha^{-1} y 0 Mg de estiércol ha^{-1} (150N-0E) se generó el valor promedio mayor en los dos ciclos, 75.57 kg hL^{-1} (Tabla 3.16), sin que estas diferencias fueran estadísticamente significativas.

Tabla 3. 17. Peso hectolítrico del grano de maíz cultivado con fertilizantes orgánicos, combinación de nejayote y estiércol, en Ahuazotepec, Puebla, PV 2015 y 2016 (Elaboración propia, 2017).

Tratamiento	PV-2015 (kg·hL ⁻¹)	PV-2016 (kg·hL ⁻¹)	Promedio (kg·hL ⁻¹)
0N-0E	77.33	71.23	74.28
0N-25E	76.30	71.80	74.05
0N-50E	76.87	72.93	74.90
75N-0E	76.83	72.20	74.52
75N-25E	77.00	70.50	73.75
75N-50E	75.43	69.23	72.33
150N-0E	77.47	73.67	75.57
150N-25E	76.03	70.87	73.45
150N-50E	75.00	71.03	73.02
120N-60P-30K*	77.63	71.86	74.74

75N=75 m³ de nejayote ha⁻¹, 150N=150 m³ de nejayote ha⁻¹, 25E=25 Mg (toneladas) de estiércol de ovino ha⁻¹, 50E=50 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹. *El tratamiento con fertilización química en la dosis 120N-60P-30K se consideró únicamente para fines de comparación.

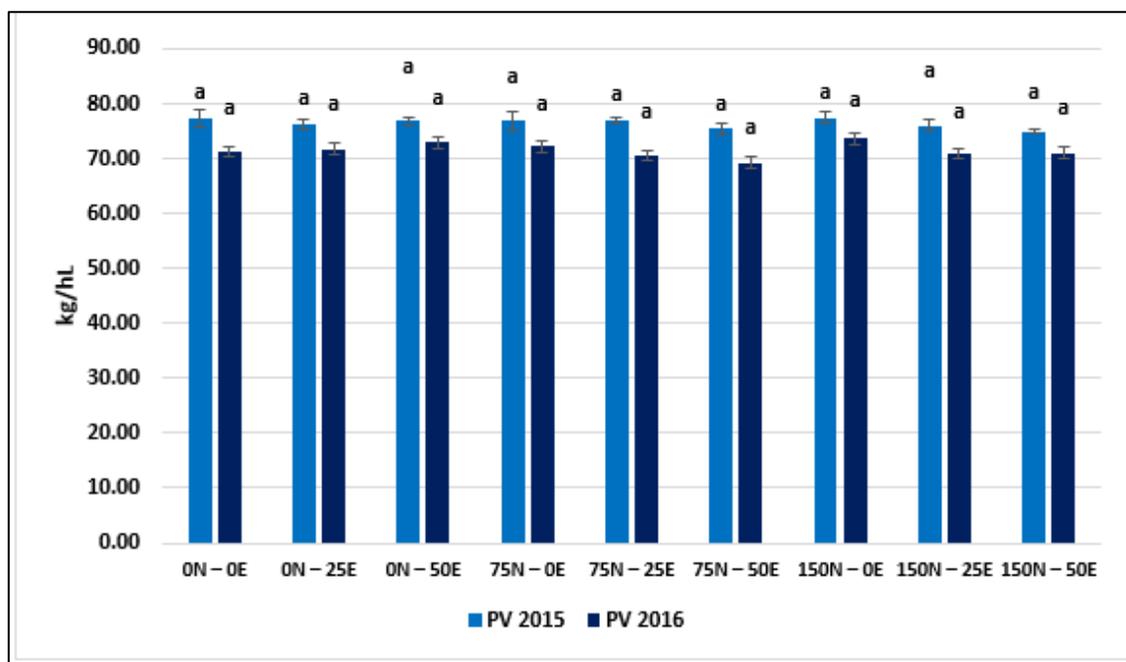


Figura 3. 11. Peso hectolítrico del grano de maíz cultivado con fertilizantes orgánicos, combinación de nejayote y estiércol, en Ahuazotepec, Puebla. 2015 y 2016. PV =Primavera-Verano, 75N=75 m³ de nejayote ha⁻¹, 150N=150 m³ de nejayote ha⁻¹, 25E=25 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹, 50E=50 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹, kg = kilogramos, hL=hectolitro. Las barras que no comparten letra son significativamente diferentes (DMSH₂₀₁₅=5.00, DMSH₂₀₁₆=4.14, α =0.05). C.V₂₀₁₅ = 2.36, R²₂₀₁₅ = 24.08, C.V₂₀₁₆ = 2.92, R²₂₀₁₆ = 61.24 (Elaboración propia, 2017).

El peso hectolítrico se incrementa utilizando la dosis mayor de nejayote o estiércol sin mezclarlos, 75.57 y 74.90 kg·hL⁻¹, respectivamente (Figura 3.12).

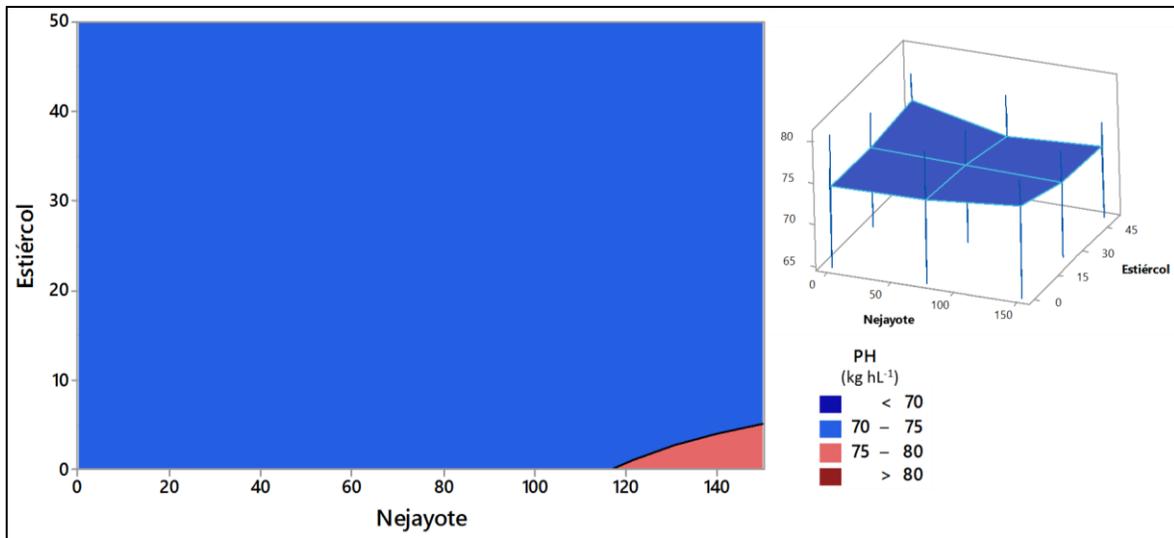


Figura 3. 12. Gráfica de contorno y superficie de respuesta para el peso hectolítrico de grano de maíz cultivado con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016. PH = Peso hectolítrico, hL = hectolitro (Elaboración propia, 2017).

Tamaño de grano

El tamaño de grano, considerando el porcentaje de grano grande más grano mediano, no presentó diferencias estadísticas significativas en los ciclos de producción evaluados ($P = 0.067$ en 2015 y $P = 0.590$ en 2016); los tratamientos sin aplicación de estiércol o fertilización química presentaron la mayor cantidad de grano pequeño con valores entre 4.57 % (0N - 0E), 4.42 % (150N - 0E) y 3.75 % (75 N - 0 E). Los tratamientos con estiércol disminuyen el porcentaje de grano pequeño hasta 2.65 %; la fertilización química presentó el mismo comportamiento que la fertilización con la mezcla 150 N - 50 E (Tabla 3.17). Se observó un incremento promedio de 2.8 % entre el primer y segundo ciclo de producción (Figura 3.13).

El tratamiento sin fertilización presenta un porcentaje de grano pequeño de hasta 7.13 %, también la aplicación de dosis altas de nejayote sin estiércol incrementan el porcentaje de grano pequeño hasta 4.42 %. De acuerdo con la gráfica de contorno y la de superficie de respuesta, se observó que el comportamiento del híbrido AS-722 es estable y que la respuesta se mejora con las dosis altas de estiércol (Figura 3.14).

Tabla 3. 18. Porcentaje de grano grande más grano mediano de maíz cultivado con fertilizantes orgánicos, combinación de nejayote y estiércol, en Ahuazotepec, Puebla. 2015 y 2016 (Elaboración propia, 2017).

Tratamiento	PV-2015 (%GG+GM)	PV-2016 (%GG+GM)	Promedio (%GG+GM)
0N-0E	92.87	98.00	95.43
0N-25E	95.67	98.93	97.30
0N-50E	96.43	98.27	97.35
75N-0E	96.23	96.27	96.25
75N-25E	94.37	98.73	96.55
75N-50E	95.57	98.47	97.02
150N-0E	94.36	96.80	95.58
150N-25E	95.10	98.53	96.82
150N-50E	95.50	98.60	97.05
120N-60P-30K*	96.23	97.87	97.05

GG= porcentaje de grano grande, GM = porcentaje de grano mediano, 75N = 75 m³ de nejayote ha⁻¹, 150N = 150 m³ de nejayote ha⁻¹, 25E = 25 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹, 50E = 50 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹. *El tratamiento con fertilización química en la dosis 120N-60P-30K se consideró únicamente para fines de comparación.

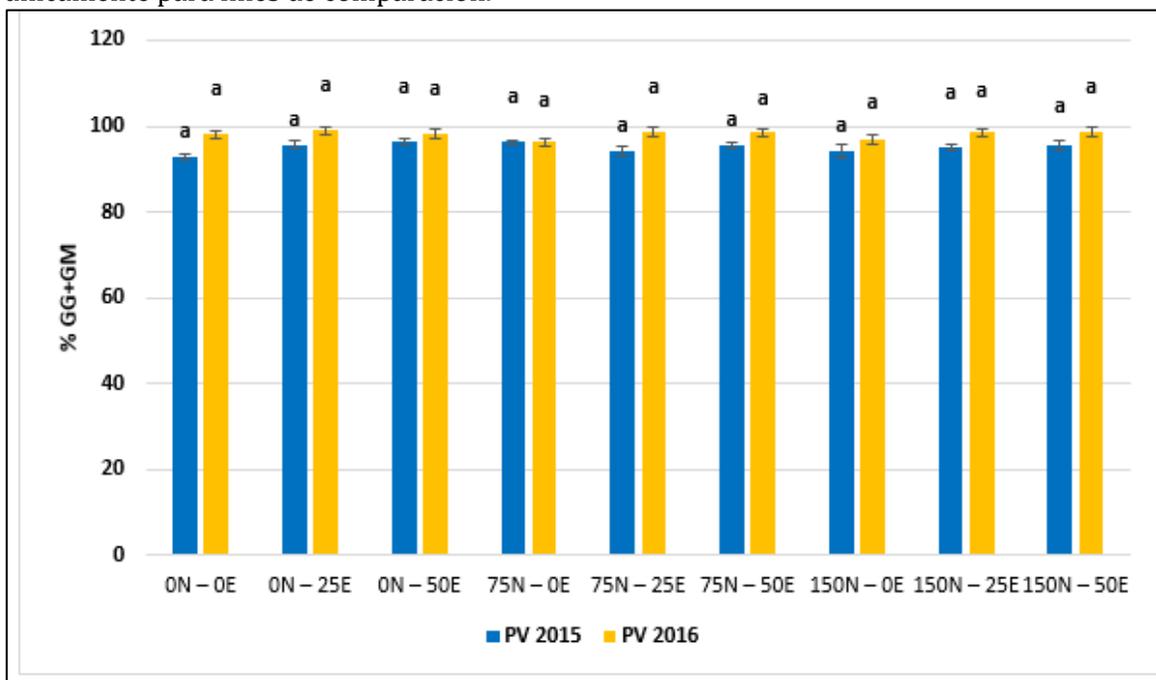


Figura 3. 13. Tamaño de grano de maíz cultivado con fertilizantes orgánicos, combinación de nejayote y estiércol, en Ahuazotepec, Puebla. 2015 y 2016. PV=Primavera-Verano, 75N = 75 m³ de nejayote ha⁻¹, 150N=150 m³ de nejayote ha⁻¹, 25E=25 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹, 50E=50 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹, %GG=porcentaje de grano grande, %GM=porcentaje de grano mediano. Las barras que no comparten letra son significativamente diferentes (DMSH₂₀₁₅=3.41, DMSH₂₀₁₆=2.76, $\alpha=0.05$). C.V₂₀₁₅=1.85, R²₂₀₁₅= 62.95, C.V₂₀₁₆=1.33, R²₂₀₁₆=55.84 (Elaboración propia, 2017).

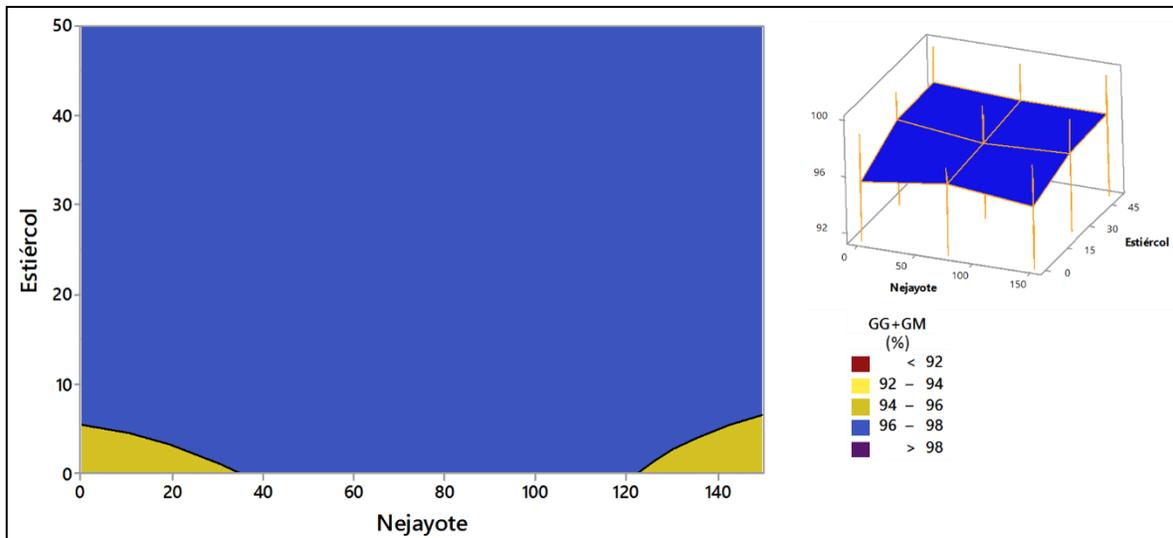


Figura 3. 14. Gráfica de contorno y superficie de respuesta para tamaño de grano de maíz cultivado con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016. %GG=Porcentaje de grano grande, %GM= Porcentaje de grano mediano (Elaboración propia, 2017).

Eficiencia energética

El tratamiento con mayor eficiencia energética fue el testigo, que no recibió aportaciones de nejayote ni de estiércol; por lo tanto, cada MJ ha⁻¹ gastado produjo 59.34 MJ en 2015 y 35.68 MJ en 2016 en el sistema de producción. Los fertilizantes orgánicos con nejayote tuvieron un menor consumo energético para la producción del grano, lo que genera eficiencias de 40.8 MJ/MJ para la dosis de 75 m³ ha⁻¹ y 32.41MJ/MJ para la de 150 m³ ha⁻¹. Las combinaciones nejayote-estiércol obtuvieron una eficiencia energética promedio de 12.84, con valor mínimo de 9.84 en el tratamiento 150 m³ de nejayote ha⁻¹+ 50 Mg de estiércol ha⁻¹ (150N-50E) y valor máximo de 16.59 con 75 m³ de nejayote ha⁻¹+25 Mg de estiércol ha⁻¹(75N-25E); la fertilización inorgánica 120N-60P-30K tuvo una eficiencia energética promedio de 10.11 (Tabla 3.18). En el ciclo de producción 2015, los tratamientos 0 m³ de nejayote ha⁻¹+0 Mg de estiércol ha⁻¹ (0N-0E) (grupo a), 75 m³ de nejayote ha⁻¹ (75N-0E) (grupo b) y 150 m³ de nejayote ha⁻¹ (150N-0E) (grupo c) tuvieron una eficiencia energética promedio de 50.7 MJ/MJ y fueron diferentes a las combinaciones nejayote-estiércol y a los tratamientos donde se utilizó estiércol solo (Figura 3.15). En 2016, se observó una disminución a 30.4 MJ/MJ en el promedio de los mismos tratamientos. Esto debido a las condiciones climáticas adversas que ocasionaron la disminución en el rendimiento del grano por efecto del acame (Figura 3.15 y Tabla 3.15).

Tabla 3. 19. Eficiencia energética en el sistema de producción maíz cultivado con fertilizantes orgánicos, combinación de nejayote y estiércol. Ahuazotepec, Puebla. 2015 y 2016 (Elaboración propia, 2017).

Tratamiento	PV-2015	PV-2016	Promedio
0N-0E	60.34	36.68	48.51
0N-25E	20.35	13.93	17.14
0N-50E	11.28	8.00	9.64
75N-0E	51.29	30.30	40.80
75N-25E	19.16	14.03	16.59
75N-50E	11.33	9.95	10.64
150N-0E	40.49	24.32	32.41
150N-25E	16.69	11.93	14.31
150N-50E	10.76	8.93	9.84
120N-60P-30K*	12.32	7.90	10.11

75N=75 m³ de nejayote ha⁻¹, 150N=150 m³ de nejayote ha⁻¹, 25E=25 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹, 50 E = 50 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹. *El tratamiento con fertilización química en la dosis 120N-60P-30K se consideró únicamente para fines de comparación.

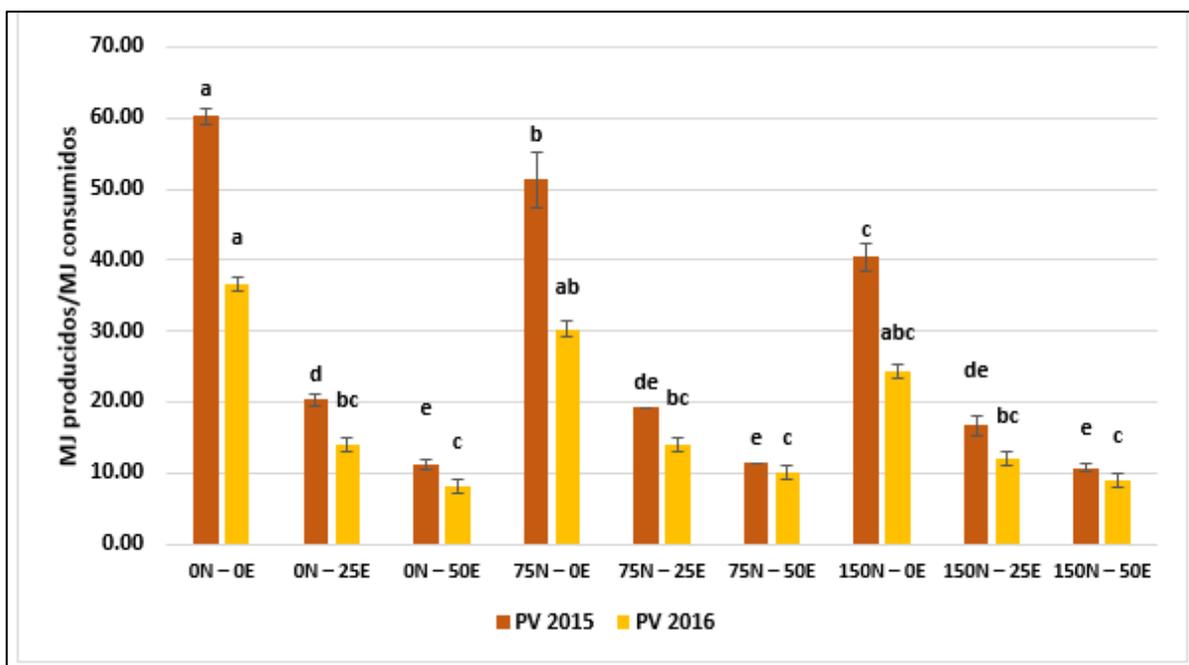


Figura 3. 15. Eficiencia energética obtenida en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016. PV=Primavera-Verano. MJ=Mega Joules, 75N=75 m³ de nejayote ha⁻¹, 150N=150 m³ de nejayote ha⁻¹, 25E=25 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹, 50E=50 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹. Las barras que no comparten letra son significativamente diferentes (DMSH₂₀₁₅=7.45, DMSH₂₀₁₆=17.44, $\alpha=0.05$). C.V₂₀₁₅=68.11, R²₂₀₁₅=98.37, C.V₂₀₁₆=64.94, R²₂₀₁₆=76.96 (Elaboración propia, 2017).

Las gráficas de superficie de respuesta y contorno muestran que la forma en que optimizaría la eficiencia energética es utilizando un nivel bajo de insumos para la producción; entonces, el tratamiento con eficiencia energética mayor es aquel donde no se aplicaron fertilizantes orgánicos o químicos y aquellos en los que se aplicó únicamente nejayote. Las combinaciones nejayote estiércol con la dosis de 25 Mg de estiércol ha⁻¹ tuvieron eficiencias entre 15 y 30 (Figura 3.16).

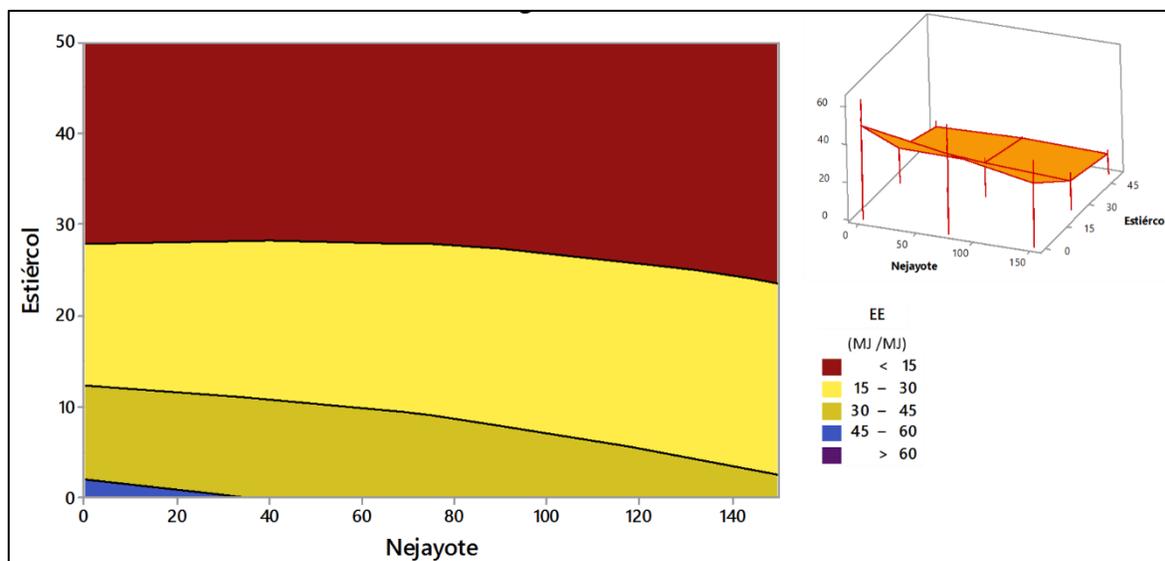


Figura 3. 16. Gráfica de contorno y superficie de respuesta para la eficiencia energética de los diferentes fertilizantes orgánicos (combinaciones entre nejayote y estiércol de ovino) en la producción de maíz en Ahuazotepec, Puebla 2015 y 2016 (Elaboración propia, 2017).

Relación Beneficio/costo

En 2015, hubieron diferencias significativas ($P = 0.023$) entre los fertilizantes orgánicos para la relación beneficio costo; donde se aplicó nejayote pero no estiércol se encontró una disminución promedio de 36 % con respecto al valor obtenido en el tratamiento testigo (0N-0E). En el ciclo primavera-verano 2016, no se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($P = 0.8$); sin embargo, la adición de abono incrementa la relación beneficio costo promedio de 4.83 en los fertilizantes orgánicos con cero estiércol hasta 6.5 en tratamientos con 50 toneladas (Figura 3.17).

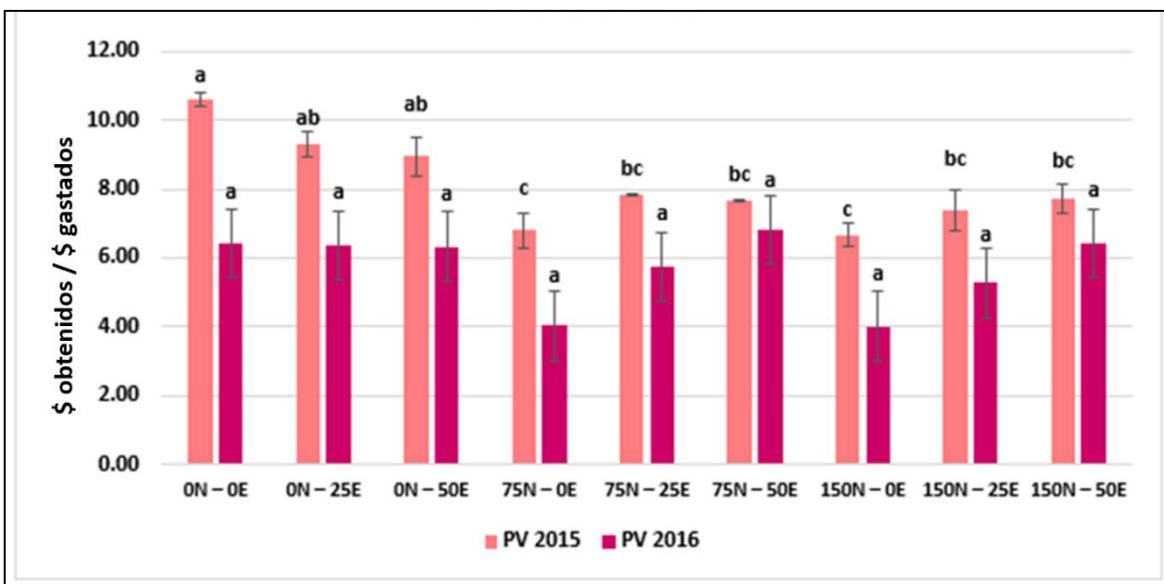


Figura 3. 17. Relación Beneficio-Costo obtenida en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016. PV=Primavera-Verano. 75N=75 m³ de nejayote ha⁻¹, 150N=150 m³ de nejayote ha⁻¹, 25E=25 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹, 50E=50 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹. Las barras que no comparten letra son significativamente diferentes (DMSH₂₀₁₅=1.80, DMSH₂₀₁₆=3.23, $\alpha=0.05$). C.V₂₀₁₅=16.66, R²₂₀₁₅=82.47, C.V₂₀₁₆=25.58, R²₂₀₁₆=51.81 (Elaboración propia, 2017).

En 2015 la relación beneficio costo (RBC) mayor se obtuvo con el tratamiento testigo (0N-0E), fue de \$ 9.59 por cada peso invertido; sin embargo, en el segundo ciclo de cultivo (2016) la mayor RBC se obtuvo con el tratamiento 75 m³ de nejayote ha⁻¹+50 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹ (75N-50E) teniendo \$ 5.83 por cada peso invertido. La fertilización inorgánica genera una RBC de 5.43, 36.3 % menor que la obtenida con el tratamiento sin fertilización y 30.7 % menor que la obtenida con el tratamiento 0 m³ de nejayote ha⁻¹-25 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹ (0N-25E) (Tabla 3.19).

En la Figura 3.18, se observa que utilizar nejayote sin adición de estiércol disminuye la respuesta a menos de 6 pesos por cada peso invertido, aún con la dosis mayor de estiércol (50 Mg ha⁻¹). El comportamiento de la relación beneficio costo es similar en el tratamiento sin aplicación de nejayote o estiércol que en aquéllos con las dosis 75 m³ de nejayote ha⁻¹ y 25 Mg de estiércol ha⁻¹ o 150 m³ de nejayote ha⁻¹ y 50 Mg de estiércol ha⁻¹; sin embargo, la tendencia de los datos indica que el tratamiento sin aplicación de insumos tendrá una disminución del beneficio económico por efecto del rendimiento y otros factores como el suelo y el clima.

Tabla 3. 20. Relación Beneficio-Costo en el sistema de producción maíz cultivado con fertilizantes orgánicos, combinación de nejayote y estiércol. Ahuazotepec, Puebla. 2015 y 2016 (Elaboración propia, 2017).

Tratamiento	PV-2015	PV-2016	Promedio
0N-0E	10.59	6.44	8.52
0N-25E	9.31	6.37	7.84
0N-50E	8.94	6.34	7.64
75N-0E	6.81	4.03	5.42
75N-25E	7.84	5.74	6.79
75N-50E	7.67	6.83	7.25
150N-0E	6.68	4.01	5.34
150N-25E	7.37	5.27	6.32
150N-50E	7.73	6.41	7.07
120N-60P-30K*	6.62	4.25	5.43

PV=Primavera-Verano, 75N=75 m³ de nejayote ha⁻¹, 150N=150 m³ de nejayote ha⁻¹, 25E=25 Mg (toneladas) de estiércol de ovino ha⁻¹, 50E=50 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹. *El tratamiento con fertilización química en la dosis 120N-60P-30K se consideró únicamente para fines de comparación.

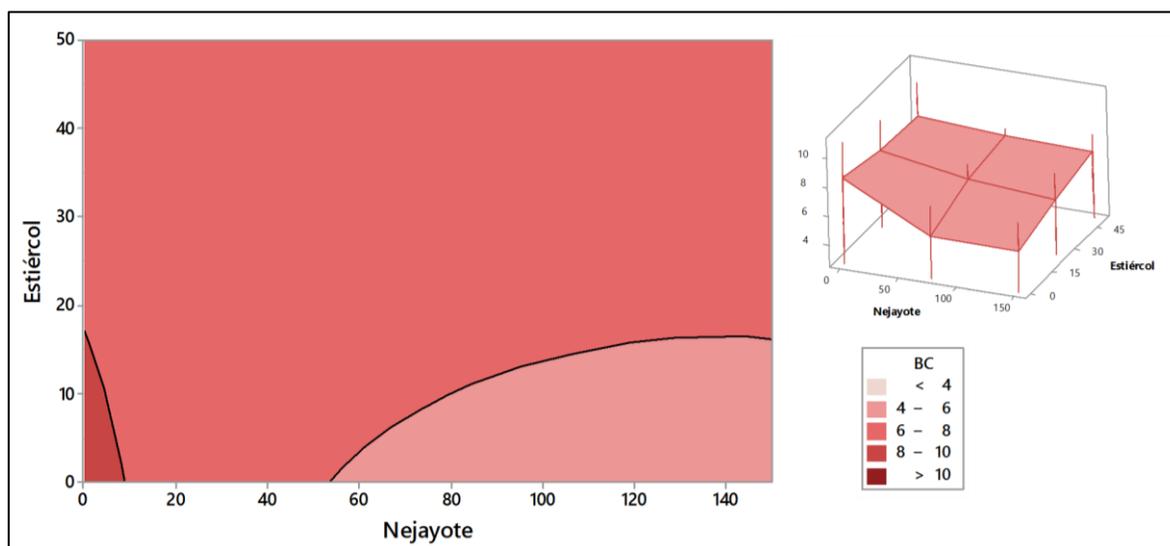


Figura 3. 18. Gráfica de contorno y superficie de respuesta para la relación Beneficio Costo de los fertilizantes orgánicos aplicados en maíz en Ahuazotepec, Puebla en los ciclos Primavera - Verano 2015 y 2016. BC = relación beneficio costo (Elaboración propia, 2017).

3.3.2.7 Discusión

Rendimiento

Las dosis media de nejayote con estiércol (75 m^3 de nejayote ha^{-1} +25 Mg de estiércol ha^{-1}) generó los rendimientos de grano de maíz mayores durante los ciclos de producción 2015 y 2016, en promedio se obtuvieron 13.32 Mg de grano ha^{-1} con el fertilizante orgánico 75 m^3 de nejayote ha^{-1} +50 Mg de estiércol ha^{-1} (75N-50E) lo que representa un incremento de 2.16 Mg con respecto a la fertilización química 120N-60P-30K. Los resultados coinciden con los reportados por Miron *et al.* (2011), quienes obtuvieron incrementos de 25 % en el rendimiento de maíz en tratamientos con la aplicación estiércol en comparación con una fertilización inorgánica y con los de Mucheru-Muna *et al.* (2014), que al evaluar en maíz durante siete ciclos de producción, encontraron que la aplicación de 6 t de estiércol bovino por hectárea incrementó 15 % el rendimiento en suelos con buena fertilidad y 67 % en suelos pobres en comparación con la fertilización inorgánica. Asimismo, Opala *et al.* (2007) encontraron que 6 Mg de estiércol ha^{-1} aportaron 60 kg ha^{-1} de nitrógeno, incrementando 5 % el rendimiento de maíz comparado con tratamientos donde la misma cantidad de nitrógeno fue aportada con urea.

El incremento promedio para tratamientos con estiércol fue de 4.42 Mg ha^{-1} , lo que representa el 49.7 % del rendimiento del tratamiento sin fertilización (0N-0E). Los resultados coinciden con los reportados por Wang *et al.* (2017) quienes encontraron que la aplicación continua de estiércol de bovino en dosis de 52.5 Mg ha^{-1} genera incrementos en el rendimiento de grano entre 4.8 y 16.3 % con respecto a tratamientos donde no se aplicó estiércol; con los de Farhad *et al.* (2009) quienes al aplicar estiércol de pollo a razón de 12 Mg· ha^{-1} incrementaron el rendimiento de grano 3.3 Mg· ha^{-1} con respecto a tratamientos sin aplicación de estiércol Asimismo, existe coincidencia con los de Parsons *et al.* (2009), quienes encontraron que la aplicación de 4 y 8 Mg de estiércol por hectárea incrementa los rendimientos de grano de maíz entre 415 y 425 kg por hectárea y con los de Belay, Claassens y Wehner (2002), quienes obtuvieron un incremento de 1.83 Mg· ha^{-1} con respecto a tratamientos sin fertilización.

En el ciclo de producción 2016, se presentó un evento climático que ocasionó el acame de las plantas, afectando los rendimientos. La disminución del rendimiento entre 2015 y

2016 fue de 40 % en los tratamientos sin estiércol y de 21 % en los tratamientos con nejayote y estiércol; los resultados coinciden con lo reportado por Arnés *et al.* (2013), quienes determinaron que bajo condiciones climáticas adversas la disminución del rendimiento fue de 68 % en el manejo convencional contra 62 % con la fertilización orgánica.

Calidad física del grano

El peso hectolítrico promedio de los dos ciclos de producción fue de 74.06 kg hL⁻¹, valor menor a los reportados por Vázquez-Carrillo *et al.* (2011) (82 kg·hL⁻¹) y Zepeda-Bautista, Carballo-Carballo y Hernández-Aguilar (2009), quienes reportan valores entre 76.38 y 80.25 kg hL⁻¹; mientras que, el promedio obtenido fue mayor que el reportado por Vázquez-Carrillo, Arellano-Vázquez y Santiago-Ramos (2015) quienes obtuvieron 72.9 kg hL⁻¹ en condiciones de temporal y de 73.8 kg hL⁻¹ bajo riego.

Entre 2015 y 2016 se observó una disminución promedio de 6.7 % en todos los tratamientos que puede explicarse por las condiciones climáticas adversas que generó el huracán Earl en la zona; de acuerdo con datos registrados en el municipio de Ahuazotepec, la precipitación acumulada entre el 5 y el 8 de agosto de 2016 fue de 137 mm.

La precipitación acumulada durante el periodo de abril a noviembre que fue de 942.9 mm en 2015 y de 1029 en 2016. De acuerdo con Zepeda-Bautista, Carballo-Carballo y Hernández-Aguilar (2009), los cambios en las condiciones ambientales modifican los componentes estructurales del grano y por ende su calidad. Yang *et al.* (2000) reportan que en condiciones de alta precipitación el peso hectolítrico disminuye, con promedios entre 57.5 y 69.38 kg hL⁻¹ y en los de baja precipitación es relativamente alto, con valores promedio de 75.5 kg hL⁻¹ lo que coincide con la tendencia de los resultados obtenidos en esta investigación. El porcentaje de grano grande + grano mediano se incrementó durante el 2016 en todos los tratamientos; sin embargo, no existen diferencias estadísticas entre los fertilizantes orgánicos lo que indica que el tamaño de grano no fue afectado por la fertilización ni por el acame debido a la precipitación y viento.

Eficiencia energética

La eficiencia energética obtenida por la aplicación de los fertilizantes orgánicos, combinaciones entre nejayote y estiércol, tuvo un promedio de 12.84, que es superior en 27 % a la obtenida con la fertilización inorgánica 120N-60P-30K; sin embargo, es menor que la eficiencia promedio del estiércol (13.39 MJ/MJ) y del nejayote (36.61 MJ/MJ). Los resultados son contrarios a lo reportado por Purroy-Vásquez *et al.* (2016), quienes mencionan que los sistemas tradicionales tienen menor eficiencia energética y menor relación beneficio costo que los convencionales; sin embargo, la eficiencia y productividad menores se asocian con la obtención de rendimientos bajos, lo que se contrapone a lo encontrado en esta investigación donde los rendimientos de las combinaciones nejayote-estiércol son mayores que los obtenidos con la fertilización inorgánica; debido posiblemente a que la parcela experimental fue cultivada en los cinco años anteriores con una asociación rye grass-trébol blanco utilizada para pastoreo de ovinos.

La eficiencia energética promedio de los ciclos de producción 2015 y 2016 con fertilización inorgánica fue de 10.11, valor similar al reportado por Šarauskis *et al.* (2014) de 12.4 y al reportado por Rahman y Rahman (2013) con eficiencia energética promedio de 8.31 y rendimiento de 6.6 Mg ha⁻¹; asimismo, es proporcional al reportado por Banaeian y Zangeneh (2011) para maíz en Irán (EE=1.9 MJ/MJ), considerando un consumo de 52575 MJ y un rendimiento de 6808 kg·ha⁻¹ que equivalen a 100079 MJ.

En los tratamientos testigo (0N-0E), 75 m³ de nejayote ha⁻¹ (75N-0E) y 150 m³ de nejayote ha⁻¹ (150N-0E), la eficiencia energética promedio fue de 40.6 MJ/MJ, dichos valores son mayores del grupo debido a que los insumos utilizados generan un consumo calórico menor que las combinaciones nejayote-estiércol o con fertilizante inorgánico; esto coincide con lo reportado por Gathala *et al.* (2016), Šarauskis *et al.* (2014) y Sartori *et al.* (2005), quienes encontraron que los sistemas alternativos donde se disminuye la utilización de insumos para la producción tienen valores más altos en la eficiencia energética que los sistemas convencionales.

Relación Beneficio-Costo

La aplicación de 25 Mg de estiércol por hectárea generó una relación Beneficio-Costo promedio de 7.84 para los ciclos de producción 2015 y 2016; 44.4 % mayor que la obtenida con la fertilización inorgánica 120N- 60P-30K; asimismo, el comportamiento de las combinaciones nejayote-estiércol fue similar con incrementos promedio de 26.2 %. Los resultados coinciden con los reportados por Arnés *et al.* (2013) en un estudio realizado en Napízaro, Michoacán donde determinaron que la relación beneficio costo con fertilización orgánica se incrementa 87.8 % con respecto a la obtenida en un manejo convencional con fertilización inorgánica (RBC=1.23) y por Opala *et al.* (2007), que con la aplicación de estiércol combinado con 20 kilogramos de fósforo por hectárea genera una relación beneficio costo de 3.4; mientras que, la utilización de urea disminuye la RBC a 2.11, es decir, un 61.1 % menos.

Las fertilizaciones orgánicas producto de las combinaciones de 75 y 150 m³ de nejayote ha⁻¹ con 25 y 50 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹, generan una relación beneficio costo promedio de 6.71, lo que se contrapone a lo reportado por Mucheru-Muna *et al.* (2014), quienes obtuvieron una disminución promedio de 0.8 con una fuente inorgánica a 0.25 con una orgánica y a lo obtenido por Muyayabantu, Kadiata y Nkongolo (2013), quienes reportan una disminución del 60 % en la relación Beneficio-Costo al utilizar fuentes orgánicas en lugar del manejo convencional con fertilizantes inorgánicos.

Uzcanga *et al.* (2013), determinaron que la relación beneficio costo para sistemas de producción de maíz con manejo convencional en la península de Yucatán fue de 1.51; mientras que, en esta investigación el manejo convencional con fertilización inorgánica generó una relación beneficio costo de 10. Las diferencias se explican por los rendimientos obtenidos.

Los sistemas de producción con manejo orgánico generalmente tienen costos de producción más elevados que los sistemas convencionales, Adamtey *et al.* (2016) encontraron que, los rendimientos en ambos sistemas son similares después de 3 años de producción (en promedio 3.08 t ha⁻¹ para sistemas convencionales y orgánicos de bajo y alto consumo); sin embargo, los costos de producción en un sistema orgánico pueden

duplicarse con respecto a los convencionales. Los rendimientos de grano de maíz promedio en los ciclos de producción 2015 y 2016 en Ahuazotepec, Puebla fueron similares en el manejo orgánico (11.64 Mg ha⁻¹) y el convencional (11.16 Mg ha⁻¹), mientras que, los costos en el sistema orgánico fueron de \$ 8,185 contra \$ 9,609 en el convencional, debido a que el estiércol y el nejayote utilizados no tuvieron costo porque se obtuvieron de la unidad de producción y de una tortillería cercana.

3.3.3 Cuantificación del efecto de la aplicación de los fertilizantes nejayote–estiércol sobre el contenido de microorganismos y las propiedades físicas y químicas del suelo.

3.3.3.1 Resumen

El suelo es una de las principales fuentes de nutrientes para los cultivos y un indicador que permite medir el efecto de las prácticas de fertilización en la dimensión ambiental de un agroecosistema; por ello, se cuantificó el efecto de la aplicación de los fertilizantes orgánicos nejayote–estiércol sobre el contenido de microorganismos y las propiedades físicas y químicas del suelo durante dos ciclos agrícolas de producción, Primavera-Verano 2015 y 2016 en Ahuazotepec, Puebla. Se utilizó un experimento factorial con dos factores: Nejayote (N) con tres niveles N0 = 0 m³ ha⁻¹, N1 = 75 m³ ha⁻¹ y N2 = 150 m³ ha⁻¹, Estiércol (E) con tres niveles E0 = 0 Mg ha⁻¹, E1 = 25 Mg ha⁻¹ y E2 = 50 Mg ha⁻¹ (Tabla 3.8). Los resultados indican que la aplicación de los fertilizantes nejayote–estiércol mejora la fertilidad del suelo al incrementar el contenido de microorganismos y nutrientes. Las combinaciones nejayote–estiércol aumentan 88.2 % el contenido de nitrógeno amoniacal, 13.9 % el nitrógeno nítrico, 99 % el contenido de potasio y 29 % el contenido de fósforo en comparación con la dosis de fertilización química 120N-60P-30K; además, el contenido de materia orgánica aumenta 5.9 % lo que generó una disminución de la densidad aparente a valores promedio de 1.18 g cm⁻³ e incrementos en el porcentaje de espacio poroso (52.7 %) contra 1.25 g cm⁻³ obtenido en la fertilización química, cuyo contenido de materia orgánica fue de 3.88 % con 48.2 % de espacio poroso. El número de unidades formadoras de colonias se incrementa 32.9 %, lo que es un reflejo del incremento de la

materia orgánica. Las propiedades físicas y químicas del suelo se modificaron en forma positiva para el desarrollo del maíz; por lo que, los fertilizantes orgánicos nejayote-estiércol son una opción sustentable para el incremento del rendimiento de grano y el manejo de los residuos estiércol y nejayote.

Palabras clave: Propiedades físicas, propiedades químicas, materia orgánica, nejayote, estiércol

3.3.3.2 Introducción

El suelo es la capa superior de la corteza terrestre, contiene nutrientes esenciales que permiten el crecimiento y desarrollo de las plantas; un suelo promedio contiene 45 % de materiales minerales, 5 % de materiales orgánicos, 25 % de aire y 25 % de agua; el estudio de la microbiología y las propiedades físicas y químicas del suelo permiten establecer prácticas de manejo como la aplicación de estiércoles y otras enmiendas orgánicas, que mantengan y/o mejoren la fertilidad del suelo para hacerlo más productivo (Biondo y Lee, 1997; Roy *et al.*, 2010; Gliessman, 2015).

Las propiedades físicas del suelo tienen efectos importantes en la composición del mismo y en la actividad microbiana; mientras que, las propiedades químicas de los suelos afectan el crecimiento de las plantas debido a que tienen influencia tanto en la actividad microbiana como en la disponibilidad de nutrientes; la capacidad de retención de agua y nutrientes de un suelo, que afectan el crecimiento de las plantas y microorganismos, es afectada por la fracción mineral y el contenido de materia orgánica; los suelos con alto contenido de materia orgánica tienen mayor capacidad de intercambio catiónico y de retención de humedad (Coleman, Crossley y Hendrix, 2004). La aplicación de estiércol incrementa el contenido de materia orgánica y la porosidad del suelo disminuyendo su densidad aparente (Meng *et al.*, 2016).

Los microorganismos del suelo tienen impacto en la productividad de las plantas, actúan mediante dos mecanismos: directamente en asociación con las raíces e indirectamente a través de la modificación en la distribución y disponibilidad de nutrientes; los hongos y bacterias son responsables de hasta el 80 % del nitrógeno y 75 % del fósforo que fijan las plantas anualmente (Van Der Heijden, Bardgett y Van Straalen, 2008). La microflora del

suelo es responsable de catabolizar materia orgánica, mineralizar y fijar nutrientes; por ello, los microorganismos son el factor con mayor influencia en la disponibilidad de nutrientes y por tanto en la productividad de las plantas (Coleman, Crossley y Hendrix, 2004; Chaparro *et al.*, 2012).

La aplicación de estiércol mejora las propiedades químicas y el contenido de nutrientes en el suelo (Gil, Carballo y Calvo, 2008); por ejemplo, incrementa 14 % la eficiencia en el uso del nitrógeno en maíz en suelos ácidos (Duan *et al.*, 2014). Trejo-Escareño *et al.* (2013) encontraron incrementos de entre 180 y 189 % en el contenido de materia orgánica con la aplicación de 120 y 160 Mg ha⁻¹ estiércol de bovino, Salazar Sosa *et al.* (2004) reportan incrementos de 1 % después de un año de aplicación de 160 Mg ha⁻¹ de estiércol de bovino. Las aplicaciones de abonos orgánicos favorecen la biomasa y actividad microbiana (Delgado *et al.*, 2012), la cantidad de carbono y la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Liu *et al.*, 2009; Nazli *et al.*, 2014).

La mineralización del nitrógeno es un proceso microbiano que se afecta por la cantidad y calidad de la materia orgánica del suelo. La acumulación de materia orgánica en la porción lábil del suelo regula el proceso de mineralización del nitrógeno, la nitrificación debido a que es el sustrato inicial para el ciclo del nitrógeno (Dinesh *et al.*, 2010).

El suelo es un componente de los agroecosistemas que permite medir el efecto de los fertilizantes nejayote-estiércol dentro de la dimensión ambiental. Por ello, se realizó la caracterización microbiológica, física y química de las muestras de cada tratamiento al inicio y al final del ciclo de producción en PV-2015 y PV-2016.

3.3.3.2 Objetivo

Cuantificar el efecto de la aplicación de los fertilizantes nejayote-estiércol sobre el contenido de microorganismos y las propiedades físicas y químicas del suelo.

3.3.3.3 Hipótesis

La aplicación de los fertilizantes orgánicos nejayote-estiércol genera cambios en el contenido de microorganismos y las propiedades físicas y químicas del suelo de un agroecosistema maíz.

3.3.3.4 Materiales y Métodos

El trabajo de investigación se estableció en el municipio de Ahuazotepec, Puebla, México durante los ciclos primavera-verano 2015 y 2016. La parcela experimental se localiza en las coordenadas 20° 01' 51.6" L. N. y 98° 07' 15.6" L. O. a una altitud de 2268 msnm. El sitio tiene clima templado húmedo C(m), con abundantes lluvias en verano, temperatura media anual de 14.4 °C y precipitación media anual de 1064.9 mm. Los suelos del municipio están caracterizados como Andosoles órticos de textura media, con potencial de uso agrícola y pecuario; mecanizables.

Durante los ciclos agrícolas Primavera-Verano 2015 y 2016; se evaluaron diferentes fertilizantes orgánicos en dos ciclos de producción utilizando un experimento factorial con dos factores: Nejayote (N) con tres niveles $N_0 = 0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, $N_1 = 75 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y $N_2 = 150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, Estiércol (E) con tres niveles $E_0 = 0 \text{ Mg ha}^{-1}$, $E_1 = 25 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $E_2 = 50 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Tabla 3.8). Los tratamientos se arreglaron en bloques completos al azar considerando las diferencias en la parcela como factor de bloqueo. Cada tratamiento se replicó tres veces; la unidad experimental constó de seis surcos de diez metros de largo y 0.8 m de ancho, considerando como parcela útil a los dos surcos centrales. Adicionalmente, se establecieron tres parcelas con la dosis química 120N-60P-30K (Arellano-Vázquez, Virgen-Vargas y Avila-Perches, 2010), esta dosis se obtuvo con urea, fosfato diamónico y cloruro de potasio, como fuente de nitrógeno, fósforo y potasio, respectivamente.

La preparación del terreno consistió en un barbecho, una rastra y surcado; estas labores y la siembra se realizaron en forma mecánica. Se sembró el híbrido de maíz AS-722 (Tabla 3.12) el 25 de abril en el ciclo primavera-verano 2015 y el 12 de mayo en el ciclo PV 2016, con una densidad de 75000 plantas por ha.

Los muestreos de suelos se hicieron antes de la siembra (20 de abril de 2015) y después de la cosecha (10 de noviembre de 2015). Para las determinaciones físicas y químicas las muestras fueron tomadas a una profundidad de 30 cm y para la microbiota a 10 cm. En ambos casos, las muestras se obtuvieron de la parte central de cada unidad experimental; se secaron a la sombra, molidas y tamizadas con una malla de 2 mm.

Para la determinación de la microbiota se aplicó la técnica de dilución en serie de acuerdo con Cappuccino y Sherman (2002), de cada dilución se tomó una alícuota de 1 mL, que fue sembrada en cajas de Petri con medio de cultivo Papa Dextrosa Agar; las muestras selladas se incubaron en posición invertida a una temperatura de 26 °C durante ocho días, posteriormente, se cuantificaron las unidades formadoras de colonias totales.

Para cada tratamiento y repetición se determinaron: densidad aparente y densidad real, porcentaje de espacio poroso, pH potencial y real, capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica, porcentaje de materia orgánica, nitrógeno nítrico y amoniacal, fósforo, potasio, porcentaje de saturación de bases, calcio, magnesio y capacidad de intercambio catiónico

La densidad aparente se midió con el método de la probeta y la densidad real utilizando un matraz volumétrico para determinar el área y volumen que ocupa una submuestra de 10 g; el pH se midió con el método potenciométrico con una relación muestra agua de 1 a 5, el nitrógeno, fósforo y potasio se determinaron mediante lectura con el medidor c215 Grow Master Basic (Hanna Instruments®), la conductividad eléctrica se midió mediante puente de conductividad en una suspensión 1 a 2 de muestra-agua; el porcentaje de materia orgánica con el método de Walkley y Black, calcio y magnesio asimilables con el método complejométrico EDTA (Valencia-Islas y Hernández, 1998).

3.3.3.5 Resultados

3.3.3.5.1 Microbiota del suelo y porcentaje de materia orgánica

Las diferencias en el número de unidades formadoras de colonias (UFC) no fueron estadísticamente significativas ($P > 0.05$) para los ciclos de producción evaluados. El tratamiento $0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de nejayote- 25 Mg ha^{-1} de estiércol de ovino (0N-25E) tuvo un incremento de 12.2 % en PV-2016 con respecto al muestreo inicial. El tratamiento $0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de nejayote- 0 Mg ha^{-1} de estiércol de ovino (0N-0E) tuvo una disminución de 76.4 % y la fertilización química disminuyó 53.3 % en el mismo periodo. La disminución promedio de los tratamientos con estiércol fue de 27 UFC; mientras que, los tratamientos que no recibieron este componente disminuyeron en promedio 59 UFC (Figura 3.19).

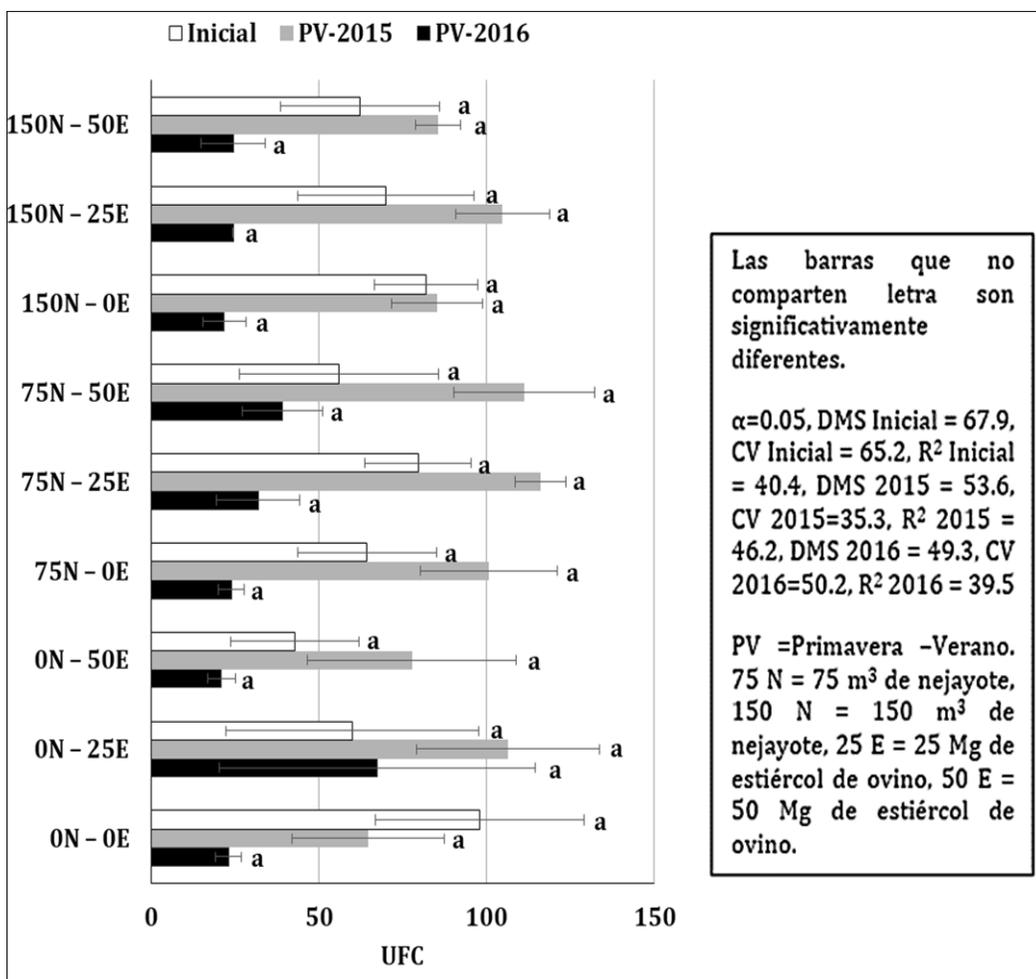


Figura 3. 19. Unidades formadoras de colonias (UFC) en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016 (Elaboración propia, 2017).

El contenido de materia orgánica no presentó diferencias estadísticas significativas ($P>0.05$). El tratamiento 75 m³ ha⁻¹ de nejayote–25 Mg ha⁻¹ de estiércol de ovino (75N-25E) tuvo el mayor incremento (10.3 % entre el inicio y el segundo ciclo), mientras que el tratamiento 75 m³ ha⁻¹ de nejayote–50 Mg ha⁻¹ de estiércol de ovino (75N–50E) incrementó 6.6 % (Figura 3.20). Se observó una tendencia negativa en el tratamiento 0 m³ de nejayote ha⁻¹ –0 Mg de estiércol de ovino ha⁻¹ (0N-0E) y en las parcelas con fertilización química, la disminución fue de 19.3 % y 16 % entre el inicio y el segundo ciclo de producción.

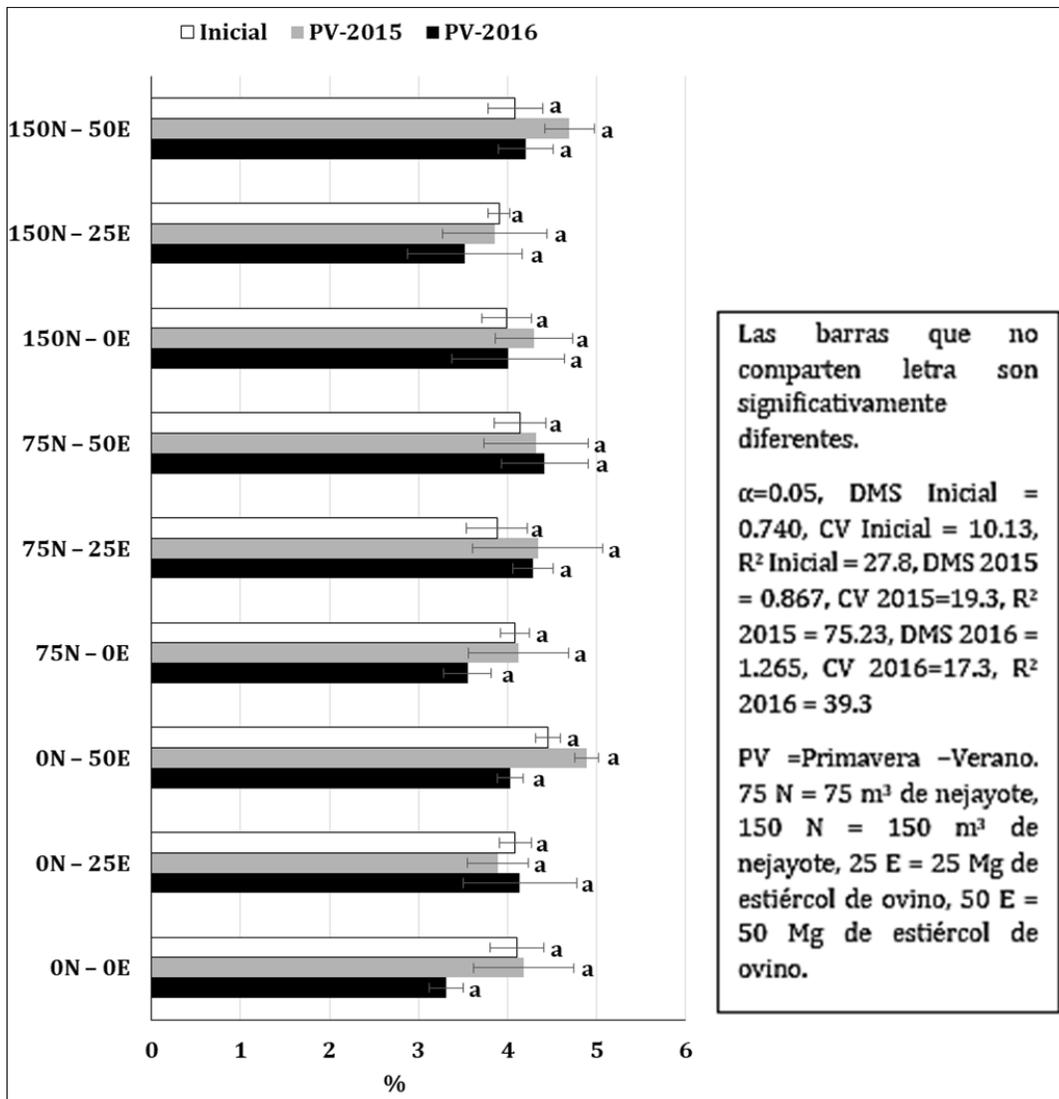


Figura 3. 20. Porcentaje de materia orgánica en suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016 (Elaboración propia, 2017).

3.3.3.5.2 Propiedades físicas

Densidad aparente, densidad real y porcentaje de espacio poroso

Las diferencias en los valores de densidad aparente y densidad real no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($P > 0.05$) durante 2015 Y 2016; el incremento promedio de la densidad aparente en los tratamientos con estiércol y nejayote fue de 4 %; mientras que, en las parcelas donde se aplicó la fertilización química el incremento fue de 14.3 %. La densidad real tuvo un comportamiento similar, el incremento promedio en las

fertilizaciones orgánicas fue de 4.7 %; mientras que, en la inorgánica fue de 4.8 %. El porcentaje de espacio poroso presentó diferencias estadísticamente significativas ($P=0.034$) después de dos ciclos con aplicación de fertilizantes orgánicos (Figura 3.21) por la aplicación de estiércol, el tratamiento con 50 Mg de estiércol ha^{-1} (0N-50E) tuvo un incremento promedio de 12.8 % entre el muestreo inicial y el segundo ciclo de producción; el tratamiento con fertilización química tuvo una disminución de 8.1 %.

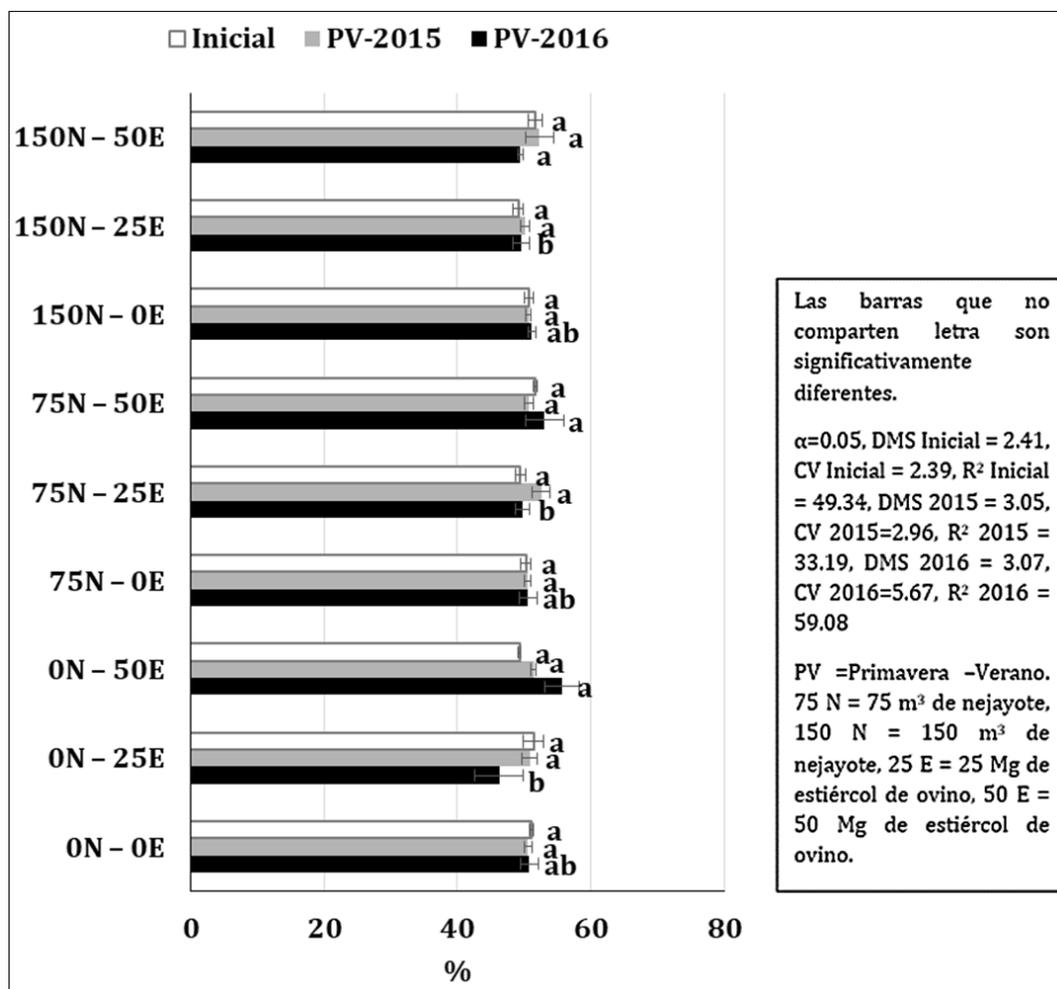


Figura 3. 21. Porcentaje de espacio poroso en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016. PV=Primavera-Verano (Elaboración propia, 2017).

3.3.3.5.3 Propiedades químicas

pH potencial y pH real

El pH potencial tuvo diferencias estadísticamente significativas en los ciclos PV-2015 y PV-2016 por la aplicación de estiércol; los tratamientos con 50 Mg ha⁻¹ de estiércol de ovino incrementaron en promedio 0.3 unidades, mientras que el tratamiento con fertilización química 120N-60P-30K tuvo una disminución de 1.8 % después de dos ciclos de cultivo (Figura 3.22).

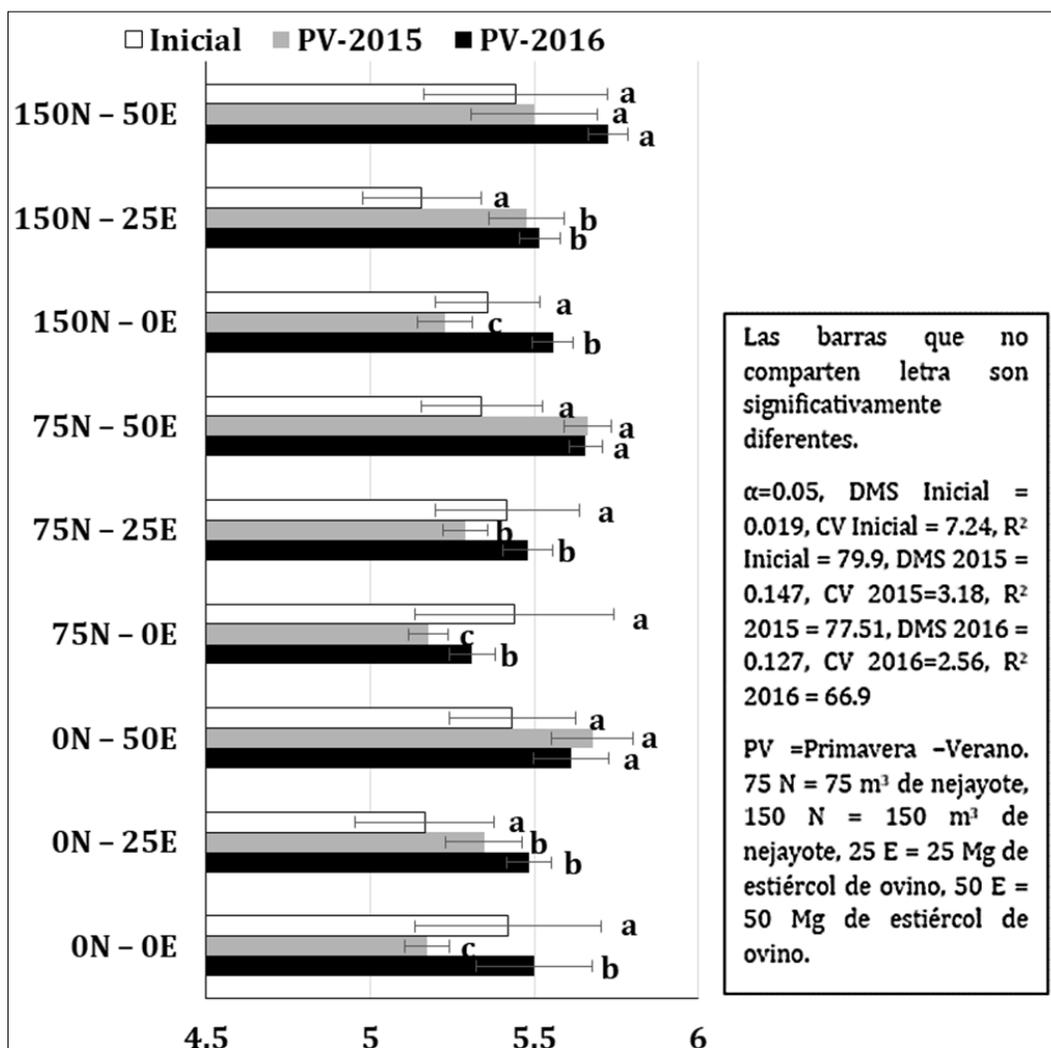


Figura 3. 22. pH potencial del suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016. PV =Primavera -Verano (Elaboración propia, 2017).

El pH real se incrementó en todos los tratamientos entre 0.3 y 0.7 unidades durante los dos ciclos de cultivo 2015 y 2016. Los tratamientos con estiércol incrementaron el valor 9.4 % en promedio, el incremento en tratamientos que recibieron únicamente nejayote fue de 6.5 % (Figura 3.23). La fertilización química tuvo un incremento de 6.4 %.

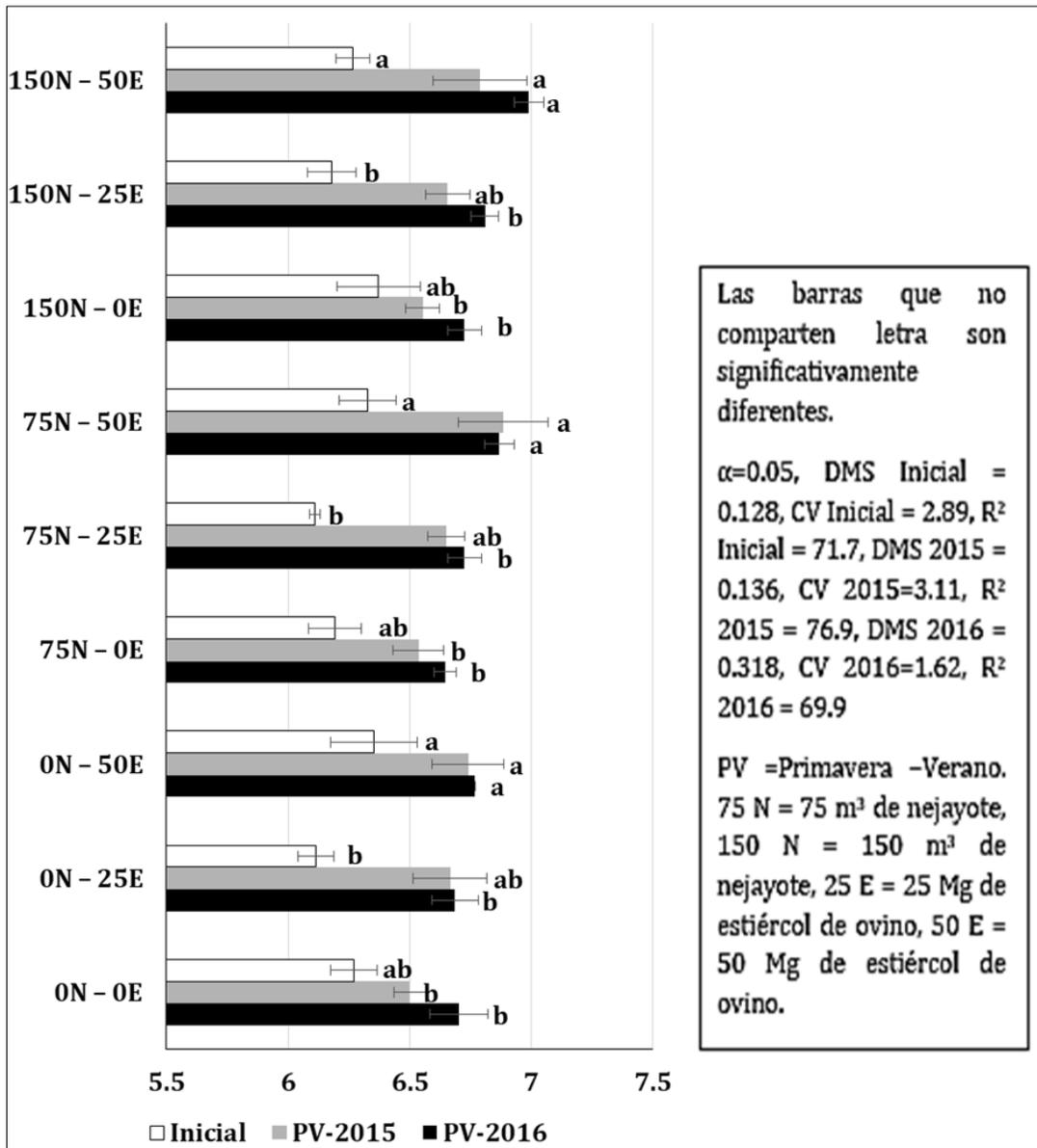


Figura 3. 23. pH real del suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016. PV=Primavera-Verano. Elaboración propia (2017).

Nitrógeno amoniacal y nítrico

El contenido de nitrógeno amoniacal tuvo diferencias estadísticamente significativas ($P=0.043$) en el ciclo PV-2016 por la aplicación de estiércol; en los tratamientos con la dosis de 50 Mg de estiércol ha^{-1} , el contenido promedio de nitrógeno amoniacal fue de 22.4 kg; mientras que, en los tratamientos con la dosis de 25 Mg de estiércol ha^{-1} y 0 Mg de estiércol ha^{-1} fue de 22.1 y 16.4 kg, respectivamente (Figura 3.24); la fertilización química generó un contenido promedio de 12.1 kg en el mismo ciclo. El contenido de nitrógeno nítrico no tuvo diferencias estadísticamente significativas ($P>0.05$) en los ciclos evaluados.

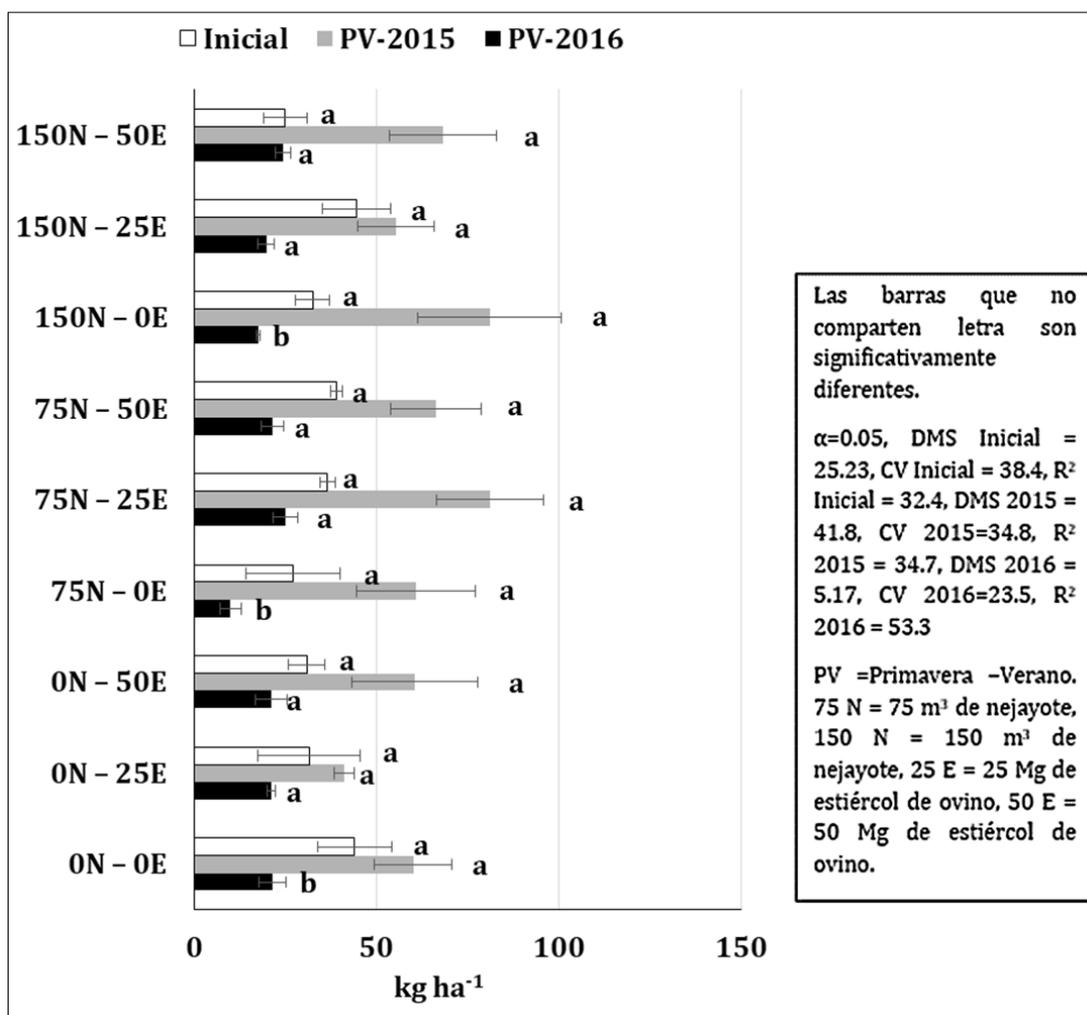


Figura 3. 24. Nitrógeno amoniacal en suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepc, Puebla. 2015-2016. Elaboración propia (2017).

Potasio

La aplicación de los fertilizantes orgánicos producto de la combinación de nejayote y estiércol de ovino, generó diferencias en el contenido de potasio del suelo en el ciclo PV-2016 ($P < 0.05$), hubo incrementos de entre 40.2 y 126.3 kg por hectárea en los tratamientos con 50 Mg de estiércol ha^{-1} ; los tratamientos con 25 Mg de estiércol ha^{-1} tuvieron disminuciones promedio de 33 kg y los tratamientos sin estiércol de 65.2 kg (Figura 3.25). La fertilización química generó una disminución promedio de 18.9 kg por hectárea.

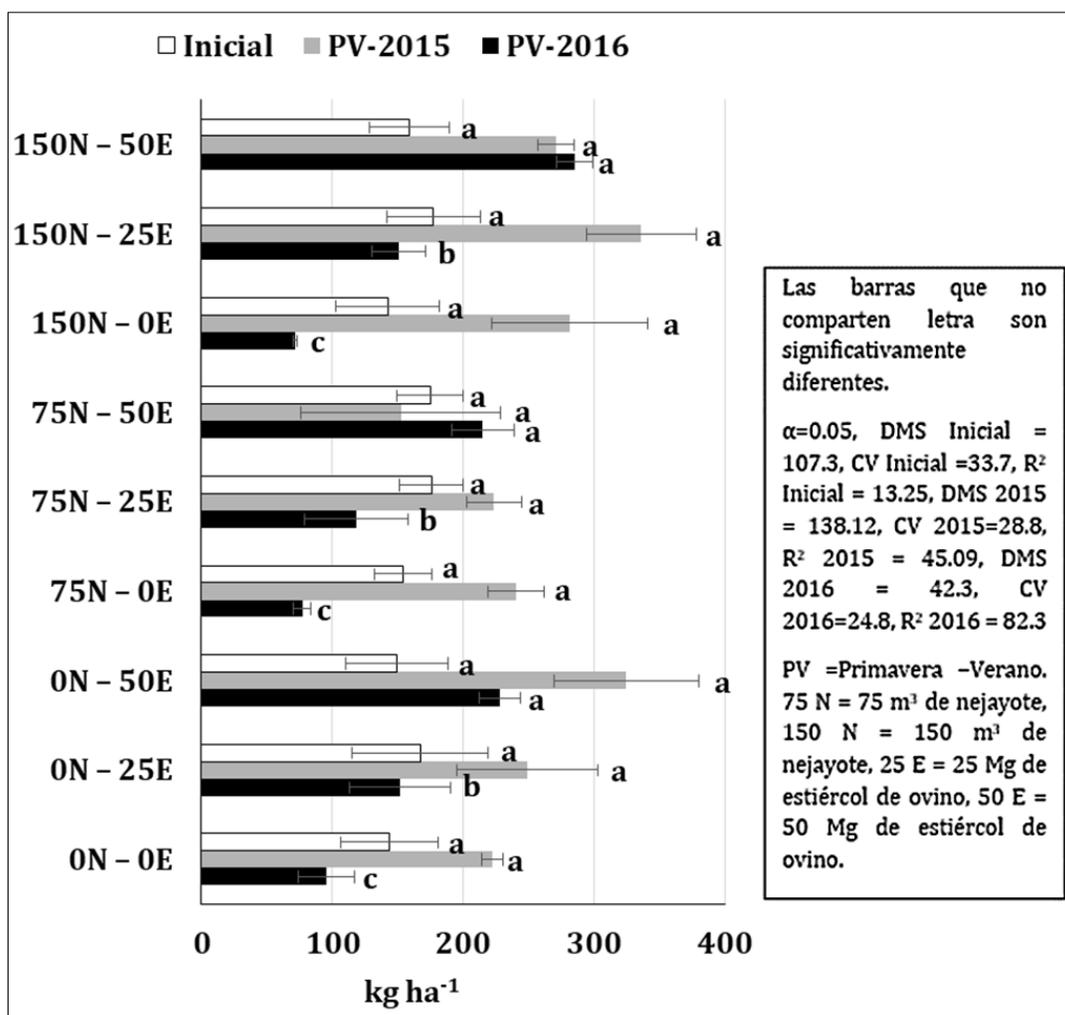


Figura 3. 25. Potasio en suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016. Elaboración propia (2017).

Fósforo

El contenido de fósforo no presentó diferencias estadísticas significativas en los ciclos de producción 2015 y 2016 ($P>0.05$). Los tratamientos 0 m^3 de nejayote ha^{-1} -25 Mg de estiércol de ovino ha^{-1} (0N-25E), 75 m^3 de nejayote ha^{-1} -25 Mg de estiércol de ovino ha^{-1} (75N-25E) y 150 m^3 de nejayote ha^{-1} -50 Mg de estiércol de ovino ha^{-1} (150N-50E) tuvieron incrementos de 18.9 %, 22.4 % y 5.6 % en el ciclo PV-2016 con respecto al contenido inicial (Figura 3.26). El tratamiento con fertilización química generó una disminución de 18.2 kg al final de los ciclos de cultivo 2015 y 2016.

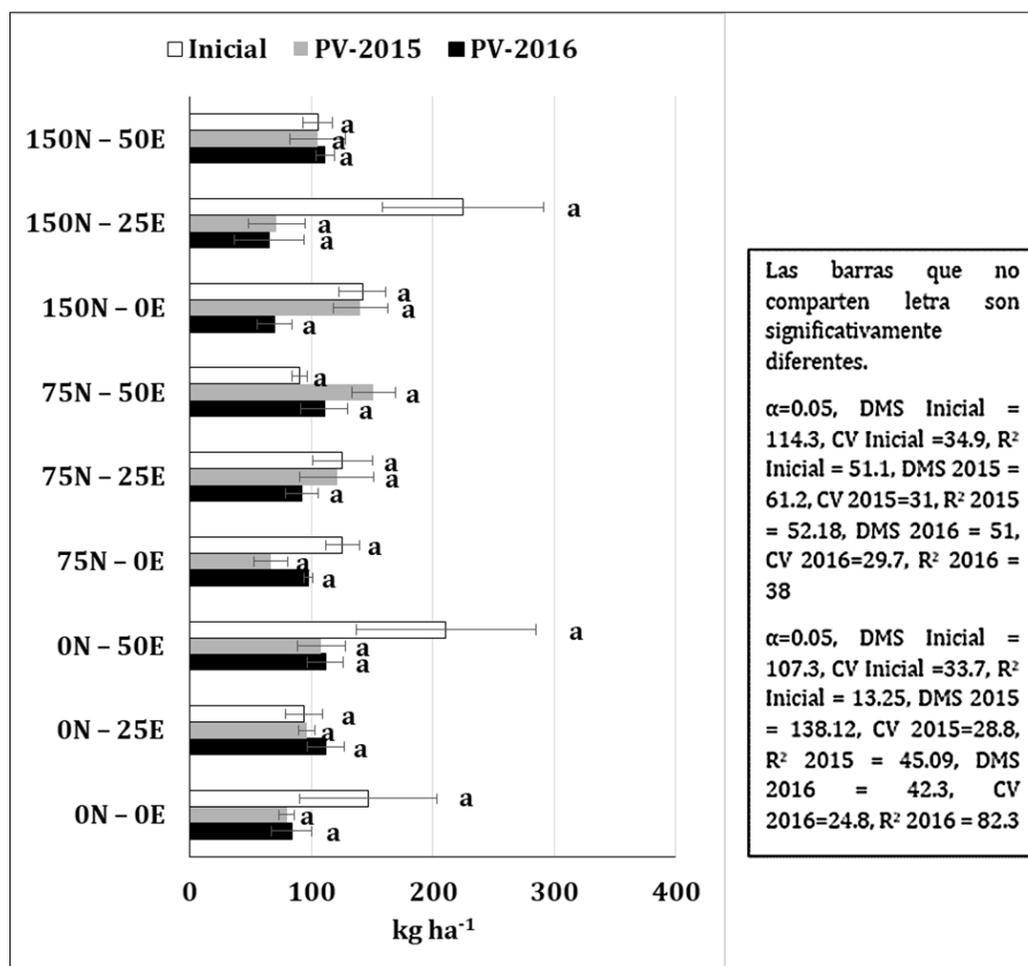


Figura 3. 26. Fósforo en suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016 (Elaboración propia, 2017).

Calcio y magnesio

En el muestreo inicial se observaron diferencias estadísticas en las parcelas experimentales para el contenido de calcio; sin embargo, la aplicación de los tratamientos

no tuvo un efecto significativo en los ciclos de producción 2015 y 2016 ($P>0.05$), los valores obtenidos indican una disminución de entre 90 kg en el tratamiento 0 m^3 de nejayote ha^{-1} -25 Mg de estiércol de ovino ha^{-1} (0N-25E) y hasta 656 kg en el tratamiento 75 m^3 de nejayote ha^{-1} -0 Mg de estiércol de ovino ha^{-1} (75N-0E). La fertilización química 120N-60P-30K disminuyó en promedio 220 kg la cantidad de calcio en los dos ciclos de producción. El contenido de calcio en las unidades experimentales tratadas con 75 o 150 m^3 de nejayote ha^{-1} fue 3.57 % mayor que en el tratamiento 0 m^3 de nejayote ha^{-1} -0 Mg de estiércol de ovino ha^{-1} (0N-0E); mientras que, en las combinaciones nejayote-estiércol el incremento fue de 7.13 % y de 5.48 % en la fertilización química, comparados con el mismo tratamiento (Figura 3.27).

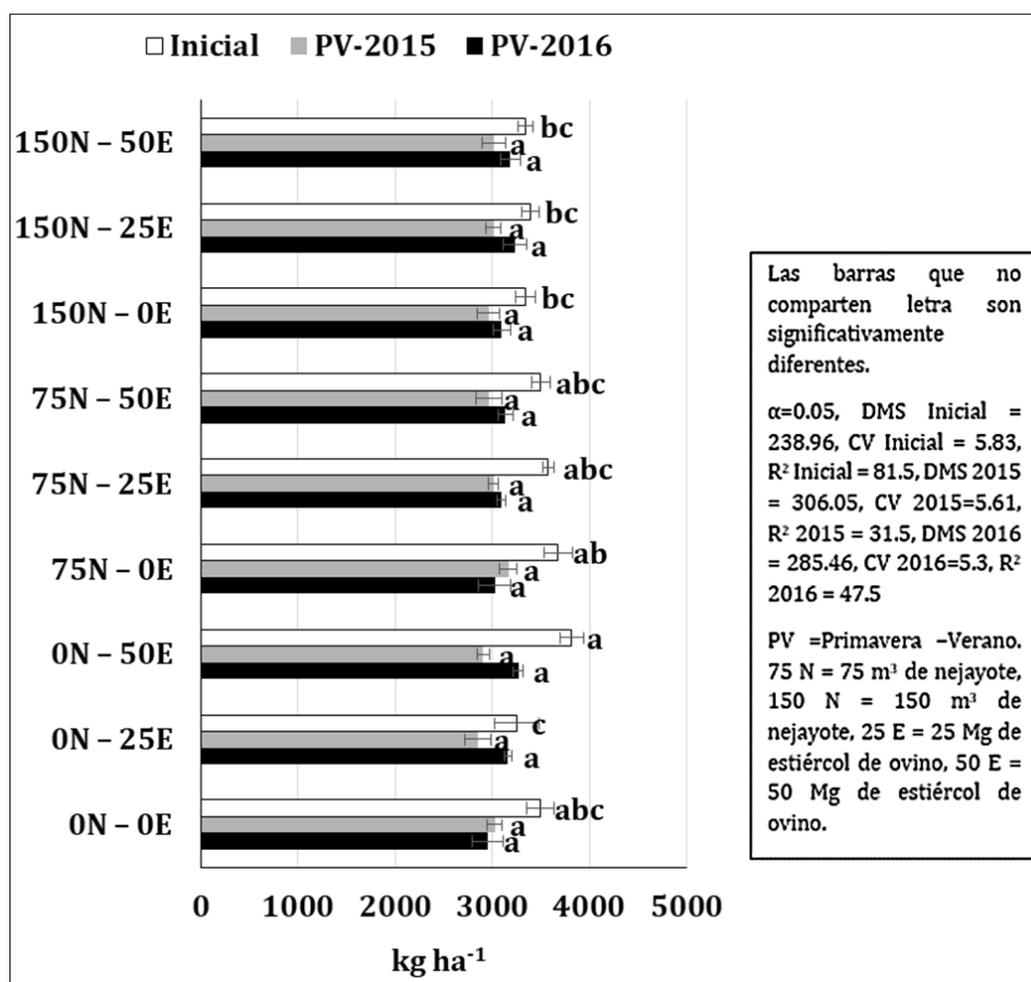


Figura 3. 27. Contenido de Calcio en suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016 (Elaboración propia, 2017).

En el ciclo PV-2015, se observaron diferencias estadísticamente significativas en el contenido de magnesio por la aplicación de estiércol ($P < 0.05$); los tratamientos con 50 Mg de estiércol ha^{-1} incrementaron el contenido de magnesio en 130.8 kg con respecto a los tratamientos con las dosis de 25 Mg de estiércol ha^{-1} y 174.9 con respecto a los tratamientos que no recibieron estiércol.

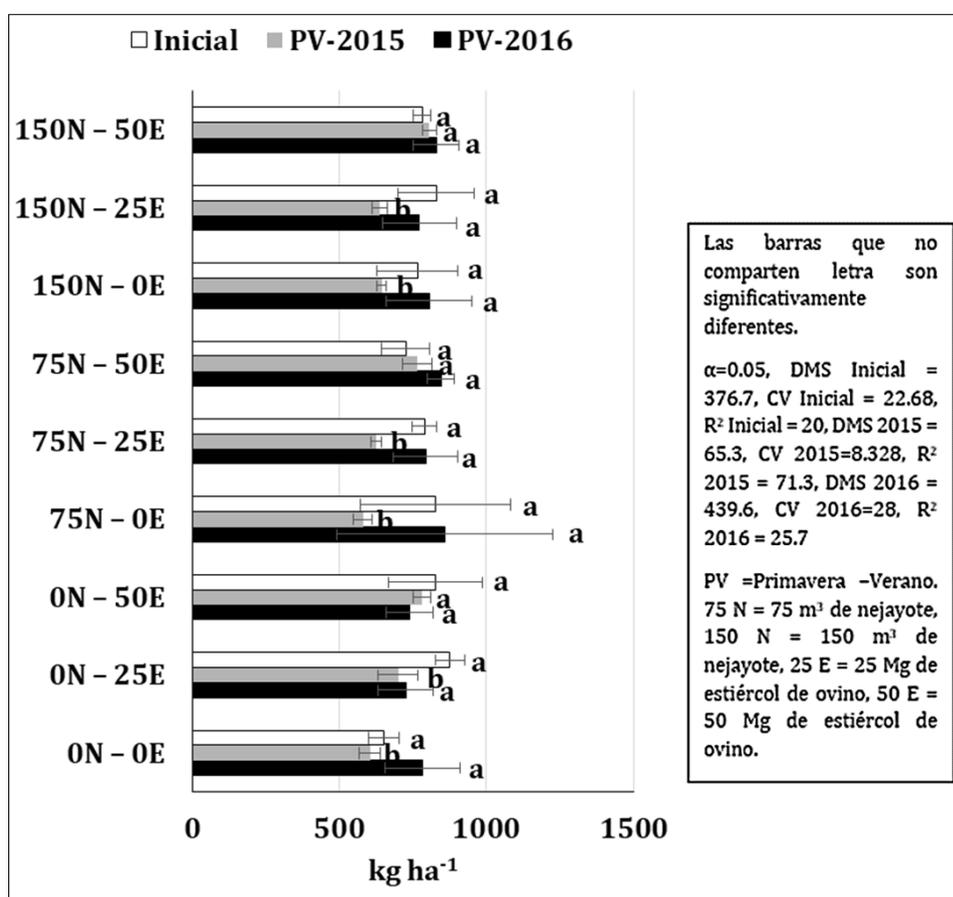


Figura 3. 28. Contenido de Magnesio en suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016 (Elaboración propia, 2017).

En los tratamientos 75 m^3 de nejayote ha^{-1} -50 Mg de estiércol de ovino ha^{-1} (75N-50E) y 150 m^3 de nejayote ha^{-1} -50 Mg de estiércol de ovino ha^{-1} (150N-50E) se observa una tendencia positiva en la cantidad de magnesio; mientras que, en el tratamiento 0 m^3 de nejayote ha^{-1} -50 Mg de estiércol de ovino ha^{-1} (0N-50E) hubo una disminución promedio de 43.6 kg en los dos ciclos de producción (Figura 3.28). La fertilización química tuvo un incremento de 108.2 kg al final de los dos ciclos de cultivo.

Capacidad de intercambio catiónico total (CICT) y Conductividad Eléctrica (CE)

Los fertilizantes orgánicos nejayote-estiércol generaron diferencias estadísticas en la capacidad de intercambio catiónico en ciclo de producción 2016 ($P=0.036$) por la aplicación de estiércol. Los tratamientos sin aplicación de estiércol (0N-0E, 75N-0E y 150N-0E) tuvieron una disminución promedio de 12.3 % con respecto a las combinaciones con 50 Mg de estiércol ha^{-1} y de 11.8 % con respecto a las mezclas con 25 Mg de estiércol ha^{-1} después de dos ciclos de cultivo (Figura 3.29).

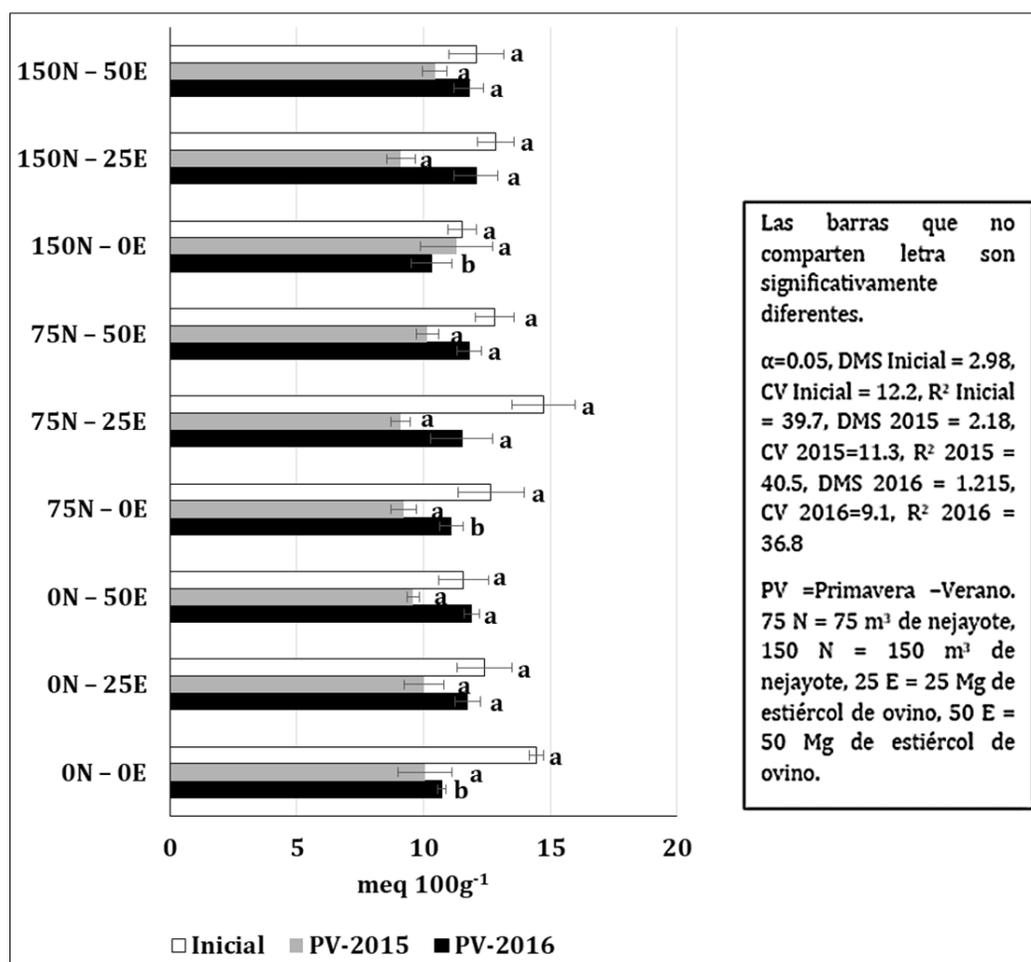


Figura 3. 29. Capacidad de intercambio catiónico total en suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepc, Puebla. 2015-2016 (Elaboración propia, 2017).

La aplicación de estiércol generó diferencias estadísticas significativas en 2015 y 2016 ($P=0.006$ y $P=0.001$, respectivamente) para la conductividad eléctrica. Los tratamientos con la dosis de 50 Mg de estiércol ha^{-1} tuvieron un valor promedio de 0.144 dS m^{-1} , mientras que la dosis de 25 Mg de estiércol ha^{-1} y los tratamientos sin estiércol tuvieron valores promedio de 0.093 y 0.093 dS m^{-1} , respectivamente (Figura 3.30). La conductividad eléctrica en las parcelas con aplicación de fertilización química se redujo de 0.222 a 0.056 dS m^{-1} , este valor es similar al del tratamiento 0 m^3 de nejayote ha^{-1} - 0 Mg de estiércol de ovino ha^{-1} (0N-0E) (0.053 dS m^{-1}).

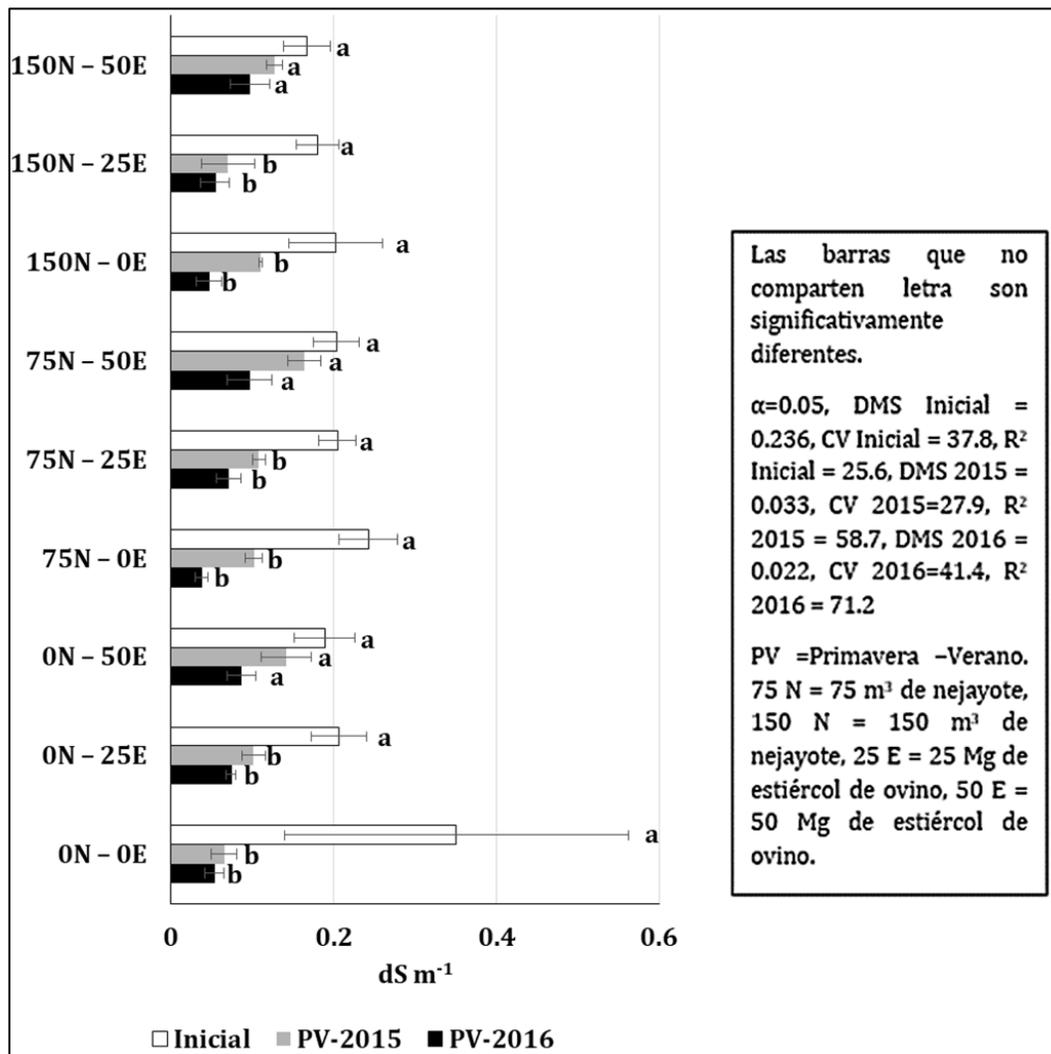


Figura 3. 30. Conductividad eléctrica en suelo en el sistema de producción maíz con la aplicación de fertilizantes orgánicos (combinación de nejayote y estiércol). Ahuazotepec, Puebla. 2015-2016. Elaboración propia (2017).

Porcentaje de saturación de bases

El porcentaje de saturación de bases no presentó diferencias estadísticas por la aplicación de los fertilizantes orgánicos ($P > 0.05$); el tratamiento 0 m^3 de nejayote ha^{-1} – 0 Mg de estiércol de ovino ha^{-1} (0N-0E) tuvo un incremento de 8.97 %, el 75 m^3 de nejayote ha^{-1} – 25 Mg de estiércol de ovino ha^{-1} (75N-25E) incrementó el espacio poroso en 6.1 %. La aplicación de la fertilización química generó una disminución de 11.8 % después de los ciclos de cultivo 2015 y 2016.

3.3.3.5 Discusión

Microbiota del suelo y porcentaje de materia orgánica

El contenido de microorganismos (UFC) en el suelo tratado con 25 y 50 Mg de estiércol de ovino por hectárea fue 90 % mayor que en el tratamiento 0 m^3 de nejayote ha^{-1} – 0 Mg de estiércol de ovino ha^{-1} (0N-0E) y 95 % mayor que en el suelo fertilizado con 120N-60P-30K. Las combinaciones nejayote-estiércol tuvieron incrementos de 29.7 % con respecto al tratamiento sin aplicaciones y de 32.9 % contra la fertilización química, el incremento de las unidades formadoras de colonias puede explicarse por el aumento del porcentaje de materia orgánica por la adición de estiércol (Meng *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2017).

El tratamiento 75 m^3 de nejayote ha^{-1} – 50 Mg de estiércol de ovino ha^{-1} tuvo un incremento del 10.3 % en el contenido de materia orgánica después de dos años de aplicación lo que coincide con las tendencias reportadas por Salazar-Sosa *et al.* (2004) y Trejo-Escareño *et al.* (2013); el rendimiento de grano promedio de los dos ciclos fue el más alto del grupo con 13.32 Mg ha^{-1} (Tabla 3.15).

Propiedades físicas

En los tratamientos con dosis de 50 Mg de estiércol ha^{-1} se obtuvieron los menores valores de densidad aparente (1.18 g cm^{-3}) este comportamiento se explica por el incremento del porcentaje de materia orgánica (4.21 %) y espacio poroso (52.7 %), comparados contra 1.25 g cm^{-3} obtenido en la fertilización química, cuyo contenido de materia orgánica fue de 3.88 % con 48.2 % de espacio poroso; estos resultados coinciden con los reportados por Wang *et al.* (2017), quienes después de tres años de aplicación de 52.5 Mg ha^{-1} de estiércol

de bovino observaron una reducción de la densidad aparente a 1.18 g cm^{-3} contra 1.27 g cm^{-3} en tratamientos sin estiércol.

Propiedades químicas

El pH se incrementó con la aplicación de los fertilizantes orgánicos. En la fertilización química y el tratamiento 75 m^3 de nejayote ha^{-1} -0 Mg de estiércol de ovino ha^{-1} (75N-0E) la disminución fue de 1.8 % y 2.4 %, respectivamente; los tratamientos con estiércol tuvieron un promedio de 5.6 mientras que el testigo tuvo un promedio de 5.5, esta tendencia coincide con la reportada por Trejo-Escareño *et al.* (2013) en tratamientos con aplicación de 120 y 160 Mg de estiércol de bovino ha^{-1} .

El nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) se incrementó 76.3 % en los tratamientos 0 m^3 de nejayote ha^{-1} con 25 ó 50 Mg de estiércol de ovino ha^{-1} (0N-25E, 0N-50E) y 88.2 % en los tratamientos con estiércol y nejayote; ambos comparado con la fertilización química 120N-60P-30K cuyo contenido promedio después de dos ciclos de cultivo fue de 12.1 kg ha^{-1} . El nitrógeno nítrico ($\text{NO}_3\text{-N}$) tuvo un incremento de 13.9 % con respecto a la fertilización química en los tratamientos con estiércol, esta tendencia coincide con la reportada por Dinesh *et al.* (2010) quienes reportan un incremento de entre 45 y 48 % utilizando un manejo orgánico con 66.6 Mg ha^{-1} de estiércol combinado con pasta de neem, ceniza, vermicomposta y microorganismos; y con Wang *et al.* (2017) quienes reportan incrementos de entre 22.9 y 24.7 % después de tres años de aplicación de 52.5 Mg ha^{-1} de estiércol de bovino y con Salazar-Sosa *et al.* (2007) quienes encontraron incrementos promedio de 330 % con respecto a tratamientos sin fertilización. El contenido de nitrógeno se incrementa en tratamientos cuyo contenido de materia orgánica es mayor, ya que la actividad microbiana favorece su mineralización (Dinesh *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2017).

La cantidad de fósforo (PO_4^{3-}) después del segundo ciclo de producción (2016) fue 34 % mayor en los tratamientos con estiércol comparados contra el tratamiento testigo y 29 % mayor que el valor obtenido con la fertilización química. Este comportamiento coincide con el reportado por Meng *et al.* (2016). El contenido de potasio se incrementó 99 % en los tratamientos con 25 y 50 Mg de estiércol ha^{-1} con respecto al tratamiento testigo (0N-0E) y la fertilización química (120N-60P-30K); los primeros resultados coinciden con los

encontrados por Salazar-Sosa *et al.* (2007), quienes reportan incrementos de hasta 30.4 ppm en aplicaciones de 160 Mg ha⁻¹ de estiércol con respecto al tratamiento testigo.

La conductividad eléctrica disminuyó en todos los tratamientos probados después de dos años de aplicación (2015 y 2016), lo que indica que las cantidades de nejayote y estiércol aplicadas no generaron problemas de salinidad a pesar de que las combinaciones tuvieron valores superiores a los 5 dS m⁻¹ (Figura 3.7). Los tratamientos con 25 y 50 Mg de estiércol ha⁻¹ tuvieron el promedio más alto con 0.08 dS m⁻¹, este valor es 50 % mayor que en el testigo, la aplicación de este elemento incrementa la conductividad por efecto de la descomposición de la materia orgánica, lo que coincide con lo reportado por Salazar-Sosa *et al.* (2010).

3.4 Fase IV. Impactos en el mundo real

El análisis de sustentabilidad del agroecosistema maíz permitió identificar la necesidad de impartir asesoría técnica y capacitación a los productores sobre la aplicación eficaz y eficiente de la tecnología para la producción de maíz en el municipio de Ahuazotepec, Puebla. Asimismo, se identificaron puntos críticos positivos y negativos que inciden directamente en la sustentabilidad económica del sistema, los cuales están relacionados con la forma, cantidad y momento de aplicación de la fertilización química y los herbicidas para el control de maleza, ambos representan alrededor del 41.9 % de los costos de producción. Por lo anterior, se llevaron a cabo actividades para mejorar la eficiencia y eficacia de la aplicación de la tecnología de producción de maíz. Se utilizó la metodología de investigación-acción, que establece la participación activa de los productores y la interacción con la comunidad en pro de la mejora de las prácticas de producción de maíz.

3.4.1 Elaboración de manual técnico para productores: Tecnología para la producción de maíz en el municipio de Ahuazotepec, Puebla.

La primera actividad consistió en la elaboración de un manual titulado: **Tecnología para la producción de maíz en el municipio de Ahuazotepec, Puebla**; en éste se presenta la información detallada sobre la tecnología de producción de maíz, que incluye la selección de la variedad o híbrido, la preparación del terreno, siembra, riego, fertilización, control

de plagas y maleza, manejo del agua y cosecha y manejo poscosecha específicos para el municipio de Ahuazotepec, Puebla (Figura 4.1). El manual fue obsequiado a 50 productores de maíz del municipio.



Figura 4. 1. Manual sobre la tecnología para la producción de maíz en el municipio de Ahuazotepec, Puebla (Elaboración propia, 2016).

3.4.2 Curso de capacitación para productores: Tecnología para mejorar la producción de maíz para grano

Como segunda actividad, se impartió un curso de capacitación titulado: **Tecnología para mejorar la producción de maíz para grano** el 19 de marzo de 2016 con una duración de 8 horas. Se abordaron tópicos como: características de las variedades e híbridos de maíz con atributos sobresalientes y adaptados al municipio, procesos para mejoramiento y conservación de variedades criollas, fertilización química y orgánica, aplicación eficiente de herbicidas, factores que afectan el rendimiento de grano, manejo poscosecha y calidad de grano, entre otros. Se contó con la asistencia de 23 productores (Figura 4.2).



Figura 4. 2. Curso de capacitación para productores: Tecnología para mejorar la producción de maíz para grano. Ahuazotepec, Puebla. 2016 (Elaboración propia, 2016)

En el curso se hizo la entrega a cada productor del manual titulado: Tecnología para la producción de maíz en el municipio de Ahuazotepec, Puebla para que sirviera como guía para el cultivo de maíz; así como, una bitácora para el registro técnico y administrativo del sistema de producción, útil para la planeación, el control y la mejora de la producción. Asimismo, se hizo el contacto con tres productores cooperantes para el establecimiento de tres parcelas demostrativa en el ciclo agrícola primavera-verano 2016, en estas parcelas se reportaron rendimientos de 8 t ha^{-1} en condiciones de temporal.

3.4.3. Planeación y ejecución del Programa para el incremento de la sustentabilidad económica del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla

Con base al análisis de sustentabilidad, se determinó que para el municipio de Ahuazotepec, Puebla es posible incrementar el rendimiento implementando un paquete tecnológico diseñado exprefeso por el grupo de investigación integrado por profesores-investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México y el Instituto Politécnico Nacional y el conocimiento y participación activa de los productores, ya que las

condiciones biofísicas y de manejo de la zona permitirían la obtención de rendimientos superiores a la media nacional.

En conjunto con el Ayuntamiento de Ahuazotepec, Puebla se planeó y ejecutó el “Programa para el incremento de la sustentabilidad económica del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla” con el objetivo de incrementar la sustentabilidad económica del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla mediante el establecimiento de unidades de producción experimentales (parcelas escuela para los productores) establecidas y con manejo agronómico acorde al paquete tecnológico definido y detallado en el Manual Tecnología para la producción de maíz en el municipio de Ahuazotepec, Puebla. El proyecto se llevó a cabo en el ciclo agrícola Primavera-Verano 2017 y se beneficiaron 24 productores (Figura 4.3).

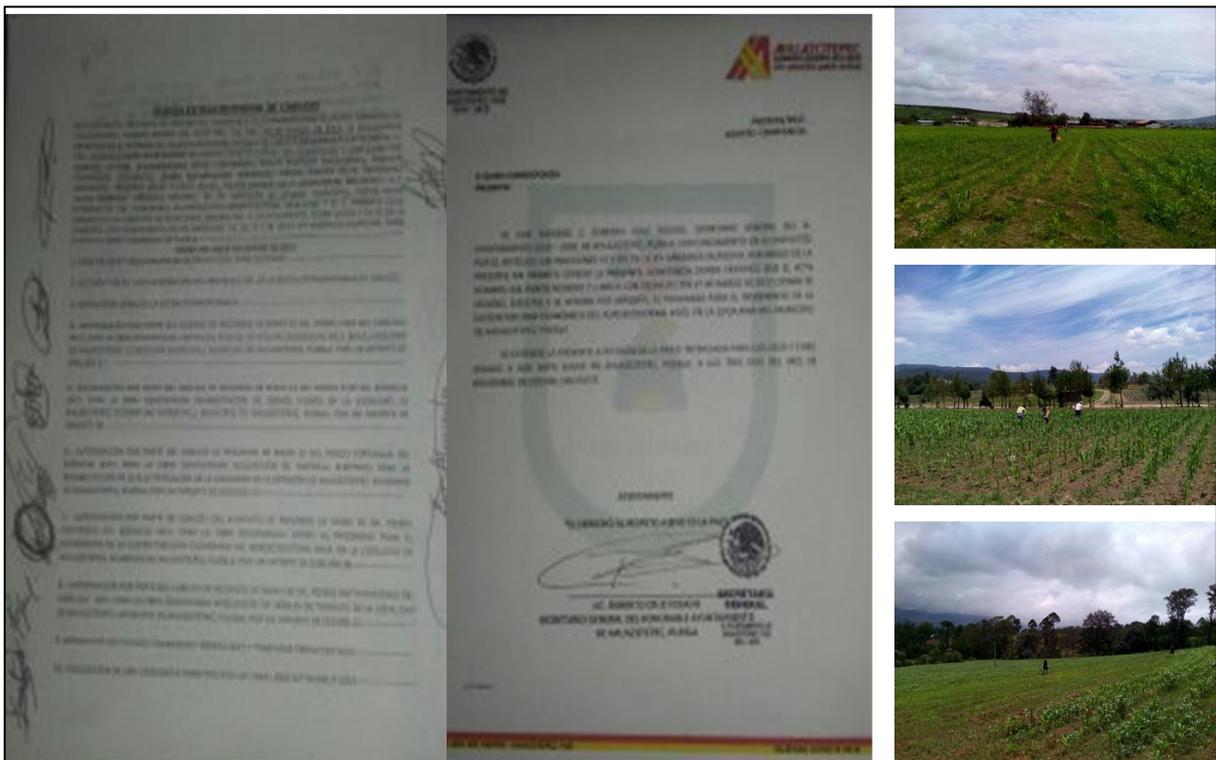


Figura 4. 3. Programa para el incremento de la sustentabilidad económica del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla. 2017.

3.4.4. Publicación de artículo científico

Con base a la planeación y ejecución de la metodología propuesta para realizar el análisis de Sustentabilidad del agroecosistema de maíz en Ahuazotepec, Puebla, se escribió, se

sometió a proceso editorial y publicó el artículo científico titulado: “Sustainability assessment of traditional maize (*Zea mays* L.) agroecosystem in Sierra Norte of Puebla, Mexico” (doi.org/10.1080/21683565.2017.1382426) en la revista *Agroecology and Sustainable Food Systems* ISSN: 2168-3565.

CAPÍTULO 4
CONCLUSIONES



CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

La perspectiva sistémica transdisciplinaria bajo la que se condujo este trabajo de investigación permitió generar una alternativa sustentable para satisfacer las necesidades nutrimentales del maíz mediante el diseño y aplicación de fertilizantes orgánicos obtenidos de la combinación de dos residuos: nejayote y estiércol de ovino. Los fertilizantes permitieron mejorar de las condiciones actuales del agroecosistema, con lo que se cumplió el objetivo general de la investigación.

Las combinaciones nejayote–estiércol de ovino generaron el mayor rendimiento promedio de grano de maíz, lo que permitió el incremento de la sustentabilidad económica con respecto a la obtenida con la aplicación de fertilización química o en unidades sin aplicación de fertilizantes. Además, se mejoró la fertilidad del suelo por el incremento del contenido de materia orgánica y consecuente disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio, nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz. Esto indica la mejora de la dimensión ambiental del sistema.

La aplicación de los fertilizantes orgánicos nejayote–estiércol permitió tener un sistema de producción rentable y con capacidad para resistir fenómenos ambientales adversos. Estos factores mejoran la autosuficiencia alimentaria y mantienen el agroecosistema, lo que incide directamente en la dimensión social del sistema.

En esta investigación, los beneficios del enfoque agroecológico fueron cuantificados mediante métodos que permiten evaluar en forma confiable el impacto de dichas prácticas en el agroecosistema en forma multidimensional. Existen pocos estudios que integren las tres dimensiones del sistema.

Estudiar al agroecosistema maíz con una visión transdisciplinaria permitió generar propuestas de solución factibles que son flexibles para aplicarse en diferentes sistemas de producción, siempre y cuando, se tomen en cuenta las condiciones locales y se hagan las adecuaciones pertinentes a cada región.

Los objetivos particulares planteados en la investigación fueron cumplidos mediante las actividades experimentales que se mencionan a continuación:

4.1. Análisis de sustentabilidad del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla.

Con base en los indicadores de sustentabilidad del agroecosistema maíz en Ahuazotepec, Puebla; los productores fueron clasificados en tres grupos: Tradicional Bajo, Tradicional Medio y Transición. Difieren en edad, educación, productividad, actividades complementarias a la agricultura, ingresos económicos, infraestructura, organización y manejo agronómico del cultivo.

Los factores determinantes para mejorar la productividad de maíz fueron fertilización química, control químico de malezas y la aplicación de estiércol. Es conveniente integrar e implementar las técnicas de producción usadas por los productores, sin hacer cambios extremos en las condiciones actuales de producción.

Los indicadores de sustentabilidad permitieron generar una línea base para Ahuazotepec, Puebla, México, útil para realizar un proyecto estratégico de desarrollo territorial, para la toma de decisiones, la implementación de acciones de mejora del agroecosistema y el desarrollo de investigaciones futuras.

4.2 Caracterización física y química de los fertilizantes orgánicos producto de las combinaciones entre concentraciones de nejayote y estiércol de ovino

Con base en los resultados, el contenido de macro y micronutrientes de los fertilizantes orgánicos, combinación entre concentraciones de nejayote y estiércol de ovino, permitieron calcular la dosis de aplicación óptima en el sistema de producción de maíz y otros cultivos en función del rendimiento esperado con el uso eficiente de los recursos naturales, financieros y humanos, sin dañar el ambiente.

El rango de pH de los fertilizantes orgánicos nejayote estiércol estuvo dentro del óptimo para el crecimiento y desarrollo del maíz, permite la disponibilidad de macro y micronutrientes. El nejayote sin mezclar tiene un pH que disminuye la disponibilidad de macronutrientes y nutrientes secundarios; mientras, que el estiércol tiene menor disponibilidad de micronutrientes.

Los fertilizantes orgánicos nejayote estiércol satisfacen la cantidad de nutrientes extraída por el maíz, pueden usarse en sustitución de la fertilización inorgánica tradicional. El

contenido de nutrientes secundarios y micronutrientes no presenta alguna restricción para la cantidad que requiere el maíz.

La caracterización física y química de los fertilizantes orgánicos permitió la cuantificación de la aportación de nutrimentos esenciales para la planta de acuerdo con el rendimiento esperado, con lo que se valida la hipótesis de su posible utilización dentro del sistema de producción de maíz.

El uso nejayote estiércol como fertilizantes orgánicos representa una opción para el tratamiento de desechos de la agroindustria y los sistemas de producción pecuaria. La cantidad de agua recuperada en el nejayote permite aplicar un riego en periodos de escasez de entre 7.5 y 15 mm durante el ciclo de producción agrícola, sin considerar la evaporación ni la eficiencia en la aplicación del riego.

4.3 Cuantificación del efecto de la aplicación de los fertilizantes nejayote–estiércol sobre el rendimiento, la calidad física del grano, la eficiencia energética y la relación beneficio–costo y selección de concentraciones óptimas para cada variable de respuesta

La aplicación de los fertilizantes orgánicos nejayote–estiércol tuvo un efecto positivo en el rendimiento de grano de maíz con una tendencia a mantenerse en el tiempo, lo que representa una mejora sustentable del sistema de producción.

Ante condiciones climáticas adversas la disminución de rendimiento es menor con las fertilizaciones orgánicas nejayote–estiércol en comparación con la fertilización química y con el testigo. El sistema se vuelve más resiliente.

La aplicación de los fertilizantes orgánicos nejayote–estiércol es una opción viable para hacer eficiente el uso de la energía en la agricultura favoreciendo el incremento de los rendimientos de grano del maíz.

La relación beneficio costo promedio obtenida con la aplicación de las fertilizaciones orgánicas nejayote-estiércol fue de 6.71, es decir, por cada peso invertido se obtienen 5.71 pesos. Los insumos utilizados en los fertilizantes orgánicos no tuvieron costo por ser desechos de un sistema de producción pecuario y un sistema agroindustrial.

Los fertilizantes orgánicos nejayote–estiércol tuvieron un efecto positivo en el rendimiento de grano de maíz, eficiencia energética y relación beneficio costo; no así, para calidad de grano, por lo cual es necesario realizar más estudios para lograr un producto que cumpla con los requerimientos para la industria productora de tortillas y productos de maíz nixtamalizado.

4.4 Cuantificación del efecto de la aplicación de los fertilizantes nejayote–estiércol sobre el contenido de microorganismos y las propiedades físicas y químicas del suelo.

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que los fertilizantes nejayote–estiércol mejoran la fertilidad del suelo porque incrementan el contenido de microorganismos en el suelo, la cantidad de nitrógeno, fósforo y potasio disponibles para la planta.

Los fertilizantes orgánicos nejayote-estiércol no incrementaron la conductividad eléctrica del suelo; entonces, es posible utilizar la combinación de los residuos para disminuir el potencial contaminante de ambos.

Las propiedades físicas y químicas del suelo se modificaron en forma positiva para el desarrollo del maíz, por lo que los fertilizantes orgánicos nejayote–estiércol, son una opción sustentable para incrementar el rendimiento de grano y el manejo de los residuos nejayote y estiércol.

4.5 Trabajos futuros

Los resultados de esta investigación permitieron detectar puntos críticos que pueden ser abordados bajo un enfoque sistémico, transdisciplinario y multidimensional con el fin de continuar con la mejora del agroecosistema maíz; por ello, se propone como una orientación para trabajos futuros:

- La evaluación experimental de la integración de las prácticas individuales de cada conglomerado detectado en el análisis de sustentabilidad es de particular interés como una perspectiva de investigación futura.
- Las fertilizaciones orgánicas propuestas pueden ser una alternativa sustentable para el agroecosistema maíz, sin embargo, será necesario realizar más estudios para lograr grano que cumpla con los requerimientos de la industria.

- La evaluación a largo plazo de la aplicación de nejayote y estiércol es interesante para poder cuantificar la cantidad de residuos que pueden ser manejados bajo este esquema sin afectar en forma negativa las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo.

A large green arrow graphic pointing to the right, positioned above the word 'REFERENCIAS'.

REFERENCIAS



REFERENCIAS

- AACC (1976) *Approved Methods of the AACC*. 7th ed. St. Paul, Minnesota.
- Acosta-Estrada, B. A., Lazo-Vélez, M. A., Nava-Valdez, Y., Gutiérrez-Urbe, J. A. y Serna-Saldívar, S. O. (2014) *Improvement of dietary fiber, ferulic acid and calcium contents in pan bread enriched with nejayote food additive from white maize (Zea mays)*, *Journal of Cereal Science*. doi: 10.1016/j.jcs.2014.04.006.
- Acosta-Estrada, B. A., Serna-Saldívar, S. O. y Gutiérrez-Urbe, J. A. (2015) “Chemopreventive effects of feruloyl putrescines from wastewater (Nejayote) of lime-cooked white maize (Zea mays).”, *Journal of Cereal Science*, (64), pp. 23–28.
- Adamtey, N., Musyoka, M. W., Zundel, C., Cobo, J. G., Karanja, E., Fiaboe, K. K. M., Muriuki, A., Mucheru-Muna, M., Vanlauwe, B., Berset, E., Messmer, M. M., Gattinger, A., Bhullar, G. S., Cadisch, G., Fliessbach, A., Mäder, P., Niggli, U. y Foster, D. (2016) “Productivity, profitability and partial nutrient balance in maize-based conventional and organic farming systems in Kenya”, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 235, pp. 61–79. doi: 10.1016/j.agee.2016.10.001.
- Alrøe, H. F. y Kristensen, E. S. (2001) “Towards a systemic research methodology in agriculture Rethinking the role of values in science”, *Agriculture and Human Values*, 19, pp. 3–23. doi: 10.1023/A:1015040009300.
- Alrøe, H. F. y Kristensen, E. S. (2002) “Towards a systemic research methodology in agriculture: Rethinking the role of values in science”, *Agriculture and Human Values*, 19(1), pp. 3–23.
- Altieri, M. A. (1987) *Agroecology. The Scientific Basis of Alternative Agriculture*. United States of America: Westview Press.
- Altieri, M. A. (2002) “Agroecology: The science of natural resource management for poor farmers in marginal environments”, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 93(1–3), pp. 1–24. doi: 10.1016/S0167-8809(02)00085-3.
- Alvarado, V. (2014) *Probabilidad y estadística*. México: Patria.
- American-Society-of-Agronomy (2016) *American Society of Agronomy*. Disponible en: <https://www.agronomy.org/about-agronomy> (Consultado: el 25 de julio de 2016).
- Amshoff, S. K. y Reed, D. B. (2005) “Health, work, and safety of farmers ages 50 and older”, *Geriatric Nursing*, 26(5), pp. 304–308. doi: 10.1016/j.gerinurse.2005.08.008.
- Arellano-Vázquez, J. L., Virgen-Vargas, J. y Avila-Perches, M. A. (2010) “H-66 maize hybrid for the central highlands of the Mexico and Tlaxcala states”, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(2), pp. 257–262.
- Arnés, E., Antonio, J., Del Val, E. y Astier, M. (2013) “Sustainability and climate variability in low-input peasant maize systems in the central Mexican highlands”, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 181, pp. 195–205. doi: 10.1016/j.agee.2013.09.022.

- Astier, M., Maser, O. y Galván, Y. (2008) *Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional*. 1a. Mexico: Mundi Prensa.
- Badii, M. H., Castillo, J. y Guillen, A. (2008) "Tamaño óptimo de la muestra", *Innovaciones de Negocios*, 5(1), pp. 53-65.
- Ball, A., Fernandes, E., Herren, H., Husson, O., Laing, M., Palm, C., Pretty, J., Sanchez, P., Sanginga, N. y Thies, J. (2006) *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*. Editado por N. Uphoff. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis.
- Banaeian, N. y Zangeneh, M. (2011) "Study on energy efficiency in corn production of Iran", *Energy*, 36(8), pp. 5394-5402. doi: 10.1016/j.energy.2011.06.052.
- Bawden, R. J. (1991) "Systems thinking and practice in agriculture", *Journal of Dairy Science*. Elsevier, 74(7), pp. 2362-2373.
- Bawden, R. J. (2007) "Redesigning animal agriculture: A systemic perspective", en Swain, D. L., Charmley, E., Steel, J., y Coffey, S. (eds.) *Redesigning animal agriculture: The Challenge of the 21st Century*. London UK: CABI, pp. 1-17.
- Bawden, R. J. y Packham, R. G. (1993) "Systemic praxis in the education of the agricultural systems practitioner", *Systems Practice*, 6(1), pp. 7-19. doi: 10.1007/BF01059677.
- Beck, U. (1992) *Risk society: Towards a new modernity*. Sage.
- Bell, S. y Morse, S. (2008) *Sustainability Indicators: Measuring the Immeasurable?, Second Edition Earthscan.London.Sterling,VA*. doi: 10.1016/S0743-0167(99)00036-4.
- Berdegú, J., Sotomayor, O. y Zilleruelo, C. (1990) "Metodología de tipificación y clasificación de sistemas de producción campesinos de la provincia de Ñuble, Chile", en Escobar, G. y Berdegú, J. (eds.) *Tipificación de sistemas de producción agrícola*. Santiago, Chile: Red Internacional de Metodologías de Investigación en Sistemas de Producción, pp. 85-117.
- Binder, C. R., Feola, G. y Steinberger, J. K. (2010) "Considering the normative, systemic and procedural dimensions in indicator-based sustainability assessments in agriculture", *Environmental Impact Assessment Review*, 30(2), pp. 71-81. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925509000924>.
- Biondo, R. y Lee, J. (1997) *Introduction to Plant and Soil Science and Technology*. United States of America: Interstate Publishers, Inc.
- Bland, W. y Bell, M. (2009) "Beyond Systems Thinking in Agroecology. Holons, Intentionality, and Resonant Configurations", en Bohlen, J. y House, G. (eds.) *Sustainable Agroecosystem Management: Integrating Ecology, Economics, and Society*. 1 ed. Boca Raton, Florida, pp. 85-94.
- Brklacich, M., Bryant, C. R. y Smit, B. (1991) "Review and appraisal of concept of sustainable food production systems", *Environmental Management*, 15(1), pp. 1-14. doi: 10.1007/BF02393834.
- Bundy, L. G. (1998) *Corn fertilization*. Wisconsin: University of Wisconsin-Extension, Cooperative Extension.

- Capulín-Grande, J., Núñez-Escobar, R., Etchevers-Barra, J. D. y Baca-Castillo, G. A. (2001) "Evaluation of liquid cattle manure extract as a plant nutrition input in hydroponics", *Agrocencia*, 35(3), pp. 287–299.
- Castellanos, J. (1986) "Evaluación del estiércol de bovino y gallinaza como fuente de fósforo en el cultivo de alfalfa", *Agricultura Técnica en México*, 12, pp. 247–258.
- Castro-Muñoz, R. y Yáñez-Fernández, J. (2015) *Valorization of Nixtamalization wastewaters (Nejayote) by integrated membrane process, Food and Bioproducts Processing*. doi: 10.1016/j.fbp.2015.03.006.
- Chaparro, J. M., Sheflin, A. M., Manter, D. K. y Vivanco, J. M. (2012) "Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility", *Biology and Fertility of Soils*, 48(5), pp. 489–499. doi: 10.1007/s00374-012-0691-4.
- Chapman, H. D. (1981) *Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas*. México: Trillas.
- Chávez, C. y Arriaga, C. (1999) "Agricultura campesina y diversidad de maíz", *Ciencia Ergo Sum*, 5(1), pp. 51–56.
- Checkland, P. y Poulter, J. (2010) "Soft systems methodology", en *Systems approaches to managing change: A practical guide*. Springer, pp. 191–242.
- Cheng, Y., Zhao, J., Liu, Z. X., Huo, Z. J., Liu, P., Dong, S. T., Zhang, J. W. y Zhao, B. (2015) "Modified fertilization management of summer maize (*Zea mays* L.) in northern China improves grain yield and efficiency of nitrogen use", *Journal of Integrative Agriculture*, 14(8), pp. 1644–1657. doi: 10.1016/S2095-3119(14)60879-0.
- Chenu, C., Rumpel, C. y Lehmann, J. (2015) *Methods for Studying Soil Organic Matter, Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. doi: 10.1016/B978-0-12-415955-6.00013-X.
- Coleman, D., Crossley, D. y Hendrix, P. (2004) *Fundamentals of Soil Ecology*. 2nd ed. United States of America: Elsevier Inc.
- Comision-Mundial-sobre-el-Medio-Ambiente-y-el-Desarrollo (1987) *Our Common Future*. New York: Oxford University Press.
- Conway, G. (1987) "The properties of agroecosystems", *Agricultural Systems*, 24(2), pp. 95–117. doi: 10.1016/0308-521X(87)90056-4.
- Dalsgaard, J. P. T., Lightfoot, C. y Christensen, V. (1995) "Towards quantification of ecological sustainability in farming systems analysis", *Ecological Engineering*, 4(94), pp. 181–189. doi: 10.1016/0925-8574(94)00057-C.
- Damián, M. A., Ramírez, B., Parra, F., Paredes, J. A., Gil, A., Cruz, A. y López, J. F. (2007) "Apropiación de tecnología por productores de maíz en el Estado de Tlaxcala, México", *Agricultura Técnica en México*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 33(2), pp. 163–173.
- Dantsis, T., Douma, C., Giourga, C., Loumou, A. y Polychronaki, E. (2010) "A methodological approach to assess and compare the sustainability level of agricultural plant production systems", *Ecological Indicators*, 10(2), pp. 256–263. doi: 10.1016/j.ecolind.2009.05.007.

- De-la-Herran, A. (2011) *Complejidad y Transdisciplinariedad, Educacao Skepsis*.
- Delgado, M., Rodríguez, C., Martín, J. V., Miralles de Imperial, R. y Alonso, F. (2012) "Environmental assay on the effect of poultry manure application on soil organisms in agroecosystems", *Science of the Total Environment*, 416, pp. 532–535. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.11.047.
- Dinesh, R., Srinivasan, V., Hamza, S. y Manjusha, A. (2010) "Short-term incorporation of organic manures and biofertilizers influences biochemical and microbial characteristics of soils under an annual crop [Turmeric (*Curcuma longa* L.)]", *Bioresource Technology*. Elsevier Ltd, 101(12), pp. 4697–4702. doi: 10.1016/j.biortech.2010.01.108.
- Donatelli, M. y Confalonieri, R. (2011) "Biophysical Models for Cropping System Simulation", en Flichman, G. (ed.) *Bio-Economic Models applied to Agricultural Systems*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 59–86. doi: 10.1007/978-94-007-1902-6_4.
- Duan, Y., Xu, M., Gao, S., Yang, X., Huang, S., Liu, H. y Wang, B. (2014) *Nitrogen use efficiency in a wheat-corn cropping system from 15 years of manure and fertilizer applications*, *Field Crops Research*. Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.fcr.2013.12.012.
- Duiker, S. J. (2011) *Effect of land use and soil management on soil properties and processes. In: Soil Hydrology, land use and Agriculture. Measurement and modelling*. Reino Unido: CABI.
- Van Dusen, M. E. y Taylor, J. E. (2005) "Missing markets and crop diversity: evidence from Mexico", *Environment and Development Economics*, 10(4), pp. 513–531. doi: 10.1017/S1355770X05002317.
- Dyson, R. G. (2004) "Strategic development and SWOT analysis at the University of Warwick", *European Journal of Operational Research*, 152(3), pp. 631–640. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00062-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00062-6).
- Eakin, H., Bausch, J. y Sweeney, S. (2014) "Agrarian winners of neoliberal reform: The 'Maize Boom' of Sinaloa, Mexico", *Journal of Agrarian Change*, 14(1), pp. 26–51. doi: 10.1111/joac.12005.
- Edmondson, P. (2012) *Soil Science & Its applications*. Dehli: College Pub. House.
- Eghball, B., Wienhold, B. J., Gilley, J. E. y Eigenberg, R. A. (2002) "Mineralization of manure nutrients", *Journal of Soil and Water Conservation*, 57(6), pp. 470–473. doi: 10.1006/meth.2001.1262.
- Eksvärd, K., Salomonsson, L., Francis, C., Sriskandarajah, N., Svanäng, K., Lieblein, G., Björklund, J. y Geber, U. (2009) "16 Participatory Approaches and Stakeholder Involvement in Sustainable Agriculture Research", *Sustainable Agroecosystem Management: Integrating Ecology, Economics, and Society*. CRC Press, p. 271.
- Ewert, F., van Ittersum, M. K., Bezlepkina, I., Therond, O., Andersen, E., Belhouchette, H., Bockstaller, C., Brouwer, F., Heckeley, T., Janssen, S., Knapen, R., Kuiper, M., Louhichi, K., Olsson, J. A., Turpin, N., Wery, J., Wien, J. E. y Wolf, J. (2009) "A methodology for enhanced flexibility of integrated assessment in agriculture", *Environmental Science and Policy*, 12(5), pp. 546–561. doi: 10.1016/j.envsci.2009.02.005.

- Fantin, V., Righi, S., Rondini, I. y Masoni, P. (2017) "Environmental assessment of wheat and maize production in an Italian farmers' cooperative", *Journal of Cleaner Production*, 140(2017), pp. 631–643. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.136>.
- FAO (2002) "Agua y Cultivos-Logrando el uso optimo del agua en el agricultura", p. 28. Disponible en: ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/cropsdrops_s.pdf.
- FAO (2013a) *Los biopreparados para la producción de hortalizas en la agricultura urbana y periurbana*. Paraguay: FAO.
- FAO (2013b) *Statistical yearbook 2013*. Roma: FAO.
- FAO (2016a) *Perspectivas alimentarias. Resúmenes de mercado*. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i5703s.pdf> (Consultado: el 21 de julio de 2016).
- FAO (2016b) *The state of food and agriculture. Climate change, agriculture and food security*. Rome: FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations).
- FAOSTAT (2016) *Food Agriculture Organization of the United Nations FAOSTAT*. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (Consultado: el 27 de noviembre de 2016).
- Farhad, W., Saleem, M. F., Cheema, M. A. y Hammad, H. M. (2009) "Effect of poultry manure levels on the productivity of spring maize (*Zea mays* L.)", *Journal of Animal and Plant Sciences*, 19(3), pp. 122–125.
- Financiera-Rural (2014) *Panorama del Maíz*. México.
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., Zaks, D. P. M. y O'Connell, C. (2011) "Solutions for a cultivated planet", *Nature*, 478(7369), pp. 337–42. doi: 10.1038/nature10452.
- Fortis-Hernández, M., Leos-Rodríguez, J. A., Preciado-Rangel, P., Orona-Castillo, I., García-Salazar, J. A., García-Hernández, J. L. y Orozco-Vidal, J. A. (2009) "Aplicación de abonos orgánicos en la producción de maíz forrajero con riego por goteo.", *Terra Latinoamericana*, 27(4), pp. 329–336.
- Foster, S., Urbanowitz, S., Gatzke, H. y Schultz, B. (2016) *Soil Properties, Part 3 of 3: Chemical Characteristics*. University of Nevada Cooperative Extension. Disponible en: <http://www.unce.unr.edu/publications/files/ho/2016/fs1602.pdf>.
- Francis, C. a., Lieblein, G., Breland, T. a., Salomonsson, L., Geber, U., Sriskandarajah, N. y Langer, V. (2008) *Transdisciplinary research for a sustainable agriculture and food sector*, *Agronomy Journal*. doi: 10.2134/agronj2007.0073.
- García-Gómez, a., Bernal, M. P. y Roig, a. (2002) *Growth of ornamental plants in two composts prepared from agroindustrial wastes*, *Bioresource Technology*. doi: 10.1016/S0960-8524(01)00211-5.
- García-Zamora, J. L., Sánchez-González, M., Lozano, J. A., Jáuregui, J., Zayas, T., Santacruz, V., Hernández, F. y Torres, E. (2015) "Enzymatic treatment of wastewater from the corn

- tortilla industry using chitosan as an adsorbent reduces the chemical oxygen demand and ferulic acid content”, *Process Biochemistry*, 50(1), pp. 125–133. doi: 10.1016/j.procbio.2014.10.012.
- Gathala, M. K., Timsina, J., Islam, M. S., Krupnik, T. J., Bose, T. R., Islam, N., Rahman, M. M., Hossain, M. I., Harun-Ar-Rashid, M., Ghosh, A. K., Hasan, M. M. K., Khayer, M. A., Islam, M. Z., Tiwari, T. P. y McDonald, A. (2016) “Productivity, profitability, and energetics: A multi-criteria assessment of farmers’ tillage and crop establishment options for maize in intensively cultivated environments of South Asia”, *Field Crops Research*. Elsevier B.V., 186, pp. 32–46. doi: 10.1016/j.fcr.2015.11.008.
- Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. y Tempio, G. (2013) *Tackling climate change through livestock - A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Gerpacio, R. (2001) *Impact of public and private sector Maize breeding. Research is Asia, 1966-1997/98*. Disponible en: <http://repository.cimmyt.org/xmlui/bitstream/handle/10883/1034/75341.pdf?sequence=1>. (Consultado: el 25 de septiembre de 2015).
- Gil-Muñoz, A., López, P., Orozco, A. M. y López-Sánchez, H. (2004) *Variedades criollas de maíz (Zea mays L.) en el estado de Puebla, México: diversidad y utilización, Manejo de la diversidad de los cultivos en los agroecosistemas tradicionales*. Cali, Colombia: Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos.
- Gil, M. V., Carballo, M. T. y Calvo, L. F. (2008) *Fertilization of maize with compost from cattle manure supplemented with additional mineral nutrients, Waste Management*. doi: 10.1016/j.wasman.2007.05.009.
- Gliessman, S. R. (1998) *Agroecology: Ecological processes in sustainable agriculture*. Chelsea, MI: Ann Harbor Press.
- Gliessman, S. R. (2000) *Agroecosystem sustainability: developing practical strategies*. CRC Press.
- Gliessman, S. R. (2015) *Agroecology: the ecology of sustainable food systems*. 3rd ed. CRC Press.
- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M. y Toulmin, C. (2012) “The Challenge of Food Security”, *Science*, 327(February), p. 812. doi: 10.4337/9780857939388.
- González, C. E., Ríos, H., Brunett, L., Zamorano, S. y Villa, C. (2006) “¿Es posible evaluar la dimensión social de la sustentabilidad?: Aplicación de una metodología en dos comunidades campesinas del valle de Toluca, México”, *Convergencia*, 13(40), pp. 107–139.
- Gros, A. y Domínguez-Vivancos, A. (1992) *Abonos. Guía práctica de la fertilización*. 8a ed. Madrid: Ediciones Mundi Prensa.
- Gullifer, J. y Thompson, A. (2006) “Subjective realities of older male farmers: Self-perceptions of ageing and work”, *Rural Society*, 16(1), pp. 80–97. doi: 10.5172/rsj.351.16.1.80.

- Gutiérrez, M. F., Moguel, Z. B., Abud, A. M., Gutiérrez, O. V. y Dendooven, L. (2008) "Sheep manure vermicompost supplemented with a native diazotrophic bacteria and mycorrhizas for maize cultivation", *Bioresource Technology*, 99(15), pp. 7020–7026.
- Gutiérrez, P. y De la Vara, S. (2012) "Planeación de un experimento", en *Análisis y diseño de experimentos*. 3a. México: McGraw-Hill, pp. 285–297.
- Han, J., Kamber, M. y Pei, J. (2012) "Cluster Analysis: Basic Concepts and Methods", en *Data Mining*. Elsevier Inc., pp. 443–495. doi: 10.1016/B978-0-12-381479-1.00010-1.
- Harger, J. R. E. y Meyer, F. M. (1996) "Definition of indicators for environmentally sustainable development", *Chemosphere*, 33(9), pp. 1749–1775. doi: 10.1016/0045-6535(96)00194-4.
- Hart, R. (1990) "Componentes, subsistemas y propiedades del sistema finca como base para un método de clasificación", en Escobar, G. y Berdegú, J. (eds.) *Tipificación de sistemas de producción agrícola*. Santiago, Chile: Red Internacional de Metodología de Investigación de Sistemas de Producción, pp. 45–62.
- Haug, R. T. (1993) *The practical Handbook of Compost Engineering*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Van Der Heijden, M. G. A., Bardgett, R. D. y Van Straalen, N. M. (2008) "The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems", *Ecology Letters*, 11(3), pp. 296–310. doi: 10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x.
- Hellin, J., Lundy, M. y Meijer, M. (2009) "Farmer organization, collective action and market access in Meso-America", *Food Policy*, 34(1), pp. 16–22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2008.10.003>.
- Hernández-Aguilar, C. (2007) *Una opción en el proceso inicial de investigación bajo perspectiva Transdisciplinaria. Notas de clase*. México.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C. y Baptista-Lucio, P. (2014) *Metodología de la investigación*. 5a ed. McGraw-Hill.
- Herrscher, G. (2008) *Pensamiento Sistémico*. México: Granica.
- Høgh-Jensen, H. (1998) "Systems Theory as a Scientific Approach towards Organic Farming", *Biological Agriculture & Horticulture*, 16(1), pp. 37–52. doi: 10.1080/01448765.1998.9755217.
- Huang, S., Zhang, W., Yu, X. y Huang, Q. (2010) "Effects of long-term fertilization on corn productivity and its sustainability in an Ultisol of southern China", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 138(1–2), pp. 44–50. doi: 10.1016/j.agee.2010.03.015.
- Ibeawuchi, I. I., Iwuanyanwu, U. P., Nze, E. O., Olejeme, O. C. y Ihejirica, G. O. (2015) "Mulches and Organic Manures as Renewable Energy Sources for Sustainable Farming", *Journal of Natural Sciences Research*, 5(2), pp. 139–147.
- INEGI (2009) *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Ahuazotepec, Puebla*. México.

- INEGI (2014a) *Encuesta Nacional Agropecuaria ENA 2014*. México.
- INEGI (2014b) *INEGI: Información por Entidad Federativa y Municipio: Ahuazotepec, Puebla*. Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=21> (Consultado: el 25 de septiembre de 2015).
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2014) *Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero*. Disponible en: <http://gaia.inegi.org.mx/sicc2015/> (Consultado: el 3 de abril de 2017).
- Jackson, M. L. (1970) *Análisis químico de suelos*. 2a. Barcelona: Ediciones Omega.
- Jiang-Tao, L. y Zhang, B. (2007) "Paddy Soil Stability and Mechanical Properties as Affected by Long-Term Application of Chemical Fertilizer and Animal Manure in Subtropical China", *Pedosphere*, 17(5), pp. 568–579.
- Johansen, B. (2013) *Introducción a la teoría de sistemas*. México: Limusa.
- Kanyama-Phiri, G., Wellard, K. y Snapp, S. (2008) "Introduction", en Snapp, S. y Pound, B. (eds.) *Agricultural systems: Agroecology and rural innovation for development*. Academic Press, pp. 1–26.
- Karlen, D., Russell, J. y Mallarino, A. (1998) "A Systems Engineering Approach for Utilizing Animal Manure", en *Animal Waste Utilization*. CRC Press, pp. 283–315. doi: 10.1201/9781439822630.ch10.
- Köbrich, C., Rehman, T. y Khan, M. (2003) "Typification of farming systems for constructing representative farm models: Two illustrations of the application of multi-variate analyses in Chile and Pakistan", *Agricultural Systems*, 76(1), pp. 141–157. doi: 10.1016/S0308-521X(02)00013-6.
- Krishna, K. (2013) *Maize Agroecosystem: Nutrient Dynamics and Productivity*. Canada: Apple Academic Press Inc.
- Krishna, K. (2014) "Agroecosystems: An introduction", en Krishna, K. R. (ed.) *Agroecosystems: Soils, Climate, Crops, Nutrient Dynamics and Productivity*. United States of America: Apple Academic Press Inc., pp. 1–10.
- Kupper, K. C., Bettioli, W., de Goes, a., de Souza, P. S. y Bellotte, J. a M. (2006) *Biofertilizer for control of Guignardia citricarpa, the causal agent of citrus black spot*, *Crop Protection*. doi: 10.1016/j.cropro.2005.09.002.
- Lambert, W. V., McPhee, H., Speh, C., Bishopp, F. C., McCall, M. A., Coons, C. M., Jhonson, S., Moore, E., Larrimer, W. H. y Nichols, M. (1947) *The yearbook of agriculture*. Editado por A. Stefferud. Washington: USDA.
- Lerner, A. M., Eakin, H. y Sweeney, S. (2013) "Understanding peri-urban maize production through an examination of household livelihoods in the Toluca Metropolitan Area, Mexico", *Journal of Rural Studies*, 30(2013), pp. 52–63. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrurstud.2012.11.001>.
- Liu, M., Hu, F., Chen, X., Huang, Q., Jiao, J., Zhang, B. y Li, H. (2009) "Organic amendments with

reduced chemical fertilizer promote soil microbial development and nutrient availability in a subtropical paddy field: The influence of quantity, type and application time of organic amendments”, *Applied Soil Ecology*, 42(2), pp. 166–175. doi: 10.1016/j.apsoil.2009.03.006.

López-Ridaura, S., Masera, O. y Astier, M. (2000) “Evaluating the sustainability of integrated peasantry systems - The MESMIS Framework”, *Ecological indicators*, December 2, pp. 28–30.

López-Ridaura, S., Masera, O. y Astier, M. (2002) “Evaluating the sustainability of complex socio-environmental systems. The MESMIS framework”, *Ecological indicators*. Elsevier, 2(1), pp. 135–148.

López-Ritas, J. y López-Melida, J. (1985) *El diagnóstico de suelos y plantas*. 4a ed. Ediciones Mundi Prensa.

Lorimor, J., Powers, W. y Sutton, A. (2008) “Manure Characteristics”, *Mwps-18*, pp. 1–24.

Lyimo, H. J. F., Pratt, R. C. y Mnyuku, R. S. O. W. (2012) *Composted cattle and poultry manures provide excellent fertility and improved management of gray leaf spot in maize*, *Field Crops Research*. Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.fcr.2011.09.023.

Mafongoya, P., Rusinamhodzi, L., Siziba, S., Thierfelder, C., Mvumi, B. M., Nhau, B., Hove, L. y Chivenge, P. (2016) “Maize productivity and profitability in Conservation Agriculture systems across agro-ecological regions in Zimbabwe: A review of knowledge and practice”, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 220(2016), pp. 211–225. doi: 10.1016/j.agee.2016.01.017.

Manitoba-Agriculture-Food-and-Rural-Development (2015) *Properties of Manure*. Manitoba. Disponible en: <https://www.gov.mb.ca/agriculture/environment/nutrient-management/pubs/properties-of-manure.pdf>.

Marotz-Baden, R., Keating, N. C. y Munro, B. (1995) “Generational differences in the meaning of retirement from farming.”, *Family and Consumer Sciences Research Journal*, 24(1), pp. 29–46. doi: 10.1177/1077727X950241003.

Mascarenhas, A., Coelho, P., Subtil, E. y Ramos, T. B. (2010) “The role of common local indicators in regional sustainability assessment”, *Ecological Indicators*, 10(3), pp. 646–656. doi: 10.1016/j.ecolind.2009.11.003.

Masera, O., Astier, M. y López-Ridaura, S. (1999) *Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco MESMIS*. México: Mundi Prensa.

McGrath, J., Spargo, J. y Penn, C. (2014) “Soil Fertility and Plant Nutrition”, 5, pp. 166–184. doi: 10.1016/B978-0-444-52512-3.00249-7.

McLaughlin, S. P. (1999) *Energy in Ecosystems*. Tucson, AZ: University of Arizona.

Meadows, D. (2008) *Thinking in systems: a primer*. Londres: Earthscan.

Measham, T. G., Preston, B. L., Smith, T. F., Brooke, C., Gorddard, R., Withycombe, G. y Morrison, C. (2011) “Adapting to climate change through local municipal planning:

- Barriers and challenges”, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16(8), pp. 889–909. doi: 10.1007/s11027-011-9301-2.
- Meng, Q., Li, D., Zhang, J., Zhou, L., Ma, X., Wang, H. y Wang, G. (2016) “Soil properties and corn (*Zea mays* L.) production under manure application combined with deep tillage management in solonchic soils of Songnen Plain, Northeast China”, *Journal of Integrative Agriculture*, 15(4), pp. 879–890. doi: 10.1016/S2095-3119(15)61196-0.
- Mera, O. y Caballero, N. (2010) “Importancia del maíz en Mesoamérica a partir de las representaciones prehispánicas”, en *El cultivo del Maíz - Temas Selectos II*. México: Mundi Prensa, pp. 1–14.
- Miron, J., Yosef, E., Nikbachat, M., Zenou, A., Zuckerman, E., Solomon, R. y Nadler, A. (2011) “Fresh dairy manure as a substitute for chemical fertilization in growing wheat forage; effects on soil properties, forage yield and composition, weed contamination, and hay intake and digestibility by sheep”, *Animal Feed Science and Technology*, 168(3–4), pp. 179–187. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2011.04.094.
- Misra, R., Roy, R. y Hiraoka, H. (2003) *On-farm composting methods*. Rome: FAO.
- Moctezuma-López, G., Espinosa-García, J. A., Cuevas-Reyes, V., Jolalpa-Barrera, J. L., Romero-Santillán, F., Vélez-Izquierdo, A. y Bustos-Contreras, D. E. (2010) “Innovación tecnológica de la cadena agroalimentaria de maíz para mejorar su competitividad: estudio de caso en el estado de Hidalgo”, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(1), pp. 101–110.
- Montgomery, D. (2009) *Design and analysis of experiments*. Estados Unidos de América: Wiley.
- Moreno-Casco, J. y Mormeneo-Bernat, S. (2008) “Microbiología y bioquímica del proceso de compostaje”, en Moreno-Casco, J. y Moral-Herrero, R. (eds.) *Compostaje*. Madrid: Mundi Prensa, pp. 111–140.
- Mucheru-Muna, M., Mugendi, D., Pypers, P., Mugwe, J., Kung’u, J., Vanlauwe, B. y Merckx, R. (2014) “Enhancing Maize Productivity and Profitability Using Organic Inputs and Mineral Fertilizer in Central Kenya Small-Hold Farms”, *Experimental Agriculture*, 50(2), pp. 250–269. doi: 10.1017/S0014479713000525.
- Muyayabantu, G. M., Kadiata, B. D. y Nkongolo, K. K. (2013) “Assessing the Effects of Integrated Soil Fertility Management on Biological Efficiency and Economic Advantages of Intercropped Maize (*Zea Mays* L.) and Soybean (*Glycine Max* L.) in DR Congo”, 3(3), pp. 520–541.
- Nazli, R. I., Inal, I., Kusvuran, A., Demirbas, A. y Tansi, V. (2014) “Effects of different organic materials on forage yield and quality of silage maize (*Zea mays* L.)”, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 38, pp. 23–31. doi: 10.3906/tar-1302-62.
- Niculescu, B. (2002) *La transdisciplinariedad. Manifiesto*. Albania: State University of New York.
- Niño-Medina, G., Carvajal-Millán, E., Lizardi, J., Rascon-Chu, A., Marquez-Escalante, J. A., Gardea, A., Martínez-Lopez, A. L. y Guerrero, V. (2009) *Maize processing waste water*

arabinoxylans: Gelling capability and cross-linking content, Food Chemistry. doi: 10.1016/j.foodchem.2009.01.046.

NMX-FF-034/1-SCFI-2002 (2002) *Productos Alimenticios no Industrializados para Consumo Humano - Cereales - Parte I: Maíz Blanco para proceso alcalino para tortillas de maíz y productos de maíz nixtamalizado - Especificaciones y Métodos de prueba.* Secretaría de Economía.

O'Connor, J. y McDermott, I. (1998) *Introducción al pensamiento sistémico.* España: Urano.

Opala, P. A., Jama, B. A., Othieno, C. O. y Okalebo, J. R. (2007) "Effect of Phosphate Fertilizer Application Methods and Nitrogen Sources on Maize in Western Kenya: an Agronomic and Economic Evaluation", *Experimental Agriculture*, 43(4), pp. 477-487. doi: 10.1017/S0014479707005315.

Osundare, F. O. (2013) "Socio-economic study of maize farmers under different production technologies in south west Nigeria", *Journal of Agricultural Technology*, 9(5), pp. 1069-1080.

Parsons, D., Ramírez-Aviles, L., Cherney, J. H., Ketterings, Q. M., Blake, R. W. y Nicholson, C. F. (2009) "Managing maize production in shifting cultivation milpa systems in Yucatan, through weed control and manure application", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 133(2009), pp. 123-134. doi: 10.1016/j.agee.2009.05.011.

Petersen, R. (1994) *Agricultural Field Experiments. Design and Analysis.* United States of America: Marcel Dekker, Inc.

Pettygrove, G. S., Heinrich, A. L. y Crohn, D. M. (2009) "Manure Nitrogen Mineralization", *Time*, pp. 1-5.

Pietola, K., Vare, M. y Lansink, A. O. (2003) "Timing and type of exit from farming: farmers' early retirement programmes in Finland", *European Review of Agricultural Economics*, 30(1), pp. 99-116. doi: 10.1093/erae/30.1.99.

Pimentel, D. y Pimentel, M. (1996) *Food, energy, and society.* Editado por D. Pimentel y M. Pimentel. Niwot, CO: University Press of Colorado.

Pinos-Rodríguez, J. M., García-López, J. C., Peña-Avelino, L. Y., Rendón-Huerta, J. a., González-González, C. y Tristán-Patiño, F. (2012) *Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de américa, Agrociencia.*

Pla, L. (sin fecha) "Biodiversidad: Inferencia basada en el índice de Shannon y la riqueza", *Interciencia.* Asociación Interciencia, 31(8), pp. 583-590. Disponible en: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442006000800008&lng=es&nrm=iso&tlng=es (Consultado: el 2 de julio de 2016).

Potter, C. y Loble, M. (1992) "Ageing and Succession on Family Farms: The Impact on Decision-making and Land Use", *Sociologia Ruralis*, 32(2-3), pp. 317-334. doi: 10.1111/j.1467-9523.1992.tb00935.x.

Powell, J. M. y Williams, T. O. (1993) *Livestock, nutrient cycling and sustainable agriculture in*

the West African Sahel. London: Gatekeeper Series.

- Primo-Yufer, E. y Carrasco-Dorrien, J. M. (1973) *Química Agrícola I. Suelos y fertilizantes*. Madrid: Alhambra.
- Rahman, S. y Rahman, M. S. (2013) "Energy productivity and efficiency of maize accounting for the choice of growing season and environmental factors: An empirical analysis from Bangladesh", *Energy*, 49(1), pp. 329–336. doi: 10.1016/j.energy.2012.10.042.
- Reed, M. S., Fraser, E. D. y Dougill, A. J. (2006) "An adaptive learning process for developing and applying sustainability indicators with local communities", *Ecological Economics*, 59(4), pp. 406–418. doi: 10.1016/j.ecolecon.2005.11.008.
- Reganold, J. P., Papendick, R. . y Parr, J. F. (1990) "Sustainable Agriculture", *Scientific American*, 262(6), pp. 112–121. doi: 10.1038/scientificamerican0690-112.
- Renard, G. y Storr, S. (2014) *Maize CRP Annual Report 2013*. México. Disponible en: <http://maize.org/wp-content/uploads/sites/5/2014/07/MAIZE-CRP-Annual-Report-2013-HQ.pdf>.
- Rodríguez, C. (2009) *Diccionario de Economía*. Disponible en: www.eumed.net/diccionario/dee/dee.pdf. (Consultado: el 28 de junio de 2015).
- Rojas-García, C., García-Lara, S., Serna-Saldivar, S. O. y Gutiérrez-Urbe, J. A. (2012) "Chemopreventive Effects of Free and Bound Phenolics Associated to Steep Waters (Nejayote) Obtained After Nixtamalization of Different Maize Types", *Plant Foods for Human Nutrition*, (67), pp. 94–99. doi: 10.1007/s11130-011-0272-y.
- Romero-Padilla, A., Hernández-Juárez, M., León-Merino, A. y Sangerman-Jarquín, D. M. (2015) "Impacto en el mercado mexicano de maíz en ausencia de políticas de producción de biocombustibles en Estados Unidos de América", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), pp. 1023–1033.
- Romero, C. (2003) "Paradigma de la complejidad, modelos científicos y conocimiento educativo", *Ágora Digital*, I(6), pp. 1–10.
- Roy, S., Arunachalam, K., Dutta, B. K. y Arunachalam, A. (2010) *Effect of organic amendments of soil on growth and productivity of three common crops viz. Zea mays, Phaseolus vulgaris and Abelmoschus esculentus*, *Applied Soil Ecology*. doi: 10.1016/j.apsoil.2010.02.004.
- Ruttan, V. W. (2002) "Productivity Growth in World Agriculture: Sources and Constraints", *Journal of Economic Perspectives*, 16(4), pp. 161–184.
- Rykiel, E. J. (1984) "Modeling agroecosystems: Lessons from ecology", *Agricultural Ecosystems: Unifying Concepts*, R. Lowrance, B. Stinner, and G. House, eds. New York: Wiley, pp. 157–178.
- Rykiel, E. J. (1996) "Testing ecological models: the meaning of validation", *Ecological modelling*. Elsevier, 90(3), pp. 229–244.
- Salazar-Sosa, E., Beltrán-Morales, A., Fortis-Hernández, M., Leos-Rodríguez, J. A., Cueto-Wong, J. A., Vázquez-Vázquez, C. y Peña-Cabriales, J. J. (2003) "Mineralización de nitrógeno en el

suelo y producción de maíz”, *Terra Latinoamericana*, 21(4), pp. 569–575.

Salazar-Sosa, E., Trejo-Escareño, H. I., López-Martínez, J. D., Vázquez-Vázquez, C., Serrato-Corona, J. S., Orona-Castillo, I. y Flores-Márquez, J. P. (2010) “DE MAÍZ FORRAJERO Y PROPIEDADES DEL SUELO Residual Effect of Cow Manure on Silage Corn Yield and Soil Properties”, *Terra Latinoamerica*, 28(4), pp. 381–390.

Salazar-Sosa, E., Trejo-Escareño, H. I., Vázquez-Vázquez, C. y López-Martínez, J. D. (2007) “Producción de maíz bajo riego por cintilla, con aplicación de estiércol bovino”, *Phyton*, 76, pp. 269–285.

Salazar-Sosa, E., Trejo-Escareño, H. I., Vázquez-Vázquez, C., López-Martínez, J. D., Fortis-Hernández, M., Zuñiga-Tarango, R. y Amado-Álvarez, J. P. (2009) *Distribución de nitrógeno disponible en suelo abonado con estiércol bovino en maíz*, *Terra Latinoamerica*.

Salazar-Sosa, E., Vázquez-Vázquez, C., Leos-Rodríguez, J., Fortis-Hernández, M., Montemayo-Trejo, J. A., Figueroa-Viramontes, R. y López-Martínez, J. D. (2004) “Mineralización del estiércol bovino y su impacto en la calidad del suelo y la producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) bajo riego sub-superficial”, *Pyton Revista Internacional de Botánica Experimental*, 10.

Salazar, A. H. y Godínez, G. (2010) “El maíz y sus usos estratégicos”, en *El cultivo del Maíz - Temas Selectos II*. México: Mundi Prensa, pp. 35–47.

Salmerón-Alcocer, A., Rodríguez-Mendoza, N., Pineda-Santiago, V., Cristiani-Urbina, E., Juárez-Ramírez, C., Ruiz-Ordaz, N. y Galíndez-Mayer, J. (2003) “Aerobic treatment of maize-processing wastewater (*nejayote*) in a single-stream multi-stage bioreactor”, *Journal of Environmental Engineering and Science*. NRC Research Press Ottawa, Canada, 2(5), pp. 401–406. doi: 10.1139/s03-046.

Sands, D. M. (2008) “Farming Systems Research: Clarification of Terms and Concepts”, *Experimental Agriculture*. Cambridge University Press, 22(2), p. 87. doi: 10.1017/S0014479700014174.

Šarauskis, E., Buragiene, S., Masilionyte, L., Romanekas, K., Avižienyte, D. y Sakalauskas, A. (2014) “Energy balance, costs and CO₂ analysis of tillage technologies in maize cultivation”, *Energy*, 69, pp. 227–235. doi: 10.1016/j.energy.2014.02.090.

Sartori, L., Basso, B., Bertocco, M. y Oliviero, G. (2005) “Energy use and economic evaluation of a three year crop rotation for conservation and organic farming in NE Italy”, *Biosystems Engineering*, 91(2), pp. 245–256. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2005.03.010.

Saval, S. (2012) “Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado, Presente y Futuro”, *BioTecnología*, 16(2).

Schaller, N. (1993) “Sustainable agriculture and the environment: The concept of agricultural sustainability”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 46, pp. 89–97. doi: 10.1016/0167-8809(93)90016-I.

Schianetz, K. y Kavanagh, L. (2008) “Sustainability Indicators for Tourism Destinations: A Complex Adaptive Systems Approach Using Systemic Indicator Systems”, *Journal of*

- Sustainable Tourism*. Routledge, 16(6), pp. 601–628. doi: 10.1080/09669580802159651.
- Schindler, J., Graef, F., König, H. J., Mchau, D., Saidia, P. y Sieber, S. (2016) “Sustainability impact assessment to improve food security of smallholders in Tanzania”, *Environmental Impact Assessment Review*, 60(2016), pp. 52–63. doi: 10.1016/j.eiar.2016.04.006.
- Schröder, J. J., Vermeulen, G. D., van der Schoot, J. R., van Dijk, W., Huijsmans, J. F. M., Meuffels, G. J. H. M. y van der Schans, D. a. (2015) *Maize yields benefit from injected manure positioned in bands*, *European Journal of Agronomy*. Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.eja.2014.12.011.
- Scipioni, A., Mazzi, A., Mason, M. y Manzardo, A. (2009) “The Dashboard of Sustainability to measure the local urban sustainable development: The case study of Padua Municipality”, *Ecological Indicators*, 9(2), pp. 364–380. doi: 10.1016/j.ecolind.2008.05.002.
- Sheaffer, C. C. y Moncada, M. . (2012) *Introduction to Agronomy: Food, Crops, and Environment*. 2nd ed. Canada: Cengage Learning.
- SIAP (2015) *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/produccion-agropecuaria/>. (Consultado: el 25 de septiembre de 2015).
- SIAP (2016a) *Atlas agroalimentario 2016*. México: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: http://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2016/Atlas-Agroalimentario-2016.
- SIAP (2016b) *Avance de Siembras y Cosechas. Resumen por estado*. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do (Consultado: el 25 de noviembre de 2016).
- SIAP (2016c) *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP)*. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/produccion-agropecuaria/> (Consultado: el 20 de julio de 2016).
- Van Soest, P. (2014) *The Detergent System for Analysis of Food Stuffs*. Ithaca: Department of Animal Science, Cornell University.
- Sokal, R. R. (1977) “Clustering and classification: Background and current directions”, en Van Ryzin, J. (ed.) *Classification and clustering*. New York: Academic Press, INC., pp. 1–15.
- Soria-Fregoso, M. J., Ferrera-Cerrato, R., Etchevers-Barra, J. D., Alcántar-González, G., Trinidad-Santos, J., Borges-Gómez, L. y Pereyda-Pérez, G. (2001) *Biodigestion of Hog Slurry to Produce Biomanure*, *Terra*.
- Speelman, E. N., López-Ridaura, S., Colomer, N. A., Astier, M. y Masera, O. (2007) “Ten years of sustainability evaluation using the MESMIS framework: Lessons learned from its application in 28 Latin American case studies”, *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 14(4), pp. 345–361. doi: 10.1080/13504500709469735.
- Sweeney, S., Steigerwald, D. G., Davenport, F. y Eakin, H. (2013) “Mexican maize production: Evolving organizational and spatial structures since 1980”, *Applied Geography*. Elsevier Ltd, 39(2013), pp. 78–92. doi: 10.1016/j.apgeog.2012.12.005.

- Terry, E., Leyva, A. y Díaz, M. (2006) "Biofertilizantes y productos bioactivos, alternativas para la asociación maíz-tomate en el período temprano de siembra", *Cultivos Tropicales*, 27(2), pp. 5-11. Disponible en: <http://www.redalyc.org:9081/articulo.oa?id=193215872001>.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R. y Polasky, S. (2002) "Agricultural sustainability and intensive production practices.", *Nature*, 418(6898), pp. 671-677. doi: 10.1038/nature01014.
- Trejo-Escareño, H. I., Salazar-Sosa, E., López-Martínez, J. D. y Vázquez-Vázquez, C. (2013) "Impacto del estiércol bovino en el suelo y producción de forraje de maíz / Impact of cow manure in soil and corn forage production", *Revista mexicana de ciencias agrícolas VO - 4*, 4(5), p. 727. Disponible en: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edssci&AN=edssci.S2007.09342013000500006&lang=es&site=eds-live>.
- Trinidad-Santos, A. (2007) *Abonos orgánicos, Sistema de Agronegocios Agrícolas*. Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasCOUSSA/Abonosorganicos.pdf>.
- Trinidad-Santos, A. (2010) *Utilización de estiércoles*. SAGARPA.
- USDA (2010a) "Composting", en *National Engineering Handbook*. United States: USDA NRCS, p. 97. Disponible en: <https://directives.sc.gov.usda.gov/viewerFS.aspx?id=3850>.
- USDA (2010b) *Composting*. United States of America: USDA NRCS.
- USDA (2016) *Crop production 2015 summary*. Estados Unidos de América: USDA.
- Uzcanga, N. G., Cano, G. A., Ramírez, S. J. y Tun, D. J. (2015) "Características socioeconómicas y rentabilidad de los sistemas de producción de maíz bajo condiciones de temporal de la península de Yucatán, México.", *Revista Mexicana de Agronegocios*, 37, pp. 173-184.
- Valderrama-Bravo, C., Gutiérrez-Cortez, E., Contreras-Padilla, M., Oaxaca-Luna, A., Real López, A. Del, Espinosa-Arbelaez, D. G. y Rodríguez-García, M. E. (2013) *CyTA -Journal of Food Physico-mechanic treatment of nixtamalization by-product (nejayote) Physico-mechanic treatment of nixtamalization by-product (nejayote) Tratamiento físico-mecánico de un subproducto de la nixtamalización (nejayote)*. doi: 10.1080/19476337.2013.781680.
- Valderrama-Bravo, C., Gutiérrez-Cortez, E., Contreras-Padilla, M., Rojas-Molina, I., Mosquera, J. C., Rojas-Molina, A., Beristain, F. y Rodríguez-García, M. E. (2012) *Constant pressure filtration of lime water (nejayote) used to cook kernels in maize processing, Journal of Food Engineering*. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.12.018.
- Valencia-Islas, C. y Hernández, B. (1998) *Manual de prácticas para la caracterización física y química de muestras de suelo y de composta*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Valentín-Garrido, J. ., León-Merino, A., Hernández-Juárez, M., Sangerman-Jarquín, D. M. y Valtierra-Pacheco, E. (2016) "Evaluación del programa PROAGRO productivo en comunidades rurales de la sierra norte de Puebla", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*,

7(2), pp. 413–425.

- Vasileiadis, V. P., Moonen, A. C., Sattin, M., Otto, S., Pons, X., Kudsk, P., Veres, A., Dorner, Z., van der Weide, R., Marraccini, E., Pelzer, E., Angevin, F. y Kiss, J. (2013) “Sustainability of European maize-based cropping systems: Economic, environmental and social assessment of current and proposed innovative IPM-based systems”, *European Journal of Agronomy*, 48(2013), pp. 1–11. doi: 10.1016/j.eja.2013.02.001.
- VasstrÃ,m, M., Christensen, D., Sriskandarajah, N. y Lieblein, G. (2008) “Facilitating Agricultural Innovation and Learning through Systemic Action Research”, *Innovation Systems and Rural Development.*, 27, p. 101.
- Vázquez-Carrillo, G., García-Lara, S., Salinas-Moreno, Y., Bergvinson, D. J. y Palacios-Rojas, N. (2011) “Grain and Tortilla Quality in Landraces and Improved Maize Grown in the Highlands of Mexico”, *Plant Foods for Human Nutrition*, 66(2), pp. 203–208. doi: 10.1007/s11130-011-0231-7.
- Vázquez-Carrillo, M. G., Arellano-Vázquez, J. L. y Santiago-Ramos, D. (2015) “Rendimiento y calidad de grano y tortilla de maíces híbridos de valles altos de México crecidos en riego y temporal”, *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(1), pp. 75–83.
- Velasco-Martinez, M., Angulo, O., Vazquez-Couturier, D., Arroyo-Lara, A. y Monroy-Rivera, J. (1997) “Effect of dried solids of nejayote on broiler growth”, *Poultry Science*. Oxford University Press, 76(11), pp. 1531–1534. doi: 10.1093/ps/76.11.1531.
- Von-Gigch, P. (2012) *Teoría general de sistemas*. 3a. México: Trillas.
- Waites, M. J., Morgan, N. L., Rockey, J. S. y Higton, G. (2001) *Industrial Microbiology: An Introduction*, *International Journal of Food Microbiology*. London: Blackwell Science. doi: 10.1016/S0168-1605(02)00154-X.
- Wang, X., Ren, Y., Zhang, S., Chen, Y. y Wang, N. (2017) “Applications of organic manure increased maize (*Zea mays* L.) yield and water productivity in a semi-arid region”, *Agricultural Water Management*, 187, pp. 88–98. doi: 10.1016/j.agwat.2017.03.017.
- Welde, K. y Gebremariam, H. L. (2016) “Effect of different furrow and plant spacing on yield and water use efficiency of maize”, *Agricultural Water Management*. Elsevier B.V., 177, pp. 215–220. doi: 10.1016/j.agwat.2016.07.026.
- von Wirén-Lehr, S. (2001) “Sustainability in agriculture—an evaluation of principal goal-oriented concepts to close the gap between theory and practice”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Elsevier, 84(2), pp. 115–129.
- Wu, S. C., Cao, Z. H., Li, Z. G., Cheung, K. C. y Wong, M. H. (2005) *Effects of biofertilizer containing N-fixer, P and K solubilizers and AM fungi on maize growth: A greenhouse trial*, *Geoderma*. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.07.003.
- Young, J. W. S. (1997) “A framework for the ultimate environmental index—putting atmospheric change into context with sustainability”, *Environmental Monitoring and Assessment*. Springer, 46(1–2), pp. 135–149.

- Yunlong, C. y Smit, B. (1994) "Sustainability in agriculture: a general review", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 49(3), pp. 299–307. doi: 10.1016/0167-8809(94)90059-0.
- Zangeneh, M., Omid, M. y Akram, A. (2010) "A comparative study on energy use and cost analysis of potato production under different farming technologies in Hamadan province of Iran", *Energy*, 35(7), pp. 2927–2933. doi: 10.1016/j.energy.2010.03.024.
- Zarazúa-Escobar, J. A., Almaguer-Vargas, G. y Ocampo-Ledesma, J. G. (2011) "El programa de apoyos directos al campo (PROCAMPO) y su impacto sobre la gestión del conocimiento productivo y comercial de la agricultura del estado de México", *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 8(1), pp. 89–105.
- Zepeda-Bautista, R., Carballo-Carballo, A. y Hernández-Aguilar, C. (2009) "Interacción genotipo-ambiente en la estructura y calidad del nixtamal-tortilla del grano en híbridos de maíz", *Agrociencia*, 43(7), pp. 695–706.

ANEXOS



ANEXOS

Anexo 1. Productividad

Artículos

Dominguez-Hernandez, M., Zepeda-Bautista, R., Valderrama-Bravo, C., Dominguez-Hernandez, E. y Hernández-Aguilar, C. (2018) "Sustainability assessment of traditional maize (*Zea mays* L.) agroecosystem in Sierra Norte of Puebla, Mexico", *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 42:4, 383-406. doi.org/10.1080/21683565.2017.1382426

AGROECOLOGY AND SUSTAINABLE FOOD SYSTEMS
2018, VOL. 42, NO. 4, 383–406
<https://doi.org/10.1080/21683565.2017.1382426>

 Taylor & Francis
Taylor & Francis Group



Sustainability assessment of traditional maize (*Zea mays* L.) agroecosystem in Sierra Norte of Puebla, Mexico

Martha E Dominguez-Hernandez^{a,b}, Rosalba Zepeda-Bautista^a,
María del Carmen Valderrama-Bravo^{c,d}, Elisa Dominguez-Hernandez^a,
and Claudia Hernandez-Aguilar^a

^aInstituto Politécnico Nacional, Sección de Posgrado e Investigación, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco, Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos'. Col. Lindavista, México, Ciudad de México México; ^bFacultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Departamento de Ciencias Agrícolas, Edo. de México, México; ^cFacultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Departamento de Ingeniería y Tecnología, Edo. de México, México; ^dFacultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Departamento de Matemáticas, Edo. de México, México

ABSTRACT
The sustainability of the traditional maize agroecosystem in Ahuazotepec, Mexico, was evaluated using a cluster analysis for the typification of the producers and the Framework for Assessing the Sustainability of Natural Resource Management Systems approach for the sustainability assessment. Results revealed three groups within the agroecosystem: low-traditional, medium-traditional, and transition. Clusters differed in grain yield, income, age, education, organization, production practices, and complementary economic activities. Sustainability evaluation showed that productivity was the most influential attribute as the grain yield determined how efficiently the production resources are utilized, which in turn influences some environmental and social attributes. Information obtained allows the generation of a baseline and specific suggestions for improving sustainability of the clusters.

ARTICLE HISTORY
Received 20 February 2017
Revised 15 September 2017
Accepted 18 September 2017

KEYWORDS
Sustainability;
agroecosystem; maize;
cluster analysis; MESMIS

Participación en Congresos

Domínguez-Hernández, Martha E., Zepeda-Bautista, R. Domínguez-Hernández, E., Hernández-Aguilar, C., Domínguez-Pacheco, A. *Eficiencia energética y productividad del agroecosistema maíz con el uso de fertilizantes orgánicos*. En: VIII Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. Ciudad de México. 21 de Octubre de 2016.

ARTÍCULO No. 52
ARTÍCULO

8º CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA
ELECTROMECÁNICA Y DE SISTEMAS (CIES 2016)

SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Escuela Politécnica Superior
de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas

Eficiencia energética y productividad del agroecosistema maíz con el uso de fertilizantes orgánicos
Energy efficiency and productivity of the maize agroecosystem with the use of organic fertilizers

M. E. Domínguez-Hernández¹, R. Zepeda-Bautista¹, E. Domínguez-Hernández², M. C. Valderrama-Bravo³, C. Hernández-Aguilar¹, F. A. Domínguez-Pacheco¹

Resumen. En Ahauztepec, Puebla, México, el sistema de producción maíz (*Zea mays* L.) es importante, pero tiene un rendimiento de grano promedio bajo (1.83 Mg ha⁻¹); se requiere aumentarlo mediante el uso eficiente de los recursos naturales, humanos y financieros. Por ello, se evaluó el efecto de fertilizantes orgánicos sobre el rendimiento de grano, la relación beneficio-costo y la eficiencia energética del agroecosistema maíz. Durante el ciclo agrícola primavera-verano 2015, se evaluaron tres fertilizantes orgánicos (75 m³ najayote, 25 Mg de estiércol de ovino y una combinación de ambos: 75 m³ najayote + 25 Mg de estiércol) por hectárea y una fertilización química con la dosis 120N-60P-30K. Los tratamientos no presentaron diferencias significativas ($P = 0.379$) para rendimiento; sin embargo, la aplicación de la mezcla Najayote + Estiércol incrementó el rendimiento en 5.4 % en comparación con la Fertilización química. El tratamiento con Estiércol generó mayor retorno económico, pero también requiere el mayor aporte de energía debido a las altas dosis de estiércol aplicadas (25 Mg de estiércol = 300 kg de urea por ha). La ponderación de los diferentes criterios mostró que la aplicación de estiércol de ovino sería la opción que aporta mayores beneficios para el agroecosistema maíz estudiado.

Palabras Clave: *Zea mays* L., eficiencia energética, costo-beneficio, najayote, estiércol, rendimiento.

Abstract. In Ahauztepec, Puebla, México the maize production is important, but the average grain yield is low (1.83 Mg ha⁻¹). It is crucial to increase this value with an efficient use of environmental, human and economic resources. The aim of this study was to evaluate the effect of organic fertilizers on three variables: grain yield, cost-benefit and energy efficiency of the

¹ Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatecas. Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", Sección de Purguato e Investigación. Cd. Lindavista, Cd. de México. C. P. 07738. México. agromat@ipn.mx

² Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México, Km 2.5 Carr. Cuautitlán Teotihuacan, C.P. 54714, Cuautitlán, Estado de México, México.

³ Department of Food and Environmental Sciences, University of Helsinki, 00014 Helsinki, Finland.

México D.F., 17 al 21 de octubre 2016

maize agroecosystem. During the 2015 Spring-Summer cycle. Three organic fertilizers (75 m³ lime water, 25 Mg of sheep manure, and a combination of both: 75 m³ lime water + 25 Mg manure) and a synthetic fertilizer (120N - 60P - 30K) were evaluated. No significant differences in measured yield in the different treatments ($P = 0.379$) were observed, however the application of the mixture Lime water + Manure increased grain yield 5.4% compared to the Chemical fertilizer treatment. Treatment with sheep manure generates higher economic return, but also requires more energy input due to the high doses of manure applied (25 Mg of manure = 300 kg of urea). After the different criteria were weighed, it was determined that the application of organic fertilizers, based on sheep manure, would be the most beneficial option for the maize agroecosystem evaluated.

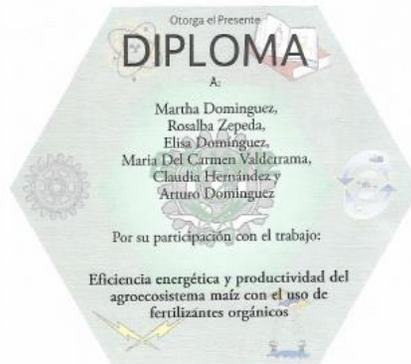
Keywords: *Zea mays* L., Energy Efficiency, Cost - Benefit, Lime water, Manure, yield.

1. INTRODUCCIÓN

En la agricultura tradicional y en los sistemas de enfoque agroecológico, los estiércoles y residuos de cosechas han sido aplicados con el fin de proporcionar nutrientes a los cultivos, para aumentar los rendimientos y la fertilidad del suelo; sin embargo, en la agricultura y ganadería intensivas los estiércoles pasaron de ser recursos a ser desechos de los sistemas de producción con lo que se provocan impactos ambientales negativos debido a la emisión de gases contaminantes y la contaminación de cuerpos hídricos, la disminución de contenido de carbono y de la actividad microbiana y la capacidad de retención de humedad en el suelo [1, 2].

El maíz requiere la aplicación de nutrientes para lograr rendimientos mayores, los principales son el nitrógeno, el fósforo y el potasio; estos nutrientes pueden obtenerse del suelo o a través de fertilizantes químicos, estiércoles y residuos de cosecha [3]. La utilización de estiércoles en el

VIII
CIES
VIII Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas



Ciudad de México, 17 al 21 de octubre de 2016

DR. MIGUEL TOLEDO VELÁZQUEZ
Jefe de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME, Unidad Zacatecas

DR. RICARDO OCTAVIO MOTA PALOMINO
Director de la ESIME, Unidad Zacatecas



Domínguez-Hernández, Martha E., Cuervo-Usán, Y., Zepeda-Bautista, R. Valderrama-Bravo, M.C., *A Efecto de la aplicación de diferentes fertilizaciones en la microflora del suelo*. En: 2º Congreso Universitario de Ciencias Agroalimentarias. Cuautitlán Izcalli, Estado de México. 7 de abril de 2017.

Efecto de la aplicación de diferentes fertilizaciones en la microflora del suelo

Resumen: Considerando la importancia de la microflora en el establecimiento y desarrollo de los cultivos, el objetivo del trabajo fue determinar el efecto de diferentes fertilizaciones en el número de unidades formadoras de colonias (UFC) de los microorganismos en un suelo cultivado con maíz. El estudio se realizó en un campo de experimentación, donde se aplicó un tratamiento con 10 fertilizaciones (T0 a T9) con un cultivo de maíz. Los tratamientos se asignaron en bloques completos al azar considerando tres repeticiones.

Introducción: El uso excesivo de fertilizantes químicos y el manejo agropecuario convencional contribuyen a la reducción de la actividad microbiana y al contenido de materia orgánica en los suelos lo que genera una disminución en la calidad de los mismos (Díaz et al. 2010). Otra de las consecuencias de no aplicar estiércol al suelo es la disminución del contenido de carbono y el consiguiente detrimento en la estabilidad del agua en los agregados del suelo, de la actividad microbiana, de la retención de nutrientes y de la capacidad de retención de agua (Carrán, Rosal, and Martínez 1997). Las aplicaciones de abonos orgánicos favorecen la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Li et al. 2009; Nairi et al. 2014), también tienen un efecto positivo en la actividad microbiana (Díaz et al. 2013). Por ello, el contenido de microorganismos puede ser un indicador relacionado con la calidad de los suelos agrícolas.

Materiales y métodos: El trabajo de investigación se estableció en el municipio de Ahuazotepc, Puebla, México durante el ciclo primavera-verano 2015. La parcela experimental se localiza en las coordenadas 20° 51' 47" N y 96° 57' 15.4" O a una altitud de 2148 metros (Figura 1). Se estableció un experimento en bloques al azar con 10 tratamientos.

Resultados y Discusión: Las diferencias entre tratamientos no fueron estadísticamente significativas ($P > 0.05$) para los variables estudiadas. Sin embargo, el tratamiento T3 tuvo el mayor incremento promedio (46 UFC) mientras que el fertilizante químico únicamente incrementó en 10 unidades; el tratamiento donde se usó estiércol y abono tuvo una disminución de 34 unidades durante el ciclo de producción (Figura 4). El incremento en el número de UFC en los tratamientos con estiércol coincide con el aumento de la actividad microbiana reportada por Díaz et al. (2013); Díaz et al. (2010).

Conclusiones: La fertilización con fuentes orgánicas y orgánicas tiene una influencia positiva en la cantidad de microorganismos presentes en el suelo comparadas con tratamientos sin fertilización. La respuesta en los tratamientos con estiércol incrementos en promedio 78 % el número de UFC, mientras que el incremento con fertilización química es de 25 %.

Referencias: Díaz, E., y C. E. Valencia Islas. 2010. "Efecto de diferentes fertilizaciones en la microflora del suelo." *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1(1): 1-10. Díaz, E., y C. E. Valencia Islas. 2013. "Efecto de diferentes fertilizaciones en la microflora del suelo." *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4(1): 1-10. Díaz, E., y C. E. Valencia Islas. 2014. "Efecto de diferentes fertilizaciones en la microflora del suelo." *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5(1): 1-10. Carrán, J., J. Rosal, and J. Martínez. 1997. "Efecto de diferentes fertilizaciones en la microflora del suelo." *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8(1): 1-10. Li, X., et al. 2009. "Efecto de diferentes fertilizaciones en la microflora del suelo." *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10(1): 1-10. Nairi, et al. 2014. "Efecto de diferentes fertilizaciones en la microflora del suelo." *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 15(1): 1-10. Díaz, E., et al. 2013. "Efecto de diferentes fertilizaciones en la microflora del suelo." *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4(1): 1-10. Díaz, E., et al. 2010. "Efecto de diferentes fertilizaciones en la microflora del suelo." *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1(1): 1-10.

Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

Otorgan la presente

CONSTANCIA

A: M. E. Domínguez-Hernández, Y. Cuervo-Usán, R. Zepeda-Bautista y M. C. Valderrama-Bravo

Por su participación como ponentes con la conferencia Efecto de la aplicación de diferentes fertilizaciones en la microflora del suelo. Realizado del 3 al 7 de abril de 2017, en las instalaciones de la FES Cuautitlán.

"Por mi raza hablará el espíritu" Cuautitlán Izcalli, Estado de México, abril de 2017.

M. en C. Jorge Alfredo Cuéllar Ordaz Director de la Facultad

Domínguez-Hernández, Martha E., Valencia-Islas, Celia E. *Efecto de diferentes fertilizaciones en la variabilidad espacial de un suelo cultivado con Maíz en Ahuazotepc, Puebla.* En: 2º Congreso Universitario de Ciencias Agroalimentarias. Cuautitlán Izcalli, Estado de México. 7 de abril de 2017.

Efecto de diferentes fertilizaciones en la variabilidad espacial de un suelo cultivado con maíz en Ahuazotepc, Puebla

Resumen: El objetivo del trabajo fue estudiar la variabilidad espacial del contenido de nitrógeno, fósforo, potasio y materia orgánica en un suelo cultivado con maíz. El estudio se realizó en el municipio de Ahuazotepc, Puebla, México durante el ciclo primavera-verano 2015. La parcela experimental se localiza en las coordenadas 20° 51' 47" N y 96° 57' 15.4" O a una altitud de 2148 metros (Figura 1). Se estableció un experimento con 10 fertilizaciones (T0 con mezcla de materia orgánica y química) con un cultivo de maíz. Los tratamientos se asignaron en bloques completos al azar considerando tres repeticiones.

Introducción: La variabilidad del suelo está presente incluso en parcelas pequeñas y es el resultado de diferencias en la textura, la profundidad, la capacidad de retención de humedad, el drenaje y las estructuras dispuestas, entre otros factores; cuando el grado de variabilidad del suelo es casado, es posible reducir su efecto en el error experimental mediante la elección del diseño experimental adecuado, el tamaño, la forma y la orientación de las unidades (Gentner 1994). La variabilidad espacial del suelo dentro de una parcela experimental no tiene un patrón físico de distribución, por lo que puede ser modificada por el manejo agrícola y la escala de muestreo (Braz et al. 2002). De acuerdo con Wang et al. (2017) los mapas de variabilidad espacial son una herramienta útil para el manejo de nutrientes y que permite la optimización de costos a pequeña escala.

Materiales y métodos: El trabajo de investigación se estableció en el municipio de Ahuazotepc, Puebla, México durante el ciclo primavera-verano 2015. La parcela experimental se localiza en las coordenadas 20° 51' 47" N y 96° 57' 15.4" O a una altitud de 2148 metros (Figura 1). Se estableció un experimento con 10 fertilizaciones (Tabla 1) para un cultivo de maíz, los tratamientos se asignaron en bloques completos al azar considerando tres repeticiones.

Resultados y Discusión: Las variaciones espaciales no presentaron diferencias estadísticas por efectos de los tratamientos aplicados: porcentaje de materia orgánica ($P = 0.302$), nitrógeno amoniacal ($P = 0.512$), nitrógeno nítrico ($P = 0.964$), fósforo ($P = 0.050$) y potasio ($P = 0.265$). De la Figura 2 se muestran los mapas de variabilidad espacial del porcentaje de materia orgánica.

Conclusiones: Las fertilizaciones aplicadas no generaron diferencias estadísticas para el contenido de nitrógeno, fósforo, potasio y materia orgánica. Sin embargo, se encontraron diferencias espaciales en la parcela e incrementos en el rendimiento con los tratamientos con estiércol donde el contenido de nitrógeno orgánico fue mayor.

Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

Otorgan la presente

CONSTANCIA

A: Martha Elena Domínguez Hernández y Celia Elena Valencia Islas

Por su participación como ponentes con la conferencia Efecto de diferentes fertilizaciones en la variabilidad espacial de un suelo cultivado con maíz en Ahuazotepc, Puebla. Realizado del 3 al 7 de abril de 2017, en las instalaciones de la FES Cuautitlán.

"Por mi raza hablará el espíritu" Cuautitlán Izcalli, Estado de México, abril de 2017.

M. en C. Jorge Alfredo Cuéllar Ordaz Director de la Facultad

Cursos impartidos

Tecnologías para mejorar la producción de maíz para grano. Impartido para productores del municipio de Ahuazotepec, Puebla. 19 de Marzo de 2016. Duración: 8 horas.



CURSO

Tecnología para la producción de maíz para grano

Fecha: 19 de marzo de 2016

Lista de asistencia

No.	Nombre	Ocupación	Córeo electrónico y/o teléfono	Firma
1	Pedro Gerardo Botto	Campecano	776 7695904 botto.pedro@gmail.com	<i>[Firma]</i>
2	Lina Amador Martínez		776 7699924 lina-amador@hotmail.com	<i>[Firma]</i>
3	Enrique Amador Zapata	Campecano	7761079979	<i>[Firma]</i>
4	JOSÉ CELEDONIO DOMÍNGUEZ HERNÁNDEZ CAMPECANO		776-126-73-77	<i>[Firma]</i>
5	María Elena Martínez Fuentes		7761010972 mariaelena_martinez@outlook.com	<i>[Firma]</i>
6	Eric Cupeño Lozada et.	Campecano	lamar@ahua.com.mx 776103177-7761054899	<i>[Firma]</i>
7	CRISPIN HERNANDEZ SANCHEZ	Campecano	7761063248	<i>[Firma]</i>
8	José Manuel Flores	Campecano	7767696321	<i>[Firma]</i>
9	Manuel León H.	Agricultor		<i>[Firma]</i>
10	José Rubén Domínguez C.	Campecano	yanuchera.comod@12	<i>[Firma]</i>
11	Rafael Florencio D	Campecano	7761143198	<i>[Firma]</i>

Folleto para productores de maíz



Manual Tecnología para la producción de maíz en el municipio de Ahuazotepec, Puebla

Martha Elena Domínguez Hernández^{1,2}
Rosalba Zepeda Bautista¹
María del Carmen Valderrama Bravo²



¹ Instituto Politécnico Nacional - ESIME Zacateco - Doctorado en Ingeniería de Sistemas

² Universidad Nacional Autónoma de México - Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

Anexo 2. Encuesta para el diagnóstico de la situación actual del agroecosistema maíz en el municipio de Ahuazotepec, Puebla.

ENCUESTA PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL DEL AGROECOSISTEMA MAÍZ EN EL MUNICIPIO DE AHUAZOTEPEC, PUEBLA					
<p>El presente cuestionario es parte del proyecto de investigación doctoral de la M. en I Martha Elena Domínguez Hernández en el Instituto Politécnico Nacional (IPN), cuyo objetivo es contribuir a la mejora del agroecosistema maíz, mediante un diagnóstico del estado actual de dicho cultivo en el municipio de Ahuazotepec, Puebla.</p> <p>La información que se recibe es confidencial y será procesada de manera general para destacar resultados promedio del sistema de producción. En ningún momento se procesará información específica sobre su opinión o unidad de producción.</p>					Número:
Información general					
Fecha:		Localidad:		Municipio:	Ahuazotepec
				Estado:	Puebla
Ubicación geográfica de la unidad de producción					
Latitud		Longitud		Altitud (msnm)	
Datos del productor					
Nombre					
	Nombre(s)		Apellido paterno		Apellido materno
Dirección					
	Calle y número				
Edad		Sexo		Femenino	Masculino
Tiene alguna discapacidad	No	Si	¿Cuál?		
Sabe leer y escribir	No	Si			
Escolaridad					
Primaria	1) Completo	2) Incompleto ¿cuántos años?			
Secundaria	1) Completo	2) Incompleto ¿cuántos años?			
Técnica	1) Completo	2) Incompleto ¿cuántos años?			
Preparatoria	1) Completo	2) Incompleto ¿cuántos años?			
Licenciatura	1) Completo	2) Incompleto ¿cuántos años?		¿Cuál?	
Posgrado	1) Completo	2) Incompleto ¿cuántos años?		¿Cuál?	
Organización para la producción					
¿Forma parte de alguna asociación para la producción?					
Asociación de productores	de	Si	No	Nombre	
Múltiples de ramos		Si	No	Nombre	

En caso de formar parte de alguna organización:

¿Cuánto tiempo tiene como asociado? _____

¿Hace cuánto tiempo se formó la organización? _____

¿Cuántos socios la integran? _____

¿Considera que ha recibido beneficios al formar parte de dicha asociación? No Si

¿Cuáles? _____

Información económica

Número de dependientes económicos		Menores de 18 años		Mayores de 18 años	
-----------------------------------	--	--------------------	--	--------------------	--

Número de personas empleadas en el predio		Permanentes		Eventuales	
		Familiares permanentes		Familiares eventuales	

Ingreso total del productor (Pesos por semana)

Menos de 900	
Entre 901 y 1800	
Entre 1801 y 3000	
Entre 3001 y 5000	
Más de 5000	

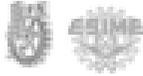
Aportación de la actividad agrícola en el ingreso del productor (INDICAR SOLO UNA)

Aporta menos del 50 %	
Aporta más del 50 % pero menos del 100 %	
Es la única fuente de ingresos (100%)	

¿Realiza otra actividad económica? No Si

Agricultura	Cultivo	Superficie sembrada (hectáreas)	Rendimiento

Ganadería	Especie	Número de cabezas	Producción/unidad de medida



ENCUESTA PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL DEL AGROECOSISTEMA MAÍZ EN EL MUNICIPIO DE AHUAZOTEPEC, PUEBLA



Forestal

Especie

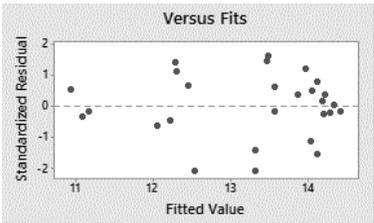
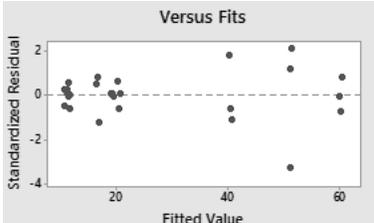
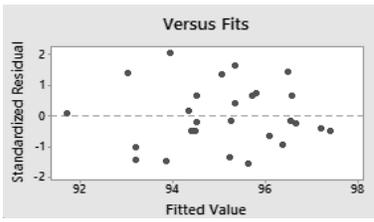
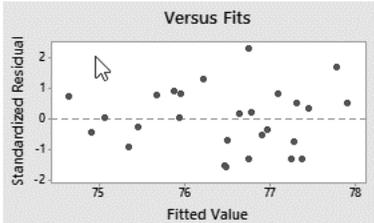
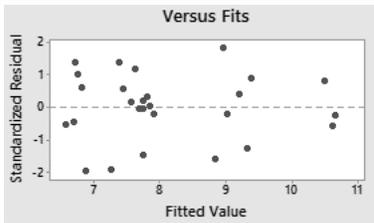
Superficie sembrada (hectáreas)

Metros cúbicos/año

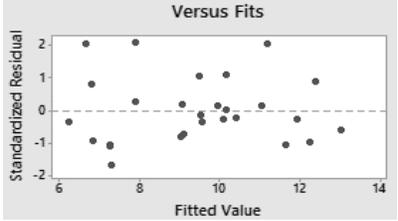
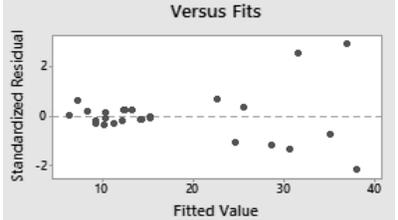
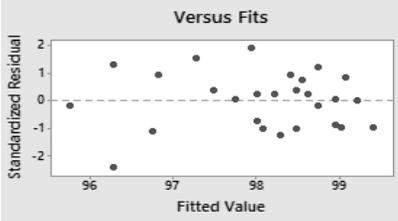
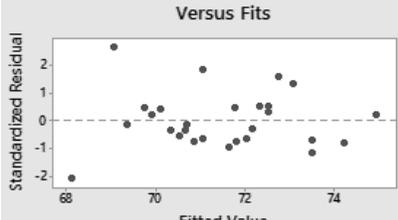
Problemática	
Limitantes	Descripción (¿En qué etapa se presenta?, ¿por qué lo considera un problema?)
Asesoría técnica	
Capacitación	
Mano de obra	
Insumos	
Disponibilidad de riego	
Capital	
Herramientas o equipo	
Comercialización	
Almacenaje	
Maquinaria o implementos	
Tenencia de la tierra	
Acceso a créditos	
Otros	

Nombre y firma del entrevistador

Anexo 3. Resultados pruebas de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia Ahuazotepec, Puebla, 2015

Variable	Ciclo	Normalidad (Anderson - Darling)	Homogeneidad de varianzas (Bartlett)	Independencia (Residuos vs ajustes)
Rendimiento	PV - 2015	P = 0.449	P = 0.706	
Eficiencia energética	PV - 2015	P = 0.061	P = 0.476	
Tamaño de grano	PV - 2015	P = 0.150	P = 0.967	
Peso hectolítrico	PV - 2015	P = 0.511	P = 0.928	
Beneficio Costo	PV - 2015	P = 0.084	P = 0.664	

**Resultados pruebas de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia
Ahuazotepec, Puebla, 2016.**

Variable	Ciclo	Normalidad (Anderson - Darling)	Homogeneidad de varianzas (Bartlett)	Independencia (Residuos vs ajustes)
Rendimiento	PV - 2016	P = 0.259	P = 0.451	
Eficiencia energética	PV - 2016	P = 0.057	P = 0.526	
Tamaño de grano	PV - 2016	P = 0.504	P = 0.301	
Peso hectolátrico	PV - 2016	P = 0.123	P = 0.724	
Beneficio Costo	PV - 2016	P = 0.514	P = 0.227	