

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



EFFECTOS DE INOCULANTES BIOLÓGICOS SOBRE LA CAPTURA DE CO<sub>2</sub> EN CULTIVOS DE PAPAS NATIVAS (*Solanum tuberosum subesp. andigena*) SECTOR SAÑAYCA, PROVINCIA DE AYMARAES.

Tesis presentado para optar al título profesional de Ingeniero Agrónomo por el Bachiller en Ciencias Agrarias **Freddy Alex Carrizales Vilchez**.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Economía Agrícola y Ambiental

ASESOR: Dr. Francisco Medina Raya

ABANCAY - APURÍMAC

2019

## DEDICATORIA

A mi madre, que desde mis primeros pasos siempre estuvo para guiarme, transmitirme la pasión y el amor que uno encuentra en el fascinante mundo del saber y demostrarme que los imposibles no existen. Tú, mi leona enseñando a su cachorro que ya no hay marcha atrás.

A Yudy Bazan Ancco, mi bella princesa, por confiar en mí actuando de manera incondicional, compartiendo parte de su tiempo para robarme sonrisas y ser mi lucero cuando transitaba por un oscuro sendero. Por el amor que nos tenemos y los deseos furiosos de un mejor porvenir; son los motivos que tengo para cada día ser mejor para ti.

**Freddy Alex.**

## AGRADECIMIENTO

A Ronal Carrasco León, Huber Vera Velasquez, Billy Yoel Ortiz Polo, Yury Guevara Alvarez y David Recharte Pineda con quienes compartí gratas experiencias tanto en lo personal como en el campo profesional además del gran apoyo moral y humano, necesarios en los momentos difíciles de esta profesión.

Al Mg Sc. Mario Humberto Taipe Cancho, por sus comentarios y sugerencias.

Al Ing. Ladislao Palomino Flores, agronomista dedicado a la investigación del cultivo de papas nativas de quien aprendí todo lo referente de este versátil cultivo en el contexto del cambio climático. También agradecerle por el respeto y la consideración de mis sugerencias e ideas que sumado a su dirección y rigurosidad a las mismas han facilitado el desarrollo del presente trabajo de investigación; gracias por sus enseñanzas.

Al Dr. Francisco Medina Raya por sus acertados comentarios y la minuciosa revisión del presente trabajo de investigación.

Y por último a los agricultores de la comunidad campesina de Sañayca que luchan constantemente por revalorar nuestros cultivos andinos.

**Freddy Alex.**

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación titulado “Efectos de inoculantes biológicos sobre la captura de CO<sub>2</sub> en cultivos de papas nativas (*Solanum tuberosum subesp. andigena*) sector de Sañayca, provincia de Aymaraes” se desarrolló durante la campaña agrícola 2016 - 2017 con tres objetivos planteados: evaluar los efectos de la aplicación de inoculantes biológicos en el rendimiento del cultivo, determinar la concentración de CO<sub>2</sub> en suelo agrícola donde se instaló el cultivo de papa nativa y por último determinar la concentración de CO<sub>2</sub> en la biomasa.

Como la naturaleza del estudio es cuantitativa, se sometió a un conjunto de técnicas estadísticas a fin de llegar a conclusiones mediante la comprobación de hipótesis, que para el presente caso fue validar: “Las aplicaciones de inoculantes biológicos influyen en los niveles de concentración de CO<sub>2</sub> tanto en el suelo agrícola como en la biomasa vegetal, además de incrementar los rendimientos del cultivo de papa nativa”.

Para el cumplimiento de los objetivos, se hizo uso del diseño estadístico en Bloques Completamente Aleatorizados conformado por tres tratamientos y 4 repeticiones.

Los tratamientos bajo estudio estuvieron conformado por la aplicación de los inoculantes biológicos ECOTERRA, ALICERCE y además del TESTIGO (sin control).

De los análisis estadísticos realizados, se afirma la validez de la hipótesis de investigación con un nivel de significancia del 5 %, por consiguiente se encontró que para el rendimiento, la mejor respuesta se consiguió aplicando ECOTERRA para alcanzar en promedio 514.78 g por planta, seguido de ALICERCE con 428.05 g por planta y 317.29 g por planta para el TESTIGO.

El rendimiento obtenido por cada tratamiento fue proyectado hacia una hectárea, teniendo

los siguientes resultados:

- 1). En una hectárea usando el tratamiento ECOTERRA se consigue un rendimiento de 12.50 toneladas.
- 2). En una hectárea usando el tratamiento ALICERCE se consigue un rendimiento de 10.40 toneladas.
- 3). Sin aplicar ningún tratamiento se logra un rendimiento de 6.80 toneladas.

Mientras que el almacenamiento de carbono contenido en el suelo agrícola reporta para ECOTERRA, una concentración de 8.50 % C, 7.91 % C para ALICERCE y 7.32 % C para el TESTIGO.

Así mismo, era conveniente presentar un modelo alométrico para estimar la biomasa vegetal de la parte aérea en el cultivo de papa nativa a fin de estimar la cantidad de carbono capturado.

El modelo alométrico se expresa en:  $Y = 0,1626AP^{4,0495}DT^{1,6906}$ , donde AP es altura de planta y DT corresponde a diámetro de tallo.

Posteriormente, se determinó que las concentraciones de CO<sub>2</sub> alcanzaron promedios por cada tratamiento en valores que se ubican en 57.40 t CO<sub>2</sub>/ha para ECOTERRA, para ALICERCE se reporta un valor de 51.47 t CO<sub>2</sub>/ha y 38.97 t CO<sub>2</sub>/ha para el TESTIGO.

**Palabras claves:** inoculantes, sumideros, biomasa y alometría.

## ABSTRACT

The present work of investigation titled “Effects of biological inoculants on the capture of CO<sub>2</sub> in crops of native potatoes (*Solanum tuberosum subsp. Andigena*) sector of Sañayca, province of Aymaraes” it was developed during the agricultural campaign 2016 - 2017 with three objectives: to evaluate the effects of the application of biological inoculants on crop yield, determine the concentration of CO<sub>2</sub> in agricultural soil where the native potato crop was installed and finally determine the concentration of CO<sub>2</sub> in biomass.

As the nature of the study is quantitative, it was submitted to a set of statistical techniques in order to reach conclusions by testing hypotheses, which for the present case was validated: “ The applications of biological inoculants influence the concentration levels of CO<sub>2</sub> both in agricultural land and in plant biomass, in addition to increasing the yields of the native potato crop.”

For the fulfillment of the objectives, the statistical design was used in Completely Random Blocks conformed by three treatments and 4 repetitions.

The treatments under study were conformed by the application of the biological inoculants ECOTERRA, ALICERCE and besides the WITNESS (without control).

From the statistical analyzes carried out, the validity of the research hypothesis with a level of significance of 5% is affirmed, therefore it was found that for the yield, the best response was obtained applying ECOTERRA to reach on average 514.78 g per plant, followed by ALICERCE with 428.05 g per plant and 317.29 g per plant for the WITNESS.

The yield obtained for each treatment was projected to one hectare, obtaining the following results:

- 1). In a hectare using the ECOTERRA treatment a yield of 12.50 tons is achieved.
- 2). In a hectare using the ALICERCE treatment a yield of 10.40 tons is achieved.
- 3). Without applying any treatment, a yield of 6.80 tons is achieved.

While the carbon storage contained in the agricultural land reports for ECOTERRA, a concentration of 8.50 % C, 7.91 % C for ALICERCE and 7.32 % C for the WITNESS.

Likewise, it was convenient to present an allometric model to estimate the plant biomass of the aerial part in the native potato crop in order to estimate the amount of carbon captured.

The allometric model is expressed in:  $Y = 0,1626AP^4,0495DT^{1,6906}$ , where AP is plant height and DT corresponds to stem diameter.

Subsequently, it was determined that CO<sub>2</sub> concentrations reached averages for each treatment in values that are located at 57.40 t CO<sub>2</sub>/ha for ECOTERRA, in the case of ALICERCE a value of 51.47 t CO<sub>2</sub>/ha is reported and 38.97 t CO<sub>2</sub>/ha for the WITNESS.

**Keywords:** inoculants, sinks, biomass, and allometry.

# INTRODUCCIÓN

Este fenómeno llamado cambio climático ha dejado de ser una simple especulación, ha trascendido como una problemática de escala mundial realmente alarmante y no solo nuestro país sino muchos países ya están viviendo las consecuencias, como son los fenómenos climatológicos adversos: granizadas, heladas, sequías, lluvias torrenciales entre otros. En la actualidad es sabido que el origen y las causas del cambio climático están directamente relacionados al efecto de invernadero. El cambio climático tiene sus orígenes en causas naturales y las actividades antrópicas que ocasionan la liberación del CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera por el consumo excesivo de combustibles fósiles y electricidad (ambas fuentes de energía empleadas en el proceso industrial) y manejo inadecuado de los suelos debido a un laboreo excesivo de los mismos con la consiguiente disminución de la materia orgánica. De otro lado, muchas especies vegetales están colonizadas por cientos de microorganismos de diversas especies. La peculiaridad de estos microorganismos radica en su capacidad para establecer relaciones simbióticas con las plantas, favoreciendo en muchos casos su crecimiento vegetal, induciendo resistencia a enfermedades bióticas y abióticas (insolación, estrés hídrico, etc.). La forma como establecen estas relaciones de ayuda mutua de estos microorganismos que habitan en el suelo, es a través de rizosfera colonizando de manera natural y estrecha. La industria biotecnológica agrícola por tanto entendiendo la importancia de estos microorganismos para la agricultura se vio obligada a orientar esfuerzos para formular estos microorganismos de manera industrial para su posterior aplicación en cultivos de interés agrícola dando origen a la biofertilización se aplica desde leguminosas, hortalizas, forestales, silvopastoriles proporcionando ventajas con respecto a la aplicación de fertilizantes químicos. En lo que respecta a agricultura,

el cultivo de papas nativas es una actividad económica fundamental de subsistencia de los pobladores altos andinos y también influye en la agrobiodiversidad existente, que sin embargo se ven amenazadas por las alteraciones de los fenómenos climatológicos manifestados en precipitaciones irregulares, sequias, heladas, granizadas y cambios de temperatura por tanto los riesgos que se ciernen sobre estas especies nativas condicionan a que estas se adapten de mejor manera a las consecuencias del cambio climático. Por tanto se deben orientar esfuerzos en alternativas que influyen sobre la cantidad de carbono en el suelo revalorando estas especies nativas que evolucionaron en los andes durante miles de años, tomando en cuenta tres pilares básicos, visto desde la perspectiva agrícola, sobre los que se fundamenta la posible recuperación del equilibrio entre el CO<sub>2</sub> captado de la atmósfera y el desprendido desde el suelo y son:

- 1 El aumento de la biomasa y de la producción de los cultivos por la introducción de especies nativas y rotaciones de los mismos, por un incremento de la eficiencia de los fertilizantes y por una ampliación de la superficie de regadío.
- 2 El incremento de la materia orgánica del suelo y una menor tasa de mineralización, por tanto una menor liberación de CO<sub>2</sub>.
- 3 El ahorro de combustibles fósiles en la agricultura, disminuyendo las labores agrícolas y utilizando maquinaria. de menor potencia.

# ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

<b>I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS . . . . .	3
1.1.1 Objetivo General . . . . .	3
1.1.2 Objetivos Específicos . . . . .	3
1.2 JUSTIFICACIÓN . . . . .	4
1.3 HIPÓTESIS . . . . .	6
<b>II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>7</b>
2.1 INOCULANTE BIOLÓGICO . . . . .	7
2.2 FOTOSÍNTESIS . . . . .	9
2.2.1 La fotosíntesis a nivel de la hoja . . . . .	11
2.2.2 Tipos de planta según el mecanismos de reducción del CO <sub>2</sub> . . . . .	12
2.3 BIOQUÍMICA DEL CARBONO . . . . .	16
2.3.1 El dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) . . . . .	17
2.3.2 El ciclo de carbono . . . . .	18
2.4 SUMIDEROS DE CARBONO . . . . .	19

2.4.1	Stock de carbono . . . . .	20
2.4.2	Carbono orgánico en el suelo . . . . .	23
2.4.3	Fracciones de la materia orgánica . . . . .	23
2.4.4	Fraccionamiento de la materia orgánica . . . . .	25
2.4.5	Conversión del carbono calculado a CO <sub>2</sub> equivalente . . . . .	27
2.5	HUELLA DE CARBONO . . . . .	28
2.5.1	Medición de carbono en el suelo . . . . .	28
2.5.2	Modelos de simulación del carbono orgánico del suelo . . . . .	32
2.6	BIOMASA . . . . .	37
2.6.1	Estimación de la biomasa . . . . .	38
2.6.2	Técnicas de análisis de crecimiento en cultivos agrícolas . . . . .	41
2.6.3	Principales funciones matemáticas en cultivos agrícolas . . . . .	44
2.7	ESTRATEGIAS PARA REDUCIR EMISIONES DE GEI . . . . .	52
2.8	ASPECTOS GENERALES DEL CULTIVO DE PAPA . . . . .	54
2.8.1	Orígenes del cultivo de papa . . . . .	54
2.8.2	Nombres científicos de la papa . . . . .	55
2.8.3	Distribución geográfica . . . . .	55
2.8.4	Descripción botánica . . . . .	56
2.8.5	Suelo y fertilización . . . . .	58
2.8.6	Siembra . . . . .	60
2.8.7	Labores de manejo en el cultivo de papa . . . . .	61
2.8.8	Sanidad Vegetal . . . . .	63
2.9	CULTIVAR AMACHI . . . . .	64

3.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA E HIDROGRÁFICA . . . . .	65
3.1.1	Ubicación geográfica . . . . .	65
3.1.2	Ubicación hidrográfica . . . . .	65
3.2	MATERIALES . . . . .	66
3.2.1	Material biológico . . . . .	66
3.2.2	Materiales de campo . . . . .	67
3.2.3	Materiales de gabinete . . . . .	67
3.3	METODOLOGÍA . . . . .	68
3.3.1	Cálculo del tamaño de la muestra . . . . .	68
3.3.2	Análisis de datos . . . . .	69
3.3.3	Método . . . . .	69
3.3.4	Labores agronómicas realizadas . . . . .	81
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>		<b>82</b>
4.1	RESULTADOS . . . . .	82
4.1.1	Rendimientos . . . . .	82
4.1.2	Resultados para contenido de Carbono orgánico y CO <sub>2</sub> . . . . .	99
4.2	DISCUSIONES . . . . .	113
4.2.1	Rendimiento . . . . .	113
4.2.2	Contenido de carbono . . . . .	120
<b>V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		<b>124</b>
5.1	CONCLUSIONES . . . . .	124
5.1.1	Rendimiento . . . . .	124
5.1.2	Contenido de CO <sub>2</sub> en suelo agrícola . . . . .	125

5.1.3	Contenido de CO <sub>2</sub> en la biomasa . . . . .	125
5.2	RECOMENDACIONES . . . . .	126
5.2.1	Rendimiento . . . . .	126
5.2.2	Contenido de CO <sub>2</sub> en suelo agrícola . . . . .	126
5.2.3	Contenido de CO <sub>2</sub> en la biomasa . . . . .	127
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>128</b>
<b>ANEXO</b>		<b>142</b>
<b>A. Operacionalización de variables</b>		<b>142</b>
<b>B. Matriz de consistencia</b>		<b>145</b>
<b>C. Cumplimiento de los supuestos del Análisis de Varianza</b>		<b>149</b>
3.1	Rendimiento . . . . .	149
3.2	Carbono en suelo agrícola . . . . .	170
3.3	Carbono en la biomasa de papa . . . . .	173
<b>D. Modelo alométrico</b>		<b>176</b>
4.1	Validez del modelo alométrico seleccionado . . . . .	176
<b>E. Comparaciones múltiples Tukey</b>		<b>180</b>
<b>F. Mapa de ubicación</b>		<b>184</b>
<b>G. Fotografías</b>		<b>185</b>
<b>H. Análisis de laboratorio</b>		<b>189</b>
<b>ACRÓNIMOS</b>		<b>192</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

1	Proceso de la fotosíntesis. . . . .	10
2	Metabolismo del carbono en la biosfera. . . . .	17
3	Barrenos. . . . .	29
4	Distribución de la parcela para muestreo. . . . .	31
5	Relación de parentesco evolutivo de las papas cultivadas. . . . .	55
6	Papa, la planta y sus características. . . . .	57
7	La papa y sus componentes. . . . .	58
8	Disposición de los tratamientos en estudio . . . . .	70
9	Comparaciones múltiples para emergencia de plántulas (%). . . . .	83
10	Comparaciones múltiples para altura de planta 60 días (cm). . . . .	85
11	Comparaciones múltiples para la altura de planta 90 días (cm). . . . .	87
12	Comparaciones múltiples para altura de planta 180 días (cm). . . . .	89
13	Comparaciones múltiples para área foliar (cm <sup>2</sup> ). . . . .	91
14	Comparaciones múltiples para el diámetro de tallo (mm). . . . .	94
15	Comparaciones múltiples para número de tallos (und). . . . .	96
16	Gráfica de comparaciones múltiples para peso de tubérculos (g). . . . .	98
17	Comparaciones múltiples para carbono en suelo agrícola (%). . . . .	100
18	Gráfica de comparaciones múltiples contenido de carbono en la biomasa (%). . . . .	103
19	Correlación múltiple de predictores y biomasa. . . . .	104
20	R <sup>2</sup> ajustado y número de predictores. . . . .	105

C.1	Independencia para la emergencia de plántulas. . . . .	149
C.2	Normalidad de residuos para la emergencia de plántulas. . . . .	150
C.3	Histograma + Curva normal teórica - emergencia de plántulas. . . . .	151
C.4	Independencia para altura de planta 60 días. . . . .	152
C.5	Normalidad de residuos para altura de planta 60 días. . . . .	153
C.6	Histograma + Curva normal teórica - altura de planta 60 días. . . . .	153
C.7	Independencia para altura de planta 90 días. . . . .	155
C.8	Normalidad de residuos para altura de planta 90 días. . . . .	156
C.9	Histograma + Curva normal teórica - altura de planta 90 días. . . . .	156
C.10	Independencia para variable altura de planta 180 días. . . . .	157
C.11	Normalidad de residuos para altura de planta 180 días. . . . .	158
C.12	Histograma + Curva normal teórica - altura de planta 180 días. . . . .	159
C.13	Independencia para el área foliar. . . . .	160
C.14	Normalidad de residuos para el área foliar. . . . .	161
C.15	Histograma + Curva normal teórica - área foliar. . . . .	161
C.16	Independencia para el diámetro de tallo. . . . .	163
C.17	Normalidad de residuos para el diámetro de tallo. . . . .	164
C.18	Histograma + Curva normal teórica - diámetro de tallos . . . . .	164
C.19	Independencia para el número de tallos. . . . .	165
C.20	Normalidad de residuos para el número de tallos. . . . .	166
C.21	Histograma + Curva normal teórica para - número de tallos. . . . .	167
C.22	Independencia para el peso de tubérculos. . . . .	168
C.23	Normalidad de residuos para peso de tubérculos. . . . .	169
C.24	Histograma + Curva normal teórica - peso de tubérculos. . . . .	169

C.25 Independencia para carbono en suelo agrícola. . . . .	171
C.26 Normalidad de residuos para el carbono en suelo agrícola. . . . .	172
C.27 Histograma + Curva normal teórica para - carbono en suelo agrícola. . .	172
C.28 Independencia para el carbono en la biomasa. . . . .	173
C.29 Normalidad de residuos para el carbono en la biomasa. . . . .	174
C.30 Histograma + Curva normal teórica para - carbono en la biomasa. . . . .	175
D.1 Gráfica de normalidad del modelo 5. . . . .	176
D.2 Gráfica de residuos vs valores ajustados del modelo 5. . . . .	177
D.3 Gráfica de independencia del modelo 5. . . . .	178
D.4 Regresión en un plano del modelo 5. . . . .	179
F.1 Ubicación. . . . .	184
G.1 Reunión con los promotores agroecológicos de Sañayca. . . . .	185
G.2 Inicio de la preparación de inoculantes biológicos. . . . .	186
G.3 Inicio de la siembra. . . . .	187
G.4 Colocación de los tubérculos en los surcos de las promotoras. . . . .	188
G.5 Colocación de los tubérculos en los surcos con ayuda de los promotores. .	188
H.1 Análisis de suelos. . . . .	189
H.2 Análisis microbiológico del suelo . . . . .	190

## ÍNDICE DE TABLAS

1	Extracción y restitución de elementos nutricionales en el cultivo de papa.	59
2	Principales plagas en el cultivo de papa. . . . .	63
3	Principales enfermedades en el cultivo de papa. . . . .	64
4	Análisis de varianza para emergencia de plántulas (%). . . . .	82
5	Prueba de Tukey para emergencia de plántulas (%). . . . .	83
6	Análisis de varianza para altura de planta 60 días. . . . .	84
7	Prueba de Tukey para altura de planta 60 días (cm). . . . .	85
8	Análisis de varianza para la altura de planta 90 días. . . . .	86
9	Prueba de Tukey para la altura de planta 90 días (cm). . . . .	87
10	Análisis de varianza para la altura de planta 180 días. . . . .	88
11	Prueba de Tukey para la altura de planta 180 días (cm). . . . .	88
12	Análisis de varianza para área foliar. . . . .	90
13	Prueba de Tukey para área foliar (cm <sup>2</sup> ). . . . .	90
14	Análisis de varianza para diámetro de tallo. . . . .	92
15	Prueba de Tukey para diámetro de tallos (mm). . . . .	92
16	Análisis de varianza para número de tallos. . . . .	94
17	Prueba de Tukey para número de tallos (und). . . . .	95
18	Análisis de varianza para el peso de tubérculos. . . . .	96
19	Prueba de Tukey para la variable peso de tubérculos. . . . .	97
20	Análisis de varianza para carbono en suelo agrícola. . . . .	99
21	Prueba de Tukey para contenido carbono en suelo agrícola (%). . . . .	100
22	Análisis de varianza para carbono en la biomasa. . . . .	102

23	Prueba de Tukey para el carbono en la biomasa (%).	102
24	Coeficientes del modelo 1.	106
25	Coeficientes del modelo 2.	107
26	Coeficientes del modelo 3.	108
27	Coeficientes del modelo 4.	108
28	Coeficientes del modelo 5.	109
29	Coeficientes del modelo 6.	111
30	Interceptos y estadísticos de los modelos de regresión.	111
31	Proceso de operacionalización de las variables en estudio.	143
31	Proceso de operacionalización de las variables en estudio.	144
32	Matriz de consistencia metodológica.	145
32	Matriz de consistencia metodológica.	146
32	Matriz de consistencia metodológica.	147
32	Matriz de consistencia metodológica.	148
33	Test de normalidad para la emergencia de plántulas.	150
34	Test de homocedasticidad para la emergencia de plántulas.	151
35	Test de normalidad para altura de planta 60 días.	152
36	Test de homocedasticidad para altura de planta 60 días.	154
37	Test de normalidad para altura de planta 90 días.	155
38	Test de homocedasticidad para la altura de planta 90 días.	157
39	Test de normalidad para altura de planta 180 días.	158
40	Test de homocedasticidad para la altura de planta 180 días.	159
41	Test de normalidad para el área foliar	160

42	Test de homocedasticidad para el área foliar . . . . .	162
43	Test de normalidad para el diámetro de tallo) . . . . .	163
44	Test de homocedasticidad para el diámetro de tallos. . . . .	165
45	Test de normalidad para el número de tallos. . . . .	166
46	Test de homocedasticidad para el número de tallos. . . . .	167
47	Test de normalidad para el peso de tubérculos. . . . .	168
48	Test de homocedasticidad para el peso de tubérculos. . . . .	170
49	Test de normalidad para carbono en suelo agrícola. . . . .	171
50	Test de homocedasticidad para contenido de carbono en suelo agrícola. . . . .	173
51	Test de normalidad para el carbono en la biomasa. . . . .	174
52	Test de homocedasticidad para el carbono en la biomasa. . . . .	175
53	Test de normalidad para el modelo 5. . . . .	176
54	Test de homogeneidad de varianza para el modelo 5 . . . . .	177
55	Test de autocorrelación para el modelo 5. . . . .	178
56	Factor de influencia de la varianza en el modelo 5 . . . . .	179
57	Comparaciones - emergencia de plántulas. . . . .	180
58	Comparaciones - altura de planta 60 días. . . . .	180
59	Comparaciones - altura de planta 90 días. . . . .	180
60	Comparación - altura de planta 180 días. . . . .	181
61	Comparaciones - área foliar. . . . .	181
62	Comparaciones - diámetro de tallos. . . . .	181
63	Comparaciones - número de tallos. . . . .	182
64	Comparaciones - rendimiento. . . . .	182
65	Comparaciones - contenido de carbono en suelo agrícola. . . . .	182

66	Comparaciones - carbono en la biomasa. . . . .	183
67	Contenido de Carbono en la biomasa aérea. . . . .	191
68	Contenido de Carbono en suelo agrícola. . . . .	191

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dentro del contexto internacional, el incremento de la temperatura del planeta modifica la cantidad de los glaciares, es decir influye directamente en el derretimiento de estos, disminuye la disponibilidad de agua potable para 70 millones de personas e intensificar los eventos climatológicos adversos. A su vez, las pruebas que se desprenden producto de muchas investigaciones en temas relacionados a efectos del cambio climático realizados en todos los continentes del planeta demuestran que estos cambios regionales, en particular los aumentos de temperatura están afectando a muchos ecosistemas naturales. En lo que concierne a la agricultura, según estudios basados en modelos proyectados para América Latina y el Caribe dan como resultados que existe una disminución en los rendimientos agrícolas, como por ejemplo, trigo, cebada, papa, maíz, legumbres y algunos frutales. De otro lado, según el informe de la serie “Bajemos la temperatura” preparado para el Banco Mundial por Potsdam Institute for Climate, advierten que este calentamiento global incrementa los impactos negativos sobre la seguridad alimentaria, hídrica y energética. El Perú, está situado en el tercer lugar como un país expuesto al cambio climático por consiguiente a medida que estos fenómenos climáticos adversos producto del calentamiento global se vuelvan más comunes tendrán consecuencias negativas sobre los ecosistemas y su biodiversidad, por tanto gran parte de la población peruana que viven en las zonas alto andinas y se dedican a actividades sensibles como crianza de animales y agricultura son más vulnerables al cambio climático esto principalmente porque tienen poca capacidad de adaptarse a causa de los mínimos recursos, tanto de origen económico como la restringida facultad y presencia de instituciones gubernamentales.

En tal sentido, existe la preocupación dentro del ámbito nacional, regional y sobre todo provincial de la falta de medidas innovadoras que contribuyan a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y la falta de inversión en medidas que fortalezcan la capacidad de resiliencia frente al cambio climático. Son muy pocas las investigaciones llevadas a cabo con la aplicación de inoculantes biológicos para facilitar la asimilación de CO<sub>2</sub> con el objetivo de contribuir a la mitigación del cambio climático y lograr una agricultura más eficiente y respetuosa con el medioambiente; esta situación encara las condiciones para impulsar nuevos paradigmas en la ciencias agrícolas a través del alto aprovechamiento biológico enfocadas en sistemas sostenibles de producción. Por lo tanto, se evidencia como problema que no se realiza iniciativas en materia de agricultura para el desarrollo de una agricultura por medio del almacenamiento de carbono en la biomasa de los cultivos y el suelo a través de técnicas innovadoras que permitan proporcionar a los cultivos agrícolas un medio ambiente adecuado para su desarrollo con énfasis en el cuidado del medio ambiente además de prácticas que pueden contribuir a mitigar el cambio climático a través de la reducción de emisiones.

Dentro del contexto local, en la comunidad campesina de Sañayca se evidencia también la poca iniciativa en aplicar medidas innovadoras que contribuyan a incrementar el rendimiento de sus cultivos de papa nativa - en vista que los rendimientos que se obtiene por cada cosecha realizada se sitúa por debajo del promedio nacional - puesto que es importante contar la disponibilidad de este cultivo debido a su alto consumo que garantiza la seguridad alimentaria y el potencial económico que representa en el desarrollo rural. Por tanto la falta de una tecnología de fácil adopción que permita salvaguardar su producción expone al agricultor a abandonar la actividad agrícola poniendo en peligro la preservación de la biodiversidad de estos cultivos en la comunidad campesina de Toraya.

Así mismo son estas comunidades campesinas quienes se encargan de emplear estrategias de conservación de la biodiversidad en la lucha contra el cambio climático sin embargo hasta la fecha el apoyo recibido en temas ambientales ha sido mínimo por consiguiente se evidencia el desconocimiento de alternativas tecnológicas que les brinden la posibilidad a estos agricultores de luchar contra el cambio climático de manera más eficiente y sostenible con el ambiente.

Ante el contexto citado, se plantea la siguiente interrogante de investigación: **¿Cuál es el efecto de la aplicación de inoculantes biológicos en la fijación de CO<sub>2</sub> en el cultivo de papa nativa?**

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. Objetivo General**

Evaluar el efecto de inoculantes biológicos sobre la captura de CO<sub>2</sub> en cultivos de papas nativas (*Solanum tuberosum subesp. andigena*) sector Sañayca, provincia de Aymaraes.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Evaluar la aplicación de los inoculantes biológicos sobre el rendimiento en cultivos de papas nativas (*Solanum tuberosum subesp. andigena*).
- Determinar la concentración de CO<sub>2</sub> en los suelos agrícolas donde se instaló cultivos de papas nativas (*Solanum tuberosum subesp. andigena*).
- Determinar la concentración de CO<sub>2</sub> en la biomasa de cultivos de papas nativas (*Solanum tuberosum subesp. andigena*).

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

En vista de que en las últimas décadas el cambio climático constituye un tema de primera magnitud en políticas ambientales tanto en la agenda internacional como en el contexto nacional peruano urge en la necesidad de, formular estrategias que permitan en el corto y largo plazo reducir la emisión de CO<sub>2</sub>; por consiguiente, la razón de la realización de esta investigación es buscar propuestas de adaptación para hacer frente al cambio climático a través de la gestión de diversidad de papas nativas.

Así mismo, este trabajo de investigación resulta de la motivación en aplicar los conocimientos de las ciencias agrarias desde diferentes perspectivas que contribuyan en el desarrollo rural de la comunidad de Sañayca.

- Aspecto técnico - económico

A través de la promoción de este cultivo, se podrán realizar cambios y mejoras sustantivas en la calidad de vida del productor dedicado al cultivo de papas nativas, a razón de las propuestas técnicas que incorporan, la aplicación de inoculantes biológicos que inciden directamente en el aumento del rendimiento del cultivo, obteniendo un incremento significativo en su economía debido a los ingresos económicos producto de las ventas de sus cosechas además de asegurar su soberanía alimentaria.

- Seguridad alimentaria

Las consecuencias del cambio climático influyen sobre la seguridad alimentaria de manera específica en poblaciones de muy escasos recursos económicos, por lo tanto con esta investigación se propone revalorar la siembra de papa

nativa como una mejor estrategia sustentable en la protección de la seguridad alimentaria y fortalecimiento de la salud, ya que el cultivar seleccionado para esta investigación es altamente rico en antocianinas, polifenoles totales, minerales y vitaminas esenciales en la dieta humana.

- Medio ambiente

Una mejor práctica agrícola con la aplicación de inoculantes biológicos en la producción de papas nativas constituye un receptor neto de gases de efecto invernadero, por consiguiente la adopción de este tipo de prácticas es necesario para contrarrestar las cambiantes condiciones del clima.

- Sumideros de carbono

De otra parte, esta investigación es de suma importancia porque contribuye en alguna medida a la captura de  $\text{CO}_2$ , de no hacerlo tendrá como consecuencia negativa el cambio climático afectando a muchos sistemas naturales. Por tanto, dentro del contexto de cambio climático, se promoverá la mitigación a través de la intervención de los habitantes de las comunidades altoandinas de Sañayca mediante la producción sostenible del cultivo de papas nativas con el fin de sanear los sumideros de carbono al igual que los bosques naturales.

Sin embargo, para poder estimar el contenido de  $\text{CO}_2$  sobre todo en cultivos leñosos, se requiere en primer lugar de datos de la biomasa aérea y radicular de manera que puedan servir para algún tipo de calibración y en segundo lugar demandan elevados gastos económicos; en ese sentido, la investigación aborda desde el aspecto académico, el esfuerzo de establecer un procedimiento rentable para la obtención de ecuaciones alométricas con el propósito de relacionar la biomasa, con mucha precisión, a partir de mediciones que son fácilmente obtenibles en

evaluaciones de campo, siendo éstas el diámetro de tallo, altura de la planta, área foliar y número de tallos.

### **1.3. HIPÓTESIS**

La aplicación de inoculantes biológicos mejora la fijación de CO<sub>2</sub> e incrementa el rendimiento del cultivo de papa nativa beneficiando a los agricultores de la comunidad campesina de Toraya.

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. INOCULANTE BIOLÓGICO

El **Instituto Colombiano Agropecuario (2011)**, refiere que un Inoculante Biológico es la mezcla de sustancias que contiene microorganismos viables benéficos en ausencia de microorganismos del tipo patógeno que perjudica a humanos, plantas y animales. Están clasificados de la siguiente manera:

a) Bacterias simbióticas fijadoras de Nitrógeno

Tienen la capacidad de realizar una interacción biológica (simbiosis) a nivel radicular en plantas leguminosas con el fin de realizar la fijación del nitrógeno.

b) Bacterias asimbióticas fijadoras de Nitrógeno

Estas especies de bacterias se caracterizan por ser de vida libre, es decir no forman simbiosis y tiene la capacidad de realizar la fijación del nitrógeno.

c) Hongos micorrizógenos

Estas especies de hongos tienen la propiedad de asociarse de manera eficaz con las raíces de los cultivos a fin de incrementar la absorción de los elementos nutricionales.

d) Microorganismos solubilizadores de fosfatos

Estas especies de microorganismos poseen la capacidad de solubilizar el fósforo hasta en sus formas no disponibles para la absorción de las plantas.

e) Microorganismos productores de promotores de crecimiento vegetal.

Los microorganismos pertenecientes a este grupo presentan la capacidad de sintetizar sustancias que pueden estimular o promover el crecimiento vegetal.

f) Microorganismos transformadores de materia orgánica

Estas especies de microorganismos tiene la capacidad de aumentar la velocidad del compostaje además de otras maneras de poder transformar la materia orgánica en abono.

**Rolli (2007)**, también señala que estos inoculantes a base de microorganismos están contenidos de múltiples poblaciones microbianas pudiendo ser: bacterias, lactobacilos y hongos de fermentación.

**Aranda (2005)**, sostiene que debido al elevado contenido nutricional de sales brinda las facultades necesarias que, en contacto con materia orgánica que hay en el suelo, se gesten la producción de compuestos que son beneficiosos en la nutrición vegetal (e.g. antioxidantes, ácidos orgánicos, vitaminas, quelatos y minerales).

**Christy y Ramaligam (2005)**, señalan que los inoculantes a formulados base de microorganismos tienen la capacidad de cambiar las características de los macro y micro organismos que habitan el suelo y por consiguiente lograr un balance biológico en el suelo.

**Tognetti (2005)**, manifiesta que la capacidad antioxidante de estos inoculantes a base de microorganismos mejoran la descomposición de cualquier tipo de material orgánico logrando incrementar la concentración de humus en el suelo.

En conclusión, de lo descrito anteriormente, **Muñoz y Benavides (2010)** refiere que todo ello incide de manera favorable en el desarrollo de las plantas o cultivos, a nivel de la postcosecha y en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

**Plaster (2010)**, afirma que haciendo uso de manera racional de estos inoculantes se obtienen mejoras, como ya se señaló anteriormente, en propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo además de actuar como un agente supresor de múltiples enfermedades de origen biológico que atacan a las plantas o cultivos.

En este sentido:

- Sobre las condiciones físicas: permite mejorar la estructura y agregación de las partículas del suelo, reducir su compactación, incrementar los espacios porosos y mejorar la infiltración del agua.
- Sobre las condiciones químicas: mejora la disposición de los nutrientes en el suelo, dejar elementos libres para facilitar su absorción por el sistema radicular.
- Sobre la microbiología del suelo: permite suprimir o controlar - por medio de competencia - poblaciones de microorganismos patógenos que se desarrollan en el suelo.
- Incrementar la biodiversidad microbiana, generando las condiciones necesarias para que los microorganismos benéficos nativos prosperen.

## **2.2. FOTOSÍNTESIS**

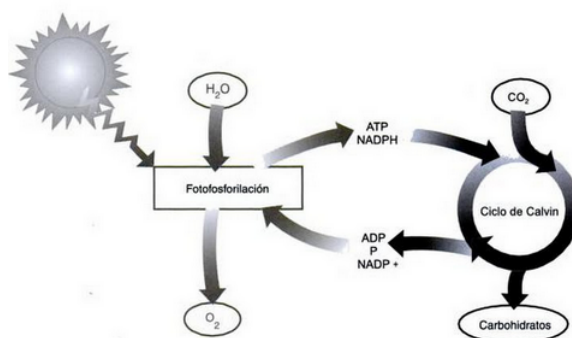
**Collazo y Rodés (2016)**, señala que la fotosíntesis comienza por la absorción de la energía lumínica y su transformación en ATP y NADPH en las membranas internas de los cloroplastos (tilacoides y granas). El CO<sub>2</sub> se absorbe a través de los estomas y su transformación o reducción a triosas fosfatos ocurre en el estoma de los cloroplastos, con la participación de un gran número de enzimas. Existen, por tanto, varios componentes que afectan a la fotosíntesis, de los cuales resaltan las

elevadas concentraciones de  $\text{CO}_2$  presentes en el medio ambiente, la intensidad de la luz y el grado de apertura de los estomas. .

**Gliessman (2002)**, indica que la fotosíntesis se conforma de dos fases diferenciadas, compuesto de varios procesos.

Estas fases, son conocidas como **reacciones de luz y reacciones oscuras**, por un lado en las reacciones de luz se inicia con la transformación de energía luminosa al tipo de energía química convirtiéndose en ATP y NADPH. Durante este proceso las reacciones demandan agua y se produce la liberación de oxígeno. Por su parte en las reacciones oscuras (que acontecen de manera independiente a la luz) ocurre la extracción de átomos de carbono del  $\text{CO}_2$  presente en la atmósfera y los emplea para dar lugar a compuestos orgánicos; a este resultado se le denomina captura de carbono y es estimulado a través del ATP y NADPH producto de las reacciones de luz. El resultado final de todo el proceso fotosintético recibe el nombre fotosintato, y está compuesto generalmente de azúcar (glucosa). Este azúcar o glucosa es el componente principal de fuente energética que son demandados durante el crecimiento y el metabolismo de las plantas y animales, por su facilidad de nuevamente convertirse en energía química (ATP) y  $\text{CO}_2$  durante la respiración (ver figura 1).

**Figura 1:** Proceso de la fotosíntesis.



**Fuente:** Gliessman (2002).

### 2.2.1. La fotosíntesis a nivel de la hoja

**Martín (2009)**, refiere que el 85 - 90 % de la materia seca acumulada en un cultivo resulta del proceso fotosintético.

En el área foliar, la fotosíntesis se puede descomponer en los tres procesos siguientes:

- a) Difusión de  $CO_2$  desde la atmósfera hacia los cloroplastos, siguiendo el gradiente de concentración:

$$F_c = c_1 d[CO_2]/r_h \quad (1)$$

donde  $c_1$  es una constante y  $r_h$  es la resistencia de la hoja a la difusión del  $CO_2$ . La resistencia estomática es la principal componente de la resistencia a la difusión.

- b) Interceptación de la luz por los pigmentos de los cloroplastos y fotólisis del agua: La fracción de radiación absorbida depende de la concentración de pigmentos en la hoja. Se produce  $O_2$  y se generan compuestos energéticos (ATP y NADPH).

Este proceso no está vinculado directamente con la temperatura ni con la cantidad de  $CO_2$ .

- c) Reducción de  $CO_2$  a partir de los compuestos generados en la fotólisis del agua. Por cada molécula de  $CO_2$  reducida son necesarios entre 8 y 12 quanta de luz.

La reducción se puede dar en la oscuridad y es muy sensible a la temperatura.

Globalmente el proceso de la fotosíntesis depende de la intensidad de radiación, de la concentración de  $\text{CO}_2$  y de la temperatura. La energía fijada en forma de hidratos de carbono asciende a 0.468 MJ/mol de  $\text{CO}_2$ .

### 2.2.2. Tipos de planta según el mecanismos de reducción del $\text{CO}_2$

**Martín (2009)**, sostiene que en las plantas se han desarrollado tres sistemas químico - anatómicos distintos para la fotosíntesis ( $\text{C}_3$ ,  $\text{C}_4$  y CAM). Las plantas terrestres proceden evolutivamente de las algas y en un principio eran todas  $\text{C}_3$ . Posteriormente se han producido una evolución hacia estructuras  $\text{C}_4$  y CAM. Las especies cultivadas al igual que la flora natural presentan en su mayoría  $\text{C}_3$  (p. eje. patata, trigo, cebada, arroz, remolacha, algodón, soja, girasol y colza). Muy pocas especies cultivadas presentan sistema  $\text{C}_4$  (maíz, sorgo, caña de azúcar) o el sistema CAM (agave, piña).

**Campbell y Reece (2007)**, manifiesta que las plantas  $\text{C}_4$  se denominan así ya que alargan el ciclo de calvin de una manera alternativa en la fijación de carbono que da lugar a una sustancia formada por cuatro carbonos resultando como la primera manufactura. Múltiples especies, en promedio de 19 familias de plantas que emplean la ruta  $\text{C}_4$ . Las especies de plantas que emplean la ruta  $\text{C}_4$  presentan dos clases diferentes de células que se encargan de cumplir la fotosíntesis: células de la vaina fascicular y células mesófilas. Las **células de la vaina fascicular** se encuentran ordenadas en láminas fuertemente compactadas en torno a los fascículos vasculares de la hoja. En medio de la vaina fascicular y en la extensión

de la hoja se ubican las **células mesófilas**, estructuradas con mayor espacio. El ciclo de Calvin se encuentra confinado en los cloroplastos de la vaina fascicular. No obstante, el ciclo antecede a la integración de  $\text{CO}_2$  en las sustancias orgánicas donde esta el mesófilo. Primero, se da por la enzima **PEP carboxilasa** donde ocurre la adición de dióxido de carbono al fosfoenolpiruvato (PEP), formando la manufactura de cuatro carbonos oxalacetato. La PEP carboxilasa presenta mayor afinidad por el dióxido de carbono que la rubisco y la ausencia de afinidad con el  $\text{O}_2$ . De tal manera, PEP carboxilasa tiene la capacidad de fijar seis carbonos eficientemente en el momento que la rubisco no esta disponible para realizarlo - sucede en el momento que aumenta la temperatura y se encuentra seco además los estomas se hallan parcialmente cerrados, por consiguiente influye en la caída de dióxido de carbono presente en la hoja y la cantidad de  $\text{O}_2$  se incrementa -. Posteriormente la planta  $\text{C}_4$  captura el carbono del  $\text{CO}_2$ , las células mesófilas envían sus manufacturas de cuatro carbonos a las células de la vaina fascicular por medio del plasmodesma. En el interior de las células de la vaina fascicular los compuestos de cuatro carbonos liberan dióxido de carbono que es nuevamente asimilado en material orgánico por la rubisco y el ciclo de Calvin. El piruvato de igual manera es regenerado para convertirse en PEP en las células mesófilas.

Efectivamente, las células mesófilas de una planta  $\text{C}_4$  succionan dióxido de carbono al interior de la vaina fascicular conservando la acumulación de  $\text{CO}_2$  dentro de células de la vaina fascicular lo suficientemente elevada donde la rubisco se añade al  $\text{CO}_2$  emplazando al oxígeno. La serie cíclica

de reacciones que implican la PEP carboxilasa y la regeneración de PEP puede ponderarse como una bomba de acumulación de  $\text{CO}_2$  propulsado por ATP.

Así, la fotosíntesis de la ruta  $\text{C}_4$  reduce la fotorrespiración y aumenta la fabricación de azúcar. La adaptación resulta de mucha ventaja en las zonas cálidas donde hay mayor intensidad de luminosidad solar, donde los estomas se cierran fraccionariamente en el día razón por la cual las plantas  $\text{C}_4$  evolucionaron en esos tipos de ambiente prevaleciendo actualmente.

**García y Collazo Ortega (2006)**, sostiene que en las plantas  $\text{C}_3$  los cloroplastos se ubican mayormente en el mesófilo de las hojas. Estos cloroplastos tienen todas las enzimas del ciclo de Calvin, así como las de la síntesis de almidón.

**Carvajal et al. (2010)**, afirma que las plantas  $\text{C}_3$  se diferencian por permanecer con los estomas abiertos a lo largo del día para facilitar la fijación de  $\text{CO}_2$ , implicando pérdidas de agua debido a la transpiración, de manera seguida. Frente al riesgo de ocurrir la deshidratación a causa de estrés ambiental, por consiguiente las plantas realizan el cierre estomático provocando una mayor disminución de la fotosíntesis.

**Campbell y Reece (2007)**, señala que en la mayor cantidad de las plantas, la fijación inicial de carbono se da mediante la rubisco, la enzima del ciclo de Calvin que añade dióxido de carbono en la ribulosa bifosfato. Un ejemplo de esto son las plantas  $\text{C}_3$  ya que su primera manufactura orgánica por la fijación de carbono resulta en un conjunto de sustancias que contienen tres carbonos, el 3-fosfoglicerato. En el momento que los

estomas se cierran fraccionariamente durante los días que son secos y cálidos, estas plantas  $C_3$ , fabrican menor cantidad de azúcar porque el descenso de los niveles de dióxido de carbono en la hoja condiciona a que el ciclo de Calvin se extinga por inanición. Adicionalmente, la rubisco tiene la posibilidad de fijar  $O_2$  en reemplazo de dióxido de carbono. En la disposición que el dióxido de carbono empieza a ser escaso entre los espacios de aire de la hoja, la rubisco añade  $O_2$  al ciclo de Calvin en vez de dióxido de carbono.

**Taiz y Zeiger (2007)**, afirman que las plantas como los cactus, presentan una elevada eficiencia en el uso del agua, abriendo sus estomas durante las frías noches desérticas cerrándolos durante los días secos y calurosos. El cierre estomático durante el día minimiza las pérdidas de agua, pero dado que el agua y el  $CO_2$  comparten la misma ruta de difusión, el  $CO_2$  debe ser asimilado por la noche. El  $CO_2$  es incorporado por carboxilación del fosfoenolpiruvato a oxalacetato, para ser entonces reducido a malato. El malato se acumula y es almacenado en las grandes vacuolas típicas de las células de las hojas de las plantas CAM. La acumulación de cantidades sustanciales de ácido málico, equivalente a la cantidad de  $CO_2$  asimilado durante la noche, queda reflejada como una acidificación nocturna de la hoja.

Durante el inicio del día, los estomas se cierra, evitando la pérdida de agua, y con ello la incorporación de más  $CO_2$ . Las células de las hojas se alcalinizan a medida que las reservas de ácido málico de sus vacuolas son consumidas.

La decarboxilación se consigue por acción del enzima NADP málico sobre el malato.

### 2.3. BIOQUÍMICA DEL CARBONO

Castillo *et al.* (2005), sostienen que las plantas superiores son un sumidero de carbono en forma de celulosa y lignina, polímeros carbonados muy estables gracias a su composición química (enlaces glucosilo  $\beta$  (1  $\rightarrow$  4) en la celulosa y enlaces Ar – O – R en la lignina). Solo un grupo muy reducido de bacterias y hongos es capaz de degradar estos polímeros produciendo derivados más fácilmente asimilables por el resto de organismos. El otro polímero importante, el almidón, se degrada fácilmente gracias a la glucosidasas que hidrolizan sus enlaces glucosilo  $\alpha$  (1  $\rightarrow$  4).

De la figura 2, se observa que posteriormente las unidades monosacáridas (glucosa, fructosa, galactosa, manosa, pentosas) se degradan a compuestos tricarbonados mediante las denominadas rutas centrales del metabolismo carbonado (glucolisis, ruta de Entner – Doudoroff, ruta de las pentosas). Los derivados C<sub>3</sub> se transforman en aminoácidos o se oxidan a C<sub>2</sub> (acetato), que posteriormente se utiliza para la síntesis de lípidos o, en condiciones aeróbicas, se oxida a CO<sub>2</sub> por el ciclo de Krebs. En medios anaeróbicos, el acetato se reduce a CH<sub>4</sub> que también se produce a partir de CO, CO<sub>2</sub> y grupos R – CH<sub>3</sub>. En medios aeróbicos o anaeróbicos, el CH<sub>4</sub> se reoxida a CO<sub>2</sub>, cerrando así el ciclo del carbono en la naturaleza.



su concentración en dicho sistema se ve afectada por interacciones con la superficie del planeta, en que las se incluyen reacciones del ciclo carbonato – silicato, el intercambio de gases y los ciclos anuales de fotosíntesis y respiración de los seres vivos.

### 2.3.2. El ciclo de carbono

**Ciesla (1996)**, afirma que el carbono se moviliza de diferentes maneras, desde la superficie terrestre, su interior y la atmósfera. Los procesos fundamentales en el intercambio de carbono lo constituye la oxidación, la respiración y la fotosíntesis. Este canje se comprueba entre los organismos biológicos, el suelo, agua y la atmósfera. Este ciclo del carbono es apreciado como un grupo de cuatro despensas o pozos que están enlazados: la atmósfera, medio ambiente (incluyendo los cuerpos de agua fresca), los sedimentos (incluso los combustibles fósiles) y los océanos.

**Manahan y Leyva (2006)**, mencionan que el carbono puede estar presente como  $\text{CO}_2$  atmosférico gaseoso, que constituye una porción muy pequeña pero significativa del carbono global. Algo de carbono se disuelve en el agua superficial y en el agua subterránea como  $\text{HCO}_3^-$  ó  $\text{CO}_{2(\text{acuoso})}$  molecular.

Una gran cantidad del carbono está presente en minerales, particularmente carbonatos de magnesio y calcio tales como  $\text{CaCO}_3$ . La fotosíntesis fija el C inorgánico como carbono biológico, representado como  $\text{CH}_2\text{O}$  que es un constituyente de todas las moléculas de los seres vivos.

Otra fracción del carbono se fija como petróleo y gas natural, con una

cantidad mayor como el querógeno de hidrocarburos (la materia orgánica en el esquisto bituminoso, a diferencia de los compuestos basados en hidrocarburos), carbón y lignito. Un aspecto importante del ciclo del carbono, es el hecho de que constituye el ciclo por el cual la energía solar transfiere a los sistemas biológicos y, finalmente, a la geosfera y a la antropósfera como carbono fósil y combustibles fósiles o madera.

Los microorganismos se ven muy involucrados con el ciclo del carbono, cumpliendo el rol de mediadores de reacciones bioquímicas cruciales. El carbono orgánico fijado por actividad de estos organismos microscópicos se convierte en petróleo fósil, querógeno, carbón y lignito debido a procesos biogeoquímicos. Los organismos microscópicos reducen el carbono orgánico de la biomasa, fuentes xenobióticas y del petróleo, retornándolo a la atmósfera como dióxido de carbono.

#### **2.4. SUMIDEROS DE CARBONO**

**Polzot (2004)**, sostiene que en todo proceso o sistema en donde se retira de la atmósfera un gas o gases y es almacenado, se denomina sumideros. Es de vital importancia evaluar la biomasa en el momento que es considerado como sumideros de carbono, debido a que estas evaluaciones en la biomasa nos otorga una valorización en la cuota de carbono incluido en la vegetación.

Por consiguiente, la biomasa refleja una evaluación indirecta de la cuota de carbono que es fijada por la vegetación del tipo leñoso.

La predicción de la biomasa de igual modo facilita determinar la cuota de CO<sub>2</sub> que puede ser extraído de la atmósfera producto de la reforestación.

**Martín (2009)**, indica que la agricultura tiene efectos, tanto positivos como negativos sobre el ambiente; por un lado, la agricultura al ser la principal actividad de las zonas rurales, configura mucho su paisaje donde el agricultor juega un papel importante en conservar los recursos naturales y evitar su degradación. Además, la agricultura es probablemente la actividad humana más importante que actúa de sumidero del CO<sub>2</sub> atmosférico, secuestrando parte del carbono emitido por otras actividades y reduciendo el efecto invernadero.

**Clemente (2007)**, argumenta que la relación entre el carbono acumulado en la atmósfera, debido a causas antrópicas, que favorecen el efecto invernadero y la capacidad de retirar carbono atmosférico, por parte de la fotosíntesis, nos da una idea de la importancia que pueden llegar a tener las actividades agrícolas y forestales como mitigadoras del cambio climático. Así, las actividades antrópicas provocan que la atmósfera acumule entre 2 y 3 billones de gramos de carbono. Este valor es menor comparado con la cantidad que transita al año por medio de la respiración - fotosíntesis que realizan los organismos de vida terrestre, que es valorizado en 60 billones de gramos de carbono; lo que equivale a un incremento relativamente pequeño en la fotosíntesis (que asimila el carbono) en comparación con la respiración (que libera carbono) es posible aportar de manera significativa al contrapeso del almacenamiento anual de carbono presente en la atmósfera.

#### **2.4.1. Stock de carbono**

**Honorio y Baker (2009)**, manifiesta que se conoce como “stock” a todo aquello que está depositado en los elementos del bosque, mientras que los flujos son aquellos procesos que alteran o modifican el stock.

Para cuantificar el stock contenido en un bosque, se realiza un muestreo: la biomasa viva depositada en las ramas, las hojas, el fuste y las raíces; la necromasa almacenada en la hojarasca y la madera muerta; y el carbono presente en el suelo. Al realizar la cuantificación de los flujos del bosque se tienen en consideración el tiempo y luego se hace el muestreo: la productividad que resulta de la diferencia entre en el proceso fotosintético y la respiración que se expresa en el crecimiento del fuste, producción de hojas, raíces y ramas; el deceso de troncos, hojas, ramas y las raíces; y finalmente la descomposición de madera y restos vegetales producidas por microorganismos encargados de degradar la materia orgánica.

**FAO (2012)**, define que las cuotas de carbono presentes en el suelo se encuentran vinculados con los principales factores a largo plazo que guarda relación con la formación del suelo sin embargo es posible ser alterado, ya sea degradarlos o mejorarlos, debido al tipo de uso que se le da a la tierra. Mientras que los ecosistemas donde hay especies forestales tienen más contenido de carbono por unidad de superficie comparado con múltiples usos que se les da a los suelos, albergando en promedio 40 % del total del carbono, razón por la cuál son importantes al considerarla en el manejo de bosques.

**Hernández (2001)**, señala que la captura de carbono está regulado por múltiples factores tales como la conformación mineral del suelo, textura, densidad, aireación y la profundidad. La dimensión del nivel potencial de la captura de carbono en el suelo que puede alcanzar, estará regulada por factores limitantes como la producción de biomasa aérea y subterránea,

por los efectos directos de temperatura sobre la producción de biomasa. Estos niveles actuales de captura de carbono contenidas en el suelo estarán regulados por factores reductores donde destacan las mermas directas por lixiviación, erosión y las causas en la manipulación de los residuos orgánicos de las cosechas que posiblemente limitan la cuota de carbono que ingresan al suelo.

**Raich y Schlesinger (1992)**, indican que el  $\text{CO}_2$  producido en el suelo se debe a las raíces, los macro y micro organismos que habitan el suelo y una mínima proporción debido a la oxidación química de los elementos que contienen carbono, además conceptualizan como flujo de  $\text{CO}_2$  del suelo al  $\text{CO}_2$  producido por la respiración del suelo. También sostienen que las mínimas tasas de respiración del suelo tienen lugar en los ecosistemas con características frías y secas (Tundras y Desiertos), y las tasas más altas se dan en bosques con mucha humedad del tipo tropical en la que su temperatura y humedad permanecen altas a lo largo del año. Finalmente llegan a concluir que el factor temperatura del aire resulta como el mejor indicador en la predicción para la respiración del suelo, sin embargo al considerar la precipitación se mejora la predicción.

**Oviedo (2007)**, sostiene que el flujo de  $\text{CO}_2$  contenido en el suelo o la cuota de  $\text{CO}_2$  que llega a cambiarse entre el suelo y la atmósfera tiene la facilidad de ser determinado por unidad de superficie y en el tiempo. Y Anderson (1982), define la respiración que se da en el suelo como la fijación de  $\text{O}_2$  o la liberación de  $\text{CO}_2$  por los seres vivos presentes en el suelo.

#### **2.4.2. Carbono orgánico en el suelo**

**Harmand *et al.* (2003)**, define como la parte de origen orgánico del suelo que componen de residuos de animales y vegetales que se hallan en distintas fases de descomposición; esto incluye células y tejidos de los macro y micro organismos que habitan el suelo, también de compuestos orgánicos fabricados por los organismos del mismo.

**Nair y Montagnini (2004)**, agrega que estudios referidos a la materia orgánica están estrechamente vinculado al carbono orgánico.

**Young (1989)**, afirma que el carbono es la principal recurso energético que brinda alimento a los organismos microscópicos, sus actividades están vinculadas por la cuota de carbono que se encuentran a disposición en el tiempo, y el carbono que se pierde es proporcional a la cantidad que existe inicialmente.

#### **2.4.3. Fracciones de la materia orgánica**

**Izaurre *et al.* (2001)**, argumenta que el material agregado que componen el suelo se encuentran clasificados en dos tipos o clases: los macroagregados y microagregados teniendo como referencia el tamaño de partícula de 250  $\mu\text{m}$ .

Estos del tipo macroagregados están constituidos de microagregados que se caracterizan por su facilidad de romperse al estar inmersos en agua o bien ser sacudidos además estos materiales orgánicos dan lugar a fuertes conexiones.

También, las labores realizadas en el suelo desempeñan fuertes influencias

en la conformación y el empecinamiento del agregado, de manera especial sobre los macroagregados. De manera general, estas cantidades de carbono y las tasas de C/N disminuyen mientras los agregados del suelo reducen de tamaño, empero la cuota de carbono fijado en los agregados se incrementa progresivamente cuando el tamaño de los agregados se van reduciendo.

**Cambardella y Elliot (1992)**, señalan que las fracciones livianas (FL) conjuntamente con la macro materia del tipo orgánico son las que más decaen debido al manejo que se le da al suelo. La fracción liviana se caracteriza por presentar una densidad por debajo de  $2.0 \text{ g cm}^{-3}$ , con relaciones de C/N por debajo de 25 conteniendo cuotas considerables de residuos de la micro fauna que incluyen hongos e hifas. De otro lado, esta fracción que conforma la macro materia del tipo orgánico del suelo presenta un tamaño igual al de la arena (valores mayores a  $53 \mu\text{m}$ ), se constituye básicamente por fracciones de raíces y restos vegetales en distintos procesos de descomposición, presentan una relación C/N con valores cercanos a 20.

**Parton *et al.* (1987)**, la clasifica en tres tipos de fracciones: pasiva, lenta y activa agrupadas en distintos periodos de descomposición que pueden ser menor a 1 año, entre 5 y 25 años, y finalmente en 1000 años. La fracción del tipo pasiva conforma entre el 40 % y 70 %, la fracción lenta alrededor del 20 % al 40 % y por último la fracción activa bordea entre el 5 % al 10 % en la constitución total de materia orgánica presente en el suelo.

**Meléndez (1997)**, sostiene que las distintas tasas de reciclaje que ocurren

dentro de estas fracciones es resultado de la composición química de los compuestos orgánicos y la forma como están asociadas con las partículas del suelo.

**Duxbury *et al.* (1989)**, consideran que la masa de los microorganismos y las sustancias descompuestas de origen vegetal y los pequeños organismos constituyen la fracción activa.

Mientras que los residuos de origen orgánico de naturaleza compleja o que están parcialmente descompuestos y disponibles para los microbios (ocasionalmente se presentan entre los macroagregados del suelo) y más aún cuando no está disponible como humus conforman la fracción lenta; y por último la fracción pasiva involucra a los distintos compuestos químicos de naturaleza compleja (presentes en los macroagregados) que tiene la propiedad de resultar difícil en su descomposición y por ende no están disponibles para los microbios del suelo.

#### **2.4.4. Fraccionamiento de la materia orgánica**

**Meléndez (1997)**, indica que existen dos métodos para llevar a cabo el fraccionamiento de la materia orgánica y éstos se dan de la siguiente manera: en primer lugar se encuentra el fraccionamiento granulométrico que consiste en separar las fracciones de acuerdo al tamaño.

La materia orgánica tiene la facilidad de fraccionarse en el suelo mediante mallas de distintas dimensiones empleando agua.

La dimensión del material orgánico u orgánicomíneral guarda relación con las fases que ocurren en la descomposición y función en la materia

orgánica presente en el suelo.

Durante el fraccionamiento de la granulometría, el fraccionamiento a nivel individual se equipara con las clases texturales a nivel de partícula del suelo: partículas de dimensiones como la arena (mayores a  $53\mu\text{m}$ ) denominada materia orgánica particulada (MOP); las de fracción limosa (entre  $2\mu\text{m}$  y  $53\mu\text{m}$ ) y por último las del tamaño arcilloso (menores a  $2\mu\text{m}$ ).

De entre sus principales objetivos que se basa el método granulométrico se encuentra la cuantificación de las cantidades que corresponde a cada grupo de fracciones producto de las distintas maneras de manejo.

**Cambardella y Elliot (1992)**, refiere que en segundo lugar se halla el método que corresponde a los fraccionamientos químicos realizados a la materia orgánica contenida en el suelo, cabe precisar que son muy complejas, debido a que los aislamientos químicos alteran la composición química de la materia orgánica contenida en el suelo y no se vincula directamente con el funcionamiento de la materia orgánica del suelo sobre los sistemas agrícolas, debido a ello en gran medida los estudios realizados emplean el método de fraccionamiento granulométrico.

**Meléndez (1997)**, manifiesta que la alteración mecánica sobre la materia orgánica a través de la agitación o sonificación con el fin de destruir los agregados y dejar expuesto la materia orgánica, impide que las variaciones químicas en la materia orgánica que puedan agregarse en el momento de las remociones químicas, sin embargo cabe la posibilidad de presentar el problema de darse las reasignaciones de las fracciones en el tiempo que

ocurre el proceso de perturbación.

El éxito para esclarecer la dinámica del suelo se debe en general a los métodos que contemplan la separación física secuencial teniendo en cuenta las dimensiones de los agregados que están estrechamente vinculadas con la materia orgánica del suelo.

#### 2.4.5. Conversión del carbono calculado a CO<sub>2</sub> equivalente

Yepes *et al.* (2011), afirman que el dióxido de carbono equivalente [CO<sub>2</sub>e] representa la medida métrica que se emplea en la comparación de emisiones de múltiples gases de efecto invernadero (GEI), en base a su potencial de calentamiento global de cada uno. El CO<sub>2</sub>e es el producto del multiplicar las toneladas de GEI por su potencial de calentamiento global. En el caso del metano [CH<sub>4</sub>], su potencial de calentamiento en comparación con el CO<sub>2</sub> resulta 21 veces mayor, por consiguiente el CO<sub>2</sub> equivalente para el metano alcanza el valor de 21. En el caso que se requiera convertir la cantidad de carbono (contenida o emitida) por acción de ecosistemas con especies forestales. El IPCC (2003, 2006), por su parte recomienda emplear el factor de  $44/12=3.67$  (este factor resulta de la división entre el peso atómico de una molécula de CO<sub>2</sub> y el peso específico de la molécula de carbono). Esto es, multiplicando la cuota almacenada en los bosques de toneladas de carbono por el factor 3.67, de esta forma, si algún bosque en concreto acumula  $200 \text{ t Cha}^{-1}$  en promedio, y este es preservado, se evitaría la emisión hacia la atmósfera producto de la deforestación en promedio de  $733.33 \text{ t CO}_2\text{e}$  ( $200 \times 44/12$ ).

## 2.5. HUELLA DE CARBONO

La **FAO (2012)**, indica que es una medida que posibilita la cuantificación de la cantidad de gases de efecto invernadero liberadas hacia la atmósfera a causa de las actividades que se realizan para la comercialización o en la producción de productos sean de origen agrícola o industrial, es preciso señalar que para llevar a cabo esta actividad se debe considerar todas las acciones, empezando por el ciclo de vida, culminando en la gestión como residuo. Cuantificar la huella de carbono trae consigo beneficios significativos en los agricultores, debido a que contribuye de manera responsable en la sostenibilidad del sector agrícola.

En años posteriores, el consumo de mercancías etiquetadas donde se señala la huella de carbono tendrán efecto en las leyes y aceptación de los consumidores en la promoción responsable de una manufactura que posean las menores emisiones generando cambios en las cadenas de producción.

### 2.5.1. Medición de carbono en el suelo

**Rügnitz *et al.* (2009)**, afirma que el carbono contenido en el suelo se encuentra de forma orgánica e inorgánica. Por un lado, el contenido orgánico es igual a la mayor acumulación en coacción con la atmósfera. Mientras que el carbono orgánico que se halla en el suelo muestra el balance dinámico que acontece entre la absorción de material de origen vegetal muerto y la merma por descomposición (mineralización).

a) Métodos de laboratorio para analizar carbono contenido en el suelo

Para la elección del método adecuado del muestreo del suelo se deberá considerar el tipo de análisis del carbono contenido en el

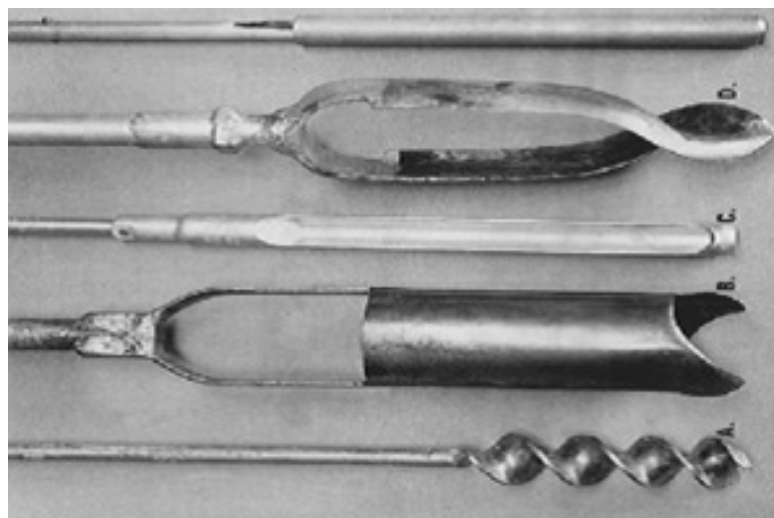
suelo a realizarse en el laboratorio que se encontrará a disposición. El método más empleado en los laboratorios para realizar los análisis de contenido de carbono corresponde al de Walkley y Black (método de oxidación húmeda) principalmente a su ventaja de no demandar de equipos muy sofisticados. Sin embargo, este método de oxidación húmeda no considera el conteo de carbonatos.

b) Método para el muestreo de suelo en campo

De las principales maneras en realizar muestreos de suelo conducidos en campo, se encuentra el de realizar las calicatas y el emplear barrenos.

Debido al elevado costo y demanda de tiempo en la aberturas de calicatas, es recomendable usar el barreno (ver figura 3).

**Figura 3:** Barrenos.



Fuente: Rüginitz *et al.* (2009).

i) El nivel de la profundidad para realizar el muestreo esta en función a la tipología del proyecto, la configuración topográfica del área, especies vegetales consideradas y profundidad estimada

en que sucedan cambios en el stock de carbono presentes en el suelo. De manera general, la cantidad de carbono orgánico contenida en el suelo resultan más elevadas en su capa superior y se reducen de manera exponencial a medida que se incrementa la profundidad.

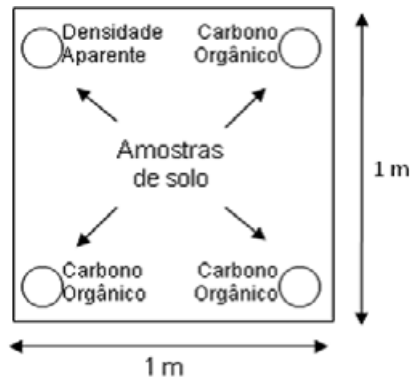
Es recomendable realizar la medición del almacén de carbono del suelo en profundidades de 30 cm como mínimo, distribuyendo esta medida en tres horizontes (0 – 10, 10 – 20, 20 – 30 cm).

A esta profundidad en la que se realiza la medición es muy probable que sucedan cambios perceptibles en el almacén de carbono mientras dure el proyecto. Es necesario tener muestras colectadas - por separado - para cada nivel de profundidad que se tiene planeado seleccionar, con el propósito de llevar a cabo el análisis de carbono orgánico, raíces finas y densidad aparente.

ii) Colecta de muestras para medición de carbono orgánico

Es recomendable coleccionar como mínimo tres muestras de suelo a distintas profundidades en cada parcela (figura 4), empleando un cilindro metálico de volumen conocido (ej. barreno). Después las muestras colectadas deberán mezclarse en un mismo contenedor, en seguida se retira una muestra con un peso aproximado de 200 gramos, para luego ser depositada dentro de un envase de papel o plástico y finalmente ser trasladada al laboratorio. Es muy importante tener en cuenta que cada muestra de suelo tendrá que ser colectada de manera minuciosa a fin de evitar su pérdida.

**Figura 4:** Distribución de la parcela para muestreo.



Fuente: Rüginitz *et al.* (2009).

iii) Colecta de muestras para medición de densidad aparente

La cuantificación de carbono depositado en el suelo requiere determinar la densidad aparente del suelo para cada profundidad, dentro de cada parcela. Por lo cual, se emplea material de una de las extremidades de la parcela que no son considerados en la colecta de muestras con las que se realizará la determinación del carbono orgánico. Para calcular la densidad aparente, es necesario que las muestras colectadas del suelo tienen que ser extraídas haciendo uso de cilindros metálicos específicos para este tipo de situaciones y deberá ser de volumen conocido. Las muestras obtenidas tienen que provenir de cada profundidad seleccionada.

En casos donde se presenten suelos de tipo pedregosos y de textura gruesa, no es recomendable calcular la densidad aparente empleando cilindros metálicos debido a que se pueden incurrir en errores y dando lugar a la obtención de valores sobrestimados. Para subsanar este error, es importante realizar muestreos a

través de calicatas. Así, en cada nivel de profundidad u horizonte definida para un perfil determinado, es recomendable realizar labores de excavación con la finalidad de estimar el volumen porcentual que son ocupados por piedras. O sea, la evaluación del porcentaje de pedregosidad ocurre a través de la observación directa, utilizando una regla graduada para medir el tamaño máximo y mínimo de las piedras presentes en la calicata.

**López-Merchán (2017)**, expresan que el método por oxidación húmeda, propuesta por Walkey y Black, no incluye el conteo de carbonatos y como desventaja de este método es la solo estimación del carbonato fácilmente oxidable (CFC) siendo necesario utilizar un factor de corrección que cambia según el tipo de suelo y horizonte para estimar el carbono orgánico total (COT), además, utiliza grandes de ácido sulfúrico.

### **2.5.2. Modelos de simulación del carbono orgánico del suelo**

Los modelos de simulación hacen uso de expresiones matemáticas que son cimentadas de las teorías científicas con el propósito de explicar de manera abstracta el funcionamiento de un sistema. La principal finalidad radica en la obtención de conclusiones del sistema real por medio de la estimación o predicción, su representación o perfeccionamiento sobre el entendimiento de los vínculos que existen entre los elementos que incluyen el sistema. Existen modelos matemáticos que permiten simular la dinámica de la materia orgánica contenida en el suelo y son empleados mayormente para pronosticar las variaciones del contenido de carbono como resultado a los

cambios de uso en el suelo, su manejo o la influencia del clima.

A continuación se presentan algunos modelos que tiene la propiedad de simular las alteraciones producidas a largo plazo en la concentración de materia orgánica contenida en el suelo. Muchos de estos modelos matemáticos tienen la particularidad de simular amplios rangos de climas y usos que se le da al suelo. En general, estos modelos matemáticos dividen en distintos compartimentos la permanencia del carbono orgánico contenido en el suelo de acuerdo a su tiempo de morada.

- CANDY (Carbon-Nitrogen-Dynamics), este modelo desarrollado en Alemania, facilita la descripción de los movimientos del carbono y el nitrógeno en suelos donde existen cultivos agrícolas, donde se asume que hay veinte capas homogéneas de diez centímetros de espesor en cada una. Involucra cuatro submodelos que consideran: agua, temperatura y la dinámica entre el nitrógeno y la materia orgánica. Los datos de ingreso o entrada principalmente se conforman de las condiciones climáticas, condiciones adherentes propias al buen desarrollo de los cultivos (siembra, alcance de las raíces en el suelo, entre otras), clase textural del suelo y sus labores agronómicas.
- CENTURY, el modelo en mención tiene la capacidad de simular a largo plazo los movimientos de la materia orgánica, el crecimiento de las plantas y los ciclos de azufre, fósforo y nitrógeno. Este modelo fue propuesto por la Universidad de Colorado con la finalidad de estudiar pastos. No obstante, su empleo ha trascendido a cultivos agrícolas, savanas y bosques.

Este modelo esta conformado por múltiples submodelos: material orgánico del suelo y su proceso de descomposición, acumulamiento de agua, forrajes, cultivo agrícola y forestal, manejo y otras funciones que especifican los factores de realización como los espacios de tiempo a analizar. La materia orgánica en estado fresco tienden a separarse en dos compartimientos, uno de tipo metabólico y otro estructural mientras que el material orgánico del suelo en tres: pasivo, lento y activo. La clase textural del suelo ordena el ratio de carbono que es transportado entre comportamientos.

Por consiguiente el presente modelo tiene la facilidad de realizar simulaciones sobre la concentración de carbono contenida en el suelo en el tiempo de su conformación y después sobre la explotación y manejo del suelo.

- DAYSI, permite realizar la simulación de la dinámica del carbono, la energía, el agua, el nitrógeno y los productos agroquímicos que ocurre en el suelo. Este modelo matemático fue concedido en Dinamarca para diversas explotaciones del suelo en sistemas agrícolas. El modelo permite predecir la manufactura, los impactos medioambientales y los cambio sobre la calidad del suelo a lo largo del tiempo. Mientras que los factores que definen la dinámica corresponden a la actividad de organismos microscópicos y el porcentaje de arcilla.
- DNDC (Denitrificación and Decomposition), tuvo su desarrollo en ecosistemas agrarios de los Estados Unidos de América. El modelo facilita la predicción de la temperatura del suelo, las normas que

reglamentan la humedad, dinámica del nitrógeno y el carbono, el crecimiento de los cultivos además de las emanaciones de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O por medio de los procesos de desnitrificación y descomposición. Esta conformado por cuatro submodelos: las condiciones de origen climático, desnitrificación, el crecimiento de las plantas y por último su descomposición la cual involucra factores relacionados al tipo de explotación agrícola. Para calcular el contenido de carbono que puede ser retenido por el suelo dependerá del porcentaje de arcilla que contenga el suelo.

- ROTHC, modelo predictivo que tuvo origen en el Reino Unido por los investigadores **Coleman y Jenkinson (1996)** con la finalidad de realizar simulaciones en la dinámica del carbono en suelos que presenta condiciones aeróbicas que no involucra el movimiento del nitrógeno.

Este modelo es perceptible a la configuración del suelo, la humedad, temperatura y el periodo de cobertura del suelo por los cultivos, de la misma manera que el ingreso de carbono debido a la vegetación o el agregado mediante compost. Este modelo también sirve para determinar la productividad primaria neta y las entradas al suelo de carbono.

- NCSOIL, este modelo que simula flujos de carbono y nitrógeno a través del suelo y los microorganismos. Está conformado por cuatro compartimentos: residuos de plantas, biomasa microbiana, humus activo y materia orgánica estable.

La estabilidad de la materia orgánica está estrechamente relacionada con el metabolismo y no propiamente con mecanismos de adsorción relacionados con el contenido de arcilla. La actividad microbiana incide sobre la descomposición de los residuos y la estabilidad del material resultante.

- SOMM, es un submodelo sobre humus que forma parte del modelo SPECOM desarrollado para bosques en Rusia.

Los procesos en este submodelo están regulados por el nitrógeno, el contenido de la hojarasca, la temperatura y la humedad. Se diferencia de los demás modelos y submodelos, en que estudia, el flujo de carbono entre los distintos horizontes del suelo. Su movimiento y la calidad del material resultante está determinado por la actividad biológica y la humificación de los residuos.

**Smith *et al.* (1997)**, realizó una comparación de alguno de los modelos señalados, después de realizar la simulación de 12 bases de datos que comprenden distintas explotaciones del suelo (del tipo forestal, forrajes y agrícola), actividades de manejo y espacios climáticos. De acuerdo a sus conclusiones, los modelos matemáticos (RothC, CENTURY, DAISY, CANDY, NCSOIL y DNDC) reportaron los ajustes más deseables entre los valores simulados frente a los evaluados, por el contrario estos cuatro modelos (RothC, NCSOIL, CENTURY y SOMM) resultaron los más adecuados en todas las explotaciones del suelo estudiadas.

## 2.6. BIOMASA

**María de Juana *et al.* (2003)**, define el termino biomasa a alguna clase de material orgánico procedente de un proceso biológico.

Este concepto engloba a manufacturas de origen vegetal y animal y, esta calificación genérica de biomasa involucra un conjunto muy variado de material, ya sea por el origen como por su naturaleza. Considerando el origen es factible hacer diferencias, desde el punto de vista de la ecología, múltiples ordenes de biomosas:

- Biomasa primaria, es la materia orgánica formada directamente por los seres que realizan la fotosíntesis (algas, plantas verdes y demás seres autótrofos). Este grupo comprende toda la biomasa vegetal, incluidos los residuos agrícolas (pajas o restos de podas) y forestales (leñas).

- Biomasa secundaria, es la producida por los seres heterótrofos que utilizan en su nutrición la biomasa primaria.

Este tipo de biomasa implica una transformación biológica de la biomasa primaria para formar un nuevo tipo de biomasa de naturaleza distinta a la inicial. Un ejemplo sería la carne o las deyecciones debidas a los animales herbívoros.

- Biomasa terciaria, es la producida por los seres que encuentran sus alimentos en la biomasa secundaria, como sería el caso de la carne de los animales carnívoros, que se alimentan de herbívoros

**Delgado (2008)**, la formación de biomasa vegetal y fitomasa se lleva a cabo por el proceso de fotosíntesis a través de las plantas que capturan y emplean la energía de lumínica para convertir el material inorgánico del medio externo en materia

orgánica de elevado contenido energético, que posteriormente será utilizado en su desarrollo y crecimiento.

### 2.6.1. Estimación de la biomasa

**Higuchi *et al.* (1998)**, afirman que los modelos que expresan la biomasa son las más empleadas para predecir el contenido de carbono capturado en los bosques, y por consiguiente se establecen en muchas investigaciones vinculadas con cuantificar la biomasa existente en muchos de estos bosques naturales.

**Rügnitz *et al.* (2009)**, señalan que hay dos métodos de predecir o medir la biomasa de arboles que se ubican sobre el suelo y estos son: el método directo (o destructivo) que es empleado en la construcción de modelos matemáticos alométricos y factores de expansión de la biomasa que permite cuantificar la biomasa mediante el conteo de uno o más individuos (árboles) y realizar el peso directo de cada parte del árbol (hojas, ramas y fuste) y como paso final extrapolar los resultados para la superficie total.

De otra parte, el método indirecto, se fundamenta en el uso de modelos matemáticos o factores de expansión que posibiliten establecer relación con determinadas dimensiones básicas que se obtienen en el tiempo de llevar a cabo los muestreos en campo (de fácil medición) con las principales características deseadas, de manera que no se repita medir estas últimas. Se tiene casos donde es posible calcular la biomasa total de un árbol a través de la medida de su diámetro.

Estos modelos matemáticos se generan mediante una técnica estadística denominada análisis de regresión.

**Ares *et al.* (2002)**, expresan que la alometría es un procedimiento donde no se realiza ningún tipo de destrucción y se basa en el desarrollo de ecuaciones que relacionan distintas dimensiones de un objeto (p.e: un árbol, cultivo agrícola u órgano vegetal). Estas ecuaciones posibilitan estimar la producción de biomasa de un cultivo, establecer sus estados de crecimiento y modelos de reciclaje de nutrientes. Este procedimiento se ha realizado de manera específica en áreas forestales donde se han conducido estudios para determinar la fijación biológica de carbono en el contexto mundial.

**Yepes *et al.* (2011)**, sostienen que para determinar los contenidos de carbono, primero se realizará la estimación de la biomasa o materia seca; esto se lleva a cabo recolectando en campo el peso humedecido del material cosechado y seguidamente en el laboratorio se obtiene el peso seco de la muestra colectada.

$$BS = [PS \text{ muestra}/PH \text{ muestra}] \times BH \quad (2)$$

donde, BS representa la biomasa seca de la muestra cosechada en campo (kg); PS muestra se refiere al peso seco de la muestra transportada al laboratorio para calcular la concentración de humedad (kg), PH muestra indica el peso con contenido de humedad de la muestra conducida al laboratorio para cuantificar la concentración de humedad (kg); y BH señala la biomasa o peso con el contenido de humedad de todo el material

cosechado a nivel de campo.

Además, para realizar la cuantificación de la cantidad de carbono cosechado se hace uso de la siguiente ecuación:

$$[C \text{ muestra}] = BS/CF \quad (3)$$

donde, [C muestra] indica la cuota de carbono contenido en la biomasa de la muestra [kg C m<sup>2</sup>]; BS se refiere a la biomasa sin humedad (seco) del material cosechado a nivel de campo [kg] estimada con la ecuación 2; y CF representa la fracción de carbono [kg C] que fue determinado a nivel de laboratorio o utilizando el valor patrón del IPCC = 0,5.

Y finalmente señala que la cuota de carbono en la biomasa sin humedad (seco) por hectárea, se calcula a partir de la dimensión de la parcela expresado en m<sup>2</sup>: i) se transforma las unidades de la muestra de kilogramos de carbono [kg C] a toneladas de carbono [t C], realizando la división por 1000; y ii) el valor que se obtiene se traslada a hectáreas haciendo uso del factor 10000 [ecuación 4].

$$[C][t \text{ C ha}^{-1}] = [10000 \text{ m}^2]/[\text{tamaño de la parcela en m}^2] \times \frac{C \text{ muestras}}{1000} \quad (4)$$

donde, [C] se refiere a la cuota de carbono en la biomasa de vegetación de especies no arbóreas [t C ha<sup>-1</sup>]; [C muestras] representa la suma total de la cuota de carbono de todas las muestras [kg C/tamaño de la parcela en m<sup>2</sup>].

### **2.6.2. Técnicas de análisis de crecimiento en cultivos agrícolas**

La productividad de los cultivos, basado en términos biológicos, empieza en el momento que inicia la fase de producción con fines comerciales, y se ve alterada por diversos factores, varios de ellos correspondientes al genotipo, algunos del ambiente, y otros de las exigencias de explotación. Estos componentes influyen mediante cambios que se manifiesta en la diferenciación y expansión de órganos, en la captura de recursos por parte de ellos, de igual manera en la forma como se distribuyen esos recursos hacia los diferentes órganos de la planta. Producto de estos efectos suceden modificaciones sobre el almacenamiento de biomasa entre las diferentes partes de esta. Para realizar la evaluación de cómo las variaciones en el genotipo, el medio ambiente y las condiciones de manejo alteran el almacenamiento de biomasa a nivel de planta se han llevado a cabo, empezando de las primeras décadas del siglo pasado, avances en el desarrollo de técnicas matemáticas para el “análisis de crecimiento vegetal”.

Comenzando de mediciones sencillas que comprenden área foliar y peso de los diferentes órganos han dado como resultado parámetros que posibilitan la estimación, teniendo siempre en consideración precisión confiable, de procedimientos principales que dan lugar a la productividad, por ejemplo la tasa de fijación de carbono y la repartición de fotoasimilados hacia los distintos órganos de una planta. Avances posteriores en estas técnicas matemáticas facilitan la predicción de la eficiencia de la planta respecto al uso de los recursos del ambiente destinado en la producción de biomasa.

En la actualidad, el análisis de crecimiento ha logrado posicionarse como una disciplina relacionada con la agronomía y ecofisiología, desarrollando sus propias definiciones, términos y herramientas de cálculo, basándose en la construcción de modelos de crecimiento generales además de especies hortícolas cultivadas intensivamente.

El “análisis clásico” consiste en analizar una planta separada, que, en su expresión más sencilla, establece la fijación de carbono por unidad de superficie foliar, y la proporción del carbono aprovechable que se usa en la producción de área foliar, intervienen en el almacenamiento de biomasa en toda la planta. Esta clase de análisis es específicamente adecuado para plantas que están en fase exponencial de crecimiento, de allí que radica su favoritismo por su uso, en estudios de ecología, donde se evalúa la competencia temprana entre plantas. No obstante, estos análisis pueden acondicionarse de manera satisfactoria en estudios que contemplan etapas más tardías.

**Di Matteo *et al.* (2015)**, sostienen que el procedimiento del análisis clásico ha sido utilizada ampliamente en estudios de ecología y fisiológicos a nivel básico, de igual manera su aplicación se ha difundido a cultivos extensivos, sin embargo su uso en cultivos intensivos no ha tenido mucha difusión.

**Di Benedetto y Tognetti (2016)**, manifiestan que distintos factores han ayudado a esta situación, por ejemplo lo complicado en el manejo de múltiples cultivos intensivos y en la situación de que la cosecha, en diversas circunstancias, se lleva a cabo en una condición avanzada del

ciclo de vida de la planta que hace tiempo dejó de crecer, al menos, de manera exponencial. Lo cual dificulta establecer la aplicación de un método de análisis de crecimiento concebida inicialmente para escenarios mucho más sencillos. Otro factor podría ser que el análisis del crecimiento se ha desarrollado con el fin de estudiar el almacenamiento de biomasa seca; no obstante, en los cultivos intensivos, el almacenamiento de peso fresco tiene mayor significancia comercial.

De todas formas, se puede asistir estas complejidades para posibilitar el uso de este método de análisis del crecimiento vegetal que puede brindar múltiples ventajas en el momento de realizar la evaluación de los efectos de tratamientos experimentales. Este análisis se ha ampliado a nivel del dosel arbóreo con el fin medir el crecimiento, no solo de plantas separas, sino también de los cultivos, preferentemente los extensivos.

No obstante, su aplicabilidad regularmente no ha sido suficientemente aprovechado en la obtención de conclusiones en relación al rendimiento.

#### **2.6.2.1. Validación estadística**

**Di Benedetto y Tognetti (2016)**, al respecto señala que es factible realizar comparaciones estadísticas de los coeficientes calculados desde las regresiones lineales (RLAE, RLA, RGR, NAR, LAR, LAP y las alometrías) de tres maneras:

- a) si en la experimentación se emplea el diseño estadístico en bloques completamente aleatorizado es viable determinar cada estimador en cada bloque y posteriormente realizar

la prueba del análisis de varianzas habitual, en la situación de validarse los supuestos (ANOVA, Tukey), para calcular la significancia estadística.

- b) **Warton *et al.* (2012)**, refiere que con el uso del software estadístico SMATR es factible determinar las diferencias estadísticas significativas en las ordenadas al origen y la pendiente de las regresiones lineales empleadas.
- c) en ajustes funcionales, el paquete de software R facilita el análisis de los parámetros concernientes mediante el paquete GLM (Generalized Linear Models).

### **2.6.3. Principales funciones matemáticas en cultivos agrícolas**

Existe una relación de proporcionalidad en el número de parámetros de función y “ajustes” que esta es capaz de lograr con cualquier conjunto de datos. Por ejemplo, se tiene las llamadas funciones polinomiales en donde un polinomio de primer grado posee dos parámetros (intersección y pendiente) y únicamente puede describir una línea recta. Por otra parte, un polinomio de segundo grado puede mostrar un punto de inflexión, es decir, un máximo o un mínimo. En tal sentido, conforme aumenta el grado del polinomio crece el número de puntos de inflexión, que este puede contener, y si poseen tantos parámetros como puntos, entonces el ajuste del modelo es perfecto. No obstante, utilizar modelos con muchos parámetros no es conveniente por dos razones fundamentales: primero, los parámetros deben tener un significado biológico para que posean un

verdadero valor y, segundo, un modelo con muchos parámetros dificulta el cálculo de las derivadas de interés.

**Rodríguez y Leihner (2005)**, manifiesta que el investigador del análisis de crecimiento deberá utilizar el menor número de parámetros posibles para describir sus datos, atendiendo el criterio estadístico de ajuste pero, sobre todo, no olvidando el criterio biológico de pertenencia y significado de cada parámetro involucrado en donde este último ha sido el criterio más determinante.

**Consuelo et al. (2013)**, señala que los modelos matemáticos son aquellos que describen los vínculos entre los componentes (variables) de un sistema de términos de expresiones matemáticas (p.e ecuaciones diferenciales) o los vínculos entre las distintas partes del sistema mediante grafos, es decir, que usan todas las herramientas que nos dan las matemáticas para describir la evolución de las variables y las relaciones entre ellas y las distintas partes del sistema. Indican también que si los modelos matemáticos utilizan solo magnitudes y ecuaciones se denominan modelos numéricos.

Estos modelos pueden ser discretos, continuos, etc., dependiendo del tipo de ecuación elegida por el investigador a utilizar.

**León-Valverde y Barrera (2003)**, afirman que los modelos matemáticos se clasifican de acuerdo a:

- 1) Por el tipo de variable

**Determinístico**, son modelos matemáticos de función simple; para cada condición dan un valor fijo determinado.

**Estocástico**, son modelos matemáticos basados en la densidad de probabilidad, por tanto, cada condición a ser simulada puede dar resultados diferentes, dentro de los niveles probabilísticos de dicha respuesta.

**Continuo**, si las alteraciones en los valores de las funciones ocurren en forma continua, es decir a una tasa constante a medida que el tiempo varía.

**Discreto**, si los cambios ocurren en puntos discretos del tiempo.

2) Por el tipo de estructura temporal

**Estáticos**, aquellos que no incluyen el tiempo. Por ejemplo se tiene la respuesta a dosis de fertilización.

**Dinámicos**, aquellos que incluyen el tiempo. Por ejemplo la época de siembra, respuesta animal a algún tipo de alimentación, etc.

Señalan también que estos modelos de simulación o matemáticos incluye también combinaciones como:

- **Estático determinístico**, modelo no aleatorio que no incluye la variable tiempo. Se tiene como ejemplo los casos de funciones de respuesta.
- **Dinámico determinístico**, modelo que engloba la variable tiempo, pero su respuesta es de certeza absoluta. Por ejemplo el modelo de programación dinámica.
- **Estático probabilístico**, modelo aleatorio que no incluye tiempo. La programación lineal estocástica o probabilística es el modelo que

representa estos casos.

- **Dinámico probabilístico**, es un modelo aleatorio que incluye la variable del tiempo. El ejemplo más resaltante es el programa de simulación probabilístico para animales al pastoreo.

**Rodríguez y Leihner (2005)**, precisan puntualmente las siguientes funciones matemáticas que se describen a continuación:

a) **Funciones polinomiales**

En una función polinomial, la variable dependiente se expresa como la suma de por lo menos dos términos. Específicamente, una función polinomial incluye términos que son diferentes potencias de la misma variable primaria. El nombre proviene del híbrido entre el griego poli (muchos) y el latín nomen (nombre o término). Estas funciones polinomiales comparten propiedades estadísticas y matemáticas que explican su extraordinaria popularidad entre los investigadores que se enfrentan con el problema de ajustar curvas de crecimiento.

Entre sus propiedades, la de mayor importancia esta que los análisis de regresión es del tipo lineal.

El autor señala también que un modelo lineal no necesariamente es una línea recta, sino la suma de sus términos.

Como ejemplo se tiene la siguiente ecuación, para el caso de peso seco (P):

$$P = a + bT \tag{5}$$

en donde “a” representa la intersección o el peso inicial, “b” la tasa de cambio o pendiente de la función y “T” la variable independiente o tiempo. La primera derivada de esta función  $\frac{dP}{dT}$  es igual a “b”. En este caso  $b = TCR$  y puede, desde luego, adoptar valores positivos, iguales a cero o negativos. Desde el punto de vista biológico, la interpretación de esta función está basada en la subdivisión de las células a intervalos regulares que conduce a un incremento geométrico y exponencial del peso y número de células respecto al tiempo.

El polinomio de segundo grado conocido como polinomio cuadrático o parabólico e incluye un único punto de inflexión. Su función es igual a:

$$P = a + b_1T + b_2T^2 \quad (6)$$

y su primera derivada  $\frac{dP}{dT} = b_1 + 2b_2T$ , corresponde a la TCR. El parámetro “a” representa, como en todos los polinomios, el tamaño o peso seco, cuando  $T = 0$ , el parámetro  $b_1$  indica el valor de la TCR en el tiempo  $T = 0$  y, el parámetro  $b_2$  refleja el grado de curvatura o la tasa de cambio en las progresiones de la TCR.

Finalmente, el polinomio de tercer grado o cúbico posee dos puntos de inflexión. La función es igual a:

$$P = a + b_1T + b_2T^2 + b_3T^3 \quad (7)$$

y su primera derivada  $\frac{dP}{dT} = b_1 + 2b_2T + 3b_3T^2$ , corresponde a la TCR.

El parametro “a” tiene el significado usual, pero resulta imposible adscribirle un significado de criterio biológico a los coeficientes “b” en todas las ocho permutaciones de signo. Esta complejidad conceptual provoca a menudo que se utilicen los polinomios de tercer grado únicamente como aproximaciones empíricas para ajustar progresiones que exhiben un solo punto de inflexión, o una simple dirección de curvatura que cambia su intensidad conforme progresan los datos. La forma de curva siempre es determinada por los signos de los coeficientes, y su grado de curvatura, por sus magnitudes.

**Picard et al. (2012)**, argumenta que el modelo polinomial debe usarse con prudencia, puesto que los polinomios son capaces de ajustarse a cualquier forma siempre que el grado “p” sea elevado (las funciones usuales se pueden descomponer todas en una base de polinomios; es el principio del desarrollo limitado).

Concretamente, se puede tener un polinomio que se adapte muy bien a la forma de nube de puntos en el ámbito de los valores de datos disponibles pero que tome una forma muy inverosímil fuera de dicho ámbito. En consecuencia, el modelo polinomial puede presentar peligros de extrapolación, mucho mayores cuanto más importante sea el grado del polinomio. En la práctica, se debe evitar a toda costa ajustar polinomios de grado superior a 3.

#### b) Funciones asintóticas

En una **función asintótica**, cualesquiera sean sus propiedades, la forma de su progresión es gobernada por una característica: el valor

de la variable dependiente asciende (o desciende) gradualmente hacia un valor límite que jamás alcanza. Este **valor límite** es conocido como la **asíntota de la función**.

A diferencia de las funciones polinomiales ya descritas, las funciones asíntóticas son no - lineales. Esto significa que los parámetros de este tipo de función no son combinados aditivamente en una secuencia lineal, sino que son sujetos a división, multiplicación o potenciación entre sí.

El caso más sencillo dentro de este grupo de funciones lo constituye el modelo llamado **monomolecular**.

**León-Valverde y Barrera (2003)**, sostiene que el modelo llamado monomolecular asume que la cantidad de la masa de crecimiento es constante e independiente del peso. Esta masa trabaja a una tasa proporcional al nivel del sustrato (S) y el crecimiento es irreversible (no considera situaciones donde el organismo pierde peso debido a penurias nutricionales, enfermedades, plagas, etc.). La ecuación diferencial se puede escribir como  $\frac{dP}{dt} = KS$ , donde "K" es una constante.  $S_f = 0$ , entonces  $S = P_f - P$  y la ecuación diferencial se puede representar en función del peso:  $\frac{dP}{dt} = K(P_f - P)$ . Luego de integrar, la ecuación se puede reescribir como:

$$Y_i = \alpha[1 + \varepsilon^{-\beta(t_i + \delta)}] \quad (8)$$

También señala que la función o ecuación logística asume que la cantidad de masa de crecimiento es proporcional al peso. Es decir que

su masa en crecimiento es proporcional a la cantidad de sustrato (S) y el crecimiento considerado es irreversible. La ecuación diferencial para este caso sería:  $\frac{dP}{dt} = KWS$ , donde, “K” es una constante. Como  $S = P_f - P$ , entonces  $\frac{dP}{dt} = KP(P_f - P)$ . En este tipo de ecuación es conveniente trabajar con una constante  $\mu$  que este en función del peso asintótico,  $P_f : K = \mu/P_f$ .

Por lo tanto,  $\frac{dP}{dt} = \mu P(1 - P/P_f)$ . Luego de la integración y el re-arreglo de los componentes, la ecuación logística puede ser escrita para calcular los parámetros en función del tiempo como:

$$Y_i = \frac{\alpha}{1 + \beta \varepsilon^{-\delta t_i}} \quad (9)$$

Y por último, la ecuación de Gompertz asume que el sustrato no es limitante. La masa de crecimiento está siempre saturada con sustrato. La cantidad de la masa de crecimiento es proporcional al peso P, con una constante de proporcionalidad  $\mu$ . La efectividad de la masa de crecimiento decae con el tiempo, siguiendo una cinética de primer orden, lo cual produce una caída exponencial.

Esta caída puede ser asociada a degradación, senescencia, o desarrollo y diferenciación de órganos.

La ecuación diferencial es:  $\frac{dP}{dt} = \mu P$ ; el parámetro de la tasa de crecimiento específico,  $\mu$ , no es constante sino que está gobernado por:  $\frac{d\mu}{dt} = D\mu$ , donde  $\frac{d\mu}{dt} = -D\mu$ , y “D” es un parámetro que describe la caída de la tasa de crecimiento específica  $\mu$ ; luego de la integración resulta en  $\mu = \mu_0 \varepsilon^{-Dt}$  en donde  $\mu = \mu_0$  cuando  $t = 0$ . Entonces,

$$\frac{dP}{dt} = \mu_0 P \varepsilon^{-Dt}.$$

Después de integrar tenemos la ecuación se puede reescribir como:

$$Y_i = \alpha \varepsilon^{-\delta \varepsilon^{-\beta t_i}} \quad (10)$$

## 2.7. ESTRATEGIAS PARA REDUCIR EMISIONES DE GEI

**Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (2014)**, manifiestan sobre las emisiones de GEI (Gases de Efectos Invernadero) se logran evitar o reducirse a través de medidas de mitigación dirigidas la producción, vale decir, mediante la reducción en las emisiones de GEI por superficie agrícola, animal o unidad de producto, o mediante medidas de mitigación en el caso de la demanda, considerando incluso la cadena de repartición, almacenaje y consumo de alimentos y fibras.

Además la tecnología y prácticas que regulan la mitigación de GEI originadas desde la producción agrícola involucran el sistema de explotación de cultivos, explotación de forrajes, recuperación de suelos orgánicos, bioenergía, recuperación de tierras degradadas y una correcta aplicación en el manejo y aplicación de fertilizantes químicos especialmente los que contienen nitrógeno. En el caso de la producción pecuaria (vacunos), la aplicación de tecnologías y prácticas que regulen la mitigación de GEI, siendo las más usadas aquellas que, involucran la crianza de animales que expresan elevados rendimientos, variación de la dieta, el manejo de estiércol a fin de reducir el CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, y la producción de bioenergía.

**Follet et al. (2001)**, expresa que generalmente el sistema de explotación en cultivos agrícolas tal que reduzca la mitigación de GEI es posible concretarse haciendo un mejor empleo de las prácticas agrícolas que aumenten los rendimientos

y originan grandes contribuciones de carbono residual, obteniéndose por tanto un mayor acumulación de carbono en el suelo.

**Estévez (2010)**, nos dice que la agricultura puede considerarse como un sumidero a largo plazo, cuando el dióxido de carbono que captura la planta es acumulado en el suelo por las raíces, en cambio, se le llama sumidero temporal cuando el dióxido de carbono necesario para el C es fijado durante la cosecha y subproductos.

**Freibauer *et al.* (2004)**, mencionan que alternativamente hay otras clases de prácticas agrícolas que brindan cobertura vegetal - hasta un tiempo determinado - entre cultivos sucesivos. Consecuentemente la cubierta vegetal agrega carbono a los suelos, previene la erosión y facilita la extracción de nitrógeno - en cualquier forma disponible - contenido en los suelos, disminuyendo de esta forma las emisiones de óxido nitroso.

**CMNUCC (2008)**, considera que estas prácticas agrícolas engloban la utilización de cultivares mejorados para incrementar el rendimiento y biomasa tal que añade carbono residual, por lo que se deberá tener en consideración de manera especial las demandas de fertilizante nitrogenado a fin de no desperdiciar las ganancias en carbono a través de la emisión de óxido nitroso a causa de aplicar estos fertilizantes.

**Ordoñez (1998)**, afirma que a fin de hacer propuestas viables enfocadas en la mitigación del cambio climático es fundamental, por un lado, tener conocimiento del movimiento del carbono en los ecosistemas forestales y, de otra, las alteraciones a los flujos de carbono resultantes de los patrones de variabilidad en el uso de suelo. Por consiguiente, el primer paso de manera obligatoria a fin de concretar este objetivo, resulta con tener o acceder a datos básicos acerca de las concentraciones de carbono en las distintas reservas del ecosistema.

## 2.8. ASPECTOS GENERALES DEL CULTIVO DE PAPA

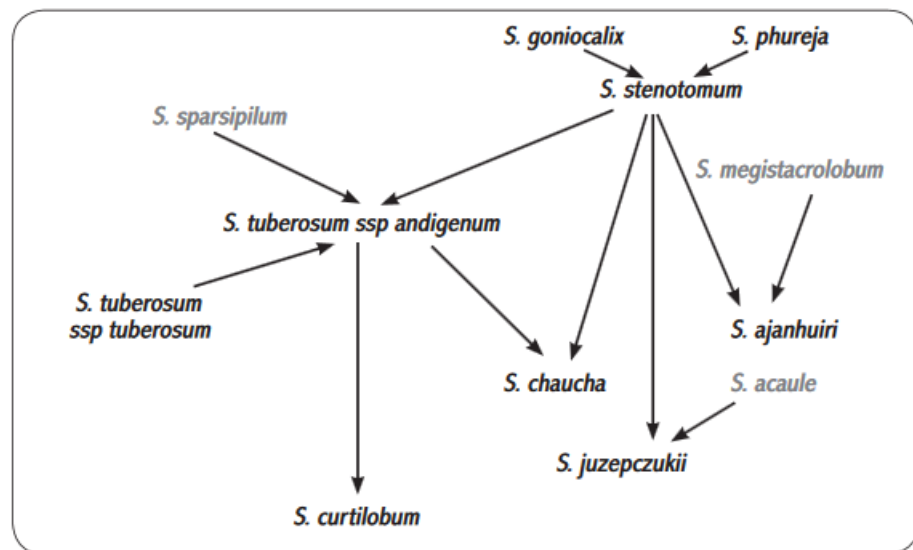
### 2.8.1. Orígenes del cultivo de papa

**Tapia y Fries (2007)**, en la región de los andes - específicamente al sur del Perú - y una zona colindante con el país de Bolivia destacan en ser el principal centro donde se inicio la domesticación de múltiples especies de papa, posicionándose como el alimento primordial para muchas familias especialmente de origen campesino, además de la población mundial. También se indica la existencia de otro centro de origen situado en país vecino de Chile, específicamente en la isla de Chiloé.

**Bukasov (1971)**, la “papa” se agrupa en nueve especies diferentes, los investigadores que formaron parte la excursión rusa en el año 1923 que posteriormente dan a conocer los resultados en 1971, plantean la existencia de 21 especies distintas de papa.

**Hawkes (1979)**, el origen de la papa se precisa en la figura 5 y, se establece que las especies silvestres que se describen a continuación: *S. sparsipilum* o arak papa, *S. megistacrolobum* y *S. acaule* (atoq papa o apharu); han permitido crear nuevas especies cultivadas que con el paso del tiempo y la intervención de los agricultores, probablemente con la mayor participación de sus esposas, han permitido a lo largo del tiempo seleccionar una gran variabilidad dando lugar a lo que conocemos como papas nativas.

**Figura 5:** Relación de parentesco evolutivo de las papas cultivadas.



Fuente: Hawkes (1979).

### 2.8.2. Nombres científicos de la papa

Ochoa (1990), de acuerdo a su clasificación taxonómica, da lugar a nueve especies distintas de papas:

- *Solanum goniocalyx*
- *Solanum phureja*
- *Solanum stenotomum*
- *Solanum tuberosum*
- *Solanum ajanhuiri*
- *Solanum chaucha*
- *Solanum juzepczukii*
- *Solanum curtilobum*

### 2.8.3. Distribución geográfica

Ochoa (1990), refiere que presenta su propia morfología, al igual que su

capacidad para adaptarse hasta los 4300 metros sobre el nivel del mar, esto permite que se encuentre distribuida ampliamente en la zona andina y también a nivel mundial. En la actualidad se ha logrado contabilizar la presencia de este cultivo en por lo menos 120 países, debido a la importancia económica y social.

**Tapia y Fries (2007)**, sostiene que la papa es posiblemente el cultivo con mayor versatilidad climática y ecológica.

El **Ministerio de Agricultura del Perú (2014)**, señala que para la tuberización la temperatura media óptima se sitúa en 20 °C, un incremento adicional influye en la disminución de la fotosíntesis e incrementa la tasa de respiración dando lugar al consumo de hidratos de carbono que se encuentran en los tubérculos. Los efectos negativos de temperaturas extremas diurnas y nocturnas repercuten en la formación total de los tubérculos.

Del mismo modo señala que la producción de carbohidratos esta ligado a la cantidad de luz (luminosidad), su importancia radica en la participación de la fotosíntesis.

Adicionalmente, esta comprobado que participa en la distribución de los carbohidratos, determinándose mayor concentración en tubérculos cuando la luminosidad es mucho más alta. La mayor asimilación se da en los 60000 lux.

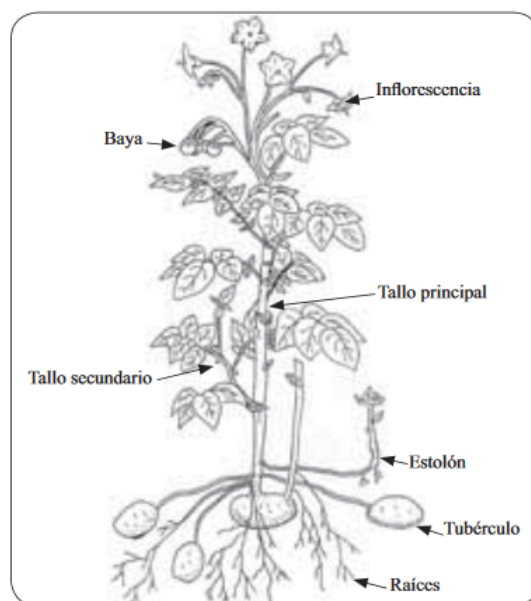
#### **2.8.4. Descripción botánica**

**Tapia y Fries (2007)**, indican que la papa es una planta herbácea que

varía de 0.30 m a 1 m de alto, dependiendo de las variedades, acompañadas de un crecimiento del tipo erecto o semierecto.

El fruto, conocido también como tomborocoto o pepino, al alcanzar la madurez posee la forma del tipo baya de una tonalidad verde oscuro y en su interior se encuentra las semillas, llamadas semillas botánicas, a fin de hacer la diferencia con la semilla agronómica (ver figura 6).

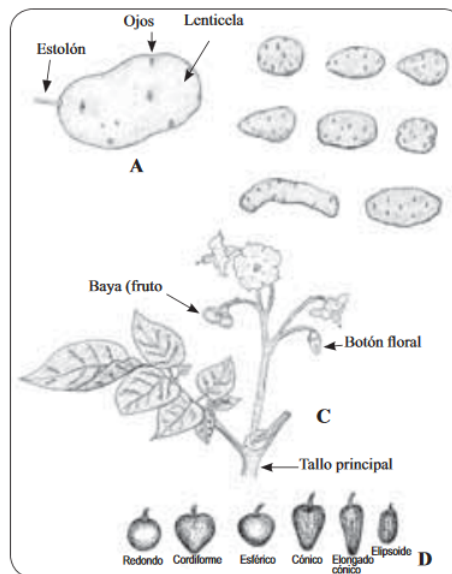
**Figura 6:** Papa, la planta y sus características.



**Fuente:** Tapia y Fries (2007).

Los tallos modificados que conforman los órganos de almacenamiento de sustancias en favor de la planta son denominadas papas y; presentan diferentes tamaños, formas y colores de la piel y pulpa (ver figura 7).

**Figura 7:** La papa y sus componentes.



**Fuente:** Tapia y Fries (2007).

**Nota:** A. tubérculo. B. Formas de tubérculos. C. Rama florífera D. Formas de la baya.

Las yemas que se encuentran presentes en el tubérculo de papa madura están en una condición de dormancia y en el medio adecuado empiezan a desarrollar estolones que dará origen a una nueva planta.

Las construcciones de almacenes donde se deposita la papa, deben permitir el paso de luz difusa para evitar que los estolones no empiecen a desarrollarse antes de la siembra.

La flor es perfecta, es decir presenta estambres (masculino) y pistilos (femenino).

### 2.8.5. Suelo y fertilización

Tapia y Fries (2007), señala que la papa es un cultivo muy extractivo por ello requiere de todo los minerales necesarios posibles que están en el suelo; siendo 14 los elementos nutricionales demandados: nitrógeno,

fósforo y potasio conocidos como macro elementos, y también están los denominados micro nutrientes magnesio, azufre, boro, manganeso, hierro, zinc, cobre y molibdeno y finalmente se encuentran el carbono, oxígeno e hidrógeno.

**Tabla 1:** Extracción y restitución de elementos nutricionales en el cultivo de papa.

Elemento	Extracción	Restitución mínima
Nitrógeno	120 kg	160 kg
Fósforo	20 kg	40 kg
Potasio	150 kg	80 kg
Calcio	6 kg	Sin datos
Azufre y Magnesio	15 kg	Sin datos
Microelementos	Gramos	Sin datos

**Fuente:** Tapia y Fries (2007).

Estudios llevados en campo abierto, han determinado que la papa en una producción que alcanza de 20 a 30 t/ha absorbe los siguientes minerales contenidos en el suelo y que deben ser repuestos (ver tabla 1).

Indican también que el nivel de fertilización en las distintas zonas agrícolas dedicadas al cultivo papa esta condicionada a:

- Si un campo es para la producción de semilla, se requiere menos fertilizante que para papa de consumo.
- La variedad sembrada: las variedades comerciales son muy exigentes por tanto necesitan mayores nivel de fertilización.
- La zona donde se lleva el cultivo: en las zonas de altura con suelos negros se aplica menos fertilización.

- Cultivo anterior o período de descanso: si el descanso es mayor de cinco años, se reduce la cantidad de fertilizante o abono.
- El carbono y el oxígeno provienen del aire y el hidrógeno del agua; los demás elementos son absorbidos de la tierra por las raíces o por las hojas cuando son aplicados mediante abonos foliares.

En general, estos autores, sugieren que la distribución de los fertilizantes sea mayor al justo en la siembra, en especial aplicar todo el fósforo debido a que requiere un tiempo para desdoblarse y ser aprovechado por el cultivo.

#### **2.8.6. Siembra**

**Tapia y Fries (2007)**, refiere que los tiempos que da lugar la siembra están sujetos con la ubicación agroecológica y la forma de explotación del cultivo. Las siembras que inician de manera temprana son llamadas maway y ocurren en los meses de mayo y junio, empleando el riego en la instalación del cultivo. De otra parte, en los meses de setiembre e inicios de noviembre según la temporalidad de las lluvias, se inician las siembras grandes en secano. El requerimiento de semilla oscila en 1 t/ha y 1.5 t/ha, dependiendo del cultivar, las dimensiones de la semilla y la densidad de siembra. En promedio, existen entre 30 000 a 35 000 plantas de papa por hectárea equivalente a ubicar entre 3 a 3.5 plantas por cada metro cuadrado, empleando surcos a una distancia de 0.80 m y 1 m.

**Malagamba (1983)**, según sus experiencias, sostiene que realizar la producción de tubérculos de papa haciendo uso de semilla sexual es una innovación que permite brindar las oportunidades para minimizar costos

de siembra y con esto garantizar la alimentación familiar.

Bajo esta modalidad, el cultivo muestra muy buena adaptabilidad en zonas donde no haya problemas de bajas temperaturas (heladas). Sin embargo, su cuidado demanda mucha atención para realizar los trabajos de horticultura para cuidar las plántulas que se obtienen de la semilla sexual. La justificación de esta técnica de producción ocurre cuando los rendimientos esperados resultan bajos a causa de la mala calidad en la semilla sumado al elevado costo de esta.

#### **2.8.7. Labores de manejo en el cultivo de papa**

**Tapia y Fries (2007)**, señalan las labores de manejo relacionadas con el cultivo de papa son las siguientes:

- Preparación del suelo

Consiste en la rompedura y el desterronado, para lograr un suelo muy mullido y libre de terrones. La acción de preparar el suelo dependerá si este presenta pastos (mayor ruptura) o si presenta rastros de cultivos anteriores.

También se realiza la operación del “majadeo” que comprende en realizar un cerco de área donde se cultivará y facilitar que los ganados tanto ovino como vacuno se instalen en el sitio durante periodos cortos que pueden comprender entre tres y cuatro noches que después se tendrá que realizar la roturación para abonar el terreno. En este proceso se descompone la materia orgánica: estiércol y orina.

- Deshierbo

Denominado también - en la zona norte del Perú - ashal, tiene lugar después de 25 a 40 días de la emergencia de las plántulas, evitando que las malezas puedan competir por la absorción de nutrientes y agua con las plantas instaladas, de igual forma facilita la aireación a las raíces.

- Riego

Esta condicionado por la ubicación geográfica y temporalidad de la siembra, el cultivo requiere riegos posteriores a la siembra; se aconseja realizar los riegos antes de efectuar los aporques siendo cuidadoso con la dosificación del agua a fin de evitar erosiones en los terrenos dispuestos en pendiente. Cabe señalar que el cultivo de la papa es sensible a la variación de la humedad.

- Aporque

Dependiendo de la situación, se realizan entre uno y dos aporques a lo largo del cultivo; el primer aporque se efectúa cuando se están formando los estolones posterior a 20 días después de haber realizado el primer deshierbo y, el segundo aporque se hace como complemento al transcurrir un mes después, con mayor razón si la época de siembra es muy lluviosa.

- Corte del tallo

El corte del tallo unas dos a tres semanas antes de la cosecha es una práctica muy útil dejando un tallo de 10 cm. Con ello se evita que la ranca avance a los tubérculos y se permite que se pueda conservar el cultivo en el suelo hasta unos 30 días, para distribuir mejor la

mano de obra y esperar un precio conveniente.

### 2.8.8. Sanidad Vegetal

Tapia y Fries (2007), realizaron un listado de las plagas más importantes que atacan al cultivo de papa, tal como se aprecia en la tabla 2.

**Tabla 2:** Principales plagas en el cultivo de papa.

Nombre común	Nombre científico	Ubicación del daño
Gorgojo de los andes	<i>Premnotrypes latithorax</i>	Tubérculos
Polilla de la papa	<i>Phthorimea operculella</i>	Tubérculos
Polilla de la papa	<i>Scrobipalpula absoluta</i>	Tubérculos
Gusano de tierra	<i>Copitarsia sp.</i>	Follaje y tubérculos
Pulga saltona	<i>Epitrix sp.</i>	Parte aérea
Mosca minadora	<i>Frankliniella tuberosi</i>	Follaje

**Fuente:** Tapia y Fries (2007).

De igual forma, los mismos autores, señalan en la tabla 3, las siguientes enfermedades de importancia económica:

**Tabla 3:** Principales enfermedades en el cultivo de papa.

Nombre común	Nombre científico	Ubicación del daño
Rancha	<i>Phytophthora infestans</i>	Hojas
Verruga	<i>Synchytrium endobioticum</i>	Tubérculo
Roña	<i>Spongospora subterraneo</i>	Hojas
Manchas foliares	<i>Poma andina</i>	Hojas
Kasahui	<i>Ulocladium atrum</i>	Hojas después del granizo
Marchitez bacteriana	<i>Pseudomonas</i>	Follaje
Virus	Diferentes tipos	Follaje

**Fuente:** Tapia y Fries (2007).

## 2.9. CULTIVAR AMACHI

**Fonseca et al. (2014)**, señalan que Amachi es un cultivar que presenta elevada concentración de antocianinas y compuestos fenólicos totales. Tiene las siguientes características morfológicas:

- Hábito de crecimiento : erecto.
- Color de flor : morado intermedio con bandas blancas.
- Forma del tubérculo : oblongo.
- Profundidad de ojos : medio.
- Color de piel : negruzco.
- Color de pulpa : morado.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA E HIDROGRÁFICA

##### 3.1.1. Ubicación geográfica

El trabajo de investigación se realizó en los terrenos comunales de la comunidad campesina de Sañayca ubicado a 3774 metros sobre el nivel del mar, entre las coordenadas UTM:

- 677348m E
- 8424299m N

Políticamente, la comunidad de Sañayca pertenece a:

- Distrito: Sañayca
- Provincia: Aymaraes
- Región: Apurímac

##### 3.1.2. Ubicación hidrográfica

De acuerdo a la Autoridad Nacional del Agua (ANA) (2018), la ubicación hidrográfica que corresponde al área de estudio es:

- Cuenca: Intercuenca Medio Apurímac.

## 3.2. MATERIALES

### 3.2.1. Material biológico

Para el desarrollo del trabajo de investigación, se hizo uso de los siguientes materiales biológicos:

- 1) Papa nativa cultivar “Amachi”.
- 2) Inoculantes biológicos de la marca comercial “Farmagro”.

El producto ECOTERRA® WG, es un bioestimulante que en su formulación contienen cepas microbianas que han sido rigurosamente seleccionadas con un fin específico, la de producir sustancias que son fisiológicamente activas, entre ellas se tiene: auxinas, giberelinas, citoquininas, aminoácidos, péptidos y vitaminas; que al interactuar con la planta promueven diferentes eventos metabólicos en función de estimular el crecimiento, el desarrollo y el rendimiento de cultivos económicos.

Cepas de: *Bacillus megaterium*, *Bacillus licheniformes*, *Azotobacter chroococcum* y *Pseudomonas fluorescens* integran el compuesto de este inoculante.

Por otra parte, se tiene el producto ALICERCE® , es un inoculante biológico en cuya elaboración se encuentra esporas de *Bacillus subtilis* y *Bacillus licheniformis*; quienes son las encargadas de producir diferentes mecanismos relacionados con la promoción de crecimiento en las plantas.

### **3.2.2. Materiales de campo**

Respecto a los materiales de campo, durante la ejecución del trabajo de investigación, se utilizó:

- 1) Pico.
- 2) Pala.
- 3) Mochila para asperjar.
- 4) Estacas.
- 5) Machete.
- 6) Barreno.
- 7) Libreta de campo.
- 8) Bolsa para muestreo.
- 9) Cámara fotográfica.
- 10) Wincha.
- 11) Baldes de 20 litros de capacidad.
- 12) Vernier.

### **3.2.3. Materiales de gabinete**

Para el procesamiento de la información y todo lo concerniente para la culminación del trabajo de investigación se necesito de los siguientes recursos:

- 1) Notebook.
- 2) Software  $L^A T_E X$ .

- 3) Software R project.
- 4) Software de Información Geográfica: ArcGis v10.1.
- 5) Impresora multifuncional.
- 6) Útiles de escritorio.

### **3.3. METODOLOGÍA**

Teniendo en cuenta la profundidad del estudio, esta es una investigación del tipo explicativo porque se pretenden conducir a un sentido de comprensión la fijación de CO<sub>2</sub> tanto a nivel de la biomasa aérea vegetal del cultivo de papa nativa así como los suelos agrícolas donde fueron cultivados empleando inoculantes biológicos.

De acuerdo a la tendencia (enfoque) de investigación y el tipo de variables a analizar, el presente trabajo corresponde a una investigación cuantitativa debido a que sus variables (datos) son tangibles, medibles y observables.

Para una mejor comprensión de la relación teórica y metodológica de las variables en estudio, revisar las tablas 31 y 32 de la sección anexos.

#### **3.3.1. Cálculo del tamaño de la muestra**

Una vez identificado y registrado la población, se procedió con la selección de la muestra por conveniencia de manera aleatoria siguiendo un muestreo no probabilística.

Se decidió que el tamaño de la muestra estaría conformada por 40 plantas de papa nativa.

### **3.3.2. Análisis de datos**

#### **3.3.2.1. Análisis exploratorio de datos**

Los datos recolectados fueron organizados y presentados a través de gráficas en el cual se consiguen examinar visualmente descriptores muy importantes tales como: valores extremos, valores atípicos, rangos máximos y mínimos; del mismo modo se consigue realizar pruebas de normalidad y homogeneidad entre los datos.

#### **3.3.2.2. Análisis descriptivos de datos**

Con la aplicación de la estadística del tipo descriptivo a cada variable registrada se pudo caracterizar a la muestra tanto en sus medidas de tendencia central como en sus medidas de variabilidad

### **3.3.3. Método**

#### **3.3.3.1. Diseño estadístico**

Respecto al diseño estadístico en la presente investigación, se hizo uso del “Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA)” (ver figura 8) con el fin de identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro del estudio.

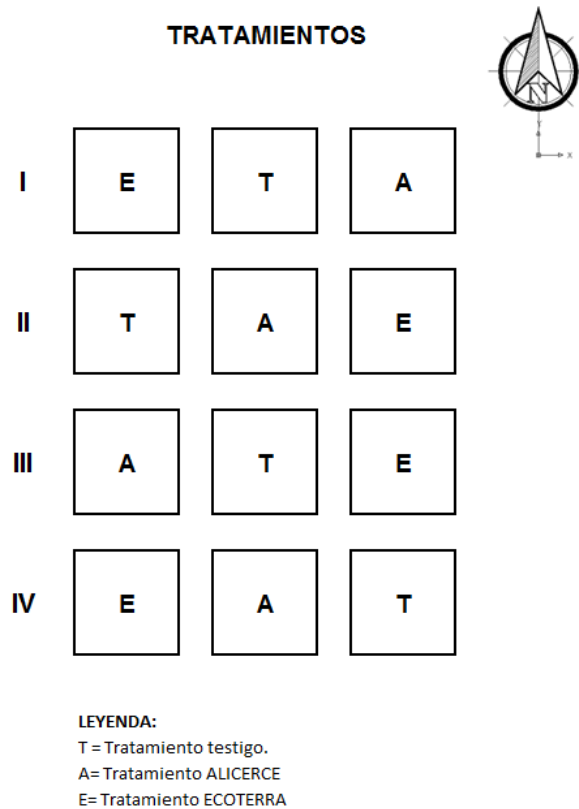
La investigación compuesto de 3 tratamientos, incluyendo el testigo con 4 repeticiones por tratamiento, haciendo un total de 12 unidades experimentales.

El modelo matemático del diseño experimental fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \gamma_j + \epsilon_{ij}; \begin{cases} i=1, 2, 3, \dots, k \\ j=1, 2, 3, \dots, b \end{cases}$$

donde  $Y_{ij}$  es la medición que corresponde al bloque  $i$  y al tratamiento  $j$ ;  $\mu$  es la media global poblacional;  $\tau_i$  es el efecto debido al bloque  $i$ , y  $\epsilon_{ij}$  es el error aleatorio atribuible a la unidad  $i$  del tratamiento  $j$ , y  $\gamma_j$  es el efecto del tratamiento  $j$ . Todo esto bajo la suposición de que los errores se distribuyen de manera normal con media cero y varianza constante  $\delta^2$ , y que son independientes.

**Figura 8:** Disposición de los tratamientos en estudio



**Fuente:** Elaboración propia.

### **3.3.3.2. Tratamientos**

En primer lugar la distribución de los tratamientos fue al azar y, en segundo lugar las condiciones previstas de carácter experimental impuestas a las unidades experimentales bajo estudio fueron:

- Testigo, que fue designado con la clave (T).
- Ecoterra, teniendo la (E) como clave de identificación.
- Alicerce, etiquetado con la clave (A).

### **3.3.3.3. Características del campo experimental**

La parcela de investigación tuvo las siguientes características:

- Área total del experimento : 605 m<sup>2</sup>.
- Área útil del experimento : 432 m<sup>2</sup>.
- largo del experimento : 11 m.
- Ancho del experimento : 55 m.
- Área de la unidad experimental : 36 m<sup>2</sup>.
- Número de unidades experimentales : 12 unidades.
- Distanciamiento entre surco a surco : 1 m.
- Distanciamiento entre planta a planta : 0.35 m.
- Número de plantas por unidad experimental : 72 unidades.
- Número total de plantas en el experimento : 864 unidades.

#### 3.3.3.4. Antecedentes de cultivos en el área experimental

La superficie agrícola designada para llevar a cabo el trabajo de investigación estuvo en descanso por más de 5 años, la comunidad campesina de Sañayca lo usaba de pradera natural para el pastoreo de sus ganados.

#### 3.3.3.5. Formulación de la hipótesis estadística

Nuestra hipótesis de interés esta dada por lo siguiente:

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu$$

$$H_1 = \mu_i \neq \mu_j \quad \text{para algún } i \neq j$$

donde se probará que la respuesta media poblacional lograda con la aplicación de los tratamientos es la misma para los k tratamientos, y por consiguiente cada respuesta media  $\mu_i$  es igual a la respuesta media poblacional  $\mu$ .

Del mismo modo, se puede interpretar que los efectos de los tratamientos bajo estudio en la variable respuesta son nulos, debido a que  $\gamma_i = \mu_i - \mu = 0$ , por ende necesariamente la respuesta media de los tratamientos es igual a la media global ( $\mu_i = \mu$ ).

### 3.3.3.6. Análisis de varianza (ANVA)

El análisis de varianza (ANVA) sirve para hallar las diferencias en las medias poblacionales bajo estudio, el mismo implica un examen de las varianzas muestrales. El procedimiento se utiliza para determinar si cuando se aplica un tratamiento en particular a una población, este tendrá un impacto significativo en su media.

En resumen, el análisis de varianza nos permite contrastar la hipótesis y para ello, en esta investigación se hizo uso del valor  $p$  (que resulta la probabilidad que mide la evidencia en contra de  $H_o$ ), el mismo que fue sometido a un nivel de significancia del 5 % (0.05).

Para obtener resultados fiables se respetaron los siguientes supuestos:

- 1) Normalidad, es decir los valores de cada muestra derivan de una distribución “normal”.

Para el caso de la presente investigación, se aplicó la prueba de Shapiro - Wilk para corroborar que los datos registrados provienen de una distribución normal.

En caso de no serlo, se tuvo planeado realizar pruebas no paramétricas equivalentes al ANVA.

- 2) Independencia, los resultados son independientes entre sí.
- 3) Varianzas homogéneas, los diversos datos registrados a

causa de la aplicación de los tratamientos tienen varianzas homogéneas.

Se aplicó el test de Bartlett para probar la hipótesis de homogeneidad de las varianzas poblacionales.

También se realizó los contrastes de comparaciones múltiples post-hoc, para el presente caso de estudio, se hizo uso del test HSD de “Tukey” con un nivel de significancia del 5%, con el propósito de saber que media difiere de qué otra.

#### **3.3.3.7. Construcción de las ecuaciones alométricas**

Las ecuaciones alométricas fueron diseñadas específicamente para predecir la fijación de CO<sub>2</sub> en base a las características agronómicas del cultivo de papa nativa.

#### **3.3.3.8. Argumentos de ingreso/input**

Se disponen de los siguientes argumentos:

- Altura de la planta.
- Área foliar.
- Cantidad de tallos.
- Diámetro de tallo.
- Peso de la biomasa aérea.

### 3.3.3.9. Selección del modelo óptimo

En vista que la estimación de biomasa es a través de una ecuación alométrica, por lo tanto corresponde plantear modelos predictivos – determinísticos, que por lo general son modelos obtenidos mediante regresión lineal simple o múltiple y en algunas veces regresiones no lineales.

Para la “construcción de un modelo” se debe tomar en cuenta que este se basa en la comparación de modelos con diferentes estructuras para las componentes aleatoria y sistemática y, mediante el uso de determinadas medidas, se decide cuál es el más adecuado. No obstante, podemos afirmar que es difícil establecer la manera de seleccionar el modelo óptimo, es usual emplear la prueba de la razón de verosimilitudes o los criterios de información.

Los denominados criterios predictivos, que hacen uso de los valores predichos, son las herramientas menos empleadas pero tienen la ventaja de comparar y seleccionar modelos anidados y no anidado. Adicionalmente se puede realizar la comparación simultánea de un conjunto de modelos.

De manera general, se siguieron los siguientes aspectos de los denominados criterios predictivos:

- 1) Error estándar de los estimadores.
- 2) Límites de confianza de los parámetros.

- 3) Análisis de varianza relacionado con el modelo.
- 4) Coeficiente de determinación  $R^2$  y  $R^2$  ajustado por los grados de libertad.
- 5) Error estándar de estimación.
- 6) Test de falta de ajuste del modelo.
- 7) Validación de las predicciones del modelo:
  - a) Estadístico PRESS (Suma de Cuadrados del Error de Predicción).
  - b) Estadístico CMEP (Cuadrado Medio del Error de Predicción).
- 8) Análisis de los residuos:
  - a) Autocorrelación (Durbin – Watson).
  - b) Homocedasticidad (gráficos de los residuos).

#### **3.3.3.10. Recolección de la información**

Para la recolección de la información en las distintas variables, se realizó lo siguiente:

- 1) Porcentaje de emergencia

La técnica empleada fue la de la “observación”, después de 30 días posterior a la siembra. Se procedió a contabilizar la cantidad de plantas emergidas por cada tratamiento bajo estudio.

La unidad de medida expresada en porcentajes (%), para su cálculo se empleo la siguiente ecuación:

$$X = \frac{N}{Y} \times 100 \quad (11)$$

donde X representa en porcentajes la cantidad total de tubérculos emergidos; N es el promedio de tubérculos emergidos e Y la cantidad de tubérculos sembrados por cada unidad experimental.

La ecuación es aplicable a todos los tratamientos en estudio.

## 2) Altura de planta

Técnica usada para la medición de la altura de planta, la “observación”.

Con la ayuda de una wincha se hizo la evaluación tomando al azar 40 plantas de cada unidad experimental de los tratamiento en observación, el promedio de estas unidades experimentales representa el resultado correspondiente al tratamiento evaluado. Las mediciones son realizadas desde el cuello de la planta hasta la hoja más larga en diferentes etapas fenológicas del cultivo. La unidad de medida esta representada en centímetros (cm).

## 3) Área foliar

Se tomó al azar 40 plantas por cada unidad experimental que conforman el tratamiento bajo evaluación. Con una

regla graduada en centímetros (cm) se procedió a realizar la respectiva medición de la superficie foliar.

Se hizo uso de la “observación” como técnica para recabar información además de llevar a cabo un procedimiento no destructivo al momento de seleccionar las plantas.

Para medir el área foliar, se empleó la siguiente ecuación:

$$AREA \ FOLIAR = L \times A \quad (12)$$

donde L es largo, medido desde el primer foliolo basal hasta la punta del foliolo terminal, y A es el ancho, medido en los foliolos de la parte media de la hoja completamente extendidos. Unidad de medida expresada en centímetros cuadrados (cm<sup>2</sup>), para realizar la medida del área foliar de los demás tratamientos se procedió a lo ya señalado.

#### 4) Número de tallos

La selección fue de manera aleatoria, 40 plantas por cada unidad experimental que conforman el tratamiento bajo evaluación. Las plantas fueron seleccionadas en la última etapa fenológica del cultivo.

La técnica usada fue la “observación” y, expresado en unidades (und) como unidad de medida.

El mismo procedimiento es de manera reiterativa para los demás tratamientos.

#### 5) Diámetro de tallos

Al concluir el ciclo fenológico del cultivo de papa nativa, se seleccionaron de manera aleatoria 40 plantas tomadas de cada unidad experimental del tratamiento respectivo en evaluación. La medición se realizó tomando el tallo de mayor altura y medido a 10 cm de superficie del suelo.

La “observación” como técnica empleada para el recogo de información, el instrumento para realizar la respectiva medición fue un vernier.

El cálculo es el mismo para los demás tratamientos en estudio.

La unidad de medida esta expresada en milímetros (mm).

#### 6) Rendimiento (peso de tubérculos)

Para recabar la información del peso de tubérculos por cada planta, se siguió el mismo procedimiento de selección que en las anteriores mediciones.

La técnica para llevar a cabo la recolección de información fue a través de la “observación”, el instrumento empleado para llevar a cabo tal fin fue una balanza del tipo reloj y la unidad de medida expresada en gramos (g).

#### 7) Contenido de CO<sub>2</sub> en biomasa aérea vegetal

Al finalizar el ciclo fenológico del cultivo, posterior a la cosecha de las 40 plantas seleccionadas, se hizo la colección de la biomasa aérea para ser llevado de manera inmediata

al laboratorio. La técnica o método usado para determinar el contenido de Carbono se hizo a través de la oxidación por combustión catalítica a 680°, desarrollado en japon por el investigador Shimadzu. Una vez determinado la cantidad de Carbono presente en la biomasa aérea de las plantas de papa se hizo la conversión respectiva de CO<sub>2</sub>. Se siguió los procedimientos detallados en la ecuación 1, 2 y 3 referenciados en la revisión bibliográfica.

La unidad de medida fue expresado en t C/ha.

#### 8) Contenido de CO<sub>2</sub> en suelo agrícola

Después de haber realizado la cosecha de la papa nativa cultivadas en las unidades experimentales correspondiente a los tratamientos bajo estudio se procedió a realizar la recolección de suelo agrícola. Para ello se hizo uso de la técnica de muestreos de suelos con distintas sub muestras (5 en total) por cada unidad experimental del tratamiento en evaluación. Posteriormente las muestras fueron llevados al laboratorio para su respectivo análisis. El barreno fue empleado para la recolección del suelo agrícola.

La unidad de media expresado en % de Carbono Orgánico.

#### **3.3.4. Labores agronómicas realizadas**

La siembra del cultivo se realizó el 24 de diciembre del 2016 y se realizó la cosecha el día 15 de junio del 2017, transcurriendo un tiempo de 180 días calendario. Durante el ciclo fenológico se realizaron las siguientes labores:

- El día 24 de diciembre del 2017, previo a la siembra, se preparó una solución de inoculantes biológicos de las marcas comerciales ECOTERRA y ALICERCE. Para ambos productos se preparo una solución de inoculantes en la proporción de 100 g en 100 litros de agua, posteriormente se sumergieron los 150 kg de semillas de tubérculos en las soluciones correspondientes a cada tratamiento por un espacio de 15 minutos y, por último fueron sembrados en sus respectivas áreas agrícolas.
- El día 30 de enero del 2017 se realizó el primer aporque y el deshierbo de malezas.
- El día 28 de febrero del 2017 se llevó a cabo el segundo aporque con su respectivo deshierbo de malezas.

Durante el desarrollo del cultivo de papa nativa no se realizó ningún tipo de manejo integrado de plagas y enfermedades.

# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. RESULTADOS

#### 4.1.1. Rendimientos

##### Emergencia de plántulas

Del resultado en la tabla 4 se evidencia que hay diferencias significativas en las unidades experimentales en estudio, lo cual implica que la aplicación de los tratamientos tuvo influencia en la emergencia de plántulas de papa posterior a la siembra.

El nivel de significancia que reporta esta tabla resultó extremadamente significativo (0.001 ó 0.1 %) debido a que el valor  $Pr(>F)$  de  $1.32e-07$  fue muy inferior a la prueba de significancia (0.05 ó 5 %) para contrastar la hipótesis de estudio, por tanto es válido afirmar que efectivamente hubo diferencias entre los promedios de los tratamientos bajo estudio.

**Tabla 4:** Análisis de varianza para emergencia de plántulas (%).

	GL	SC	CM	F - valor	$Pr(>F)$	Sig.
BLOQUES	3	2.09	0.70	11.27	0.00705	**
TRATAMIENTO	2	72.31	36.15	586.06	1.32e-07	***
ERROR	6	0.37	0.06			

Coefficiente de variabilidad: 0.25 %

Promedio: 97.52 %

Significancia: \*\*\* (0.001), \*\* (0.01), \*(0.05)

Fuente: Elaboración propia.

Además se observa que realizar el bloqueo respectivo del experimento ayudó en mejorar la precisión del estudio. Esto se sustenta de acuerdo al nivel de significancia alcanzado por el factor “BLOQUES” con un valor

$Pr(>F) = 0.00705$  que se encuentra por debajo de 5 % (0.05) y 1 % (0.01) respectivamente.

A fin de establecer que tratamiento resulto superior frente al resto, se recurrió a la prueba de Tukey. De la tabla 5 se observa, que de los tratamientos en estudio, el más significativo resultó ser ECOTERRA ya que la la diferencia entre ECOTERRA y ALICERCE es igual a 0.9725 con un valor  $p_{adj}=3.53e-03$  siendo significativo (ver anexo: tabla 55), dando a entender que “ALICERCE” estaría en el segundo lugar mientras que el TESTIGO en el último.

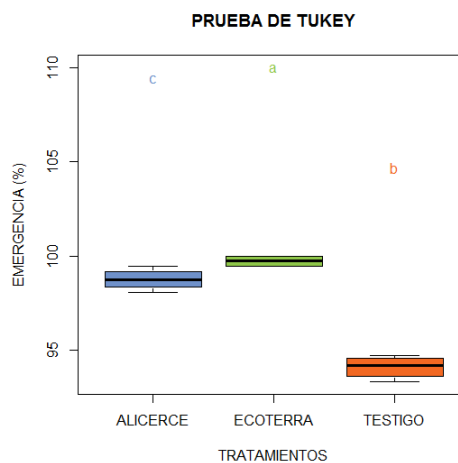
**Tabla 5:** Prueba de Tukey para emergencia de plántulas (%).

TRATAMIENTO	PROMEDIOS	GRUPOS
ECOTERRA	99.72	a
ALICERCE	98.75	c
TESTIGO	94.10	b

**Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 9 es muy notorio las diferencias de los promedios entre los tratamientos bajo (vea la significancia a través de los distintas letras encima de la caja de bigotes) estudio.

**Figura 9:** Comparaciones múltiples para emergencia de plántulas (%).



**Fuente:** Elaboración propia.

Los promedios alcanzados en la variable emergencia de plántulas por los tratamientos en estudio fueron de 99.72% para ECOTERRA, 98.75% para ALICERCE y 94.10% para el TESTIGO.

### Altura de planta evaluados a los 60 días.

En la tabla 6, se reporta diferencias extremadamente significativas (0.001 ó 0.1%) en los tratamientos evaluados del estudio, como consecuencia se puede afirmar que la aplicación de los tratamientos tuvo influencia en la altura de las plantas de papa posterior a los 60 días de la siembra.

El valor  $Pr(>F)$  de 0.000713 en contraste con el nivel de significancia del 5% (0.05) de la prueba de hipótesis de la investigación, resulta inferior por tanto es válido afirmar lo anteriormente reportado.

**Tabla 6:** Análisis de varianza para altura de planta 60 días.

	GL	SC	CM	F - valor	$Pr(>F)$	Sig.
BLOQUES	3	1.1667	0.3889	9.396	0.011017	*
TRATAMIENTO	2	2.5317	1.2658	30.584	0.000713	***
ERROR	6	0.2483	0.0414			
Coeficiente de variabilidad: 1.19%				Promedio: 17.14 cm		
Significancia: *** (0.001), ** (0.01), *(0.05)						
Fuente: Elaboración propia.						

De la tabla 7, el factor “BLOQUES” muestra una significancia del 5% (0.05) lo cual fue favorable, en vista que contribuyó a reducir el error experimental y mejorar la precisión del experimento.

Se hizo la prueba de Tukey a fin de establecer las comparaciones múltiples de las medias y determinar que tratamiento resultó superior. De la tabla 8 se observa que el tratamiento ECOTERRA presentan los promedios más altos seguido de ALICERCE y por último el TESTIGO; haciendo un análisis más exhaustivo se muestra en la tabla 56 de los anexos, la

comparación ECOTERRA - ALICERCE no hay diferencias significativas ( $p_{adj}=0.2674450 >0.05$ ), mientras que para las comparaciones TESTIGO - ALICERCE ( $p_{adj}=0.00029512 <0.05$ ) y el TESTIGO - ECOTERRA ( $p_{adj}= 0.0007249 <0.05$ ) muestra diferencias estadísticas bien marcadas en las comparaciones efectuadas.

En los tratamientos ECOTERRA y ALICERCE se observa que no hay diferencias estadísticamente entre sí pero, son superiores al TESTIGO.

**Tabla 7:** Prueba de Tukey para altura de planta 60 días (cm).

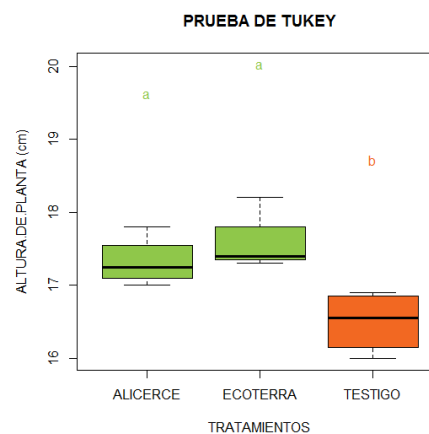
TRATAMIENTO	PROMEDIOS	GRUPOS
ECOTERRA	17.58	a
ALICERCE	17.33	a
TESTIGO	16.50	b

**Fuente:** Elaboración propia.

De la figura 10 se concluye que no existe igualdad en las promedios muestrales y que los tratamientos ECOTERRA y ALICERCE difieren estadísticamente del TESTIGO.

Asi mismo, se tiene que los promedios alcanzados en la variable altura de planta de los tratamientos bajo estudio fue de 17.58 cm para ECOTERRA, 17.33 cm para ALICERCE y 16.50 cm para el TESTIGO.

**Figura 10:** Comparaciones múltiples para altura de planta 60 días (cm).



**Fuente:** Elaboración propia.

### Altura de planta evaluados a los 90 días.

El resultado de la tabla 8 indica que el análisis de varianza efectuado es extremadamente significativo (0.001 ó 0.1 %), como consecuencia se puede afirmar que la aplicación de los tratamientos tuvo influencia en la altura de las plantas de papa posterior a los 90 días de la siembra. Esto se fundamenta debido a que el valor  $\text{Pr}(>F)$  de  $3.92\text{e-}07$  contrastado con el nivel de significancia del 5 % (0.05) de la prueba de hipótesis de esta investigación resultó inferior; razón por la cual se afirma que los datos obtenidos de cada tratamiento presentan distintos promedios de altura.

**Tabla 8:** Análisis de varianza para la altura de planta 90 días.

	GL	SC	CM	F- valor	$\text{Pr}(>F)$	Sig.
BLOQUES	3	2.56	0.85	5.571	0.0361	*
TRATAMIENTO	2	124.83	62.41	407.043	$3.92\text{e-}07$	***
ERROR	6	0.92	0.15			

Coefficiente de variabilidad: 1.26 %

Promedio: 31.06 cm

Significancia: \*\*\* (0.001), \*\* (0.01), \*(0.05)

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 8, el factor “BLOQUES” muestra una significancia del 5 % (0.05) lo cual indica que fue prudente realizar el experimento en bloques en vista que contribuyó a reducir el error experimental y mejorar la precisión del experimento.

Se recurrió al test o prueba de Tukey para establecer las comparaciones múltiples de las medias y determinar que tratamiento resultó superior.

De la tabla 9, el tratamiento ECOTERRA tiene los mejores promedios, seguido de ALICERCE y por último el TESTIGO; haciendo un análisis más profundo en la tabla 57 de los anexos se observa que la comparación entre los tratamientos ECOTERRA - ALICERCE presenta una diferencia

de 4.0 resultando significativamente diferente ( $p_{adj}=1.67e-05<0.05$ ), por lo que el tratamiento ECOTERRA supera al tratamiento ALICERCE, del mismo modo sucede con la comparación de los tratamientos TESTIGO - ALICERCE que presenta una diferencia de -3.9 y el nivel de significancia es menor al nivel seleccionado del 5 % ( $p_{adj}=1.95e-05<0.05$ ) evidenciando que el tratamiento ALICERCE es superior al TESTIGO.

**Tabla 9:** Prueba de Tukey para la altura de planta 90 días (cm).

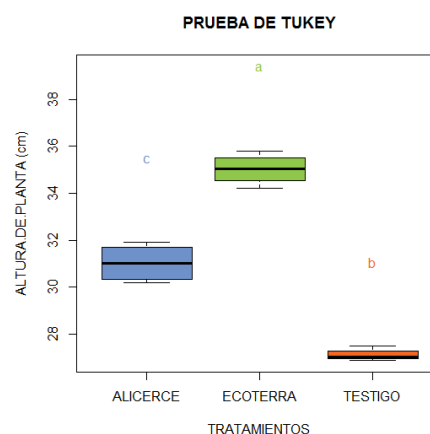
TRATAMIENTO	PROMEDIOS	GRUPOS
ECOTERRA	35.03	a
ALICERCE	31.03	c
TESTIGO	27.13	b

**Fuente:** Elaboración propia.

De la figura 11 se concluye que no existe igualdad en los promedios y que los tratamientos ECOTERRA y ALICERCE difieren estadísticamente del TESTIGO.

De los promedios alcanzados en la variable altura de planta a los 90 días se tiene los siguientes valores alcanzados por los tratamientos en estudio, 35.03 cm para ECOTERRA, 31.03 cm para “ALICERCE y 27.13 cm para el TESTIGO.

**Figura 11:** Comparaciones múltiples para la altura de planta 90 días (cm).



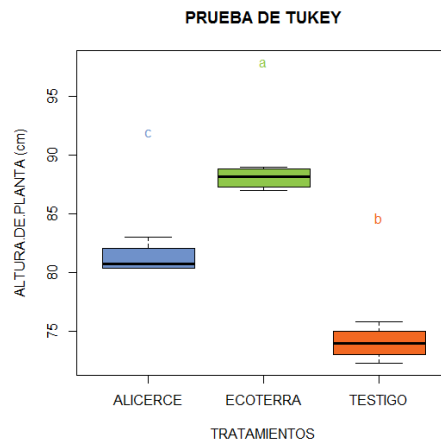
**Fuente:** Elaboración propia.



TESTIGO.

Al realizar un análisis más detallado, de la tabla 58 se reportan resultados donde se señalan que la comparación ECOTERRA - ALICERCE presenta una diferencia de 6.87 y el valor  $p_{adj}=4.01e-05$  resulta inferior al nivel de significancia seleccionado (5 %), por lo tanto el tratamiento ECOTERRA supera al tratamiento ALICERCE, lo que implica que en segundo lugar este ALICERCE y por último el tratamiento TESTIGO.

**Figura 12:** Comparaciones múltiples para altura de planta 180 días (cm).



**Fuente:** Elaboración propia.

De la figura 12, de manera visual se concluye que no existe igualdad medias y que los tratamientos ECOTERRA y ALICERCE son estadísticamente superiores al TESTIGO.

Mientras que de los promedios alcanzados en la variable altura de planta a los 180 días se tiene los siguientes valores alcanzados por los tratamientos en estudio, 88.09 cm para ECOTERRA, 81.22 cm para ALICERCE y 73.99 cm para el TESTIGO.

### Área foliar.

Los resultados de la tabla 12 señala que hay evidencias extremadamente estadísticas (0.001 ó 0.1 %) para afirmar que no hay igualdad en los promedios muestrales correspondiente a los tratamientos bajo estudio.

Del análisis se tiene un valor  $\text{Pr}(>F)$  de 1.43e-08 que en contraste con el nivel de significancia del 5 % (0.05) de la prueba de hipótesis de esta investigación resulta muy inferior; por tanto es evidente confirmar que la diferencia de promedios de cada tratamiento se debe a la aplicación de los tratamientos.

**Tabla 12:** Análisis de varianza para área foliar.

	GL	SC	CM	F - valor	$\text{Pr}(>F)$	Sig,
BLOQUES	3	196	65	5.314	0.0399	*
TRATAMIENTO	2	30383	15191	1232.944	1.43e-08	***
ERROR	6	74	12			

Coefficiente de variabilidad: 0.41 %  
Significancia: \*\*\* (0.001), \*\* (0.01), \*(0.05)  
Promedio: 849.55 cm<sup>2</sup>  
**Fuente:** Elaboración propia.

También de la tabla 12, se puede afirmar que hay significancia estadística para el factor “BLOQUES” (significancia del 5 %), lo cual significa que bloquear permitió reducir el error experimental.

**Tabla 13:** Prueba de Tukey para área foliar (cm<sup>2</sup>).

TRATAMIENTO	PROMEDIOS	GRUPOS
ECOTERRA	908.72	a
ALICERCE	854.19	c
TESTIGO	785.73	b

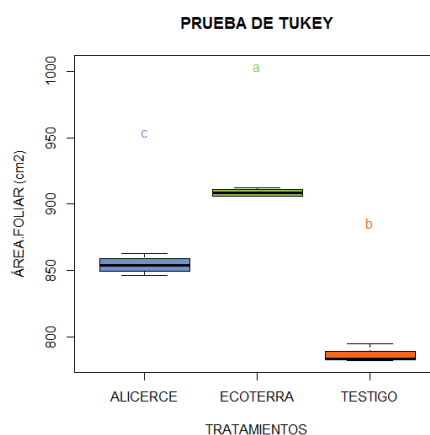
**Fuente:** Elaboración propia.

Seguidamente se empleó la prueba de Tukey con el fin de establecer las comparaciones múltiples de las medias y determinar que tratamiento resultó superior. De la tabla 13 se observa que el tratamiento ECOTERRA

presenta el promedio más alto, seguido de ALICERCE y por último el TESTIGO; haciendo un análisis minucioso en la tabla 59 de los anexos, se aprecia que la comparación ECOTERRA - ALICERCE presenta una diferencia de 54.5275 con un valor  $p_{adj}=1.5e-06$  que resulta significativo en vista que este valor es menor al nivel de significancia del 5%, por tanto el tratamiento ECOTERRA supera al tratamiento ALICERCE, lo que implica que en segundo lugar este ALICERCE y finalmente el tratamiento TESTIGO.

De la figura 13, visualmente se concluye de igual manera lo reportado en la tabla 13, sobre que no existe igualdad medias y que los tratamientos ECOTERRA y ALICERCE estadísticamente, en los resultados del área foliar, superan al TESTIGO; por consiguiente, los promedios alcanzados del área foliar en los cultivos de papa nativa están influenciados por la aplicación de los tratamientos. Y de los promedios para la variable área foliar, se tiene los siguientes valores alcanzados por los tratamientos en estudio, 908.72  $\text{cm}^2$  para ECOTERRA, 854.19  $\text{cm}^2$  para ALICERCE y 785.73  $\text{cm}^2$  para el TESTIGO.

**Figura 13:** Comparaciones múltiples para área foliar ( $\text{cm}^2$ ).



**Fuente:** Elaboración propia.

### Diámetro de tallo.

Al realizar el análisis de varianza (tabla 14), se reporta diferencias que son extremadamente significativas (0.001 ó 0.1 %) para los tratamientos en estudio. Eso da lugar a confirmar sobre los distintos valores alcanzados en los promedios correspondiente a los tratamientos en evaluación, en tal sentido el diámetro de tallo se ve influenciada por la aplicación de los tratamientos.

Se llegó a esta conclusión dado que el valor  $\text{Pr}(>F)$  de 5.91e-06, que reporta esta tabla, en contraste con el nivel de significancia del 5 % (0.05) para la prueba de hipótesis de esta investigación resulta inferior; por tanto esta regla de decisión ratifica lo anteriormente señalado.

**Tabla 14:** Análisis de varianza para diámetro de tallo.

	GL	SC	CM	F - valor	$\text{Pr}(>F)$	Sig.
BLOQUES	3	2.45	0.817	6.441	0.0264	*
TRATAMIENTO	2	41.31	20.657	162.956	5.91e-06	***
ERROR	6	0.76	0.127			

Coefficiente de variabilidad: 2.68 % Promedio: 13.26 mm  
Significancia: \*\*\* (0.001), \*\* (0.01), \*(0.05)  
**Fuente:** Elaboración propia.

También de la tabla 14, se puede afirmar que hay significancia estadística para el factor “BLOQUES” (significancia del 5 %), lo cual significa que bloquear si ayudó a reducir el error experimental.

**Tabla 15:** Prueba de Tukey para diámetro de tallos (mm).

TRATAMIENTO	PROMEDIOS	GRUPOS
ECOTERRA	15.32	a
ALICERCE	13.65	c
TESTIGO	10.82	b

**Fuente:** Elaboración propia.

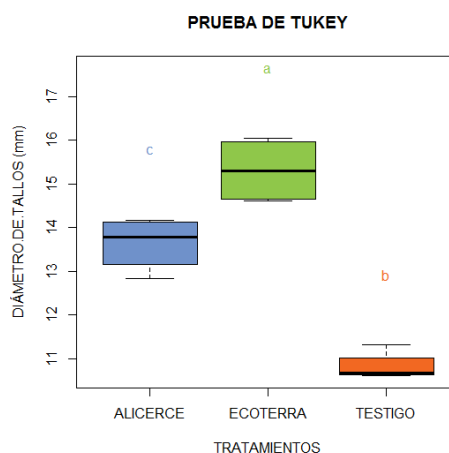
Se recurrió a la prueba de Tukey a fin de determinar que tratamiento

resultó superior en la variable diámetro de tallo. En la tabla 15 se observa, que el promedio más alto le corresponde al tratamiento ECOTERRA, seguido de ALICERCE y en último lugar el TESTIGO; un análisis más detallado de la tabla 60 de los anexos demuestra que la comparación ECOTERRA - ALICERCE presentan una diferencia de 1.665 con un valor  $p_{adj}=0.0014$  que en comparación con el nivel de significancia seleccionado (5 %) resulta inferior, por lo tanto el tratamiento ECOTERRA supera al tratamiento ALICERCE, lo que implica que en segundo lugar este ALICERCE y finalmente el tratamiento TESTIGO.

De la figura 14, al igual que lo reportado en la tabla 15, visualmente se afirma que no existe igualdad medias y que los tratamientos ECOTERRA y ALICERCE difieren estadísticamente del TESTIGO, por tanto, los promedios alcanzados en el diámetro de tallo en cultivos de papa nativa están influenciados por la aplicación de los tratamientos. Del mismo gráfico se observa las distintas letras señalando el orden de significancia de los tratamientos estudiados.

Además los promedios en la variable diámetro de tallo se reporta los siguientes valores: 15.32 mm para ECOTERRA, 13.65 mm en ALICERCE y 10.82 mm para el TESTIGO.

**Figura 14:** Comparaciones múltiples para el diámetro de tallo (mm).



Fuente: Elaboración propia.

### Número de tallos

El resultado de la tabla 16, señala que existe diferencias extremadamente significativas (0.001 ó 0.1 %) para los tratamientos bajo estudio. Esta afirmación proviene de analizar el valor  $Pr(>F)$  de  $5.48e-07$  para el factor TRATAMIENTO, que en contraste con el nivel de significancia del 5 % (0.05) de la prueba de hipótesis para este estudio resulta inferior. Por lo tanto se ratifica las diferencias existentes entre los promedios muestrales correspondiente a los tratamientos en evaluación, en tal sentido el número de tallo se ve influenciada por la aplicación de los tratamientos.

**Tabla 16:** Análisis de varianza para número de tallos.

	GL	SC	CM	F - valor	$Pr(>F)$	Sig.
BLOQUES	3	0.65	0.217	8.125	0.0156	*
TRATAMIENTO	2	19.39	9.693	363.500	$5.48e-07$	***
ERROR	6	0.16	0.027			

Coefficiente de variabilidad: 2.68 %

Promedio: 5.67 unidades

Significancia: \*\*\* (0.001), \*\* (0.01), \*(0.05)

Fuente: Elaboración propia.

También de la tabla 16, se puede afirmar que hay significancia estadística para el factor “BLOQUES” (significancia del 5 %, lo cual significa que

bloquear si ayudó a reducir el error experimental.

De la prueba de Tukey se concluye que el mejor tratamiento en la respuesta variable número de tallo es el tratamiento ECOTERRA, superando al tratamiento ALICERCE y al TESTIGO respectivamente (ver tabla 17).

**Tabla 17:** Prueba de Tukey para número de tallos (und).

TRATAMIENTO	PROMEDIOS	GRUPOS
ECOTERRA	7	a
ALICERCE	6	c
TESTIGO	4	b

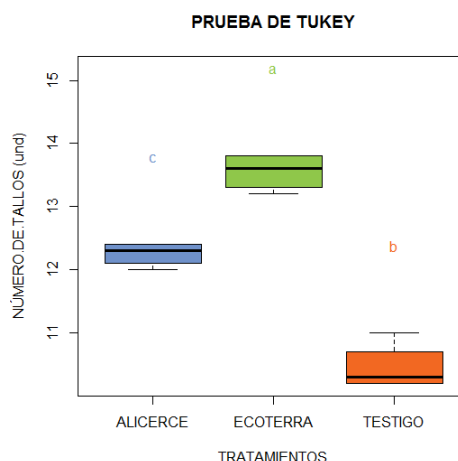
**Fuente:** Elaboración propia.

La tabla 61 de los anexos, al realizar un análisis más exhaustivo en la prueba tukey se observa que la comparación ECOTERRA-ALICERCE presenta un valor positivo de 1.3, que resulta de la diferencia de sus respectivas medias muestrales por tanto ECOTERRA es el tratamiento que en promedio reporta los mayores valores en sus medias muestrales y eso se ratifica con el  $p_{adj}=7.24e-05$  que resulta inferior al nivel de significancia seleccionado (5%), por consiguiente ECOTERRA supera al tratamiento ALICERCE implicando que este último se encuentre en segundo lugar y en tercer lugar el TESTIGO.

De manera visual, en la figura 15, apoya los resultados de la tabla 17 que indican que no existe igualdad medias y que los tratamientos ECOTERRA y ALICERCE difieren estadísticamente del TESTIGO, por tanto, los promedios alcanzados en el diámetro de tallo en cultivos de papa nativa están influenciados por la aplicación de los tratamientos. Del mismo gráfico se observa las distintas letras señalando el orden de significancia de los tratamientos estudiados.

También se reportan los siguientes promedios en la variable número de tallo: 7 unidades para ECOTERRA, 6 unidades para ALICERCE y 4 unidades para el TESTIGO.

**Figura 15:** Comparaciones múltiples para número de tallos (und).



Fuente: Elaboración propia.

### Peso de tubérculos

**Tabla 18:** Análisis de varianza para el peso de tubérculos.

	GL	SC	CM	F - valor	Pr(>F)	Sig.
BLOQUES	3	945	315	12.71	0.0052	**
TRATAMIENTO	2	78394	39197	1582.69	6.77e-09	***
ERROR	6	149	25			

Coefficiente de variabilidad: 1.18 %

Promedio: 420.04 g

Significancia: \*\*\* (0.001), \*\* (0.01), \*(0.05)

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 18, muestra los análisis de varianza obtenidos de las evaluaciones efectuadas en las unidades experimentales. De la tabla se desprende que se reportan diferencias extremadamente significativas (0.001 ó 0.1 %) para los tratamientos en estudio; el factor “TRATAMIENTO” tiene un valor  $Pr(>F)$  de 6.77e-09 que en contraste con el nivel de significancia del 5 % (0.05) para la prueba de hipótesis de este experimento resulta inferior, motivo por el cual se afirma que existe que los promedios muestrales

correspondiente a los tratamientos en evaluación presentan distintos valores, en tal sentido el peso de tubérculos se ve influenciada por la aplicación de los tratamientos.

También se concluye que para el factor “BLOQUES”, existe diferencias estadísticas bien marcadas por lo que se puede concluir que fue acertado realizar los controles para reducir el error experimental a través de los bloques aleatorizados.

De la prueba de Tukey se concluye que el mejor tratamiento en la respuesta variable número de tallo es el tratamiento ECOTERRA, superando al tratamiento ALICERCE y al TESTIGO respectivamente (ver tabla 19).

**Tabla 19:** Prueba de Tukey para la variable peso de tubérculos.

TRATAMIENTO	PROMEDIOS	GRUPOS
ECOTERRA	514.78	a
ALICERCE	428.05	c
TESTIGO	317.29	b

**Fuente:** Elaboración propia.

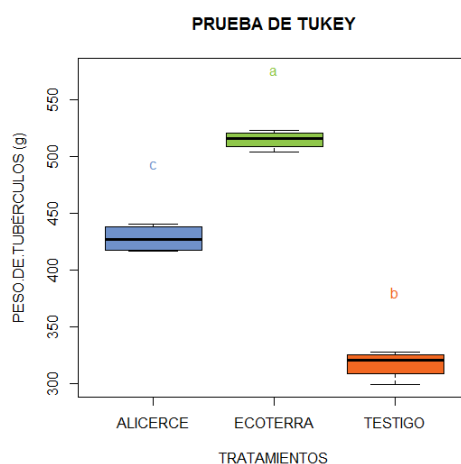
De la tabla 19, el promedio más alto se alcanzó mediante el tratamiento ECOTERRA, seguido de ALICERCE y en último lugar el TESTIGO.

Al analizar de manera más detallada las comparaciones múltiples, en la tabla 62 de los anexos, se observa que ECOTERRA-ALICERCE tiene un valor positivo de 86.730 con un valor  $p_{adj}=9e-07$  que resulta significativo en vista que este valor es inferior al nivel de significancia seleccionado (5%), por tanto el tratamiento ECOTERRA es superior al ALICERCE, implicando que este último este en segundo lugar y en último lugar el TESTIGO.

Apoyados en la figura 16 y la tabla 19, se concluye que no existe igualdad

de medias y que los tratamientos ECOTERRA y ALICERCE difieren estadísticamente del TESTIGO, por tanto, los promedios alcanzados en la variable rendimiento en cultivos de papa nativa están influenciados por la aplicación de los tratamientos. Del mismo gráfico se observa las distintas letras señalando el orden de significancia de los tratamientos estudiados. Los promedios alcanzados en la variable rendimiento/planta de acuerdo a los tratamientos en estudio fueron de 514.78 g para ECOTERRA, 428.05 g para ALICERCE y 317.29 g para el TESTIGO.

**Figura 16:** Gráfica de comparaciones múltiples para peso de tubérculos (g).



**Fuente:** Elaboración propia.

En vista que estos resultados alcanzados solo contemplan el rendimiento por planta, se vio por conveniente realizar la proyección del rendimiento por hectárea teniendo los siguientes resultados:

- 1). En una hectárea usando el tratamiento ECOTERRA se consigue un rendimiento de 12.50 toneladas métricas.
- 2). En una hectárea usando el tratamiento ALICERCE se consigue un rendimiento de 10.40 toneladas métricas.

3). Sin aplicar ningún tratamiento se consigue un rendimiento de 6.80 toneladas métricas.

#### 4.1.2. Resultados para contenido de Carbono orgánico y CO<sub>2</sub>

##### Contenido de Carbono en suelo agrícola

La tabla 20, muestra los análisis de varianza obtenidos de las evaluaciones efectuadas en las unidades experimentales. De la tabla se desprende que existen diferencias extremadamente significativas (0.001 o 0.1 %) para los tratamientos en estudio; esto es debido a que el factor “TRATAMIENTO” presenta un valor  $Pr(>F)$  de 0.000174 que en contraste con el nivel de significancia del 5 % (0.05) de la prueba de hipótesis de esta investigación resulta inferior, motivo por el cual se afirma que los promedios muestrales correspondiente a los tratamientos en evaluación tienen distintos valores, por tanto el contenido de carbono presente en el suelo se ve influenciada por la aplicación de los tratamientos.

También se concluye que para el factor “BLOQUES”, existe diferencias estadísticas bien marcadas por lo que se puede concluir que fue acertado realizar los controles para reducir el error experimental a través de los bloques aleatorizados.

**Tabla 20:** Análisis de varianza para carbono en suelo agrícola.

	GL	SC	CM	F - valor	Pr(>F)	Sig.
BLOQUES	3	0.3944	0.1315	4.774	0.049647	*
TRATAMIENTO	2	2.7966	1.3983	50.781	0.000174	***
ERROR	6	0.1652	0.0275			

Coefficiente de variabilidad: 2.10 %

Promedio: 7.91 %

Significancia: \*\*\* (0.001), \*\* (0.01), \*(0.05)

Fuente: Elaboración propia.

De la prueba de Tukey se concluye que el mejor tratamiento en la captura de Carbono en suelo agrícola es el tratamiento ECOTERRA, superando al tratamiento ALICERCE y al TESTIGO respectivamente (ver tabla 22).

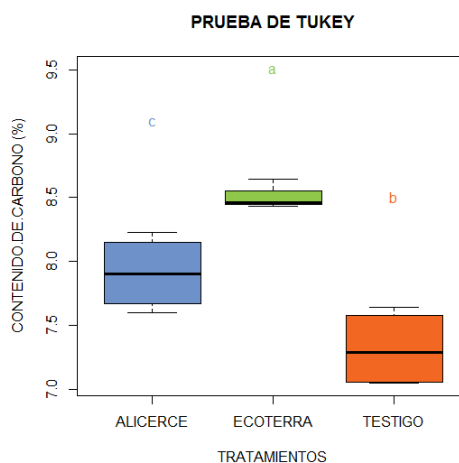
**Tabla 21:** Prueba de Tukey para contenido carbono en suelo agrícola (%).

TRATAMIENTO	PROMEDIOS	GRUPOS
ECOTERRA	8.50	a
ALICERCE	7.91	c
TESTIGO	7.32	b

**Fuente:** Elaboración propia.

De la tabla 63 de los anexos, se observa que la comparación de tratamientos ECOTERRA-ALICERCE tiene un valor positivo de 0.5875, que resulta de la diferencia de sus respectivas medias muestrales por tanto ECOTERRA es el tratamiento con mayores medias muestrales y esto es ratificado con el valor  $p_{adj}=0.006$  que resulta inferior al nivel de significancia seleccionado (5%), lo cual implica que el tratamiento ECOTERRA resulta superior al tratamiento ALICERCE y TESTIGO.

**Figura 17:** Comparaciones múltiples para carbono en suelo agrícola (%).



**Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 17, de manera visual se afirma que no existe igualdad de medias y que ECOTERRA y ALICERCE difieren estadísticamente del

TESTIGO, por tanto, los promedios alcanzados en la variable contenido de Carbono en suelo agrícola están influenciados por la aplicación de los tratamientos. Del mismo gráfico se observa las distintas letras señalando el orden de significancia de los tratamientos estudiados.

Los promedios alcanzados en la variable contenido de carbono en suelo agrícola por los tratamientos en estudio fueron de 8.50 % en ECOTERRA, 7.91 % para ALICERCE y 7.32 % al TESTIGO.

### **Contenido de Carbono en biomasa de papa**

La tabla 22, muestra los análisis de varianza obtenidos de las evaluaciones efectuadas en las unidades experimentales.

De esta tabla se reportan diferencias extremadamente significativas (0.001 ó 0.1 %) para los tratamientos en estudio; llegamos a esta conclusión debido a que en el factor “TRATAMIENTO” tiene un valor  $Pr(>F)$  que en contraste con el nivel de significancia de 5 % (0.05) de la prueba de hipótesis para esta investigación resulta inferior, por tanto se afirma que existe diferencias en los promedios muestrales correspondiente a los tratamientos en evaluación, en tal sentido el contenido de carbono presente en la biomasa está influenciada por la aplicación de los tratamientos.

También se concluye que para el factor “BLOQUES”, existe diferencias estadísticas bien marcadas por lo que se puede concluir que fue acertado realizar los controles para reducir el error experimental a través de los bloques aleatorizados.

De la prueba de Tukey se concluye que el mejor tratamiento en la captura

**Tabla 22:** Análisis de varianza para carbono en la biomasa.

	GL	SC	CM	F - valor	Pr(>F)	Sig.
BLOQUES	3	13.71	4.57	5.087	0.0436	*
TRATAMIENTO	2	136.90	68.45	76.186	5.44e-05	***
ERROR	6	5.39	0.90			
Coeficiente de variabilidad: 2.40 %				Promedio: 39.12 %		
Significancia: *** (0.001), ** (0.01), *(0.05)						
<b>Fuente:</b> Elaboración propia.						

de carbono en la biomasa es el tratamiento ECOTERRA, superando al tratamiento ALICERCE y al TESTIGO respectivamente (ver tabla 23).

**Tabla 23:** Prueba de Tukey para el carbono en la biomasa (%).

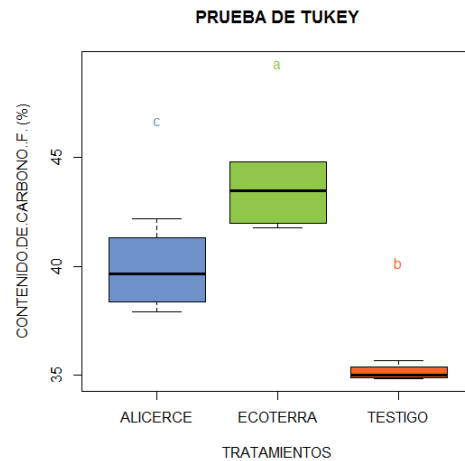
TRATAMIENTO	PROMEDIOS	GRUPOS
ECOTERRA	43.38	a
ALICERCE	39.85	c
TESTIGO	35.14	b

**Fuente:** Elaboración propia.

De la tabla 64 de los anexos, al analizar de manera más exhaustiva se observa que la comparación ECOTERRA-ALICERCE tiene un valor positivo de 3.530, que resulta de la diferencia de sus respectivas medias muestrales por tanto ECOTERRA es el tratamiento con mayores medias muestrales y además el valor  $p_{adj}=0.004$  resulta inferior de acuerdo al nivel de significancia seleccionado (5 %), por consiguiente se puede afirmar que el tratamiento ECOTERRA es superior al ALICERCE, lo cual implica que este último ocupe el segundo lugar y finalmente se tenga al TESTIGO. Visualmente en la figura 18, se puede concluir que no existe igualdad de medias y que los tratamientos ECOTERRA y ALICERCE difieren estadísticamente del TESTIGO, por tanto, los promedios alcanzados en la variable contenido de carbono en suelo agrícola están influenciados por la aplicación de los tratamientos. Del mismo gráfico se observa las distintas letras señalando el orden de significancia de los tratamientos estudiados.

Los promedios alcanzados en la variable acumulación de carbono en la biomasa por planta por los tratamientos en estudio fueron de 43.38 % para ECOTERRA, 39.85 % para ALICERCE y 35.14 % para el TESTIGO.

**Figura 18:** Gráfica de comparaciones múltiples contenido de carbono en la biomasa (%).



**Fuente:** Elaboración propia.

Es loable pensar que la biomasa total en el momento de la cosecha del cultivo de papa nativa resulta de la acumulación neta del CO<sub>2</sub> asimilado durante todo su ciclo de crecimiento. En vista que la asimilación del CO<sub>2</sub> resulta de la absorción de energía solar por medio de la fotosíntesis.

Segun Gardner *et al.* (1985), la biomasa total de un cultivo es la integral de la asimilación de CO<sub>2</sub> en toda la estación de crecimiento.

Algunos factores ambientales cambian predeciblemente durante la estación de crecimiento. A menudo el rendimiento que logra un cultivo se modifica siguiendo esos cambios.

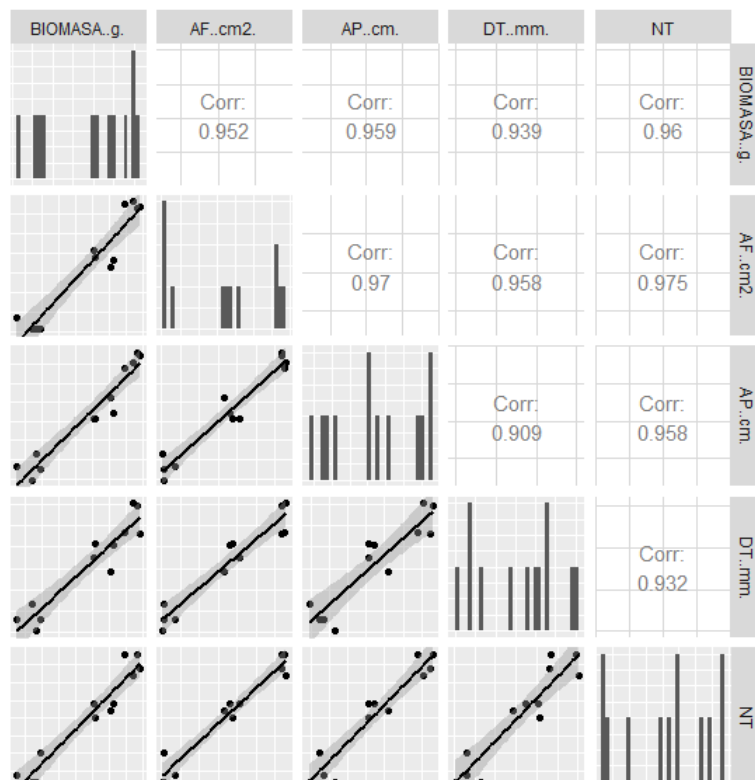
De acuerdo a la tendencia, a modo general se observa que el complejo microbiano con el que fue inoculado las semillas de papa han tenido un efecto positivo en las variables evaluadas, lo mismo ocurre para este caso, si bien no hay en la literatura estudios claros sobre la influencia

de microorganismos en los niveles de contenido de Carbono en tejidos vegetales, existe estudios sobre como se ve afectado los niveles de nitrógeno. Finalmente, para determinar el contenido de CO<sub>2</sub> que aporta el cultivo de papa nativa, se procedió a realizar los siguientes cálculos:

- 1). Determinar la función de respuesta (modelo alométrico).

A través de un análisis de correlación múltiple se determino que las variables: área foliar, altura de planta, diámetro de tallo, número de tallo y biomasa están altamente correlacionadas (figura 19). Sin embargo, hay indicios de alta multicolinealidad entre las variables relacionadas.

**Figura 19:** Correlación múltiple de predictores y biomasa.



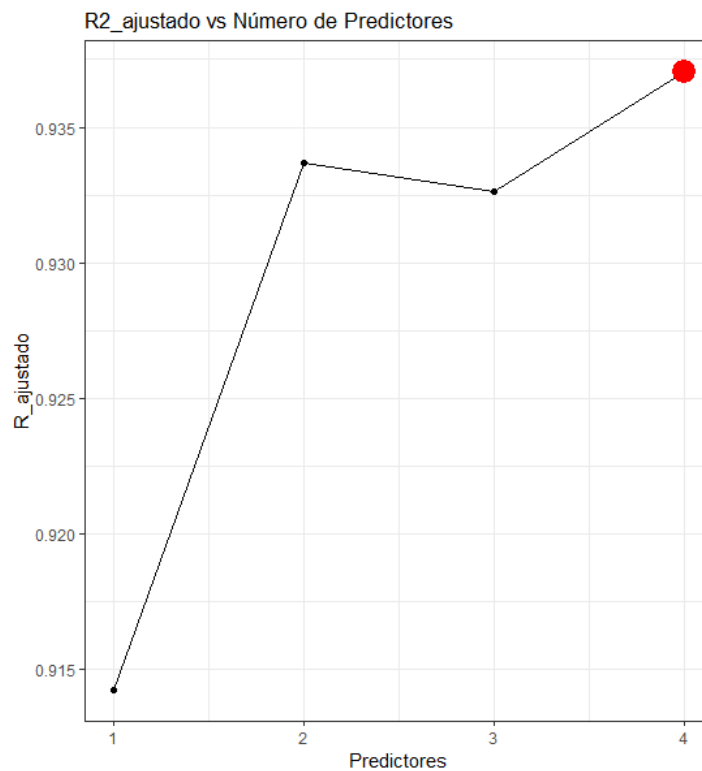
Fuente: Elaboración propia.

Se consideró emplear ecuaciones alométricas: lineal y no lineal; a fin

de obtener el mejor modelo que permita explicar con mayor precisión la relación existente entre la estimación de biomasa aérea del cultivo de papa y sus predictores.

Para ello, una representación visual del  $R^2$  ajustado, frente al número de predictores nos indica que la mejor precisión del modelo es cuando se considera 2 y 4 predictores, el punto en rojo indica el máximo valor que alcanza  $R^2$  ajustado, en el modelo a construir (figura 20).

**Figura 20:**  $R^2$  ajustado y número de predictores.



Fuente: Elaboración propia.

En consecuencia, aplicando el principio de parsimonia, el modelo adecuado que se construya deberá considerar entre 2 y 4 predictores.

Para la ecuación lineal (modelo 1), se realiza la regresión con los 4 predictores: área foliar (AF), altura de planta (AP), diámetro de tallo (DT) y número de tallo (NT); del resultado en la tabla 24 se observa

que el valor  $R^2$  ajustado obtenido es de 0.937 ó 93.7% lo cual indica que el modelo lineal es capaz de predecir con exactitud la biomasa vegetal a partir de las observaciones recolectadas. No obstante, el p - valor: 5.61e-05 del modelo en conjunto sea significativo ( $p < \alpha$ ), pero que de manera individual la mayoría de los predictores no muestren significancia confirma la multicolinealidad evidenciada en el gráfico de correlaciones múltiples.

**Tabla 24:** Coeficientes del modelo 1.

	Estimación	Std. Error	t - valor	Pr (>  t  )	Sig.
(Intercepto)	106.1298	257.8764	0.412	0.6930	
AF(cm <sup>2</sup> )	-0.6843	0.5475	-1.250	0.2515	
AP(cm)	5.8842	2.9385	2.002	0.0853	.
DT(mm)	13.0346	7.1093	1.833	0.1094	
NT	20.1693	13.9875	1.442	0.1925	

Significancia: \*\*\* (0.001), \*\* (0.01), \*(0.05), . (0.10)

Error estándar residual: 13.58 en 7 grados de libertad

$R^2$  múltiple: 0.9599 y  $R^2$  ajustado: 0.937

F - estadístico: 41.93 en 4 y 7 grados de libertad

p - valor: 5.61e-05

**Fuente:** Elaboración propia.

Eliminar algunas variables predictoras para tratar de corregir el problema de la multicolinealidad no aportarían nada al modelo 1, por tanto, la ecuación lineal considerada:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 AF^2 + \beta_2 AP + \beta_3 DT + \beta_4 NT \quad (13)$$

no es la adecuada para predecir la biomasa vegetal del cultivo de papa.

Tomando en cuenta la figura C.4 en donde indica que dos y tres predictores podrían ser buenos estimadores y la tabla 24 para tener en consideración sobre los valores más bajos de significancia entre

los predictores que constituyen el anterior modelo (ecuación 13), se plantea la siguiente ecuación (modelo 2):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 AP + \beta_2 DT + \beta_3 APDT \quad (14)$$

De la tabla 25, las variables predictivas mostradas en la ecuación 14 son estadísticamente significativas. El coeficiente  $R^2$  ajustado indica que el modelo es explicado en un 96.35% y el p - valor: 5.61e-05 confirma que el modelo en conjunto es significativo ( $p < \alpha$ ).

**Tabla 25:** Coeficientes del modelo 2.

	Estimación	Std. Error	t - valor	Pr (>  t  )	Sig.
(Intercepto)	-1393.2965	392.7884	-3.547	0.00754	**
AP(cm)	19.7001	5.1071	3.857	0.00483	**
DT(mm)	92.8651	28.8828	3.215	0.01233	*
AP(cm):DT(mm)	-1.0483	0.3627	-2.890	0.02019	*

Significancia: \*\*\* (0.001), \*\* (0.01), \*(0.05), . (0.10)

Error estándar residual: 10.34 en 8 grados de libertad

$R^2$  múltiple: 0.9735 y  $R^2$  ajustado: 0.9635

F - estadístico: 97.81 en 3 y 8 grados de libertad

p - valor: 1.208e-05

**Fuente:** Elaboración propia.

La tercera ecuación (modelo 3) propuesta está conformada por dos entradas y una variable explicativa:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 APDT^2 \quad (15)$$

Se recurrió a estimar la biomasa vegetal a partir del volumen de la planta, por ello las dos entradas del modelo fueron convertidas a una sola variable predictiva para el modelo 3.

Del resultado en la tabla 26, la variable predictiva resulta altamente significativa y el modelo en conjunto es capaz de predecir la biomasa

**Tabla 26:** Coeficientes del modelo 3.

	Estimación	Std. Error	t - valor	Pr (>  t  )	Sig.
(Intercepto)	1.579e+02	1.682e+01	9.385	2.83e-06	***
AP(cm):DT(mm) <sup>2</sup>	9.415e-03	1.076e-03	8.749	5.33e-06	***

Significancia: \*\*\* (0.001), \*\* (0.01), \*(0.05), . (0.10)

Error estándar residual: 19.30 en 10 grados de libertad

R<sup>2</sup> múltiple: 0.8845 y R<sup>2</sup> ajustado: 0.8729

F - estadístico: 76.55. en 1 y 10 grados de libertad

p - valor: 5.33e-06

Fuente: Elaboración propia.

aérea del cultivo de papa nativa en un 87.29 % (R<sup>2</sup> ajustado de 0.8729).

La cuarta ecuación (modelo 4) es del orden 2 y fue construido en base a las variables altura de planta y diámetro de tallo, siendo su estructura de la siguiente manera:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 AP + \beta_2 DT + \beta_3 APDT + \beta_4 AP^2 + \beta_5 DT^2 \quad (16)$$

**Tabla 27:** Coeficientes del modelo 4.

	Estimación	Std. Error	t - valor	Pr (>  t  )	Sig.
(Intercepto)	-598.1798	1639.5693	-0.365	0.728	
AP(cm)	-9.6997	65.3391	-0.148	0.887	
DT(mm)	152.6532	166.5341	0.917	0.395	
AP <sup>2</sup> (cm)	0.2661	0.7109	0.374	0.721	
DT <sup>2</sup> (mm)	0.9243	6.1575	0.150	0.886	
AP(cm):DT(mm)	-2.0881	3.9638	-0.527	0.617	

Significancia: \*\*\* (0.001), \*\* (0.01), \*(0.05), . (0.10)

Error estándar residual: 11.52 en 6 grados de libertad

R<sup>2</sup> múltiple: 0.9753 y R<sup>2</sup> ajustado: 0.9547

F - estadístico: 47.37 en 5 y 6 grados de libertad

p - valor: 9.621e-05

Fuente: Elaboración propia.

La ecuación 16, muestra que sus variables predictoras de manera independiente no contribuyen significativamente al modelo (tabla 27).

Al igual que en el caso del modelo 1 (ecuación 13), el p - valor:

9.621e-05 indica significancia estadística de manera grupal en los predictores sobre la respuesta de la biomasa vegetal. De otra parte, ese tipo de características en modelos matemáticos donde se presenta alto valor  $R^2$  ajustado y variables predictivas no significativas a nivel individual, tal como se señala en tabla 28, evidencian problemas de alta correlación entre sus predictores (multicolinealidad).

Para el antepenúltimo modelo se consideró la ecuación no lineal del tipo potencial generalizada que incluye dos variables predictivas, diámetro de tallo y altura de planta:

$$Y = \alpha AP^{\beta_1} DT^{\beta_2} \quad (17)$$

para facilitar el cálculo, se linealizó la ecuación tomando logaritmos naturales, resultando como nueva ecuación la siguiente:

$$\ln Y = \ln \alpha + \beta_1 \ln AP + \beta_2 \ln DT \quad (18)$$

Del resultado en la tabla 28, las dos variables predictivas resultan significativas estadísticamente.

**Tabla 28:** Coeficientes del modelo 5.

	Estimación	Std. Error	t - valor	Pr ( $>  t $ )	Sig.
(Intercepto)	-1.8165	1.6582	-1.095	0.3018	
$\ln AP(cm)$	1.3986	0.4942	2.830	0.0197	*
$\ln DT(mm)$	0.5251	0.2291	2.293	0.0476	*

Significancia: \*\*\* (0.001), \*\* (0.01), \*(0.05), . (0.10)

Error estándar residual (RSE): 0.05311 en 9 grados de libertad

$R^2$  múltiple: 0.9383 y  $R^2$  ajustado: 0.9246

F - estadístico: 68.43 en 2 y 9 grados de libertad

p - valor: 3.601e-06

**Fuente:** Elaboración propia.

El modelo 5 (ecuación 18) es capaz de predecir en un 92.46 % la biomasa aérea del cultivo de papa nativa a partir de su altura y diámetro de tallo. Además cualquier predicción del modelo, se aleja en 0.05311 (RSE) del valor real. El p - valor: 7.896e-07 también es significativo, por consiguiente afirma la utilidad del modelo.

Y por último, la construcción de la ecuación no lineal exponencial, que incluye dentro de su estructura, dos parámetros y dos variables predictivas:

$$Y = \alpha \varepsilon^{\beta_1 AP \beta_2 DT} \quad (19)$$

Para facilitar la regresión, se realizó la transformación logarítmica respectiva, teniendo el siguiente modelo lineal:

$$\ln Y = \ln \alpha + \beta_1 AP + \beta_2 DT \quad (20)$$

Los resultados que reporta la tabla 29, indican que el modelo 6 o ecuación 20 explica en un 90.85 % ( $R^2$  ajustado de 0.9085) la biomasa aérea del cultivo de papa nativa en función de la altura de planta y diámetro de tallo. Por otro lado, el p - valor: 8.587e-06 es significativo estadísticamente y ratifica que el modelo es útil para ser empleado en la predicción. Además el RSE señala que cualquier valor en la predicción tiene un alejamiento de 0.05849 del valor real.

Se realizó la selección del mejor modelo en función al valor de  $R^2$  ajustado para los modelos del tipo lineal y el (RSE) para los modelos no lineales, de la tabla 30, se muestra los 6 modelos matemáticos que

**Tabla 29:** Coeficientes del modelo 6.

	Estimación	Std. Error	t - valor	Pr (>  t  )	Sig.
(Intercepto)	3.727920	0.338073	11.027	1.58e-06	***
AP(cm)	0.017584	0.006934	2.536	0.0319	*
DT(mm)	0.039571	0.020275	1.952	0.0827	.

Significancia: \*\*\* (0.001), \*\* (0.01), \*(0.05), . (0.10)

Error estándar residual (RSE): 0.05849 en 9 grados de libertad

R<sup>2</sup> múltiple: 0.9252 y R<sup>2</sup> ajustado: 0.9085

F - estadístico: 55.62 en 2 y 9 grados de libertad

p - valor: 8.587e-06

**Fuente:** Elaboración propia.

se han construido en la investigación.

**Tabla 30:** Interceptos y estadísticos de los modelos de regresión.

Modelo	Intercepto	p - valor	RSE	R <sup>2</sup> ajustado.
Modelo 1	106.1298	5.61e-05	13.58	0.937
Modelo 2	-1393.2965	1.208e-05	10.34	0.9635
Modelo 3	1.579e + 02	5.33e-06	19.30	0.8729
Modelo 4	-598.1798	9.621e-05	11.52	0.9547
Modelo 5	-1.8165	3.601e-06	0.05311	0.9246
Modelo 6	3.7279	8.587e-06	0.05849	0.9085

**Fuente:** Elaboración propia.

Se observa que de entre los modelos lineales del 1 al 4, el mayor valor R<sup>2</sup> ajustado le corresponde el modelo 2 (ecuación 14), sin embargo el valor negativo del intercepto carece de interpretación biológica. El significado del intercepto del modelo 2 indica que, cuando los predictivos toman valores de “cero” la biomasa aérea disminuye en promedio 1393.29 g.

El modelo 4 (ecuación 16) también presenta el mismo inconveniente del intercepto con valor negativo a pesar de su alto valor R<sup>2</sup> ajustado. Después de haber descartado los modelos 2 y 4, quedaron por evaluar los modelos 1, 3, 5 y 6; de estos modelos la mejor elección para evaluarlos fue en base al error estándar residual (RSE). Esto es en vista que no todos son modelos de tendencia lineal (ecuaciones 18 y 20), lo más recomendable fue tomar el estadístico RSE como criterio

de selección del modelo que mejor ajuste presenta.

El modelo 5 es la seccionada (ecuación 20) por presentar un valor RSE de 0.05311, valor situado por debajo de los demás modelos evaluados.

El intercepto negativo de este modelo no resulta un inconveniente para la interpretación biológica, en vista que, la ecuación original del modelo seleccionado es del tipo no lineal (ecuación 17) y por tanto para calcular el verdadero valor del intercepto se aplicó “antilogarimo” a la ecuación mencionada.

Al final, la ecuación 17, en su forma original:

$$Y = 0,1626AP^{4,0495}DT^{1,6906}.$$

La interpretación biológica de esta ecuación se resume del siguiente modo: un incremento del 1 % en la altura manteniendo constante el diámetro del tallo permite un incremento en promedio del 4.0495 % en la biomasa aérea del cultivo de papa nativa. Lo mismo sucede cuando se incrementa en 1 % el diámetro de tallo mientras se mantiene constante la altura, esto conduce a un incremento en promedio de 1.6906 % en la biomasa aérea del cultivo.

- 2). Determinar la cantidad de carbono acumulado y convertirlos a CO<sup>2</sup>.

Para la estimación del contenido de carbono en la biomasa se hizo uso de la ecuación 2 y 3, para el caso del tratamiento ECOTERRA, reemplazando valores se tiene que:

$$[C \text{ muestra}] = 25.23\text{kgm}^{-2}/0.4480 = 56.31$$

y la cantidad de carbono proyectado para una hectárea aplicando el

tratamiento ECOTERRA se calculó empleando la ecuación 4:

$$[C][t\ C\ ha^{-1}] = \frac{[10000\ m^2]}{[tamaño\ de\ la\ parcela\ en\ m^2]} \times \frac{[C\ muestras]}{1000}$$

donde el valor estimado es de 15.64 t C/ha, convertidos a CO<sub>2</sub>, a través del factor 3.67, resulta el valor de 57.40 t CO<sub>2</sub>/ha.

Se realizó el mismo cálculo para los demás tratamientos, en el caso del tratamiento ALICERCE se reporta que acumula 51.47 t CO<sub>2</sub>/ha mientras que para el TESTIGO un valor de 38.97 t CO<sub>2</sub>/ha.

## 4.2. DISCUSIONES

### 4.2.1. Rendimiento

#### Emergencia de plántulas

Es de suponer que la aplicación de inoculantes biológicos influye en el proceso de brotación múltiple y emergencia de los tubérculos debido a sus propiedades de crecimiento vegetal. Un estudio realizado por los investigadores **Constantino et al. (2010)** en papaya, confirman que inoculando las semillas con bacterias del genero *Azotobacter* permitió incrementar todo los parámetros de germinación evaluados (porcentaje de germinación, velocidad de germinación tiempo medio de germinación) en un 98 % frente a los demás tratamientos evaluados. Del mismo modo, la investigación realizada por **Delgado et al. (2003)** llegan a la conclusión de que al analizar el comportamiento de la germinación de semillas de café inoculadas con cepas microbianas del genero *Azotobacter* alcanzan un

valor de 61.7 % y 93.3 % de germinación a los 50 y 60 días respectivamente. De igual modo, los investigadores como **González-López *et al.* (2005)**, han llegado a la conclusión de que al aplicar *Azotobacter* y *Arzosprillum* a semillas antes de la siembra, se mejora la germinación, debido a que estos géneros de bacterias, aparte de tener la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, también sintetizan sustancias biológicamente activas como aminoácidos, vitaminas, ácido indol acético (AIA) y giberelinas.

Estos trabajos confirman lo reportado en el porcentaje de emergencia de plántulas de papa debido a que el inoculante comercial ECOTERRA está compuesto de: *Bacillus megaterium*, *Bacillus licheniformis*, *Azotobacter chroococcum* y *Pseudomonas fluorescens*.

**Tsavkelova *et al.* (2006)**, afirma que hay investigaciones que señalan acerca de las bacterias del género *Azotobacter* como productoras del ácido indol acético (AIA) lo cual refuerza los resultados hallados.

#### **Altura de planta.**

Como resultado de las evaluaciones de los tratamientos, se tiene que ECOTERRA tuvo mayor influencia sobre el desarrollo de la planta de papa, siendo el tratamiento más promisorio.

Por tanto, es válido afirmar que emplear cepas de inoculantes biológicos del género *Azotobacter*, *Pseudomonas* y *Bacillus*, permite tener plantas más altas. A la misma conclusión llegan **Alvarado-Capó *et al.* (2015)**, que evaluaron el efecto de *Bacillus* sp. sobre el crecimiento de plantas de papa logrando con el tratamiento a base de *Bacillus* alcanzar en promedio

plantas con una altura comprendida entre 84.79 cm y 103.47 cm. Si bien sus trabajos fueron realizados en variedades comerciales de papa, sus resultados no dejan motivos para pensar en la eficacia que resulta emplear los inoculantes biológicos en la producción agrícola de papa nativa.

Además indican que inoculando al momento siembra se obtienen buenos resultados.

**Camacho y La Torre (2015)**, llegan a la conclusión que bacterias del género *Pseudomonas* promueven mejor el efecto del crecimiento en plantas de papa cultivadas en suelos con mayor contenido de materia orgánica bajo condiciones controladas. Tomando en cuenta el análisis de suelo realizado a las parcelas experimentales, se relaciona el hecho de que el suelo donde se instaló el cultivo de papa nativa presenta grandes cantidades de materia orgánica, permitiendo mantener activa su dinámica poblacional y garantizar la colonización de la rizosfera.

#### **Área foliar.**

Estudios similares pero con otras especie vegetales, como los de **Díaz *et al.* (1998)** concuerdan que la inoculación con bacterias de *P. fluorescens* tuvieron una influencia positiva en el desarrollo de plantas de lechuga logrando estimular una mayor cantidad de área foliar. Eso hace suponer que los efectos más sobresalientes de las cepas bacterianas *P. fluorescens* sugieren que posiblemente existió un sinergismo entre el hospedante y los simbioses, lo que permitió mejor absorción de elementos esenciales presentes en el suelo.

También un estudio realizado por **Magaña (2015)**, sobre el efecto de bacterias del genero *Bacillus* sp. en cultivos de fresa, reportaron que se alcanzaron las mayores áreas foliares entre un rango de 577.45 cm<sup>2</sup> y 1362.32 cm<sup>2</sup> concluyendo que la aplicación de bacterias traen consigo una mayor superficie fotosintética activa.

No obstante, hay estudios que indican sobre la dependencia del área foliar a la densidad de siembra, si se tiene en consideración que la densidad de siembra para el experimento fue por debajo de lo recomendado por consiguiente había sospechas de que el mayor tamaño de área foliar fue debido al tipo de siembra; teniendo en consideración, el estudio de **Arcila y Chaves (1995)**, en el que se observó el índice del área foliar del cafe se incrementaba con la densidad de siembra. De otra parte, estudiando el efecto de la densidad de siembra sobre el crecimiento de plantas de rábano (*Raphanus sativus* L.) en condiciones controladas; **Criollo y García (2009)** afirman que el índice de área foliar del cultivo se incrementaron con la densidad de población de plantas, con valores máximos a los 24 días después del trasplante. En este estudio no se ha considerado la densidad de siembra como factor de evaluación, por tanto es factible aceptar que el incremento del área foliar estuvo influenciado más por la aplicación de los inoculantes que la densidad de siembra. Los demás resultados de las variables evaluadas corroboran lo evaluado.

### **Diámetro de tallos.**

Estudios realizados por **Reyes-Ramírez et al. (2013)** en cultivos de ají inoculados con *Pseudomonas* tuvieron efectos significativos sobre el diámetro de tallos frente a los demás tratamientos bajo estudio. También **Lucas-García et al. (2003)**; **Sharma A. et al. (2007)**, concluyen que las plantas de ají inoculadas con *Pseudomonas* tienen efectos notables en la altura y diámetro de los tallos. **Paredes Guerrero (2014)** logró una eficacia del 2.68 % en el diámetro del tallo de plantas de maíz con la aplicación de *Bacillus* sp.; mientras que, **Llanos Machaca (2017)** con la aplicación de inoculantes a base de *Bacillus* en cultivo de quinua logra alcanzar diámetros comprendidos entre 0.206 cm y 0.202 cm valores superiores al alcanzado por el testigo.

Estos resultados guardan relación con lo dicho por **Tejera et al. (2010)**; **Torriente (2010)**, donde indican que el efecto beneficioso de la promoción del crecimiento vegetal por parte de las especies del género *Bacillus* puede ocurrir de forma directa o indirecta. Un efecto directo sobre la promoción del crecimiento vegetal se observa en bacterias rizosféricas que poseen la capacidad de producir sustancias, sideroforos, para llevar a cabo la fijación biológica del nitrógeno, la solubilización de minerales como el fósforo y la producción de hormonas reguladoras del crecimiento vegetal, Por su parte, la forma indirecta de promoción del crecimiento vegetal está relacionada con la producción de sustancias como los antibióticos que actúan como antagonistas de patógenos o induciendo resistencia en las plantas.

### **Número de tallos.**

Los investigadores **Maín y Franco (2011)** también llegaron a la misma conclusión, que aplicando dosis de Bacillus al cultivo de papa lograron incrementar la cantidad de tallos por planta.

Además indican que probablemente las cepas del género Bacillus aumentan de manera considerable la disponibilidad del fósforo.

Tomando en cuenta lo dicho por **Maín y Franco (2011)**, se puede inferir que los inoculantes aplicados al momento de la siembra facilitaron la disponibilidad de las grandes cantidades presentes de fósforo de los terrenos donde se llevo a cabo la experimentación (ver análisis de suelo), por consiguiente influenciaron en el aumento de la cantidad de tallos por planta.

De otra parte, las labores de aporque no tuvieron efecto alguno en la cantidad de cantidad de tallos por planta de papa. Esto concuerda con la investigación realizada por **Untiveros (1994)**, quien también encontró que no hubo diferencias estadísticamente significativas debido al efecto del número de aporques sobre el número de tallos principales por planta en los cultivares Revolución y Tomasa Tito Condemayta.

### **Peso de tubérculos.**

**Valverde Rodríguez (2015)**, en sus investigaciones tuvo como objetivo evaluar un complejo de microorganismos a distintos niveles de dosificación y su influencia en los rendimientos de papa (peso de los tubérculos). De sus trabajos concluye que la aplicación con microorganismos benéficos le

permitieron obtener 3 384,58 kg/ha de primera, 3 411.45 kg/ha de segunda y 3 550,00 kg/ha de tercera.

De otra parte, las investigaciones llevadas a cabo por **Tinoco Bernuy (2011)** reportaron incrementos significativos en producción de tubérculos bajo un sistema aeropónico, en donde los tratamientos a evaluar fueron cepas microbianas de *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Achromobacter*. De estos consorcios de inoculantes el tratamiento que logró mayores rendimientos fue *Pseudomonas putida* con pesos que oscilaban entre 6.754 y 7.502 gramos respectivamente.

Además en sus investigaciones concluyen que la aplicación de cepas de *Actinomyces sp.* promovieron tubérculos grandes y medianos en mayor cantidad, seguidos del tratamiento con *Achromobacter sp.* y posteriormente el tratamiento *Bacillus subtilis* + *Bacillus pumilus*. La especificidad de estos microorganismos PGPR es estrecha con la variedad canchan, por tanto esta influencia microbial se daría promoviendo la tuberización y la ganancia en peso de los tubérculos.

El complejo ECOTERRA utilizado para el experimento presenta dentro de su consorcio de microorganismos cepas de *Pseudomonas*, las mismas que probablemente debido a su capacidad de fijar N<sub>2</sub> que se encuentra en la atmósfera y solubilización de fosfato que pudo localizarse en la rizosfera activando la regulación del etileno así como la síntesis de auxinas y giberelinas en beneficio del cultivo.

Al igual que el complejo del género *Azotobacter* que se caracterizan, en condiciones ambientales óptimas, por solubilizar fosfatos y

synthetizar sustancias estimuladoras del crecimiento en las plantas, entre ellas, vitaminas y hormonas vegetales, como el ácido indol acético (AIA) por lo que habrían contribuido al desarrollo de los tubérculos.

El análisis de suelos realizados a los campos de cultivo de la presente investigación, señalan que los niveles de Fe se encuentran por encima del promedio por lo que se podría inducir que los las bacterias del genero *Pseudomonas* habrían producido sideróforos capaces de enlazar el Fe de modo reversible por los grupos funcionales más frecuentes hidroximatos y catecols, de esa forma habrían mejorado la nutrición de Fe en las plantas de papa. Esta hipótesis se habría comprobado analizando el contenido de Fe en las plantas.

Los resultados obtenidos por los mencionados investigadores concuerdan con lo reportado en este trabajo, si bien no es la misma variedad de cultivo o el sistema de producción, es evidente que el empleo de microorganismos tuvo una gran influencia en los rendimientos de los cultivos estudiados.

#### **4.2.2. Contenido de carbono**

##### **Carbono en el suelo.**

En los resultados de los análisis de las demás variables bajo estudio ha quedado demostrado ampliamente que estos microorganismos inoculados al suelo interactúan con las raíces de las plantas y constituyentes del suelo en la interfase raíz-suelo. Particularmente en el cultivo de papa, de acuerdo a los ensayos hasta el momento realizados se ha observado que las plántulas de papa han tenido una respuesta favorable dando a suponer que

producto de la inoculación a las semillas previa a la siembra ha permitido el aumento del crecimiento radical incrementando la exploración del suelo, mejorando la disponibilidad del agua y de los nutrientes limitantes y sobretodo mejorando la capacidad de fijación de carbono - por intermedio del cultivo - tal como lo señala las conclusiones del contenido de carbono en el suelo agrícola. Teniendo en cuenta además que la actividad de los microorganismos del suelo depende de las fuentes alimenticias que su ambiente proporciona: carbono orgánico, nutrientes, aire y agua, por consiguiente dado que los campos agrícolas reúnen condiciones propicias, se lograron los resultados reportados en cada etapa del presente estudio, producto de la acción de los inoculantes biológicos. Estudios realizados por **Zhicai et al. (2011)**, demuestran que bacterias de la especie *Bacillus mucilaginosus* pueden realizar la fijación de CO<sub>2</sub> a través de la enzima anhidrasa carbónica que cataliza de manera reversible la hidratación de CO<sub>2</sub>; para llegar a estas conclusiones, los cultivos de bacterias fueron instaladas en medios donde hubo la cantidad suficiente de piedra caliza. Los mismos investigadores plantean usar cepas de esta especie como un medio estratégico para el secuestro atmosférico de CO<sub>2</sub>.

Otros estudios desarrollados también refuerzan el hecho de que bacterias del genero *Bacillus* contribuyen a la fijación de CO<sub>2</sub> en el suelo, por ejemplo **Mitchell et al. (2009)**, estudiaron sobre la utilidad de aplicar biopelículas, que son conjuntos de microorganismos firmemente unidos a una superficie, como un medio para reducir la permeabilidad de las matrices geológicas.

Estos ensayos de poblaciones viables de los microorganismos seleccionados indicaron la supervivencia de las células de las especies *Bacillus mojavensis* y *Citrobacter sp.*; por ende estas conclusiones sugieren que las biopelículas diseñadas pueden mejorar el secuestro geológico de CO<sub>2</sub> atmosférico.

La probabilidad de que los tratamientos aplicados al cultivo de papa nativa influyan en el contenido de carbono del suelo se ve reforzada por la literatura ya señalada.

### **Carbono en la biomasa.**

Estudios realizados por **Paulino Flores (2013)**, reportan en promedio valores entre 25.37 t CO<sub>2</sub>/ha y 30.08 CO<sub>2</sub>/ha en cultivares de papa mejorada en sistemas de producción convencional.

**Schapendonk et al. (2000)** en sus estudios concluyen que la duplicación de CO<sub>2</sub> atmosférico en el ambiente incrementa entre el 20 % al 30 % en la biomasa vegetal.

**Solorio et al. (2016)**, llevaron a cabo estudios en distintas especie de maíz reportando resultados en promedio de 34.3 t CO<sub>2</sub>eq/ha y 24.5 t CO<sub>2</sub>eq/ha.

**Concha et al. (2007)**, realizó un estudio de cacaotales en la región San Martín muestra que la captura de carbono en la biomasa arbórea y hojarasca osciló entre 12.09 t C/ha en 5 años, donde el cacao estuvo asociado con árboles de mango, pucaquiro, capirona, coco y 35.5 t C/ha para la asociación palmera Huicungo, y árboles cedro, shaina y guaba de 12 años de edad aproximadamente.

**Andrade *et al.* (2013)** en investigaciones realizadas con cacaotales en Tolima, Colombia muestra sistemas agroforestales con almacenamiento de 28.8 y 33.6 t C/ha en biomasa arriba del suelo y 4.1 y 4.5 t C/ha en la necromasa a los 18 y 35 años, respectivamente, con una tasa de fijación promedio de 1.1 t C/ha al año. De sus resultados mencionados, se evidencia que la captura de carbono, no necesariamente está ligada a la edad de los arboles, más bien puede estar establecido entre la diversidad de cada especie del sistema y su rizosfera.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se afirma la validez de la hipótesis de investigación, por lo cual es pertinente concluir que la aplicación de inoculantes biológicos mejora la fijación de CO<sub>2</sub> en el cultivo de papa nativa.

##### 5.1.1. Rendimiento

En relación a la producción total del cultivo de papa nativa, fue pertinente clasificarlas en: parámetros agronómicos y peso de los tubérculos.

En cuanto a los resultados obtenidos en la evaluación de los parámetros agronómicos en el cultivo de papa nativa se concluye que el tratamiento que tuvo la mayor influencia en todo el ciclo fenológico del cultivo de papa nativa fue “ECOTERRA” por consiguiente debido a este tratamiento se logró obtener la mayor cantidad de biomasa área vegetal. Mientras que los resultados de evaluar el pesos de tubérculos cosechados producto de la aplicación de los tratamientos bajo estudio, se determinó que la mejor respuesta en la producción se consiguió aplicando “ECOTERRA” para alcanzar en promedio 514.78 g por planta, seguido de “ALICERCE” con 428.05 g por planta y 317.29 g por planta para el TESTIGO.

### 5.1.2. Contenido de CO<sub>2</sub> en suelo agrícola

Se determinó que producto de la aplicación de los tratamientos bajo estudio en las áreas agrícolas correspondientes permitieron almacenar en promedio 8.50 % haciendo uso de “ECOTERRA”, 7.91 % para “ALICERCE” y 7.32 % en el TESTIGO.

Sin embargo, estas estimaciones tuvieron la limitancia de no considerar los balances por pérdidas propios de un sistema dinámico.

### 5.1.3. Contenido de CO<sub>2</sub> en la biomasa

Se determinó mediante la estadística inferencial, los estadísticos RSE y R<sup>2</sup> encontrándose en los niveles 0.05311 y 0.9246 respectivamente para un nivel de significancia del 5 %. En base a estos estadísticos se eligió el mejor modelo o ecuación alométrica:  $Y = 0,1626AP^{4,0495}DT^{1,6906}$ ; con el cual se realizaron las estimaciones de captura de CO<sub>2</sub> por cada tratamiento bajo estudio en el cultivo de papa nativa. Por consiguiente se concluye que los valores alcanzados, empleando la ecuación alométrica señalada, se sitúan en promedio por cada tratamiento en 57.40 t CO<sub>2</sub>/ha para “ECOTERRA”, “ALICERCE” con un valor de 51.47 t CO<sub>2</sub>/ha y 38.97 t CO<sub>2</sub>/ha para el TESTIGO.

La evaluación de las reservas de carbono es importante debido a que estas reservas pueden representar un alto porcentaje de carbono almacenado, por tanto es importante ratificar el papel de los cultivos andinos en la fijación de CO<sub>2</sub>, sobre todo del cultivo de papa nativa, que de acuerdo a los resultados obtenidos y el contraste realizado con la literatura científica

se determina que valores de este estudio superan el promedio frente otras especies.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

### **5.2.1. Rendimiento**

Se recomienda en primer lugar a los productores dedicados a la producción de papa nativa consideren, dentro de su planificación agrícola, el uso de microorganismos con la finalidad de incrementar su producción por unidad productiva. Respecto a los profesionales de las ciencias agrarias, realizar estudios sobre niveles de dosificación de microorganismos en el cultivo de papa con el objetivo de determinar la dosificación óptima para mejorar los rendimientos del cultivo.

### **5.2.2. Contenido de CO<sub>2</sub> en suelo agrícola**

Se recomienda que, los productores agrícolas dedicados al cultivo de papa nativa al momento de la cosecha, compostar los rastrojos con la finalidad de aportar materia orgánica en el suelo e incrementar la fijación de CO<sub>2</sub> por parte de la población microbiana.

De otra parte, se sugiere contemplar como medida eficiente en el secuestro de carbono atmosférico, la aplicación de microorganismos especialmente del género *Bacillus* para todo tipo de cultivo agrícola.

En cuanto al gobierno regional y los gobiernos locales se recomienda, desmitificar que son los bosques forestales los únicos que fijan carbono en grandes concentraciones, por lo tanto incidir en fomentar la formulación de

proyectos agro - ambientales enfocados al tema de seguridad alimentaria y mitigación ambiental.

### **5.2.3. Contenido de CO<sub>2</sub> en la biomasa**

Se recomienda, para futuros estudios donde se estimen el contenido de CO<sub>2</sub>, tener en cuenta modelos matemáticos que incorporen los ciclos fenológicos y las interacciones con malezas con el fin de estimar los efectos de éstas en la fijación de carbono.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado-Capó, Y., Leiva-Mora, M., Cruz-Martín, M., y Mena, E. (2015). Efecto de *Bacillus* spp. sobre el crecimiento y rendimiento agrícola de plantas in vitro de papa cv. 'Romano' en casa de cultivo. *Biotecnología vegetal*, 15(2):115–122. Colombia.
- Anderson, J. (1982). Soil respiration, methods of soil analysis, chemical and microbiological properties. *American Society of Agronomy and Soil*, 2:15.
- Andrade, H., Figueroa, J., y Silva, D. (2013). Almacenamiento de carbono en cacaotales (*Theobroma cacao*) en Armero - Guayabal Tolima, Colombia. *Scientia Agroalimentaria*, 1:6–10. Colombia.
- Aranda, E. (2005). *Disminución por hongos saprobios de la fitotoxicidad del alpeorujó seco y extractado. Optimización de su uso como fertilizante biológico y para control de hongos fitopatógenos*. Departamento de Microbiología del suelo y Sistemas Simbióticos, Granada, España.
- Arcila, J. y Chaves, B. (1995). Desarrollo foliar del cafeto en tres densidades de siembra. *Cenicafé*, 46(1):5–20. Colombia.
- Ares, A., Boniche, J., Quesada, J., Yost, R., y Molina, E. (2002). Estimación de biomasa por métodos alométricos, nutrimentos y carbono en plantaciones de palmito en Costa Rica. Costa Rica: Agronomía Costarricense. 26(2):19–30.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA) (2018). *Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos*. Lima - Perú. Recuperado de: <http://geo.ana.gob.pe/geohidro2/>.

- Bukasov, S. M. (1971). *Las plantas cultivadas de México, Guatemala y Colombia*. CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Camacho, M. y La Torre, M. (2015). Efecto promotor de bacterias PGPR sobre el cultivo de papa bajo diferentes sustratos a nivel de invernadero. *The Biologist*, 13(1):75–89. Colombia.
- Cambardella, C. A. y Elliot, E. T. (1992). Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56:777–783.
- Campbell, N. y Reece, J. (2007). *Biología*. Editorial Médica Panamericana S.A., México. <https://books.google.com.pe/books?id=QcU0yde9PtKc>.
- Carvajal, M., Mota, C., Alcaraz-Lopez, C., Iglesias, M., y Martínez-Ballesteros, M. C. (2010). *Investigación sobre la absorción de CO<sub>2</sub> por los cultivos más representativos*. CSIS - Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Murcia, España. [http://www.lescco2.es/pdfs/noticias/ponencia\\_cisc\\_espanol.pdf](http://www.lescco2.es/pdfs/noticias/ponencia_cisc_espanol.pdf).
- Castillo, R., Roldán Ruiz, M. D., Blasco Plá, R., Huertas Romera, M. J., Caballero Domínguez, F. J., Moreno Vivián, C., y Martínez Luque, R. M. (2005). *Biotecnología ambiental*. Tebar S.L., España.
- Christy, M. y Ramaligam, R. (2005). *Vermicomposting of sago industrial soil waste using epigeic earthworm Eudrilus eugeniae and macronutrients analysis of vermicompost*. Asian Journal of Microbiology Biotechnology and Environmental Sciences.
- Ciesla, W. (1996). *Cambio climático, bosques y ordenación forestal: una visión en conjunto*. FAO, Roma.

- Clemente, M. (2007). *Los sumideros naturales de CO<sub>2</sub>: una estrategia sostenible entre el cambio climático y el Protocolo de Kyoto desde las perspectivas urbana y territorial*. Ciencias. Universidad de Sevilla, Secretariado de Publicaciones, España. <https://books.google.com.pe/books?id=feddlyn-TP8C>.
- CMNUCC (2008). *Challenges and opportunities for mitigation in the agricultural sector*. Código UNFCCC:FCCC/TP/2006/2.
- Coleman, K. y Jenkinson, D. S. (1996). RothC - 26.3 - a model for the turnover of carbon in soil. *Evaluation of soil organic matter models using existing, long-term datasets*, pp. 237–246. Springer-Verlag, Berlin.
- Collazo, O. M. y Rodés, G. R. (2016). *Manual de práctica de fotosíntesis*. Universidad Autónoma de México, México.
- Concha, J., Alegre, J., y Pocomucha, V. (2007). Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en el departamento de San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*, 6(1-2):75–82. Perú.
- Constantino, M., Gómez-Álvarez, R., Álvarez Solís, J. D., Pat Fernández, J., y Espín, G. (2010). Efecto de la biofertilización y los biorreguladores en la germinación y el crecimiento de *Carica papaya* L. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 12(2):103–115. Colombia.
- Consuelo, E. L., Cabildo Miranda, M. d. P., Claramunt Vallespí, R. M., y Claramunt Vallespí, T. (2013). *Ecología I: Introducción. Organismos y poblaciones*. Ciencias Ambientales. UNED, Costa Rica. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=LzVIAgAAQBAJ>.

- Criollo, H. y García, J. (2009). Efecto de la densidad de siembra sobre el crecimiento de plantas de rábano (*raphanus sativus* l.) bajo invernadero. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 3(2):210–222. Colombia.
- Díaz, V. P., Ferrera-Cerrato, R., Almaraz-Suárez, J. J., y Alcántar González, G. (1998). Inoculación de bacterias promotoras de crecimiento en lechuga. *Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados*, 19:327–335. México.
- Delgado, T. R. (2008). *La biomasa como recurso energético: energías y cambio climático*. Ediciones Universidad de Salamanca, España.
- Delgado, Y., Cupull, R., Pérez, C., Sánchez, A., y Vilchez, M. (2003). Efecto de *Azotobacter* sp. en la estimulación de la germinación y el desarrollo de posturas de *Coffea arabica* L. *Centro Agrícola*, pp. 26–31. Colombia.
- Di Benedetto, A. y Tognetti, J. (2016). Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. RIA. Revista de investigaciones agropecuarias. *RIA - Revista de Investigaciones agropecuarias*, 42(3):258–282. Argentina. Recuperado de: [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1669-23142016000300007&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1669-23142016000300007&lng=es&tlng=es).
- Di Matteo, J., Di Benedetto, A., y Rattin, J. (2015). Increase of spinach growth through the use of larger plug cell volume and an exogenous BAP spray. *American Journal of Experimental Agriculture*, 6(6):372–383.
- Duxbury, J. M., Smith, M. S., y Doran, J. W. (1989). *Organic matter as a source and sink of plant nutrients*. Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. University of Hawaii, Honolulu.

- Estévez, R. (2010). *La agricultura como sumidero de CO<sub>2</sub> - ecointeligencia - cambia a un estilo de vida sostenible*. Recuperado de:<https://www.ecointeligencia.com/2010/10/1a-agricultura-como-sumidero-de-co2/>.
- FAO (2012). Informe sobre los recursos mundiales de suelos: captura en los suelos para un menor manejo de la tierra. Technical report, Instituto Nacional de Investigación Agronómica, Francia.
- Figuerola, E. y Redondo, S. (2007). *Los sumideros naturales de CO<sub>2</sub>: una estrategia sostenible entre el cambio climático y el protocolo de Kyoto desde las perspectivas urbana y territorial*.
- Follet, R. F., Kimble, J. M., y Lal, R. (2001). *The potencial of U.S. grazing lands to sequester soil carbón. In the potencial of U.S grazing lands to sequester carbón and mitigae the greenhouse effect*. Lewis Publishers, Boca Raton - Florida.
- Fonseca, C., Burgos, G., Rodríguez, F., Muñoa, L., y Ordinola, M. (2014). *Catálogo de variedades de papa nativa con potencial para la seguridad alimentaria y nutricional de Apurímac y Huancavelica*. Centro Internacional de la Papa, Lima.
- Freibauer, A., Rounsevell, M., Smith, P., y Verhagen, A. (2004). *Carbon sequesration in the agricultural soils of Europe. Geoderma*.
- García, R. y Collazo Ortega, M. (2006). *Manual de Prácticas de Fotosíntesis*. UNAM, Facultad de Ciencias, México. <https://books.google.com.pe/books?id=FanXSdIC-oIC>.
- Gardner, F. P., Brent, P., y Mitchel, R. (1985). Fijación de carbono por los cultivos. *Physiologu of Crop Plants*, pp. 31-57.

- Gliessman, S. R. (2002). *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- González-López, L., Rodelas, B., Pozo, C., Salmerón-López, V., y Martínez-Toledo, M. V. (2005). Liberation of amino acids by heterotrophic nitrogen fixing bacteria. *Amino Acids*, 28:363–367. España.
- Harmand, J. M., Beer, J., Harvey, C., Ibrahim, M., Somarriba, E., y Jiménez, F. (2003). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Revista Agroforesteria en las Américas*, 10(37–38):80–87.
- Hawkes, J. G. (1979). *Biosystematics of the potato in: The potato crop, the scientific basis for improvement*. Chapman y Hall., Londres.
- Hernández, L. (2001). *Densidad de biomasa aérea en bosques extensos del neotrópico*. México.
- Higuchi, N., Santos, J., Ribeiro, R., Miente, L., y Biot, Y. (1998). *Biomassa de parte aérea da vegetacao da floresta tropical úmida de terra - firme de amazónia brasileira*. Acta amazonica, Brasil.
- Honorio, E. y Baker, T. (2009). *Memoria del taller de análisis estadístico para apoyar el diseño de inventario de carbono*. Instituto de investigaciones de la amazonia peruana – Universidad de Leeds, Perú.
- Instituto Colombiano Agropecuario (2011). *Resolución N° 00698, 4 de febrero de 2011. Por medio de la cual se establecen los requisitos para el registro de los departamentos técnicos de ensayos de eficacia, productores e importadores de bioinsumos de uso agrícola y se dictan otras disposiciones*. Bogota,

- Colombia. Recuperado de: [http://64.76.123.202/SAGPYA/economias\\_regionales/forobioinsumos/normativas/col\\_res\\_698\\_2011.pdf](http://64.76.123.202/SAGPYA/economias_regionales/forobioinsumos/normativas/col_res_698_2011.pdf).
- IPCC (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Institute for Global Environmental Strategies (IGES). IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme.
- IPCC (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. The National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japón.
- Izaurrealde, R. C., Rosenberg, N. J., y Lal, R. (2001). Mitigation of climatic range by soil carbon sequestration: issues of science, monitoring, and degrade lands. *Advances in Agronomy*, 70:1–75.
- León-Valverde, C. U. y Barrera, V. H. (2003). *Metodos bio-matematicos para el analisis de sistemas agropecuarios en el Ecuador*. INIAP - CIP, Ecuador. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=04YzAQAAMAAJ>.
- Llanos Machaca, M. Y. (2017). Bacterias solubilizadoras de fosfato del género *Bacillus* en suelos de la provincia de el Collao (Puno) y su efecto en la germinación y crecimiento de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en condiciones de invernadero.
- López-Merchán, R. (2017). *Valoración de carbono en la negromasa y suelo del bosque protector Aguarongo, provincia del Azuay*. Cuenca, Ecuador. Recuperado de: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14329/1/UPS-CT007037.pdf>.
- Lucas-García, J. A., Schloter, M., Durkaya, T., Hartmann, A., y Gutiérrez-Mañero, F. J. (2003). Colonization of pepper roots by a plant growth promoting *Pseudomonas fluorescens* strain. *Biol Fertil*, 37:381–385.

- Magaña, M. M. (2015). Efecto de *Bacillus subtilis* sobre el rendimiento, desarrollo y propiedades nutraceuticas de fresa. Tesis para optar el grado de Maestro, Instituto Politécnico Nacional, México.
- Malagamba, P. (1983). *Evaluación de tecnología agronómica para producción de papa a partir de semilla botánica. Serie de Evaluación de Tecnologías N° 9.* Centro Internacional de la Papa, Perú.
- Maín, G. y Franco, J. (2011). Efecto de la bacteria *Bacillus subtilis* y el hongo micorrizico arbuscular *Glomus fasciculatum* en la fertilización fosfórica en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* ssp. andigena). *Fundación PROINPA*. Bolivia.
- Manahan, S. y Leyva, I. (2006). *Introducción a la química ambiental*. Reverté, España. <https://books.google.com.pe/books?id=5NR8DIk1n68C>.
- María de Juana, J., Santos, F., Crespo, A., Herrero, M. n., De Francisco, A., y Jesús, F. (2003). *Energías renovables para el desarrollo*. Paraninfo S.A, España.
- Martín, F. (2009). *Fitotécnia*. Ediciones Mundi-Prensa, España. <https://books.google.com.pe/books?id=8aYSAQAAQBAJ>.
- Meléndez, G. (1997). Transformaciones de carbono, nitrogeno y fosfor del suelo, en sistemas agroforestales, cultivos anuales y bosque natural. Tesis para optar el grado de Maestro, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Ministerio de Agricultura del Perú (2014). *Cultivos de importancia nacional: papa generalidades del producto*. Lima. Recuperado de: <http://www.minag.gob.pe/portal/sector-agrario/agricola/cultivos-de-importancia-nacional/papalgeneralidades-del-producto3?limitstart=0>.

- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (2014). *Suelos, producción y cambio climático: avances en la Argentina*. INTA, Argentina.
- Mitchell, A., Phillips, A., Hierbert, R., Gerlach, R., Spangler, L., y Cunningham, A. (2009). Biofilm enhanced geologic sequestration of supercritical CO<sub>2</sub>. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3(1):90–99.
- Muñoz, J. S. C. y Benavides, A. C. M. (2010). Fertilización biológica: técnicas de vanguardia para el desarrollo agrícola sostenible. *Producción limpia*, 5(2):77–96.
- Nair, P. K. R. y Montagnini, F. (2004). Carbon sequestration: An under exploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 61:281–295.
- Ochoa, C. (1990). *The potatoes of South America: Bolivia*. University Press, Cambridge.
- Ordoñez, A. (1998). *Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso para bosque templado: San Juan Nuevo, Michoacán*. México D.F.
- Oviedo, L. (2007). Medición de la respiración del suelo en ecosistemas mediterráneos con sistemas de cámaras y analizadores tipo IRGA. Tesis para optar el grado de Maestro, Universidad de Granada, España.
- Paredes Guerrero, S. (2014). Efecto de la aplicación de *Bacillus* y *Streptomyces* spp. nativas en el desarrollo vegetativo y rendimiento de *Zea mays* L., maíz, amarillo duro en Lambayeque.
- Parton, W. J., Schimel, D. S., y Cole, C. V. (1987). Analysis of factors controlling soil organic matters levels in great plain grasslands. *Soil Sci. Amb. J.*, 51:1173–1179.
- Paulino Flores, M. (2013). Evaluación de la captura de carbono en tres sistemas de producción de papa en Zinacatepec.

- Picard, N., Sain-André, L., y Henry, M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles*. cirad - FAO, Roma.
- Plaster, E. (2010). *La ciencia del suelo y su manejo*. Thomson Editores, Madrid.
- Polzot, C. (2004). Carbon storage in coffee agroecosystem of southern Costa Rica: Potential applications for the clean development mechanism. Tesis para optar el grado de Maestro, York University, Toronto, Canada.
- Raich, J. y Schlesinger, W. (1992). *The global carbón dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate*. Tellus, USA.
- Reyes-Ramírez, A., López-Arcos, M., Ruiz-Sánchez, E., y Latournerie-Moreno, L. (2013). Effectiveness of microbial inoculants on growth and productivity of habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.). *Agrociencia*, 48(3):285–294. México.
- Rügnitz, M., Chacón, M., y Porro, R. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. Perú: Ministerio de Agricultura – IA (Iniciativa Amazonica). Ministerio de Agricultura, Lima - Perú.
- Rodríguez, W. y Leihner, D. (2005). *Análisis de crecimiento vegetal*. Editorial Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=69570TbkSxwC>.
- Rolli, U. (2007). *Microorganismos efectivos EM en la agricultura*. Ecologic Mantenances, Yucatán, México. Recuperado de: <http://www.emyucatan.com/>.
- Schapendonk, A., Van, O., Dijkstra, P., Pot, C., Jordi, W., y Stoopen, G. (2000). Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration on photosynthetic acclimation and productivity of two

- potato cultivars grown in open-top chambers. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, (27):1119–1130.
- Sharma A., A., Pathak, M., Sahgal, J. M., Meyer, V an Wray, J., y Johr, B. N. (2007). Molecular characterization of plant growth promoting rhizobacteria that enhance peroxidase and phenylalanine ammonia- lyase activities in chile (*Capsicum annum* L.) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Arch. Microbiol*, 188:483–494.
- Smith, P., U, S. J., Powlson, D. S., McGill, W. B., Arah, J. R. M., Chertov, O. G., Coleman, K., Franko, U., Frolkin, S., Jenkinson, D. S., Jensen, L. S., Kelly, R. H., Klein Gunnewiek, H., Komarov, A. S., Li, C., Molina, J. A. E., Mueller, T., Parton, W. J., Thornley, J. H. M., y Whitmore, A. P. (1997). A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven longterm experiments. *Geoderma*, 81:153–225.
- Solorio, M., Martínez Campo, B., y Arteaga Reyes, C. (2016). La biomasa de los sistemas productivos de maíz nativo (*Zea mays*) como alternativa a la captura de carbono. *Red Internacional de Contaminación ambiental*, 32(3):361–367. Colombia.
- Taiz, L. y Zeiger, E. (2007). *Fisiología vegetal*. Ciencias experimentals/ Experimental Sciences. Universitat Jaume I, España. <https://books.google.com.pe/books?id=7QIbYg-0C5AC>.
- Tapia, M. E. y Fries, M. A. (2007). *Guía de campo: cultivos andinos*. FAO y ANPE, Lima.
- Tejera, B., Heydrich, M., y Rojas, M. (2010). Potencialidades del género *Bacillus* en la promoción del crecimiento vegetal y el control biológico de hongos fitopatógenos. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 42(3):131–138. Cuba.

- Tinoco Bernuy, E. (2011). Producción de semilla pre - básica de papa por aeroponía, influenciado por microorganismos radiculares: *Actinomyces* spp., itshape *Bacillus* spp. itshape *Achromobacter* spp y itshape *Pseudomonas* sp.
- Tognetti, C. (2005). *Composting vs. vermicomposting: A comparison of end product quality*. Compost Science and Utilization.
- Torriente, D. (2010). Aplicación de bacterias promotoras del crecimiento vegetal en el cultivo de la caña de azúcar. Perspectivas de su uso en Cuba. 31(1):19. Cuba.
- Tsavkelova, E., Yu, Klimova, S., Cherdyntseva, T., y Netrusov, A. (2006). Microbial producers of plant growth stimulators and their practical use: A review. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 42:117–126.
- Untiveros, A. (1994). Contribución del aporque al rendimiento de tres cultivares de papa (*Solanum tuberosum* L.).
- Valverde Rodríguez, S. (2015). Efectos de los microorganismos eficaces y bioabonos en el rendimiento de la papa (*Solanum tuberosum* L.) var. Canchan, en condiciones edafoclimáticas de Huacrachuco, Marañón - 2015.
- Warton, D. I., Duursma, R. A., Falster, D. S., y Taskinen, S. (2012). SMATR 3- an R package for estimation and inference about allometric lines. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(2):257–259.
- Yepes, A. P., Navarrete, D. A., Duque, A. J., Phillips, J. F., Cabrera, K. R., Álvarez, E., García, M. C., y Ordoñez, M. F. (2011). *Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa - carbono en Colombia*. Instituto de Hidrología, Metereología y Estudios Ambientales - IDEAM, Bogota D. C, Colombia.

Young, A. (1989). *Agroforestry for soil conservation*. CAB International, Wallingford, UK.

Zhikai, Z., Bin, L., Weiguo, H., Mingxia, C., Xin, L., y Yan, L. (2011). *Bacillus mucilaginosus* can capture atmospheric CO<sub>2</sub> by carbonic anhydrasa. *African Journal of Microbiology Research*, 5(2):106–112.