



**FACULTAD DE FARMACIA Y BIOQUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE FARMACIA Y BIOQUÍMICA**

TESIS

**“RELACIÓN DEL CONTENIDO DE METALES ENTRE LA ESPECIE VEGETAL
Clusia rosea (RENAQUILLA) DE USO ETNOMEDICINAL Y EL SUELO QUE LA
SUSTENTA, PUERTO ALMENDRA - NINA RUMI”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
QUÍMICA FARMACÉUTICA**

**PRESENTADO POR:
GILMA BELLA DELIA RAMOS FREITAS**

**ASESOR:
Q. F. FRIDA ENRIQUETA SOSA AMAY, Dra.**

IQUITOS, PERÚ

2021

“Año del Bicentenario del Perú: 200 años de Independencia”

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N°001-PCGT-FFyB-UNAP-2021/OFICIO N°008-PCGT-UI/FFB-UNAP-2021

En la ciudad de Iquitos, Distrito de Iquitos, Departamento de Loreto, por vía Zoom de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, a los 24 días del mes de marzo de 2021, a horas 13:00, se dio inicio a la sustentación pública de Tesis titulado “**RELACIÓN DEL CONTENIDO DE METALES ENTRE LA ESPECIE VEGETAL *Clusia rosea* (renacuilla) DE USO ETNOMEDICINAL Y EL SUELO QUE LA SUSTENTA EN PUERTO ALMENDRA- NINA RUMI**”, aprobado con Resolución Decanal N°033-2021-FFyB-UNAP, presentado por la Bachiller: **GILMA BELLA DELIA RAMOS FREITAS**, para optar el Título Profesional de Químico(a) Farmacéutico(a) que otorga la Universidad de acuerdo a Ley y Estatuto.

El jurado calificador y dictaminador designado mediante Resolución Decanal N°153-2020-FFyB-UNAP, está integrada por:

Q.F. LILIANA RUIZ VÁSQUEZ, Dra.	Presidente
Q.F. ROSA DEL CARMEN MILUSKA VARGAS RODRÍGUEZ, PhD.	Miembro
M.C CHARLES OCAMPO FALCÓN.	Miembro

Luego de haber escuchado con atención y formulado las preguntas necesarias, las cuales fueron respondidas: Satisfactoriamente

El jurado después de las deliberaciones correspondientes, llegó a las siguientes conclusiones:

La sustentación pública y la tesis han sido Aprobado con la calificación Muy buena

Estando la bachiller apta para obtener el Título Profesional de Químico(a) Farmacéutico(a).

Siendo las 18:30 se dio por terminado el acto Académico




Q.F. LILIANA RUIZ VÁSQUEZ, Dra.
Presidente


Q.F. ROSA DEL CARMEN MILUSKA VARGAS RODRÍGUEZ, PhD.
Miembro

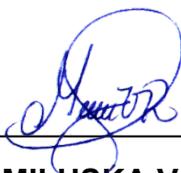

M.C CHARLES OCAMPO FALCÓN
Miembro


Q.F. FRIDA ENRIQUETA SOSA AMAY, Dra.
Asesora

JURADOS



Q. F. LILIANA RUIZ VÁSQUEZ, DRA.
CQFP N° 12491
Presidenta del Jurado calificador y dictaminador

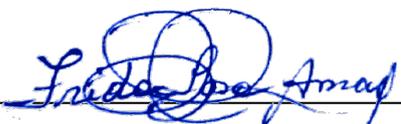


Q. F. ROSA DEL CARMEN MILUSKA VARGAS RODRÍGUEZ, DRA.
CQFP N° 13391
Miembro del Jurado calificador y dictaminador



M. C. CHARLES OCAMPO FALCÓN
CMP N° 40702
Miembro del Jurado calificador y dictaminador

ASESORA



Q. F. FRIDA ENRIQUETA SOSA AMAY, DRA.
CQFP N° 03468
Asesora

DEDICATORIA

A mi Padre Celestial y su Hijo Jesucristo por ser testigos de mis esfuerzos en esta travesía emocionante, a todas aquellas personas que ambicionan tener un mejor futuro a base de esfuerzo y dedicación, a mi familia que pese a momentos de prueba nunca perdieron la confianza en mi capacidad de lograr metas elevadas.

Dedico de manera especial este trabajo a toda persona de la zona rural que desee preservar nuestra riqueza natural, ya que son ellos los que hacen posible que obtengamos nuestro aprendizaje empírico acerca de nuestra etnofarmacología.

Y a todas aquellas personas que fueron parte de mi proceso educativo. Esperando a su vez, que las nuevas generaciones de estudiantes tengan el deseo de investigar más acerca de sus riquezas naturales y puedan sacar adelante a nuestra hermosa Facultad con nuevos proyectos.

Bella Ramos

AGRADECIMIENTOS

Siempre mi prioridad será nuestro Omnipresente Padre Celestial y su Hijo Jesucristo, que gracias a su amor e inspiración, puedo tener el privilegio de contar con seres amados que me apoyan constantemente en mi diario vivir. Mi eterno agradecimiento a mi Dios.

A mis padres, el señor Rodolfo Ramos Ramírez y la señora Magda Jane Freitas Rengifo, que son el impulso más fuerte para poder ubicarme en el lugar donde estoy y pretendo preservar; a mi amada abuela, la señora Gilma Ramírez Freitas, por inspirarme desde muy chica a que una mujer puede lograrlo todo con esfuerzo, esmero y dedicación; a mis hermanitos: Alondra, Angellina, Spencer y Wolfgang, por ser los que desarrollaron en mí las ganas de no rendirme para poder darles un ejemplo que sí se puede lograr grandes cosas con tan poco.

Agradezco a mi novio Alex Marcelo Olortegui Farge por su compañía constante en todos estos años de preparación, por regalarme sonrisas exquisitas en momentos de dificultad, y a su familia, que fue parte importante en cada salida al campo; ahora muy pronto será mi familia también.

Agradezco de manera especial a mi asesora de tesis, la doctora Frida Enriqueta Sosa Amay, por su paciencia y apoyo profesional. De ella puedo rescatar hermosos principios como persona y porque día a día sigue aprendiendo para dar lo mejor a sus alumnos.

ÍNDICE

PORTADA	I
ACTA DE SUSTENTACIÓN	II
HOJA DE FIRMAS	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	3
1.1. ANTECEDENTES	3
1.2. BASES TEÓRICAS	6
1.2.1. Características de la especie en estudio	6
1.2.2. Constituyentes minerales en los seres vivos	8
1.2.3. Elementos químicos sin función biológica conocida	18
1.2.4. Los metales pesados y las afecciones causadas en los humanos	22
1.2.5. Contaminantes metálicos en el medio ambiente	24
1.2.6. Química del suelo	25
1.2.7. Legislación en materia ambiental	29
1.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS	31
CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES	33
2.1. HIPÓTESIS	33
2.2. DEFINICIONES OPERACIONALES DE LAS VARIABLES	33
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	34
3.1. Tipo y diseño	34
3.2. Diseño muestral	34
3.3. Procedimientos de recolección de datos	34
3.4. Procesamiento y análisis de datos	35
3.5. Aspectos éticos	35
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	36
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN	49
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	55
CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES	56
CAPÍTULO VIII: FUENTES DE INFORMACIÓN	1
CAPÍTULO IX: ANEXOS	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Concentración de Fe en órganos de la especie amazónica <i>C. rosea</i> (renacuilla)	36
Tabla 2. Concentración de Cu en órganos de la especie amazónica <i>C. rosea</i> (renacuilla)	37
Tabla 3. Concentración de Mn en órganos de la especie amazónica <i>C. rosea</i> (renacuilla)	38
Tabla 4. Concentración de Cr en órganos de la especie amazónica <i>C. rosea</i> (renacuilla)	39
Tabla 5. Concentración de Zn en órganos de la especie amazónica <i>C. rosea</i> (renacuilla)	40
Tabla 6. Concentración de Cd en órganos de la especie amazónica <i>C. rosea</i> (renacuilla)	42
Tabla 7. Concentración de Pb en órganos de la especie amazónica <i>C. rosea</i> (renacuilla)	43
Tabla 8. Concentración de Hg en órganos de la especie amazónica <i>C. rosea</i> (renacuilla).	44
Tabla 9. Concentración de As en órganos de la especie amazónica <i>C. rosea</i> (renacuilla)	45
Tabla 10. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk	46
Tabla 11. Pruebas de correlación	47

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Gráfico del contenido promedio de hierro tanto en suelos como en los órganos de *C. rosea* (renaquilla) 41
- Figura 2.** Gráfico del contenido promedio de cobre, manganeso, cromo y zinc tanto en suelos como en los órganos de la planta. 41
- Figura 3.** Gráfico que presenta las concentraciones de todas las muestras de los cuatro metales no esenciales para la planta. 46

RESUMEN

La región Loreto ostenta una gran biodiversidad donde muchas de las especies de flora son reconocidas por el conocimiento ancestral sobre su uso etnomedicinal. El presente trabajo buscó relacionar el contenido de metales de la especie vegetal *Clusia rosea* (renaquilla) con el suelo que la sustenta en las comunidades de Puerto Almendra y Nina Rumi. La investigación de tipo correlacional y diseño experimental tuvo como muestra dos kg de raíz, hojas y corteza de la especie *Clusia rosea* que luego de ser acondicionada, fue procesada con 0,5 g por muestra para ser mineralizada y tratada en medio ácido; los analitos fueron cuantificados en el espectrofotómetro de absorción atómica. Los resultados indicaron que en el caso de los oligoelementos en general las concentraciones en la raíz, hojas y corteza eran superiores a las concentraciones halladas en las muestras de suelo, a excepción del hierro donde la concentración en el suelo fue mucho menor en la raíz > corteza > hojas. Contrariamente el contenido de plomo > arsénico > mercurio > cadmio; donde las concentraciones por elemento a excepción del plomo tuvieron valores bastante similares entre los diferentes órganos de la planta y el plomo mostró una concentración descendente suelo > raíz > corteza > hojas. Mas todos los elementos tóxicos mostraron concentraciones por encima del VMP en insumos vegetales. Las concentraciones altas registradas para algunos de los metales analizados preocupan, porque el ecosistema boscoso del área intervenida es fuente de recursos vegetales no solo para consumo medicinal sino también de especies de flora con valor nutricional.

Palabras clave: metales no esenciales, metales pesados, plantas medicinales.

ABSTRACT

The Loreto region boasts a great biodiversity where many of the flora species are recognized by the ancestral knowledge about their ethnomedicinal use. Relate the metal content of the plant species *Clusia rosea* with the soil that sustains it in the communities of Puerto Almendra and Nina Rumi. The correlational type research and experimental design had as a sample two kg of root, leaves and bark of the species *Clusia rosea* (renacuilla) that after being conditioned, 0.5 g per sample was processed to be mineralized and treated in an acid medium, the analytes were quantified in the atomic absorption spectrophotometer. The results indicated that in the case of trace elements in general, the concentrations in the root, leaves and bark were higher than the concentrations found in the soil samples, with the exception of iron where the concentration in the soil was much lower in the root> bark> leaves. Contrary to the content of lead> arsenic> mercury> cadmium; where the concentrations per element, except for lead, the values were quite similar between the different organs of the plant and lead showed a descending concentration of soil> root> bark> leaves. But all the toxic elements showed concentrations above the VMP in vegetable inputs. The high concentrations recorded for some of the metals analyzed are of concern, because the forest ecosystem of the intervened area is a source of plant resources not only for medicinal consumption but also for flora species with nutritional value.

Keywords: non-essential metals, heavy metals, medicinal plants.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento etnobotánico ha sido fuente de conocimientos ancestrales que ha aportado moléculas bioactivas a la industria farmacéutica y cosmética. Muchos investigadores se han adentrado a comunidades nativas y algunas rurales, con el fin de obtener información valiosa relacionada con el uso de plantas con probable actividad terapéutica (1).

Las plantas, son los medios disponibles para muchas personas de bajos recursos que viven rodeadas de floresta y su uso está basado en su conocimiento ancestral. En la actualidad, hay ciudadanos que prefieren un tratamiento natural, antes de consumir especialidades farmacéuticas para tratar sus dolencias y enfermedades. Esta tendencia va en aumento, en parte alimentada por la gran cantidad de reacciones adversas a los medicamentos y por la falta de efectividad para curar ciertas dolencias.

La Amazonía de la región Loreto representa casi una tercera parte del territorio peruano; sin embargo, tiene una densidad poblacional baja, esto ha determinado que las comunidades étnicas y rurales queden aisladas y alejadas de centros poblados que sí cuentan con atenciones en establecimientos del Ministerio de Salud (Minsa). La exuberante floresta que las rodea es fuente de inspiración y provisión; los nativos han identificado un arsenal de plantas medicinales, las cuales conocen de manera ancestral. Las comunidades amazónicas asentadas en la ribera de la margen derecha del río Nanay, conservan la práctica de tratar sus dolencias con ciertas plantas, que por lo general crecen en la zona.

Este conocimiento étnico de las bondades terapéuticas de ciertas especies botánicas, pasó a las comunidades rurales cercanas a la ciudad de Iquitos, lugar donde se puede adquirir en mercados y centros artesanales entre otras muchas plantas la especie *Clusia rosea*. Este género agrupa a más de trescientas especies que se distribuyen a lo largo del continente americano, creciendo en hábitats tanto de costa seca, como en climas de selva tropical (2). Se ha reportado la presencia de metabolitos secundarios en especies de este género,

a los cuales se deberían algunas de las actividades biológicas de estas especies (3). Sin embargo, las plantas pueden representar una fuente de metalo-toxicidad, esto depende de la calidad de las matrices ambientales como son el agua y el suelo, este último es fuente provisoria de minerales que pueden (metales esenciales) o no requerir (metales sin utilidad biológica) las plantas para su metabolismo y funcionamiento.

Los metales pesados por norma deben ser determinados en insumos, recursos y productos terapéuticos provenientes de la floresta, y es un requisito a cumplir para su exportación como medida de seguridad. No basta con la eficacia del vegetal, inherente a las moléculas bioactivas que posee para determinar su consumo; ya que, por encima de dicha actividad farmacológica prima la seguridad de su consumo para evitar episodios tóxicos. Si bien la fisiología del vegetal requiere de ciertos iones metálicos en pequeñísimas cantidades, para que se den ciertas reacciones bioquímicas y procesos fisiológicos; sin embargo, hay cationes a los cuales no se les conoce utilidad biológica, por lo que su detección en insumos vegetales de uso en salud es obligatoria a fin de determinar si es seguro su consumo.

La práctica medicinal etnotradicional requiere ser validada con estudios de eficacia, seguridad y calidad; por lo que en la presente investigación se pretende hacer estudios de seguridad, para determinar que la especie botánica *C. rosea* (renaquilla) que crece en suelos aledaños a las comunidades de Puerto Almendra y Nina Rumi no representa un riesgo de metalo-toxicidad para los consumidores. En las comunidades de la cuenca media del río Nanay, la especie *C. rosea* es muy apreciada por los lugareños por sus bondades curativas, pero se desconoce si su consumo pueda conllevar algún riesgo de contaminación por exceso de metales con utilidad biológica o presencia de metales pesados.

Ante la demanda del uso étnico tradicional y la falta de estudios para la seguridad de su consumo, se decidió verificar si hay relación en el contenido de metales en la especie vegetal *C. rosea* con el suelo que la sustenta de las comunidades de Puerto Almendra y Nina Rumi.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. ANTECEDENTES

Ali et al. (2019), en el artículo de revisión “Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation”, luego de un estudio documentario sobre metales pesados esenciales y no esenciales en el medio ambiente, su persistencia, transferencia, acumulación y cuantificación en la biota, así como la exposición humana a los metales pesados y su bioacumulación y biomagnificación en las cadenas alimentarias en las que participa el hombre, su toxicidad y monitorización en los diferentes niveles de contaminación tanto ambiental como en los seres vivos y el uso de bioindicadores; consideraron que los metales pesados y metaloides más peligrosos para el medio ambiente incluyen Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Hg y As por su persistencia ambiental, toxicidad y potencial bioacumulación - PBT. Estos metales se transfieren en cadenas y redes alimentarias acuáticas y terrestres representando un verdadero peligro para el hombre y la vida silvestre, por lo que es importante conocer la química ambiental y toxicidad de metales pesados y metaloides, así como asumir las medidas para medir y minimizar su impacto (4).

Medina (2018), en su tesis “Etnobotánica cuantitativa de las plantas medicinales en la comunidad nativa Nuevo Saposoa, provincia de Coronel Portillo, Ucayali, Perú”, identificó las especies vegetales por su uso, índice de valor de uso y factor de consenso de informantes de plantas medicinales. Categorizó las especies de uso medicinal en 60 géneros y 37 familias, resaltando las especies de mayor a menor en las familias Fabaceae, Euphorbiaceae, Moraceae, Rubiaceae, Arecaceae y Loranthaceae, siendo superior al 50% las especies arbóreas seguidas de las herbáceas y arbustivas y en menor representatividad los bejucos, lianas y hemiepipfitas; y entre las especies con mayor valor entre otras figura la renaquilla (IVUs = 0,69) (5).

Hejna et al. (2017), en una revisión denominada “Nutritional ecology of heavy metals” versan sobre el contenido de metales esenciales y no esenciales en la

producción ganadera y la contaminación ambiental por el estiércol que sirve de abono a los suelos. Algunos metales esenciales para la bioquímica y fisiología de las plantas como el Fe, Co, Zn, Cu, Mn y Mo, y otros elementos como As, Cd, F, Pb, Hg, que no tienen funciones biológicas conocidas, pueden ser considerados contaminantes indeseables de los suelos. Los metales adicionados a la alimentación animal progresivamente entran en la cadena alimentaria afectando a los seres vivos. Por lo que enfatizan las medidas adoptadas por la Unión Europea para controlar la presencia de metales en el medio ambiente, debido a actividades antropogénicas contaminantes como agrícola, ganadera e industrial, con el fin de proteger la salud humana. Se enfocan en las materias primas y los alimentos para animales, la diversidad de prácticas agrícolas y en las diferencias en los límites permisibles aceptables y estrategias efectivas para reducir la contaminación del suelo por metales en los procesos rurales (6).

Casteblanco (2018), publicó la investigación “Técnicas de remediación de metales pesados con potencial aplicación en el cultivo de cacao”, en respuesta a la alerta de la legislación de la Unión Europea que impone límites máximos de plomo y cadmio en chocolates con un porcentaje de cacao igual o mayor al 50%; hacen un recuento de problemas de salud en humanos por el consumo de alimentos contaminados con metales pesados y de los posibles mecanismos de contaminación del cacao a lo largo de su producción y procesamiento. Finalmente, revisan las técnicas de remediación (fitorremediación y biorremediación) para recuperar suelos contaminados o que evitan la translocación de los contenidos de plomo y cadmio del suelo a varios cultivos de interés comercial en Colombia u otra parte del mundo, recomendando un sistema integrado de remediación de suelos con la incorporación sistemática de árboles nativos, plantas herbáceas, acuáticas, biochar, bacterias y micorrizas arbusculares (7).

García y Uribe (2015), en su tesis “Evaluación de metales de la especie *Tynanthus panurensis* (clavo huasca) de uso etnoterapéutico en la región Loreto”, muestrearon raíz, corteza y hojas de la especie botánica en el área de intervención de la investigación comprendida entre el km 17 y 50 de ambas

márgenes de la carretera Iquitos-Nauta. A las muestras secas y pulverizadas les eliminaron la humedad residual a 110 °C y las redujeron a cenizas, luego se trataron en medio ácido en caliente y cuantificaron las concentraciones de Hg, Pb, Cd y As. Encontraron altas concentraciones de cadmio, pero bajas de plomo (8).

Flores (2014), en el trabajo de tesis "Distribución espacial y ubicación fisiográfica de cuatro especies vegetales de uso medicinal en el área de influencia de la carretera Iquitos-Nauta, Loreto, Perú", de tipo descriptivo y diseño no experimental, tuvo como población a especies botánicas de uso etnomedicinal que crecen en el área de estudio intervenida. Identificó veinte individuos de *Campsiandra angustifolia* (huacapurana) que crecen en terrenos de terrazas bajas de drenaje imperfecto, bueno o moderado, suelos con diferentes tipo de textura, pH extremadamente ácido y fertilidad baja distribuidos en cuatro centros poblados; cuatro individuos de *Maytenus macrocarpa* (chuchuhuasi) que se desarrollan en terrenos de terraza baja de drenaje bueno a moderado y terrazas medio planas, suelos con diferentes tipos de texturas, pH extremadamente ácido y fertilidad baja; seis individuos de *Tynanthus panurensis* (clavo huasca) ubicados en terrenos de terrazas altas ligeramente disectadas, terrazas de drenaje bueno a moderado y terrazas medias arcillosas, ecosistemas con diferentes tipos de suelo, pH de extremadamente ácido a muy fuertemente ácido y fertilidad baja (1) *Swartzia polyphylla* (cumaceba) que crece en terrenos de colina baja fuertemente disectada, con suelos de textura franco arenosa moderadamente gruesa, pH de extremada a fuertemente ácida y fertilidad baja, existiendo entre la distribución y la fisiografía de las especies la capacidad de estas para adaptarse a través de los años, a suelos extremadamente ácidos y de baja fertilidad (9).

Bermello (2010), en su artículo de revisión "Recursos genéticos y conocimiento etnofarmacológico cubanos. Su protección mediante patentes", expone la importancia del reconocimiento de la propiedad intelectual del conocimiento tradicional que está en relación con los recursos genéticos, entre los que destaca la etnofarmacología que estudia las drogas de uso en medicina tradicional. Para tal efecto revisó la base de datos de patentes reconocidas en Cuba con

clasificación internacional de patentes, según su uso A61K para conocer cuáles de las especies habría sido registradas en el extranjero, encontrándose una patente de *C. rosea* Jacq. con uso etnofarmacológico (10).

1.2. BASES TEÓRICAS

1.2.1. Características de la especie en estudio

A. Clasificación taxonómica de la especie *Clusia rosea*:

Reino	: Plantae
División	: Magnoliophyta
Clase	: Magnoliopsida
Orden	: Theales
Familia	: Clusiaceae
Subfamilia	: Clusioideae
Tribu	: Clusieae
Género	: <i>Clusia</i>
Especie	: <i>Clusia rosea</i> Jacq.

Clusia, es un género que agrupa especies arbóreas, arbustos y enredaderas que se distribuyen a través de las Antillas, la América Central y del Sur (11).

B. Hábitat: esta especie de *Clusia* se reporta como originaria de los Cayos de La Florida, Yucatán hasta Sinaloa (México), también en las Guayana, sur de Colombia, Islas Vírgenes, Antillas Mayores, pero en publicaciones más recientes se cree que es nativa del Caribe; asimismo, está naturalizada en otras regiones: Sri Lanka, Sudáfrica, islas del Pacífico (7). Se desarrolla en climas cálido y húmedo; en suelos menos favorecidos por precipitaciones pluviales se le encuentra cerca de donde discurren aguas (12).

C. Crecimiento y reproducción: se desarrolla como arbusto a árbol grande, que en bosques cerrados se comporta como una estranguladora epífita y hemiepífita; sus tallos presentan un látex resinoso amarillo blanquecino. Las

inflorescencias que se encuentran en los árboles dominantes o codominantes son grandes, blancas con jaspes rosados; sus frutos grandes liberan gran cantidad de semillas, que presentan una germinación epigea. Sin embargo, también presenta una reproducción vegetativa cuando los tallos se transforman en raíces aéreas (11).

Esta especie es moderadamente tolerante a la sombra y responde a cambios ambientales, en casos de desecación cierra las estomas, produciendo cambios en su modo de captación de dióxido de carbono(8); pudiendo absorber CO₂ por las noches, el cual incorporado a ácidos orgánicos (malato y citrato) que luego en el día se convierten en una fuente interna de CO₂ para la fotosíntesis. La forma de fotosíntesis expresada guarda además relación con la forma de vida, la edad y desarrollo de la planta (2).

D. Fitoquímica: en especies de *Clusia* los compuestos biológicamente activos son benzenonas poliisopreniladas como clusianona, grandona, hidroxinemorosona y nemorosona; este último compuesto se ha determinado que es el mayor constituyente de la resina de las flores de *C. rosea* y existe en su forma tautomerica ceto/enol (3).

E. Actividad biológica: benzofenonas preniladas y xantomas provenientes de diferentes especies procedentes de América entre ellas del género *Clusia*, que han probado tener actividad contra el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH-1) *in vitro*, siendo las especies químicas clusianona 7-epiclusianona, 18,19-dihidroxiclusianona, nemorosona y propolona las más promisorias por su actividad antivírica (13) (14).

F. Usos medicinales: se ha reportado que la **corteza** suele emplearse en caso de descensos y prolapso, las **hojas** en infecciones de piel y los **frutos** en heridas; sus grandes **raíces** aéreas usadas como lanzas, cuando se las abre en forma de horquilla sirven para que una persona con hernia pase por ella y los nativos aseguran que conforme se cierra el corte en la raíz, la hernia cierra (12) (15) (1). La pulpa que rodea a las semillas es alimento de aves y los frutos

alimento de los murciélagos; las resinas de especies de *Clusia* son usadas por abejas para construir sus nidos.

1.2.2. Constituyentes minerales en los seres vivos

Los llamados oligoelementos son algunos metales requeridos por los seres vivos, algunos son comunes y otros son específicos para cada especie; pero tienen carácter de esencialidad metabólica y fisiología en los seres vivos en concentración de mg/kg (ppm) o $\mu\text{g}/\text{kg}$ (ppb). Esta condición de esencialidad hace que necesariamente los oligoelementos se incorporen a la dieta; contrariamente se consideran tóxicos una vez pasado su umbral permitido. Su ausencia puede afectar la actividad de determinadas enzimas que los requieren como cofactores, alterarse algunas funciones o los flujos que mantienen la homeostasis corporal.

En el caso de los requerimientos de **metales pesados para las plantas** como micronutrientes destacan el Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Zn y Mo. Son esenciales para el crecimiento del vegetal y la resistencia al estrés oxidativo, así como para la producción de diferentes biomoléculas como: carbohidratos, clorofila, ácidos nucleicos, fitohormonas o reguladores de crecimiento y metabolitos secundarios (6).

En la alimentación animal los elementos esenciales (Fe, Co, Zn, Cu, Mn, Mo, Cr Ni y Se) suelen agregarse y están autorizados como aditivos nutricionales para optimizar la producción. Asimismo, se formulan suplementos dietéticos con vitaminas y micronutrientes para el hombre; en ambos casos pueden superar la estrecha ventana nutricional. De manera que, los excesos o deficiencias pueden presentar trastornos a nivel celular o sistémico y terminar en diversas enfermedades o condiciones de anormalidad (6) (4).

Para una suplementación mineral óptima, se deben tener en cuenta las diversas interacciones entre minerales y los componentes de la dieta. Estas interacciones positivas y negativas de los nutrientes, afectan la absorción y biodisponibilidad de otros nutrientes. Se reporta que se dan interacciones negativamente con Mn,

Zn y Fe (6) (5). Las interacciones de metales pesados con diferentes grupos de organismos son mucho más complejas (4).

A. Hierro (Fe): es el cuarto elemento más abundante en la Tierra, y el suelo contiene entre 1 a 5% de hierro total en forma de silicatos ferromagnéticos y biotitas; por meteorización se libera Fe que puede ser absorbido o formar óxidos e hidróxidos que controlan la solubilidad de este metal en el suelo; también se forman algo de sulfatos, carbonatos y minerales de arcilla. Los factores que contribuyen a disminuir la disponibilidad del hierro en el suelo para las plantas son: con pH por encima de 6,5 el hierro se encuentra insoluble y sin posibilidad de ser incorporado por la planta; lo que se traduce en clorosis que se visualiza porque las hojas presentan color amarillo con venas verdes; por el contrario, si el pH es bajo, la absorción excesiva de este metal puede llevar a toxicidad por hierro, que el vegetal tiene que acomplejar o confinar.

La humedad elevada incrementa el contenido de bicarbonato, elevando el pH y de haber exceso de fósforo se forman fosfatos de hierro que son muy insolubles; asimismo, un bajo nivel de materia orgánica también disminuye el hierro soluble ya que las fracciones húmicas son necesarias para acomplejar y solubilizar el hierro. Por último, la presencia de manganeso, cobre y zinc interaccionan por los agentes complejantes y transportadores del hierro.

Las plantas suelen absorber el Fe^{2+} más que el Fe^{3+} , pero esta condición es dependiente de la especie vegetal. Las plantas requieren grandes cantidades de hierro y para que puedan entrar al vegetal, se requiere de una familia de proteínas ZIP transportadoras de Fe y otros metales. La facilidad con que el Fe cambia de estado de oxidación lo hace partícipe de la generación de radicales libres (reacción de Fenton) que suelen oxidar los ácidos grasos poliinsaturados de los lípidos de las membranas celulares (16).

Este metal es fundamental en diversas funciones en los vegetales, el hierro está comprometido con la síntesis de clorofila y la integridad de cloroplastos; asimismo, participa en procesos redox en forma de hierro hémico como complejos proteicos hierro-porfirínicos: en citocromos, nitrato reductasas

(reducción de nitratos a nitritos), leghemoglobina, catalasas y peroxidasas. En procesos no hémicos como el Fe enlazado al S de la cisteína que es importante en la fotosíntesis e isomerización del citrato a isocitrato, ferredoxina, nitrito reductasa (nitrito a amoníaco) glutamato sintasa (en cloroplastos y mitocondrias) aconitasa, riboflavinas, superoxidodismutasa, NAD deshidrogenasa y ribonucleotidos. También participa en reacciones no redox y finalmente el hierro de reserva que se encuentra ligado a la fitoferritina (17, 18).

En caso de deficiencia de hierro, las plantas superiores han desarrollado mecanismos para aumentar su disponibilidad en el suelo, como primer mecanismo está la presencia de reductasa, de quelatos férricos en la rizodermis; a esto se asocia la acidificación de la rizosfera que ayuda a solubilizar el Fe en el suelo y a la función de la enzima. Un segundo mecanismo es la liberación de H^+ por las raíces, que incrementa la presencia de raíces laterales y pelos. Un tercer proceso para la acidificación de la rizosfera es la liberación de sustancias fenólicas quelantes (16).

Este elemento es también importante en los animales y el ser humano, por su capacidad de fijar, transportar y ceder oxígeno; como ocurre en el grupo hemo de las proteínas hemoglobina y mioglobina. En los citocromos participa durante el proceso de la respiración celular en la génesis de energía aceptando y liberando electrones. Parte del hierro está circulante o almacenado en bazo, médula ósea, sistema monocito-macrófago; también participa como cofactor en diferentes reacciones químicas. En el hombre su falta puede causar anemia, enfermedad cardíaca, cáncer, diabetes, coroiditis, retinitis y conjuntivitis (6).

B. Zinc (Zn): en general se sabe que este metal es importante para los seres vivos, ya que es un componente estructural o cofactor de una gran cantidad de proteínas, donde su deficiencia produce falla metabólica en procesos en los que el Zn juega un papel crítico; finalmente se le atribuye un rol regulador. El zinc es el único metal que se requiere en las seis clases de enzimas (oxidoreductasas, transferasas, hidrolasas, liasas, isomerasas y ligasas) (19).

El zinc en los suelos procede de la erosión de rocas madres con contenido del mineral, una vez liberado forma complejos con ácidos orgánicos, sustancias húmicas y otras sustancias orgánicas disueltas. La concentración total de Zn determinada en el suelo no se usa para evaluar la disponibilidad de este metal para las plantas; porque solo una pequeña cantidad de Zn total es intercambiable o soluble. La disponibilidad de Zn para las plantas depende de varios factores del suelo, como la concentración de Zn en solución, la especiación iónica y la interacción del Zn con otros macro y micronutrientes.

De todos los micronutrientes presentes en el suelo, la deficiencia de zinc es la más extendida a nivel mundial, siendo causa de estrés fisiológico y de bajo rendimiento tanto en cantidad como en calidad de la producción agrícola, que afecta la producción mundial de alimentos. Este metal es uno de los ocho oligoelementos (manganeso, cobre, boro, hierro, zinc, cloro, molibdeno y níquel) esenciales para el normal crecimiento y reproducción de las plantas, su deficiencia puede pasar desapercibida durante varias temporadas a un alto costo para agricultores. Los suelos con bajo contenido de Zn disponible para las plantas pueden ser tratados con fertilizantes ricos en ZnSO_4 , ZnCO_3 , ZnO , $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ y ZnCl_2 ; sin embargo, es probable que el Zn agregado permanezca cerca de la superficie, incluso en suelos con textura arenosa. En general se encuentra disponible hasta 40 cm de profundidad (20).

La deficiencia de Zn en los cultivos se da en las regiones tropicales con suelos muy erosionados, zonas semiáridas con suelos calcáreos de pH alto, suelos de textura arenosa y en suelos ácidos en varias zonas con climas diferentes relacionados con una baja concentración total de Zn en el suelo. Además de estos factores, la disponibilidad de Zn puede verse afectada por la cantidad de materia orgánica, temperatura y humedad del suelo, el secado de la capa superficial, la distribución de la raíz y los efectos de la rizosfera. Las concentraciones >15 g de C orgánico / kg de suelo se relacionan con deficiencia de Zn, debido a la forma de altos niveles de HCO_3 (21).

Un nivel adecuado de materia orgánica aumenta la solubilidad y la tasa de difusión del Zn desde el suelo a las plantas, si el contenido de materia orgánica

es alto el Zn es adsorbido por ligandos y componentes orgánicos. El suelo subyacente tiene menos materia orgánica que la capa superior del suelo, y en muchos casos, el subsuelo también tiene un pH más alto. Una temperatura baja del suelo a menudo agrava la deficiencia de Zn (21).

Con excepción del molibdeno, la disponibilidad de micronutrientes generalmente disminuye a medida que el pH del suelo aumenta. El aumento del pH del suelo estimula la adsorción del Zn por la superficie de varios componentes del suelo, tales como óxidos metálicos y minerales arcillosos; esto resulta en disminución en la solubilidad y disponibilidad de Zn para las plantas. Un pH alto disminuye la desorción de Zn desde los colides, lo que también reduce la disponibilidad de Zn para las plantas. A pH alto el Zn puede precipitar en forma de $Zn(OH)_2$, $ZnCO_3$ y Zn_2SiO_4 . La concentración de Zn en la solución del suelo depende en gran medida del pH; por ejemplo, a pH 5,0, la concentración de Zn en la solución del suelo es de aproximadamente 10 a 4 M, mientras que a pH 8,0 esta concentración es 10M (20).

La interacción de Zn con otros cationes afecta la tasa de absorción por las raíces, la disponibilidad de Zn influye en la tasa de adsorción, distribución y utilización por las plantas. En suelos con baja disponibilidad de Zn para la planta, la difusión juega un papel importante en el transporte de Zn y otros nutrientes, como P, K, Cu, Fe y Mn, a la superficie de la raíz porque el flujo en la masa solo puede transportar una pequeña fracción de los nutrientes requerido por las plantas. También es determinante el crecimiento y área de superficie de la raíz para absorber el Zn disponible.

Los niveles críticos de la deficiencia de Zn en el suelo varían entre 0,6 y 2,0 mg de Zn / kg de suelo. Las tasas de aplicación de fertilizantes de Zn también variarán, dependiendo del cultivo, la forma de Zn a aplicar, las condiciones del suelo y el método de aplicación (21).

El zinc es esencial para el crecimiento y reproducción normal saludable de las plantas. Este elemento es obligatorio en pequeñas cantidades para permitir la función normal de varias vías fisiológicas clave de la planta involucradas en el

crecimiento, regulación, activación enzimática, expresión génica; así como para garantizar la integridad estructural y funcional de las membranas. También es importante en procesos de nutrición, fitomejoramiento, regulación de la actividad de fitohormonas (auxinas), síntesis de proteínas, fotosíntesis, metabolismo de carbohidratos, fertilidad, producción de semillas y defensa contra enfermedades.

El zinc está involucrado en el metabolismo de los carbohidratos a través de sus efectos sobre la fotosíntesis y la transformación del azúcar. La fotosíntesis se reduce en casos de deficiencia de Zn, esto puede resultar en una disminución de la actividad de la anhidrasa carbónica (CA), la actividad fotoquímica de cloroplastos y contenido de clorofila, así como alteraciones en la estructura del cloroplasto. La CA baja puede inhibir la transferencia del electrón en la fotosíntesis en consecuencia, limitar el contenido de clorofila (20).

Activa metaloenzimas que están involucradas en el metabolismo de proteínas y ácidos nucleicos. El Zn es esencial en la estructura de la cromatina, metabolismo de ADN/ARN y expresión génica y evita la degradación del ARN, disminución de la actividad de la ARN polimerasa, la deformación ribosómica y una disminución en el número de ribosomas.

El zinc tiene un papel fisiológico importante en el mantenimiento de la integridad y la función de las membranas celulares ya que controla la generación y desintoxicación de especies reactivas de oxígeno, las cuales son potencialmente dañinas para los lípidos de membrana y los grupos sulfhidrilo; cuando estos compuestos están dañados debido al estrés oxidativo, hay una mayor fuga de varios compuestos orgánicos como carbohidratos y aminoácidos, de células radiculares deficientes en Zn. Esta deficiencia de compuestos de carbono puede hacer susceptibles a enfermedades de la raíz.

Muchos de los roles del zinc ya descritos son también comunes a los seres humanos, este mineral se encuentra presente en cada parte del cuerpo y cumple una amplia variedad de funciones, apropiada para muchos sistemas involucrados en el crecimiento, defensa inmune, función cognitiva y salud ósea en el cuerpo humano, especialmente para una piel sana y un sistema inmune

fuerte y capaz de ofrecer resistencia a diversas infecciones. Ayuda a curar heridas y es un cofactor de vital importancia en varias reacciones enzimáticas ya que el zinc forma parte de proteínas y de más de trescientas diferentes enzimas o es un componente catalítico (20).

Aproximadamente, el 40% de la población mundial sufre de deficiencia de micronutrientes (llamado "hambre oculta"). La Organización Mundial de la Salud estima que la deficiencia de Zn afecta a un tercio de la población mundial (aproximadamente dos mil millones personas), con tasas de prevalencia que van del 4 al 73% en varias regiones. Los lactantes y los niños son los grupos más vulnerables a la carencia de micronutrientes, pues requieren de ingerir vitaminas y minerales para un óptimo crecimiento y adecuado para un desarrollo conveniente. Asimismo, las carencias de vitamina y minerales, especialmente de vitamina A, hierro y zinc, son tributarios significativos de la morbilidad de menores de cinco años (22, 23). La deficiencia de zinc se asocia con retraso en el crecimiento, falta de apetito, dermatitis, alopecia, hipogonadismo e inmunodeficiencia. Los alimentos de origen vegetal son fuentes significativas de Zn para los humanos (20).

C. Cobre (Cu): en las plantas el cobre interviene en diversos sistemas enzimáticos, activa enzimas implicadas en la síntesis de lignina, participa en el proceso de la fotosíntesis, respiración y en el metabolismo de carbohidratos y proteínas. Las principales cuproproteínas son: plastocianina, citocromo c oxidasa, superóxido dismutasa polifenol oxidasas, amino oxidasas, plantacianina y el receptor de etileno. Cuando hay deficiencia de este metal, las hojas sufren cambios como enrollamiento, clorosis con puntos necróticos en los bordes y luego crecen hojas más pequeñas que se marchitan, con acortamiento de los tallos además de otros cambios. El pH alto en el suelo y una sobreconcentración de potasio, fosfatos y otros micronutrientes pueden provocar deficiencia de cobre (24). Sobreconcentraciones de cobre en los suelos pueden deberse a pH bajos; las raíces pueden presentar un desarrollo lateral excesivo y darse mecanismos de competencia con la absorción del hierro, molibdeno y zinc.

En el hombre es constituyente esencial de enzimas como ceruloplasmina, ácido δ -aminolevulínico deshidratasa, citocromo oxidasa, dopamina hidroxilasa, etc. Su absorción a nivel de duodeno, es favorecida por la presencia de una proteína rica en residuos de cisteína, la metalotioneína. Su deficiencia favorece de manera indirecta una forma de anemia, especialmente por la deficiencia de actividad de la ceruloplasmina que tiene actividad ferroxidasa y de la δ -aminolevulínico deshidratasa. La deficiencia de cobre de origen genético conlleva a la enfermedad de Menkes ocasionando deficiencia en el transporte y almacenamiento intracelular de cobre.

Si bien las plantas cultivadas en el suelo con grandes cantidades de Cu no lo acumulan a niveles tóxicos, representa una preocupación ambiental y puede ingresar a la cadena alimentaria desde el suelo. En el hombre su deficiencia puede ser causa de anemia, daño hepático y renal e irritación estomacal e intestinal (6).

D. Manganeso (Mn): es uno de los elementos trazas esenciales para la mayoría de los organismos incluyendo los humanos. El manganeso como metal de transición en el suelo coexiste en varios estados de oxidación (0, II, III, IV, VI y VII) dependiendo del pH del suelo, la humedad el drenaje. Las especies químicas tipo óxido, se comportan como catión o anión participando en diversos procesos biogeoquímicos. El Mn^{++} aumenta en la solución de suelos ácidos e ingresa a las plantas por la raíz en forma de Mn^{++} intercambiándose con otros cationes, pero también puede absorberse en forma de quelato. Avanza lento por la xilema como Mn^{++} , para ser almacenado como óxido de manganeso, en los brotes y aparecer en los granos donde es esencial para la germinación y maduración. A pH más alto en el suelo predominan otros estados de oxidación (Mn^{+++} y Mn^{IV}) que la planta no puede asimilar ni acumular. El umbral permitido y la tolerancia al Mn depende de la especie y el genotipo dentro de la especie (25, 6).

El manganeso forma parte de la estructura de proteínas y enzimas fotosintéticas, participa en la síntesis de clorofila, participa en el sistema de división del agua del fotosistema II que proporciona los electrones requeridos para la fotosíntesis

(fotólisis del agua). También participa en la asimilación de nitratos, nitrógeno, hierro, fósforo, calcio, magnesio y dióxido de carbono (CO₂); como en la biosíntesis de vitaminas (riboflavina, ácido ascórbico, y carotina), aminoácidos aromáticos, proteínas, ácidos grasos, lípidos, lignina, flavonoides, isoprenoides y ATP. Participa en la activación de fitohormonas y en la división celular, en procesos de óxido-reducción y como cofactor de varias enzimas tales como: Mn-superóxido dismutasa, Mn-catalasa, piruvato carboxilasa y fosfoenolpiruvato carboxiquinasa (25).

Además, el Mn es constituyente de metaloenzimas (arginasa, superóxido dismutasa) y activador enzimático, siendo necesario para el desarrollo normal del sistema nervioso y células inmunes, regulación de la glicemia sanguínea y vitaminas. El Mn tiene una vida media ($t_{1/2}$) relativamente corta en sangre y normalmente se encuentra de 4 a 15 µg/L; en alto porcentaje el Mn²⁺ puede estar ligado a la albúmina y β-globulina o encontrarse en forma de iones hidratados, formando complejos con bicarbonato, citrato y otras pequeñas moléculas. Pero la $t_{1/2}$ es bastante larga en tejidos donde se acumula como huesos ($T_{1/2}$ 8 a 9 años), hígado, riñones, páncreas y glándulas suprarrenales y pituitaria (26, 25). El Mn³⁺ se mantiene unido a la transferrina.

La toxicidad por manganeso depende de factores individuales, de problemas de salud inherente y de la etapa de la vida (26); concentraciones tóxicas se asocia a disfunción dopaminérgica causando un cuadro parecido al Parkinson. Otros síntomas por su acumulación son somnolencia, debilidad, alteración del habla, trastornos emocionales, bradicinesia, marcha espástica, calambres recurrentes en las piernas y parálisis (6).

E. Cromo (Cr): es un elemento pesado que no se encuentra en forma libre en la naturaleza, pero sí como constituyente de rocas y suelo, y liberado de emanaciones volcánicas. Las formas del cromo VI (cromatos y dicromatos) son de origen antropogénico procedente de: galvanoplastia, plantas de cemento, industria de tintes, pinturas y pigmentos, curtiembres, conservación de la madera, acabado de metales y cromados, producción de papel, humo de tabaco

y por lixiviación de rellenos sanitarios. También se usa en cintas magnéticas y fotografía; está presente en lodos de perforación y tóner de fotocopiadoras (27). Sin tener un mecanismo de absorción el Cr ingresa a la planta con otros elementos esenciales (azufre como sulfato) [Cr (VI)] con los cuales tiene cercanía química; asimismo, el Ca aumenta su absorción. También es acarreado con el agua dependiendo del pH, su estado de oxidación, concentración, salinidad y ionización, así como también se facilita su ingreso cuando se acompaña con ácidos orgánicos o por la presencia de micorrizas favoreciendo la absorción de Cr (VI) por las plantas. Sin embargo, el Cr es menos movilizado en las raíces que otros elementos presentes. La cantidad máxima de Cr se acumula en las raíces seguidas de hojas y luego frutos a donde llega sobre todo en plantas acumuladoras de Fe. Las raíces, en general, acumulan cien veces más Cr (III) insoluble que en los brotes (27).

A nivel mundial, alrededor de 50 000 t/año de Cr pueden ser emitidas por la combustión de carbón, la quema de leña y la incineración de basura. Los fertilizantes también suelen poseer contenidos significativos de Cr. Este metal es usado en la curtiembre del cuero, en la industria textil y del acero (4).

Este metal actúa en los organismos en diferentes estados de oxidación: cromo metálico, bivalente, trivalente y hexavalente; este último es altamente tóxico y el más persistente en el suelo y el medio ambiente. Los oxianiones de Cr (III) son menos móviles ligados a materia orgánica del suelo y ambientes acuáticos (28).

El cromo es un metal no esencial para las plantas, por lo que no cuenta con mecanismos de captación y pasa a la planta a través de transportadores de sulfato. Este metal traza tiene una compleja química electrónica, lo cual dificulta conocer su mecanismo de toxicidad en plantas. De manera que su toxicidad depende de la especiación, que afecta el crecimiento de la raíz y el follaje disminuyendo la acumulación de biomasa, causando alteraciones estructurales y fisiológicas, inhibiendo enzimas y produciendo efectos mutagénicos (29).

En las plantas interfiere con la fotosíntesis, respiración y absorción de agua y minerales. Altera el metabolismo del almidón reduciendo el metabolismo del

nitrógeno. Interviene como oxidante en la producción de especies reactivas del oxígeno que atacan lípidos de membrana y ADN. La toxicidad por Cr (III y VI) afecta la germinación, el crecimiento y desarrollo de las raíces y de las plántulas y la biomasa, induce a la clorosis y necrosis de las hojas, además de alteraciones fisiológicas y bioquímicas, también puede darse efectos deletéreos sobre la germinación, y los aspectos morfológicos de las plantas; sin embargo, hay gran variabilidad de respuesta (27).

En el hombre la forma trivalente promueve la acción de la insulina, participando en el metabolismo de los carbohidratos (30). Su toxicidad después de una exposición prolongada provoca irritación de la piel y ulceración después de una exposición aguda, mal funcionamiento del riñón y del hígado y daños en el sistema circulatorio y nervioso (6).

1.2.3. Elementos químicos sin función biológica conocida

Los metales sin función biológica conocida cuando se encuentran dentro de los tejidos vivos son potencialmente peligrosos. Se puede asumir que los metales pesados guardan relación de su peso con su toxicidad, produciendo bioacumulación y biomagnificación, ya que se almacenan más rápidamente de lo que se excretan. Los elementos pesados As, Cd, F, Pb, Hg se consideran contaminantes o sustancias indeseables en los alimentos. La fuente de contaminación y el mecanismo como alcanzan las cadenas alimentarias son diversas (6).

Los metales tóxicos están presentes en la corteza terrestre es concentraciones inferiores al 0,1% y casi siempre menor del 0,01%; deben su presencia de manera natural a la meteorización de rocas con contenido de estos metales y a las emisiones volcánicas; a estas fuentes se añaden las actividades antropogénicas de implicancia económica como: minería, textilera, refinería del petróleo (31), producción de biogás y diversos procesos industriales, y las actividades agrícolas. Es la industrialización y la tecnología que han llevado a un incremento de la presencia de estos elementos indeseables en el medio ambiente y la consecuente perturbación no solo de sus ciclos biogeoquímicos,

sino también por su incorporación a la cadena alimenticia y la acumulación progresiva en animales y la humanidad con efectos deletéreos para la salud (4).

Los metales considerados tóxicos para los seres vivos, siendo no esenciales como el Cd, Pb y Hg, actúan como venenos metabólicos afectando el crecimiento y biosíntesis; también alteran la función de diferentes moléculas, sean pequeñas o macromoléculas, e incrementan la resistencia al estrés, pues aún en concentraciones muy bajas son tóxicos para la biota de los diferentes ecosistemas. Los metales pesados como Fe, Cu, Zn y Mo, si bien son requeridos como micronutrientes tanto para plantas como animales incluyendo al hombre, en altas concentraciones causan efectos adversos (4).

El grado de acumulación de metales no esenciales en la biota depende de la tasa de acumulación y la tasa de eliminación del cuerpo. Por lo tanto, diferentes metales pesados tienen diferentes vidas medias en diferentes especies. Los MP procedentes del agua, sedimentos y tierra pueden ingresar al cuerpo del organismo desde su alimento o presa. Luego, la concentración de un metal pesado puede aumentar o disminuir a lo largo de los niveles tróficos sucesivos en una cadena alimentaria.

La ecología de la nutrición es un enfoque multidisciplinario que se centra en los organismos vivos pero que involucra al medio ambiente. La base de la nutrición es la cooperación entre los organismos (función, mecanismo, desarrollo) y el medio ambiente es donde se reúne biótico y abiótico. Teniendo en cuenta la gran variedad de metales pesados en el medio ambiente, es imposible evitar la presencia de metales pesados en la cadena alimentaria (6).

Ciertas plantas tienen la capacidad de prosperar en hábitats ricos en metales por lo que se les denomina metalophytes. Estas curiosas plantas han desarrollado mecanismos especiales para hacer frente a mayores concentraciones de metales pesados. A su vez se les divide en tres categorías: excluyentes, indicadores e hiperacumuladores.

En la especie humana los elementos sin función biológica conocida y considerados altamente tóxicos son el Cd, Hg, Pb, Ba, Sb y Bi. Estos elementos pueden perturbar e irrumpir los procesos metabólicos, alterando la fisiología de los diferentes órganos y sistemas. Los tres primeros son de interés para el presente estudio, a los cuales se integra el arsénico, todos con toxicidad intrínseca y persistencia en el medio ambiente. Así como también cuentan los niveles de exposición a estos metales tóxicos o a la ingestión de dosis tóxicas, es importante tener en cuenta que la ingesta dietética puede estar influenciada por varios factores: manejo, tipo y calidad de las materias primas, aditivos, ingesta de suelo y a la contaminación accidental de los alimentos (6).

La retención de metales pesados en el cuerpo de un organismo depende de muchos factores, tales como la especiación del metal y los mecanismos fisiológicos desarrollados por el organismo para la regulación, la homeostasis y la desintoxicación del metal pesado.

La fuente de exposición a metales tóxicos difiere según los elementos, por lo tanto, el control de los alimentos de origen vegetal y los alimentos para crianza de animales podría ser una estrategia efectiva para reducir los riesgos para la salud humana. La transferencia de metales a los alimentos de origen animal (leche, huevos, carne) administrados por vía oral, está relacionada con la tasa de absorción, bioacumulación, metabolismo y excreción. La toxicidad para el hombre desde la óptica de los metales varía con la especie química y el estado de oxidación del metal. Y desde la óptica de la condición de la especie humana, cuenta la vía y tiempo de exposición (especialmente para algunos elementos bioacumulativos como el cadmio), la dosis y frecuencia de consumo, el sexo, edad, idiosincrasia, estatus nutricional y fisiológico del individuo. A esto se añade la influencia de otros factores como la interacción con otros compuestos, por ejemplo, el Cd interfiere en gran medida con los elementos esenciales como Cu y Zn (6).

A. Arsénico (As): este metaloide se encuentra en especies químicas de importancia mineral y llega al hombre a través de aguas contaminadas con desechos antropogénicos. La forma trivalente es más tóxica y se acumula en el

organismo por su facilidad para combinarse con radicales metilos o etilos. A nivel mitocondrial desacopla la fosforilación oxidativa al formar enlaces covalentes con el azufre de los grupos mercapto. La arsina (AsH_3) es la forma más tóxica de este elemento (32). Su presencia excesiva daña la piel, da mayor riesgo de padecer cáncer y causa problemas en el sistema circulatorio (6).

B. Cadmio (Cd): es un subproducto de procesos minerales del zinc y el cobre, en forma natural se le encuentra como óxidos complejos y compuestos de sulfuro. Las fuentes naturales de Cd en el medio ambiente son la actividad volcánica y la meteorización de las rocas, añadiéndose las fuentes antropogénicas como: la extracción de metales no ferrosos en especial el procesamiento de los minerales Pb y Zn, su uso en procesos de galvanoplastia, aplicación de fertilizantes químicos de fosfato, y también concentraciones considerables en el tabaco (4) (33).

El Cd está presente en niveles bajos en la mayoría de los alimentos como cereales integrales, frutas, hortalizas de raíz, carne y pescado. Los niveles más altos del Cd se encuentran en alimentos de origen animal como las vísceras (riñón e hígado), huesos de mamíferos, mejillones, ostras y vieiras.

En los seres humanos el Cd presenta un tiempo de vida media largo en huesos y riñones; por su comportamiento divalente tiene la característica cinética de intercambiarse con el calcio lo que facilita su acumulación (4) (13). Produce inactivación enzimática, daño renal, hepático y al sistema nervioso, irritación de la piel, ulceración, cáncer de pulmón y en casos extremos la muerte (6) (34).

C. Plomo (Pb): se libera al medio ambiente a partir de fuentes ínfimas que incluyen baterías ácidas, viejos sistemas de plomería y balas de plomo utilizadas para la caza de aves (4). Su comportamiento divalente también lo hace acumulable en riñón, tejido óseo (su depósito principal donde provocan debilidad de las articulaciones) y en el cerebro. Se presentan manifestaciones de náuseas, insomnio, anorexia, pérdida de memoria; produce lesiones en el sistema nervioso y retraso mental, incluso en el feto, ya que logra pasar la barrera hematoencefálica. En los niños intoxicados con plomo presenta retraso del

desarrollo, menor coeficiente intelectual, acortamiento de la atención, hiperactividad y el ya mencionado deterioro mental. También produce daño a las células rojas, se une a los grupos sulfhidrilo y a enzimas que requieren de zinc como la D-aminolevulínico deshidratasa, coproporfirinógeno oxidasa y ferroquelatasa (6, 35).

D. Mercurio (Hg): en la naturaleza se encuentra como sulfuro mercúrico, especie química muy estable en el medio ambiente. Es un metal muy utilizado para la extracción de oro, también se emplea en la fabricación de termómetros y en lámparas de detección. Se le encuentra como Hg elemental, como catión inorgánico mono y divalente, y en compuestos orgánicos formando enlaces covalentes que lo hacen difícil de eliminar. Las formas metiladas de metales pesados como el Hg se acumulan en la biota en mayor medida y, por lo tanto, se biomagnifican en las cadenas alimentarias, debido a su carácter lipofílico (36).

1.2.4. Los metales pesados y las afecciones causadas en los humanos

Los metales y metaloides presentes en el medio ambiente revisten gravedad para la biota, cuando las concentraciones están por encima del umbral permitido tanto de elementos esenciales (I, Fe, Co, Cr, Ni, Mn, Mo, Ni, Se, Cu y Zn) como no esenciales (Cd, Pb, Hg y As) (4), todos por su condición de ser metales pesados presentan especies químicas tóxicas. La tasa de movilización y transporte de metales pesados en el medio ambiente se ha incrementado desde la década de los años 40 del siglo pasado con el desarrollo industrial.

Los tóxicos metálicos presentan cuatro características: son persistentes en el medio ambiente, bioacumulables en especies biológicas (plantas), se biomagnifican en las cadenas alimentarias y su toxicidad afecta la supervivencia, el crecimiento, la morfología y la reproducción según sea el organismo afectado (4). Las afecciones en los seres vivos pueden ser diversas según la sensibilidad de la especie biológica, la especie química y la relación de eventos que entre ellas se produce. Los mecanismos por los cuales los metales a concentraciones por encima del nivel permitido afectan a diferentes órganos, tejidos y sistemas

en diferentes organismos son muy complejos, y algunos de ellos no son conocidos hasta el momento.

Los elementos antes nombrados, suelen determinarse en salud ocupacional cuando en ambientes laborales la exposición puede llegar a niveles por encima de los límites máximos permisibles. Una vez introducidos los metales pesados Cd, Pb, Hg y el metaloide As en el organismo, consumen los principales antioxidantes celulares y se unen a enzimas que tienen el grupo tiol (-SH). Estos metales pueden aumentar la generación de especies reactivas de oxígeno - ROS como el radical hidroxilo (HO^\cdot), el radical superóxido (O_2^\cdot), y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), que consumirían las defensas y células antioxidantes, y conducirían a una condición llamada "estrés oxidativo". Hay estudios que corroboran que concentraciones relativamente altas de metales pesados tóxicos (Cr, Cd y Pb) se relacionan con concentraciones relativamente bajas de antioxidante (37).

Algunos metales son particularmente tóxicos para los sistemas sensibles y de rápido desarrollo como los fetos, bebés y niños pequeños. El Pb y Hg en particular, se cruzan fácilmente por la placenta y dañan el cerebro fetal. También es muy importante considerar que los niños reciben más dosis de metales de los alimentos que los adultos, ya que consumen más alimentos en relación con su peso corporal (6). La exposición infantil a algunos metales puede resultar en dificultades de aprendizaje, deterioro de la memoria, daño al sistema nervioso y problemas de comportamiento como agresividad e hiperactividad.

Se sabe que algunos metales pesados se asocian a determinado tipo de cáncer, así lo reconoce la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer, que considera a ciertos metales pesados como cancerígenos, mutagénicos y orteratogénicos (4). También hay estudios que sostienen que existe un incremento de casos de personas con diabetes en relación con los niveles de metales pesados por encima del umbral (4). Los metales pesados pueden causar daño cerebral irreversible; asimismo, son nefrotóxicos (Cd, Pb y Hg), porque afectan preferentemente la corteza renal entre otras afecciones ya mencionadas (38).

1.2.5. Contaminantes metálicos en el medio ambiente

Los metales y metaloides tóxicos de relevancia ambiental son Mn, Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Hg y As, los que a su vez son comunes de encontrarse en el medio ambiente a excepción de los dos últimos que ingresan al medio ambiente por la mano del hombre. Luego estos metales por filtración pueden alcanzar las aguas subterráneas.

En el medio ambiente las fuentes de metales pueden ser: a) naturales (biogénicas o geogénicas), aquí son importantes las de origen geológico entre ellas la extracción de rocas con contenido metálico, la meteorización de rocas con contenido de metales y las emanaciones volcánicas, que pueden ser afectadas por factores fisicoquímicos y climáticos, y que determina que en la fracción líquida del suelo, se encuentren disueltos diferentes contaminantes químicos (orgánicos e inorgánicos) y ambientales (4); b) litogénicas o geoquímicas, como el material de lo que está hecho el suelo que por causa de la erosión y las lluvias se disuelve; c) antropogénicas (39), que han cobrado relevancia a partir del crecimiento de las grandes urbes que emiten grandes descargas de aguas residuales, residuos domésticos y efluentes industriales, y en los últimos años por el incremento de los desechos tecnológicos informáticos y de comunicación (4).

Otra fuente contributiva es la industria, la explotación de recursos petroleros (31) y minerales, que vierten al medio ambiente descargas de residuos a través de la deposición seca y húmeda como efluentes industriales. Los ecosistemas acuáticos pueden recibir efluentes de las operaciones mineras, efluentes industriales y aguas servidas domiciliarias sin tratar. Generándose la deposición de metales en los fondos acuáticos, que sirven como sumidero y fuente de metales tóxicos, que son liberados en la columna de agua y también pueden conducir a la contaminación del agua subterránea (4).

En tercer lugar, la labor humana contribuye a la contaminación del suelo con el uso de fertilizantes químicos en la actividad agrícola. Los fertilizantes,

procedentes de rocas fosfatadas por acidulación con ácido sulfúrico o ácido fosfórico liberan metales pesados tóxicos que se acarrean a los suelos agrícolas junto con los fertilizantes, una parte es absorbida por las plantas y otra parte pasa por filtración al agua subterránea, y finalmente, pueden llegar al hombre. Por otro lado, cuando se quema carbón puede volatilizarse el Hg existente y parte de Cd, Pb y As, el resto queda en las cenizas (4). Y finalmente, a la combustión de combustibles fósiles, también se le atribuye la entrada de elementos en el medio ambiente.

La acumulación de metales pesados en el suelo puede conducir al deterioro de las tierras agrícolas, la eutrofización de los lagos y la absorción de sustancias tóxicas. Esto podría tener consecuencias múltiples que incluyen la fitotoxicidad a altas concentraciones, el mantenimiento de los procesos microbianos del suelo y el aumento en la dieta humana de los elementos químicos de origen zoológico. En la última década, la Unión Europea (UE) ha promovido la reducción de la contaminación por nutrientes y metales pesados del agua y el suelo (6) (40).

En los suelos y en especial en los sedimentos, factores fisicoquímicos tales como: temperatura, condiciones hidrodinámicas, estado redox, salinidad y tamaño de las partículas, facultan que se den procesos de adsorción y desorción que conducen a las concentraciones finales de metales pesados en los sedimentos. Asimismo, el pH bajo del suelo aumenta la competencia entre los metales y los sitios de unión de H^+ en los sedimentos y puede dar lugar a la disolución de complejos metálicos, produciéndose así iones metálicos libres en la columna de agua sobre los cuales actúan los microbios, incrementando las concentraciones de metales pesados tóxicos en los sedimentos fluviales que representan un riesgo ecológico para los bentos que bien pueden ser consumidos por el hombre (4).

1.2.6. Química del suelo

El suelo es la matriz que soporta y sustenta a la mayor parte de la floresta, constituido por una mezcla de minerales y residuos orgánicos expuesto a

cambios climáticos y a procesos biológicos. Se define su composición por estratos horizontales A, B y C (41).

El horizonte A corresponde a la superficie donde discurre la mayor actividad de los seres vivos: correspondiente a las plantas y animales y del mismo hombre y su actividad industrial; este horizonte se caracteriza por la ocurrencia de procesos de lixiviación que pasa al horizonte B donde se ubican las raíces de las especies vegetales (41).

En el suelo se integran vegetales y animales, así como materia orgánica en diferentes estados de descomposición, microorganismos y los productos de su metabolismo. La fracción más duradera es el humus, constituido de productos de síntesis provenientes de la descomposición de restos vegetales principalmente y algo de animales (41).

El proceso biológico de descomposición involucra cuerpos muertos, insectos, anélidos, hongos, bacterias y otros microorganismos, al cual se integran procesos físicos y químicos. Todo esto forma parte de la dinámica del suelo que conlleva a la acumulación de nutrientes inorgánicos como: nitratos, fosfatos, amonio, potasio, calcio, magnesio, y otras sales inorgánicas, que es necesario puedan solubilizarse para que sean asimilables por los vegetales y así sustentar su crecimiento y desarrollo.

Pero es necesario que los elementos nutricios no sean barridos por las escorrentías o lixiviados, para este propósito los coloides y las partículas orgánicas (micelas) del suelo, cargadas negativamente, juegan un papel muy importante, intercambiando los cationes absorbidos por los cationes de la solución del suelo, en esta dinámica el 99% de cationes están retenidos por los materiales inertes del suelo y 1% está disponible para ser absorbido por las raíces de los vegetales. Este proceso de asimilación de cationes disueltos, gobierna la dinámica de liberación de cationes a la matriz soluble, proceso que se ve enriquecido por la meteorización de los suelos.

Los procesos físicos, químicos y biológicos en el suelo ocurren con la concurrencia del agua, la cual a diferentes pH es capaz de disolver cualquier elemento presente en el suelo; el percolado cargado de elementos extraídos del suelo en diferentes proporciones, se precipita al ser lixiviado para residir en el horizonte B, donde compuestos orgánicos y minerales ayudan a retener los nutrientes. Los aniones se adentran en la materia orgánica quedando retenidos hasta que esta quede descompuesta, por el contrario, los cationes son liberados de la materia orgánica muerta para ser retenidos en la materia mineral hasta que este es meteorizado y entra a la dinámica de intercambio de cationes conocida como capacidad de intercambio catiónico en el suelo (CIC) y se expresa en miliequivalentes por cada 100 gramos (41).

Los factores que afectan la presencia y distribución de metales pesados en los suelos incluyen la composición de la roca madre, el grado de meteorización y las propiedades físicas, químicas y biológicas del medio, así como las condiciones climáticas. Los suelos agrícolas enriquecidos con fertilizantes y fungicidas de Cu presentan mayor concentración de MP en comparación con los suelos vírgenes y suelos con pobre aporte de abonos y fungicidas. Sin embargo, la concentración de metal por encima del nivel umbral afecta el equilibrio microbiológico de los suelos y puede reducir su fertilidad (4).

A. Procesos de absorción en los suelos

La **absorción química** o de precipitación puede hacer que especies químicas inorgánicas disueltas en el suelo y disponibles para ser asimiladas por los vegetales, pasen a ser sales insolubles incapaces de ser absorbidas por las plantas. Por ejemplo, los fosfatos en suelos muy ácidos pueden formar sales poco solubles con el calcio, magnesio, hierro, aluminio y otros cationes. La absorción química está ligada al pH de los suelos y la solubilidad de los compuestos producto de la reacción con los aniones del suelo (nitratos y cloruros), de manera que si son muy solubles no se retienen. A diferencia de los fosfatos que pasan a la fase sólida y tienen poca movilidad en la fase soluble del suelo (41).

La **absorción física** depende de las partículas sedimentarias de dimensiones coloidales producto de la erosión de los suelos.

La **absorción fisicoquímica** o también denominada absorción de intercambio ayuda a entender el comportamiento de los abonos disueltos con la fase sólida del suelo; donde se dan procesos recíprocos que determinan la transformación de los abonos y fertilizantes, así como los métodos a ser usados para su aplicación. Los procesos químicos que se dan permiten retener sustancias absorbidas con más fuerza y, por otro lado, porque las sustancias disueltas en la fase líquida dan reacciones.

El intercambio catiónico es crucial para la actividad del suelo. El intercambio de cationes influye en la estructura del suelo, en la actividad biológica, en el régimen hídrico y gaseoso, y en los procesos de génesis y formación del suelo. La dinámica entre la fase sólida y líquida del suelo determina el intercambio catiónico y aniónico y está sujeta a la composición y presencia de partículas de arcilla y materia orgánica, así como a la composición mineral del suelo. Los cationes presentes en la solución del suelo y los cationes liberados por la raíz de las plantas, se intercambian con los cationes adsorbidos a las partículas coloidales minerales y orgánicas del suelo. Asimismo, ocurre intercambio entre los catiónicos absorbidos a la superficie de las diferentes partículas de arcilla, entre los cationes absorbidos a las diferentes partículas húmicas y entre cationes ligados a la materia mineral con la materia húmica.

Por regla general, a mayor contenido de arcilla en el suelo, mayor capacidad de intercambio catiónico y las proporciones de los diferentes cationes unidos al complejo de intercambio depende de las condiciones de formación del suelo. Estas proporciones pueden alterarse cuando los suelos reciben cal, abonos o fertilizantes.

B. Transferencia de metales del suelo a la planta

La transferencia de metales del suelo a la planta es un paso crucial en la transferencia trófica de dichos metales a las cadenas alimentarias. Las plantas

que crecen en suelos contaminados con metales pesados y que luego son consumidas por animales herbívoros y estos por animales carnívoros que son alimento para los seres humanos, aseguran la transferencia trófica de los MP en la cadena alimentaria. En el caso de los cultivos de cereales y hortalizas es un problema muy grave con un alto riesgo de toxicidad por metales pesados para la especie humana. En caso de vegetales cultivados con aguas residuales los niveles de concentración son más altos en comparación con aquellos cultivados con agua subterránea. El consumo de hoja conlleva más riesgo en comparación con el consumo de bulbos y tubérculos (40).

Los metales presentes en el suelo reaccionan con los sistemas de enzimas, se unen al radical sulfhidrilo (-SH) y posteriormente se da la inhibición de esas enzimas, algunas de ellas involucradas en la producción de energía celular. Puede darse la reacción de un metal con dos moléculas de glutatión (GSH) adyacentes, un antioxidante importante en el cuerpo, enlazándose entre los azufres de los dos aminoácidos de cisteína. El compromiso de las dos moléculas de glutatión en la formación de un fuerte enlace con el metal las desactiva para una reacción posterior (4).

1.2.7. Legislación en materia ambiental

Las investigaciones sobre inventarios completos de suelos son aún insuficientes no solo en la Unión Europea (UE) sino a nivel mundial, que permitan cuantificar la contaminación del suelo. La UE tiene entre sus objetivos más relevantes la propuesta de la Directiva Marco del Suelo (6). Este documento indica de la conveniencia de tener mapas como un registro gráfico de las áreas y sus diferentes grados de contaminación y las intervenciones que se han hecho para recuperarlos. Según la directiva Dir. 2004/35 / CE, se habla de un total de tres millones de lugares potencialmente contaminados en la UE, de los cuales 250 mil estaban realmente contaminados (6).

En China la presión de contaminación de tierras agrícolas es casi diez veces mayor para Zn (187 742 g/ha por año) y más de catorce veces mayor para Cu

(71 824 g/ha por año); mientras que en Alemania para Zn (21 237 g/ha por año) y Francia para Cu (4869 g/ha por año) es menor, por lo que el Zn y Cu son los metales de preocupación en tierras agrícolas de países de la UE. Esta diferencia de contaminación de tierras agrícolas entre China y Europa indica que la legislación sobre el cuidado del medio ambiente tiene diferente flexibilidad (6).

En cuanto a las tierras agrícolas la UE ha informado que la deposición atmosférica es la principal fuente de la mayoría de los metales, con un rango del 25% al 85% del total de insumos. Y en China, la deposición atmosférica puede ser responsable del 43% al 85% del total de insumos de As, Cr, Hg, Ni y Pb. Otra fuente tributaria en tierras agrícolas es el estiércol de ganado predominantes de oligoelementos (6).

Los MP más representativos en el medio ambiente son el Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd y Pb; pero la carga de metalo-contaminante varía según el área geográfica y la descarga derivada de la actividad antropogénica. En China, en 2009, era relevante el control de las concentraciones de Cr, Cd, Pb, Hg y el metaloide As (4).

Las políticas de protección ambiental de la UE y otras legislaciones apuntan a la reducción de los aportes de metales pesados al medio ambiente, lo que se promueve para el crecimiento económico continuo. Por lo que, se propugna la reducción de los impactos ambientales, y la regulación de las concentraciones máximas autorizadas admisibles de sustancias esenciales (Fe, I, Co, Cu, Mn, Zn, Mo, Se) e indeseables (As, Cd, F, Pb, Hg) (6).

Metales como As, Cd, F, Pb y Hg, no tienen funciones biológicas establecidas y se consideran contaminantes / sustancias indeseables aun en concentraciones muy bajas (6). La Unión Europea adoptó varias medidas para controlar su presencia en el medio ambiente, como resultado de actividades humanas tales como: contaminación agrícola, industrial o de procesamiento y almacenamiento de alimentos.

El control de su presencia en procesos y productos de consumo alimenticio en el mercado, podría ser una estrategia eficaz para reducir los riesgos para la salud humana relacionados con el consumo de productos de origen animal y la contaminación ambiental por el estiércol que pueden influir en la propagación de metales pesados. Hay diferencias en los límites legales y para establecer estrategias efectivas contra los metales pesados; las complejas interrelaciones de las cadenas en los procesos rurales, la amplia variabilidad de las prácticas agrícolas, el suelo y las condiciones climáticas deben ser reducidas. Se han desarrollado enfoques innovadores y sostenibles para que la ecología de la nutrición de metales pesados controle la contaminación ambiental de las actividades relacionadas con la vida (6).

En alimentos de uso animal se han establecido diferentes niveles máximos de enriquecimiento con elementos traza (Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se y Zn) esenciales para el desarrollo animal. El fin de estos reglamentos (Reg. CE 1831/2003; Dir. 2002/32 / EC) es proteger la seguridad de los alimentos para conservar la salud humana y reducir la contaminación ambiental. Se han promulgado varias leyes para controlar toda la contaminación por metales pesados, reducir el riesgo de exposición humana en la cadena trófica y, asimismo, establecer métodos analíticos e indicadores de contaminación a lo largo de toda la cadena alimentaria (6). Con respecto a la cría de ganado, se necesita una estrategia global de ecología nutricional, para garantizar la producción sostenible de animales, el estado de salud de los humanos y la preservación del medio ambiente.

1.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Oligoelementos (Fe, Mn, I, F, Co, Si, Cr, Zn, Li, Mo): son elementos químicos presentes en porcentajes inferiores al 0,1%, no son los mismos en todos los seres vivos. Son indispensables para el desarrollo armónico del organismo interviniendo en funciones fisiológicas y procesos bioquímicos, en caso de desequilibrio conducen a enfermedades. Se han aislado unos sesenta oligoelementos en los seres vivos, pero solamente catorce de ellos pueden considerarse comunes para casi todos. La ingestión deficiente de oligoelementos

no siempre es la causa principal de enfermedades en el ser humano; sin embargo, desde el punto de vista bioquímico, afectan el normal funcionamiento del organismo.

Metales pesados: son elementos que superan el peso del hierro, son metales naturales que tienen un número atómico mayor de 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos) y una densidad alta igual o superior a 5 g/cm^3 (es decir, una gravedad específica mayor que 5) cuando están en estado elemental y caracterizados por ser tóxicos y persistentes en los ecosistemas, así como tóxicos bioacumulables en los seres vivos. Los metales pesados se clasifican en esenciales y no esenciales.

CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES

2.1. HIPÓTESIS

H0: La concentración de metales en *Clusia rosea* (renaquilla) y el suelo que la sustenta, en las zonas de Puerto Almendra y Nina Rumi, Loreto, se comporta de manera independiente.

Hi: La concentración de metales en *Clusia rosea* (renaquilla) está en relación con su contenido en el suelo donde se cultiva, en las zonas de Puerto Almendra y Nina Rumi, Loreto.

2.2. DEFINICIONES OPERACIONALES DE LAS VARIABLES

Variable independiente

Metales en el suelo donde se cultiva *Clusia rosea* (renaquilla).

Variable dependiente

Metales en los diferentes órganos de la especie vegetal *Clusia rosea* (renaquilla), considerados para la presente investigación.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño

La presente investigación fue de tipo correlacional, se relacionaron las concentraciones de los metales en el suelo donde crece la *C. rosea* (renaquilla) con su contenido en los diferentes órganos de la especie. El diseño fue experimental, porque se evaluaron los analitos en diferentes suelos y cultivo de *C. rosea* (renaquilla) por triplicado.

3.2. Diseño muestral

La población estuvo compuesta por los individuos de la especie vegetal *C. rosea* (renaquilla) que crecen en el área de influencia de estudio, y la muestra estuvo representada por aproximadamente dos kilos de tierra, de raíz, tallo y hojas de *C. rosea* (renaquilla).

El muestreo fue por conveniencia. El ingreso al bosque se hizo con un matero y las excicatas fueron posteriormente identificadas en el gabinete del Herbarium Amazonense de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (anexo 1). Se muestrearon a tres individuos. La georreferenciación se hizo con la ayuda de un equipo de posicionamiento satelital (GPS), en unidades UTM UPS18 M. La muestra uno fue desestimada al no poderse recolectar las muestras de los diferentes órganos analizados del vegetal; los resultados se procesaron con la muestra dos con las coordenadas (X:0679980, Y: 9575341) y la muestra tres con las coordenadas (X:0680026, Y: 9575437).

3.3. Procedimientos de recolección de datos

- a. Se procesó 0,5 g de muestra tanto de suelo como de muestras vegetales pulverizadas (raíz y hojas) por triplicado, se eliminó la humedad residual en estufa de 110 °C durante 3 horas, luego se procedió a mineralizar las muestras en mufla a 550 °C x 24 horas, para finalmente realizar la

digestión ácida en caliente de las cenizas con 10 mL de HCl 6N y 2 lavados con 10 mL de HCl 3N.

- b. Los analitos fueron cuantificados sin tener en cuenta el estado de oxidación del catión sino en forma total.
- c. La concentración del analito fue determinada por absorción atómica por flama (SpectrAAVarian AA 240), con gas de arrastre aire/acetileno temperatura de ionización 3000 °C y lámparas de cátodo hueco como señal. Para el caso del mercurio y arsénico se usó el método de absorción atómica con vapor frío con generación de hidruros (AAAnalyst 300 de Perkin Elmer).

3.4. Procesamiento y análisis de datos

La información fue procesada según la estadística descriptiva con ayuda del programa Excel y los datos se presentaron según la estadística descriptiva; las pruebas de correlación se realizaron con el *software* de SPSS versión 24 previa normalización y homogenización de los datos y se midió la correlación lineal de las dos muestras de *C. rosea* (renaquilla) y sus respectivos suelos.

3.5. Aspectos éticos

Para ingresar al bosque se siguieron los senderos de los materos. Se ingresó con la compañía de uno de ellos y del botánico taxónomo para identificar los individuos de la especie a muestrear y de esta manera no alterar las rutas en el bosque.

Las muestras corresponden a especie vegetal de interés y fueron recolectadas en cantidad que no impida la viabilidad de las plantas, ni el equilibrio del ecosistema. De manera que, no se atenta con la especie en estudio ni el área del bosque intervenido.

Los residuos químicos usados en los análisis son mínimos; sin embargo, fueron eliminados de acuerdo con el protocolo de eliminación de residuos químicos para así preservar de contaminación al medio ambiente.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

Tabla 1. Concentración de Fe en órganos de la especie amazónica *C. rosea* (renacuilla).

Árbol	2	3	
Raíz	151,9	118,8	
	167,2	110,1	
	161,4	107,4	
\bar{x}	160,17	112,10	136,135
DS	7,72	5,96	33,99
CV	0,05	0,05	0,250
Hojas	47,1	73,9	
	49,3	70,1	
	54,2	66,8	
\bar{x}	50,20	70,27	60,235
DS	3,63	3,55	14,19
CV	0,07	0,05	0,236
Corteza	89,4	60,0	
	80,8	65,3	
	89,1	68,4	
\bar{x}	86,43	64,57	75,5
DS	4,88	4,25	15,46
CV	0,06	0,07	0,205
Suelo de	622,0	577,0	
0 a 20 cm	614,6	546,8	
	610,2	567,3	
\bar{x}	615,6	563,7	589,65
DS	5,96	15,42	36,70
CV	0,01	0,03	0,062

En la tabla 1 se aprecia en el caso del hierro que, el coeficiente de variación de las repeticiones de cada muestra presentó una variabilidad muy baja ($<0,1$); pero los promedios de las muestras por cada órgano, presentaron una variabilidad muy alta, lo que indica que, la media de los diferentes órganos de los árboles muestreados tiene una dispersión moderada.

Tabla 2. Concentración de Cu en órganos de la especie amazónica *C. rosea* (renaquilla).

Árbol	2	3	
Raíz	7,79	8,84	
	7,6	8,6	
	7,5	8,6	
\bar{x}	7,63	8,68	8,155
DS	0,15	0,14	0,74
CV	0,019	0,016	0,091
Hojas	4,64	8,4	
	4,7	8,5	
	4,7	8,4	
\bar{x}	4,68	8,43	6,555
DS	0,03	0,06	2,65
CV	0,007	0,007	0,405
Corteza	12,26	5,47	
	13,7	5,5	
	13,5	5,4	
\bar{x}	13,15	5,46	9,305
DS	6,55	0,05	5,44
CV	0,667	0,009	0,584
Suelo de	1,93	2,93	
0 a 20 cm	1,8	2,7	
	1,9	2,7	
\bar{x}	1,88	2,78	2,33
DS	0,07	0,13	0,64
CV	0,036	0,048	0,273

En la tabla 2 se observa en el caso del cobre que, el coeficiente de variación de las repeticiones de cada muestra presentó una variabilidad muy baja (<0,1); pero los promedios de las muestras por cada órgano, presentaron una variabilidad muy baja para las raíces y alta para las hojas y corteza, esto indica que, la media de los diferentes órganos de los árboles tiene una dispersión variada.

Tabla 3. Concentración de Mn en órganos de la especie amazónica *C. rosea* (renaquilla).

Árbol	2	3	
Raíz	16,1	8,3	
	16,0	7,9	
	15,6	8,0	
\bar{x}	15,90	8,07	11,985
DS	0,26	0,21	5,54
CV	0,02	0,03	0,462
Hojas	18,6	22,3	
	18,2	20,6	
	18,2	21,0	
\bar{x}	18,33	21,30	19,815
DS	0,23	0,89	2,10
CV	0,01	0,04	0,106
Corteza	12,1	6,5	
	11,8	6,2	
	11,2	6,1	
\bar{x}	11,70	6,27	8,985
DS	0,46	0,21	3,84
CV	0,04	0,03	0,427
Suelo de	1,3	1,8	
0 a 20 cm	1,1	1,9	
	1,2	2,0	
\bar{x}	1,20	1,90	1,55
DS	0,10	0,10	0,49
CV	0,08	0,05	0,319

En la tabla 3 se nota en el caso del manganeso que, el coeficiente de variación de las repeticiones de cada muestra presentó una variabilidad muy baja (<0,1); pero los promedios de las muestras por cada órgano, presentaron una variabilidad muy alta, lo que indica que, la media de los diferentes órganos de los árboles muestreados, según el suelo de donde proceden tienen una dispersión variada.

Tabla 4. Concentración de Cr en órganos de la especie amazónica *C. rosea* (renaquilla).

Árbol	2	3	
Raíz	0,9	1,8	
	0,9	1,7	
	0,8	1,7	
\bar{x}	0,87	1,73	1,3
DS	0,06	0,06	0,61
CV	0,07	0,03	0,468
Hojas	9,1	11,3	
	9,3	11,2	
	9,3	11,2	
\bar{x}	9,23	11,23	10,23
DS	0,12	0,06	1,41
CV	0,01	0,01	0,138
Corteza	12,1	3,1	
	11,8	3,3	
	12	3,3	
\bar{x}	11,97	3,23	7,6
DS	0,15	0,12	6,18
CV	0,01	0,04	0,813
Suelo de	8,7	3,2	
0 a 20 cm	8,6	3,0	
	8,5	3,2	
\bar{x}	8,6	3,13	5,865
DS	0,1	0,12	3,87
CV	0,01	0,04	0,659

En la tabla 4 se advierte en el caso del cromo que, el coeficiente de variación de las repeticiones de cada muestra presentó una variabilidad muy baja (<0,1); pero los promedios de las muestras por cada órgano, presentaron una variabilidad para las hojas, raíz y corteza de baja, alta a muy alta, lo que indica que, la media de los diferentes órganos de los árboles muestreados tiene una amplitud variada.

Tabla 5. Concentración de Zn en órganos de la especie amazónica *C. rosea* (renaquilla).

Árbol	2	3	
Raíz	15,6	17,7	
	15,2	17,8	
	15,5	17,5	
\bar{x}	15,43	17,67	16,55
DS	0,21	0,15	1,58
CV	0,01	0,01	0,096
Hojas	9,3	16,8	
	9,0	16,4	
	9,0	16,0	
\bar{x}	9,10	16,40	12,75
DS	0,17	0,40	5,16
CV	0,02	0,02	0,405
Corteza	18,1	10,9	
	18,7	11,3	
	16,6	11,3	
\bar{x}	17,80	11,17	14,485
DS	1,08	0,23	4,69
CV	0,06	0,02	0,324
Suelo de	3,9	5,9	
0 a 20 cm	3,4	5,6	
	3,6	5,9	
\bar{x}	3,63	5,80	4,715
DS	0,25	0,17	1,53
CV	0,07	0,03	0,325

En la tabla 5 se ve en el caso del zinc que, el coeficiente de variación de las repeticiones de cada muestra presentó una variabilidad muy baja ($<0,1$); pero los promedios de las muestras por cada órgano, presentaron una variabilidad para las hojas, raíz y corteza de baja, alta a muy alta, lo que indica que, la media de los diferentes órganos de los árboles muestreados tiene una amplitud variada.

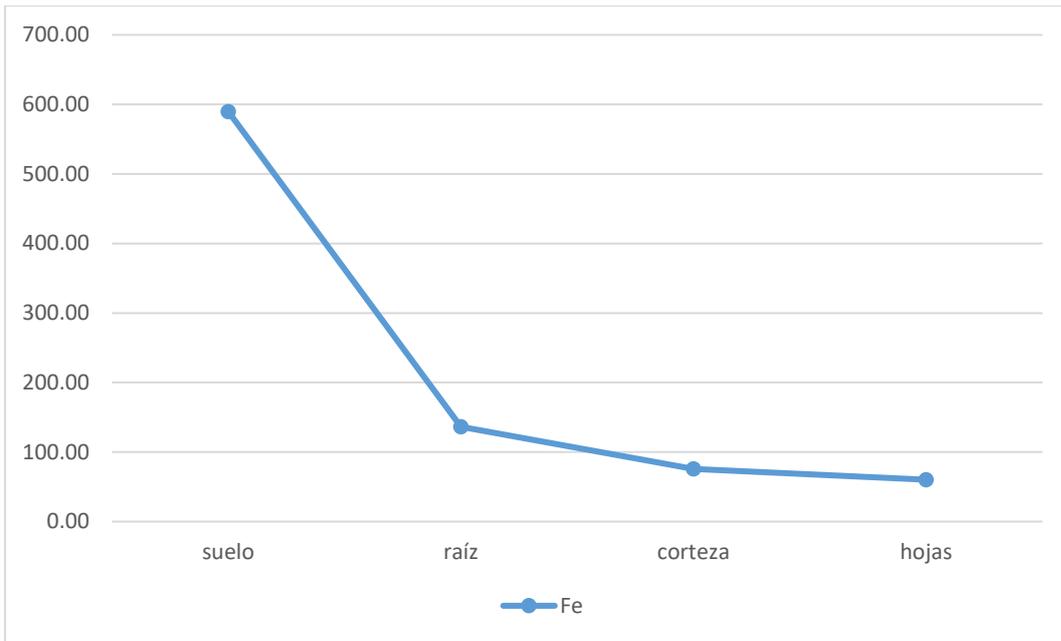


Figura 1. Gráfico del contenido promedio de hierro tanto en suelos como en los órganos de *C. rosea* (renaquilla).

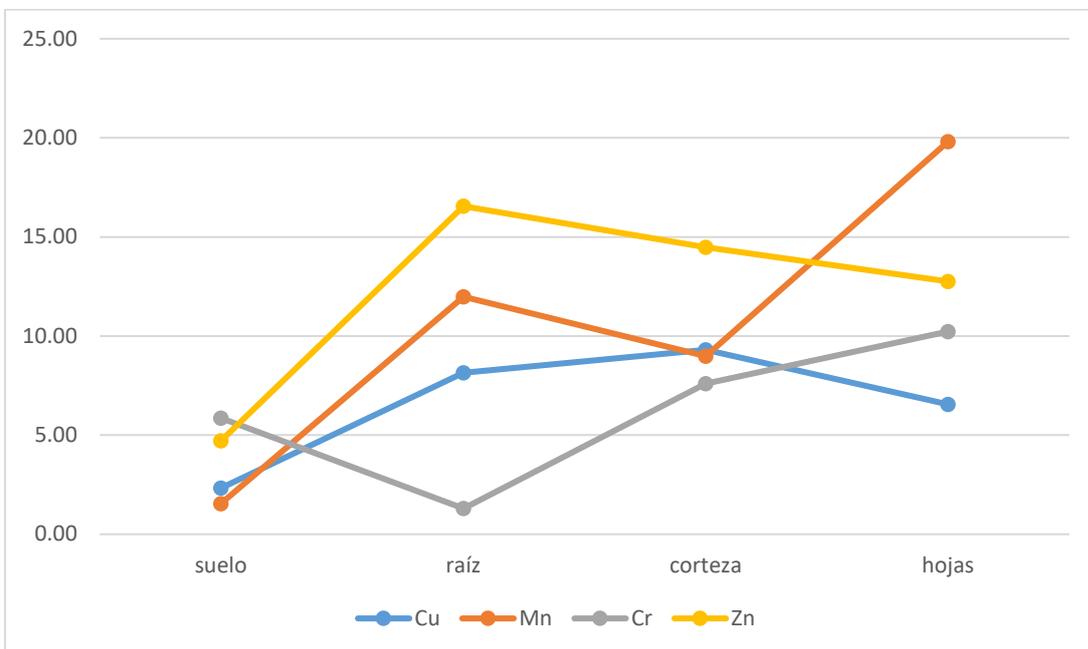


Figura 2. Gráfico del contenido promedio de cobre, manganeso, cromo y zinc tanto en suelos como en los órganos de la planta.

Tabla 6. Concentración de Cd en órganos de la especie amazónica *C. rosea* (renaquilla).

Árbol	2	3	
Raíz	0,5	0,4	
	0,5	0,38	
	0,52	0,42	
\bar{x}	0,51	0,40	0,455
DS	0,01	0,02	0,08
CV	0,02	0,05	0,171
Hojas	0,1	0,2	
	0,08	0,17	
	0,1	0,18	
\bar{x}	0,09	0,18	0,135
DS	0,01	0,02	0,06
CV	0,12	0,08	0,471
Corteza	1,0	3,0	
	0,94	2,95	
	0,94	2,93	
\bar{x}	0,96	2,96	1,96
DS	0,03	0,04	1,41
CV	0,04	0,01	0,722
Suelo de	1,8	2,8	
0 a 20 cm	1,76	2,7	
	1,75	2,75	
\bar{x}	1,77	2,75	2,26
DS	0,03	0,05	0,69
CV	0,01	0,02	0,307

En la tabla 6 se aprecia en el caso del cadmio que, el coeficiente de variación de las repeticiones de cada muestra presentó una variabilidad muy baja ($<0,1$); pero los promedios de las muestras por cada órgano, presentaron una variabilidad para las hojas, raíz y corteza de baja, alta a muy alta, lo que indica que, la media de los diferentes órganos de los árboles muestreados tiene una variabilidad muy amplia.

Tabla 7. Concentración de Pb en órganos de la especie amazónica *C. rosea* (renaquilla).

Árbol	2	3	
Raíz	1,9	27,4	
	1,9	27,6	
	2,1	26,2	
\bar{x}	1,97	27,07	14,52
DS	0,12	0,76	17,75
CV	0,06	0,03	1,222
Hojas	0,2	1,7	
	0,17	1,9	
	0,18	1,8	
\bar{x}	0,18	1,80	0,99
DS	0,02	0,10	1,15
CV	0,08	0,06	1,157
Corteza	12,4	1,6	
	12,1	1,7	
	12,0	1,5	
\bar{x}	12,17	1,60	6,885
DS	0,21	0,10	7,47
CV	0,02	0,06	1,086
Suelo de	9,4	36,9	
0 a 20 cm	9,5	37,4	
	9,2	35,6	
\bar{x}	9,37	36,63	23,0
DS	0,15	0,93	19,28
CV	0,02	0,03	0,838

En la tabla 7 se observa en el caso del plomo que, el coeficiente de variación de las repeticiones de cada muestra presentó una variabilidad muy baja ($<0,1$); pero los promedios de las muestras por cada órgano, presentaron una variabilidad para las hojas, raíz y corteza de baja, alta a muy alta, lo que indica que, la media de los diferentes órganos de los árboles muestreados tiene una amplitud variada.

Tabla 8. Concentración de Hg en órganos de la especie amazónica *C. rosea* (renaquilla).

Árbol	2	3	
Raíz	10,5	6,2	
	10,4	6,0	
	10,2	6,2	
\bar{x}	10,37	6,13	8,25
DS	0,15	0,12	3,00
CV	0,01	0,02	0,363
Hojas	3,4	13,3	
	3,5	12,9	
	3,5	13,2	
\bar{x}	3,47	10,47	6,97
DS	0,06	4,48	4,95
CV	0,02	0,43	0,710
Corteza	6,9	5,3	
	7,0	5,2	
	7,0	5,3	
\bar{x}	13,13	5,3	9,215
DS	0,21	0,06	5,54
CV	0,02	0,01	0,601
Suelo de 0 a 20 cm	3,6	6,1	
	3,7	6,2	
	3,6	6,2	
\bar{x}	3,63	6,17	4,9
DS	0,06	0,06	1,80
CV	0,02	0,01	0,367

En la tabla 8 se nota en el caso del mercurio que, el coeficiente de variación de las repeticiones de cada muestra presentó una variabilidad muy baja (<0,1); pero los promedios de las muestras por cada órgano, presentaron una variabilidad para las hojas, raíz y corteza de baja, alta a muy alta, lo que indica que, la media de los diferentes órganos de los árboles muestreados tiene una amplitud variada.

Tabla 9. Concentración de As en órganos de la especie amazónica *C. rosea* (renaquilla).

Árbol	2	3	
Raíz	13,9	24,8	
	13,6	21,1	
	13,8	22,3	
\bar{x}	13,77	22,73	18,25
DS	0,15	1,89	6,34
CV	0,01	0,08	0,347
Hojas	13,7	21,2	
	12,3	22,0	
	12,1	21,2	
\bar{x}	12,70	21,47	17,085
DS	0,87	0,46	6,20
CV	0,07	0,02	0,363
Corteza	19,4	21,0	
	18,8	20,0	
	18,9	18,9	
\bar{x}	19,03	19,97	19,5
DS	0,32	1,05	0,66
CV	0,02	0,05	0,034
Suelo de	14,3	24,2	
0 a 20 cm	14,4	20,8	
	14,2	21,7	
\bar{x}	14,30	22,23	18,265
DS	0,10	1,76	5,61
CV	0,01	0,08	0,307

Según la tabla 9, se aprecia en el caso del arsénico que, el coeficiente de variación de las repeticiones de cada muestra presentó una variabilidad muy baja ($<0,1$); pero los promedios de las muestras por cada órgano, presentaron una variabilidad para las hojas, raíz y corteza de baja, alta a muy alta, lo que indica que, la media de los diferentes órganos de los árboles muestreados tiene una amplitud variada.

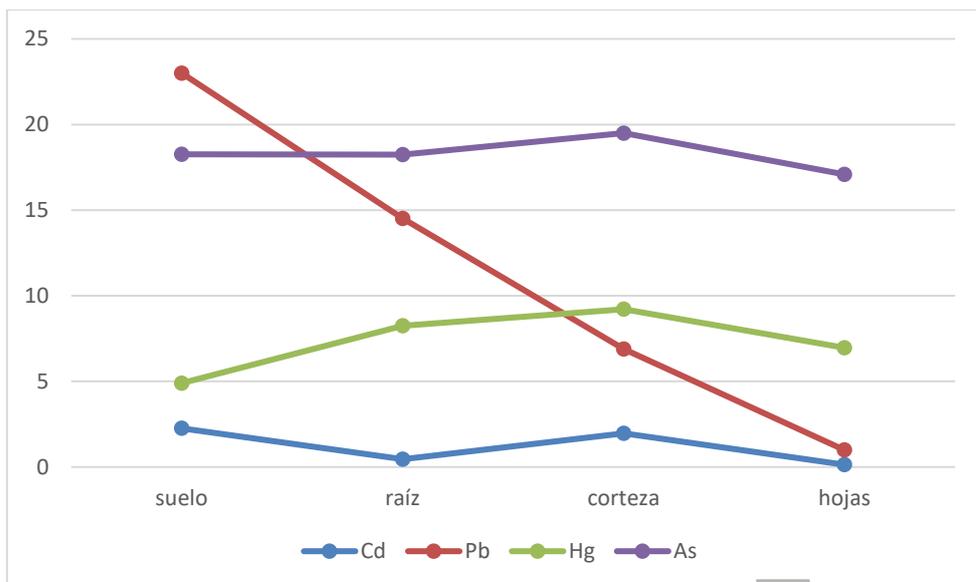


Figura 3. Gráfico que presenta las concentraciones de todas las muestras de los cuatro metales no esenciales para la planta.

De acuerdo con la figura 3, todas las muestras presentaron concentraciones por encima del máximo permitido, excepto las hojas, que presentaron concentraciones por debajo del límite máximo para Pb; el Cd, Hg y As presentaron concentraciones muy parejas tanto en suelo como en los órganos de la planta.

Estadística inferencial

Tabla 10. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.

Metal	Estadístico	gl	Sig.
Fe	,908	6	,426
Cu	,921	6	,509
Mn	,954	6	,771
Cr	,856	6	,175
Zn	,858	6	,183
Cd	,741	6	,016
Pb	,739	6	,015
Hg	,933	6	,604
As	,890	6	,321
Mg	,958	6	,804

Tabla 11. Pruebas de correlación.

Metal	Prueba de correlación	Suelo 0-20
	Coeficiente de Pearson	0,227
Fe	Sig. (bilateral)	0,665
	N	6
	Coeficiente de Pearson	-0,176
Cu	Sig. (bilateral)	0,738
	N	6
	Coeficiente de Pearson	-0,318
Mn	Sig. (bilateral)	0,540
	N	6
	Coeficiente de Pearson	0,215
Cr	Sig. (bilateral)	0,683
	N	6
	Coeficiente de Pearson	0,147
Zn	Sig. (bilateral)	0,782
	N	6
	Coeficiente de C. Rho de Spearman	0,098
Cd	Sig. (bilateral)	0,854
	N	6
	Coeficiente de C. Rho de Spearman	0,098
Pb	Sig. (bilateral)	0,854
	N	6
	Coeficiente de Pearson	-0,249
Hg	Sig. (bilateral)	0,635
	N	6
	Coeficiente de Pearson	-0,827
As	Sig. (bilateral)	0,042
	N	6
	Coeficiente de Pearson	-0,884
Mg	Sig. (bilateral)	0,020
	N	6

La prueba de hipótesis para análisis de relación del contenido de metales entre los órganos de la especie amazónica *C. rosea* (renaquilla) y el suelo que la

sustenta, que mediante la prueba de Shapiro-Wilk los metales hierro, cromo, cobre, manganeso, zinc y magnesio demostraron tener una tendencia normal; por lo que, se usó la prueba de correlación de Pearson. Y para los metales cadmio y plomo, que demostraron una distribución no paramétrica se usó el coeficiente de correlación Rho de Spearman.

La significancia bilateral a las pruebas de correlación de Pearson y Rho de Spearman (tabla 10) corridas para la variable a concentración de metales, indican que el contenido de los metales en los órganos de la especie amazónica *C. rosea* (renaquilla) en relación con el contenido de metales en el suelo que la sustenta tienen un comportamiento independiente, excepto para arsénico.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

Los niveles de los oligoelementos presentes en el suelo y las concentraciones alcanzadas en la raíz, corteza y hojas de la renaquilla permitieron analizar el proceso de difusión de estos metales esenciales para la vida del vegetal. Según reportó Flores (2014) (9), los suelos de la cuenca baja del río Nanay son pobres en materia orgánica, la cual es necesaria para solubilizar el ion **hierro**; sin embargo, en esta zona los suelos son extremadamente ácidos; a pH (<4,5) los cationes analizados se encuentran solubles en la fracción líquida del suelo, por lo tanto, están disponibles para el vegetal (16). Este medio extremadamente ácido condiciona una alta biodisponibilidad de Fe^{++} , como se aprecia en la (tabla 1).

Este ion por su facilidad para cambiar de estado de oxidación está muy comprometido en la generación de radicales libres (16); por lo que posiblemente la renaquilla, como todas las especies que crecen en esta zona estén sometidas a estrés oxidativo y de alguna forma se han adaptado a esta condición o de lo contrario la especie necesitaría ser capaz de secuestrar el exceso de hierro en compartimientos o acomplejarlo. Pero esta condición parece no darse en la renaquilla, porque los niveles de hierro encontrados en los órganos vegetales analizados, mostraron niveles muy por debajo de los encontrados en el suelo y, además, revelaron un comportamiento descendente de la raíz a las hojas (figura 1).

En el caso del **cobre**, el comportamiento de la concentración entre el suelo y la planta (figura 2) muestra que los órganos de la renaquilla alcanzan niveles muy por encima que los del suelo; lo que indicaría que, posiblemente los requerimientos de Cu de esta especie vegetal son superiores a los biodisponibles (tabla 2) (24); sin embargo, hay que precisar que el cobre compite por los mecanismos de absorción no solo con el hierro sino también con el zinc (20), todos cationes indispensables para el buen funcionamiento de los sistemas enzimáticos, la fisiología del vegetal.

La concentración de **zinc** en el suelo de ambas muestras del presente trabajo de investigación (tabla 5), está algo por encima del nivel crítico (0,6 y 2,0 mg/kg), reportado por Sadeghzadeh (20). Y según reporta Singh *et al.*, los suelos muy erosionados y ácidos de las regiones tropicales son deficientes en Zn (21). Pero los niveles de Zn en el suelo no determinan por sí solo la disponibilidad de este metal para las plantas; por lo que, es importante analizar otros parámetros (20).

En los órganos de renaquilla analizados (figura 2), se aprecia que los niveles de zinc son superiores a los del suelo; esto podría guardar relación con lo reportado por Figueredo *et al.* sobre el requerido de Zn por todas las clases de enzimas (19), y que contribuyen a entender por qué en los órganos de la planta todas las concentraciones están superiores a la concentración hallada en las muestras del suelo (tabla 5). Si se considera el tipo de suelos de la Amazonía (9) donde la cantidad de materia orgánica es muy pobre (<4%) y se sabe que se requiere un nivel óptimo de materia orgánica, para que cationes como los ya discutidos Fe, Cu y Zn se solubilizan, y de esa manera la tasa de difusión del Zn desde el suelo a las plantas sea adecuada. La humedad del suelo también aumenta la tasa de flujo de masa y la cantidad del catión en solución para ser absorbido por la planta (9) (20).

Asimismo, la temperatura alta contribuye a incrementar la disponibilidad de Zn en el suelo y el pH ácido del sustrato aumenta la cantidad de Zn disponible para la planta (20). Los suelos donde se encontraron los individuos de renaquilla tienen bajas concentraciones de Zn; pero en los órganos de la planta fueron superiores. Podría decirse a partir de la concentración de zinc encontrado en el suelo, que este catión también se encontraría deficiente en el suelo amazónico de la región Loreto; pero los factores como acidez, humedad y temperatura alta serían favorables para que las concentraciones de Zn en los órganos de la renaquilla sean superiores a las del suelo, dada la demanda del vegetal.

El **chromo**, en el presente trabajo, mostró en la raíz concentraciones inferiores a las del suelo que luego se vieron incrementadas en la corteza y más aún en las hojas (tabla 4 y figura 2); esto se contradice con lo manifestado por Singh *et al.* para quien la concentración del Cr sería a la inversa, más en la raíz donde suele

ser inmovilizado, y menos en las hojas (27). No se puede ignorar que *C. rosea* es una planta epífita que bien puede tomarse en cuenta al momento de evaluar las concentraciones de este metal (27) en los diferentes órganos del vegetal. Al parecer la movilización del cromo a las partes aéreas de las plantas podrían guardar algún tipo de relación con la necesidad de inmovilizar el metal sobre todo en las hojas ya que, de por sí estas concentraciones ya resultarían tóxicas para el vegetal.

Si bien Loreto no cuenta con industrias que aporten cromo al suelo, sin embargo, el uso de combustibles como la leña y el carbón y la incineración de basura es del día a día, hecho que estaría contribuyendo a la presencia de cromo en los suelos y las demás matrices ambientales (4). En el caso particular de las plantas no se ha demostrado la utilidad del cromo, pero sí para otras especies; por otro lado, las concentraciones de los analitos se expresan como un valor total sin tener en cuenta el estado de oxidación ni el tipo de especie química (29), por lo que no es prudente un mayor análisis.

El analito **manganeso** es de gran versatilidad de uso en procesos vitales por las plantas al igual que el zinc y de acuerdo con Millaleo *et al.* los suelos de la Amazonía cumplen los criterios de pH bajo, alta humedad y el drenaje en la selva baja suele condicionar zonas inundables (25), lo que es confirmado por Flores (9) para que el manganeso coexista en sus diferentes estados de oxidación. Y según los resultados (tabla 3 y figura 2) la renaquilla lo acumula más en el follaje donde le es indispensable para la fotólisis del agua, síntesis de clorofila, procesos de síntesis a partir de la absorción del CO₂ y procesos de regulación, catálisis, de control de división celular y procesos redox. En segundo lugar, es requerido en la raíz para la absorción de otros cationes y aniones (figura 2) (25).

En general, se puede admitir, que la cantidad de los diferentes cationes está determinada por la genética de cada especie (20) (25) (6). Para el caso de la renaquilla motivo del estudio, a excepción del hierro que está alto, los demás cationes analizados, considerados como oligoelementos, están en concentraciones aceptables en el suelo, y para el caso del cromo que no se considera útil para las plantas, la concentración aunque baja, ya resulta tóxica

para el vegetal. Pero en ninguno de los casos se puede decir que los resultados obtenidos estén relacionados con procesos de fitoacumulación que lleven a pensar que la especie *C. rosea* pueda tener un valor como fitorremediadora o bioacumuladora, como las especies que presenta Casteblanco y que ayudan a disminuir la carga de metales en otra especie de interés agrícola (7).

Es de mencionar que, en esta investigación tampoco se tiene en cuenta los cambios que puedan darse en la distribución de la raíz, ni los efectos de la rizosfera, que bien pueden sufrir cambios en casos de incremento de cationes o en caso de requerir ampliar la superficie de absorción por escasez de este, por lo que estas características del vegetal no fueron evaluadas, ya que requiere de un conocedor de la morfología del vegetal.

De acuerdo con la revisión hecha por Ali *et al.* (4) sobre estudios de tóxicos metálicos persistentes en los ecosistemas y bioacumulables, se reportó entre los elementos no esenciales, a elementos pesados, siendo los más peligrosos el Cr, Cd, Pb, Hg y As, que fueron objeto de estudio en el presente trabajo de investigación.

La concentración promedio más alta en el suelo fue para el **plomo** (tabla 7 y figura 3), pero al parecer la especie renaquilla no lo asimila o bien, puede ser que, por la técnica utilizada, parte de este catión se perdió por volatilización por efectos de la extracción en caliente y por ello la concentración en los órganos del vegetal fue inferior a la del suelo.

El valor más bajo encontrado fue para el **cadmio** (tabla 6 y figura 3). Este metal es peligroso porque puede bioacumularse ya que presenta un tiempo de vida largo.

En el caso del **mercurio** que es utilizado para la extracción de oro en aguas aluviales, es de preocupación los resultados encontrados tanto en los suelos como en los órganos de la planta (tabla 8); porque siempre sale en las noticias regionales que en el alto Nanay operan dragas informales, de manera que es

importante ver de forma periódica cómo varían los niveles de mercurio a lo largo de la cuenca de este río.

El caso del **arsénico** también con concentraciones altas (tabla 9) es preocupante, porque suele contaminar los cuerpos de agua, teniendo en cuenta que el área de estudio es selva baja; es pertinente monitorizar su comportamiento a lo largo del terreno para ver su variabilidad y buscar las fuentes contaminantes.

Los niveles encontrados de los metales no esenciales analizados fueron altos, por encima de los límites máximos permitidos (LMP); al parecer es una constante encontrar concentraciones altas en esta zona de la cuenca baja del río Nanay; como ya lo reportaron García y Uribe (8), Medina y Taminche (5), Apacla y Pezo (42). Por lo que, es conveniente como lo menciona Hejna *et al.* (6) según lo propone la Unión Europea, se controle no solo en cuerpos de agua como ya se viene haciendo a través de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y en tierras de cultivo, sino que también deben levantarse mapas de tendencia por contaminación con metales en los bosques amazónicos. Los bosques amazónicos de Nanay aportan especies silvestres de consumo humano, tanto para la alimentación como para uso medicinal (5, 8, 9, 40).

Si bien, la remediación es una solución especialmente en tierras agrícolas para cultivos en los que la misma normativa internacional impone estándares de calidad, como el del cacao que crece en zona de selva tropical propuesta por Casteblanco (7), sin embargo, no es aplicable a zonas forestales. Pero sí es necesario conocer el estado de contaminación por contaminantes metálicos, a fin de poder controlar las emisiones y en el tiempo sanear las tierras y así impedir que los metales y metaloides pesados con o sin utilidad biológica, no representen toxicidad persistente en los ecosistemas amazónicos, ya que los elementos metálicos no esenciales pueden generar bioacumulación o biomagnificación a través de la cadena trófica, de la cual forma parte el ser humano.

Si bien los resultados no son alentadores para asegurar el consumo de preparados de renaquilla procedente de esta área de estudio con fines

medicinales, su uso puede ser esporádico. Sin embargo, a decir de Bermello (2010), es necesario proteger nuestros recursos genéticos y el conocimiento etnofarmacológico (10). De manera que, se requiere de medidas para proteger no solo el recurso de la depredación por el consumo, sino porque la misma contaminación de los suelos puede afectar el buen desarrollo de la especie renaquilla.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

1. La especie vegetal *Clusia rosea* adquiere su contenido metálico del suelo que la sustenta, el mismo que los contiene en la mayoría de los casos por encima de los límites máximos permitidos. Demostró de acuerdo con la significancia del coeficiente de correlación de Rho de Spearman, que solo el arsénico y el magnesio tienen relación con el contenido de los referidos metales en el suelo, el resto de metales tienen un comportamiento independiente tanto en los órganos de la planta como el suelo.
2. En las muestras de suelo, el coeficiente de variación de las concentraciones de los analitos, indica que los valores se dispersan desde un rango de 0,01% a 0,08%. Los suelos en todos los casos de los elementos no esenciales determinados están por encima de los LMP. Para el caso de los elementos esenciales: cobre, manganeso y zinc, se observaron niveles parejos entre el suelo y los órganos de la planta; el hierro se encuentra en concentraciones altas en el suelo, pero las concentraciones en la planta están muy por debajo y el cromo que es no esencial para las plantas presenta concentración por debajo de la concentración encontrada en el suelo.
3. Se encontró que la concentración de los metales esenciales en los órganos de la planta, en el caso del hierro y del manganeso, es más alta en la raíz y en las hojas, respectivamente. En el caso del cobre y el zinc, el reparto es entre raíz y corteza en ambos, sin estar muy lejos la concentración en las hojas; y siendo la corteza la más consumida de forma esporádica con fines medicinales, la posibilidad de un exceso de oligoelementos es mínima. Mas en general, la presencia de elementos no esenciales en los órganos de la planta está por encima de los LMP, por lo que sí conlleva un riesgo de incorporar al organismo concentraciones de estos elementos que pueden acumular sin llegar a desarrollar un cuadro de toxicidad aguda.

CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES

1. Es necesario que en este tipo de estudios para una mejor discusión se incorporen los estudios de desarrollo de la planta, a fin de ver si hay cambios en el desarrollo de las raíces debido a las concentraciones altas de metales. Por otro lado, también es importante el estudio de mecanismos de detoxificación y fisiológicos de especies como la *C. rosea* (renaquilla) que crecen en los bosques amazónicos.
2. Los análisis de las especies deben hacerse de forma periódica, a fin de llevar un mejor registro no solo de las concentraciones sino del desarrollo del individuo.
3. La determinación de metales también debe hacerse a las personas para tener un perfil de la presencia de los metales y no metales que pueden representar por su concentración un riesgo de toxicidad y por ende de desarrollar algún efecto secundario que pueda en el peor de los casos llevar a desenlaces fatales.

CAPÍTULO VIII: FUENTES DE INFORMACIÓN

1. Medina Larico RA. Evaluación de metales en la corteza de *Campsiandra angustifolia* Spruce ex Benth (huacapurana) de uso etnoterapéutico en la región Loreto. Tesis. Iquitos: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Farmacia y Bioquímica; 2015.
2. Vargas Soto JG, Andrade JL. Clusia en México. *Ciencias*. 2006 julio a setiembre; (83): pp. 38-40.
3. de Oliveira CMA, Porto AM, Bittrich V, Vencato I, Marsaioli. Floral resins of *Clusia* spp.: Chemical composition and biological function. *Tetrahedron Letters*. 1996; 37(36): pp. 6427-6430.
4. Ali H, Khan E, Ilahi I. Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation. *Journal of Chemistry*. 2019 marzo 05: 14 pages.
5. Medina Torres C, Taminche Silvano S. Etnobotánica cuantitativa de las plantas medicinales en la comunidad nativa Nuevo Saposoa, provincia Coronel Portillo. Tesis. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa; 2018.
6. Hejna M, Gottardo D, Baldi A, Dell'Orto V, Cheli F, Zaninelli M, et al. Review: Nutritional ecology of heavy metals. *The Animal Consortium*. 2018; 12(10): pp. 2156-2170.
7. Castebianco JA. Técnicas de remediación de metales pesados con potencial aplicación en el cultivo de cacao. *LA GRANJA: Revista de Ciencias de la Vida*. 2018 marzo-agosto; 27(1): pp. 21-35.
8. García Paima TR, Uribe Gonzales RB. Evaluación de metales de la especie *Tynanthus panurensis* (clavo huasca), de uso etnoterapéutico en la región Loreto. Tesis. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Farmacia y Bioquímica; 2015.
9. Flores Vargas JL. Distribución espacial y ubicación fisiográfica de cuatro especies vegetales. Tesis. Iquitos: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana; 2014.
10. Bermello Crespo A. Recursos genéticos y conocimiento etnofarmacológico cubanos. Su protección mediante patentes. *BLACPMA*. 2010 Mayo 25; 9(3): pp. 153-165.
11. Cheek MD, Lalla R. A description of the naturalised *Clusia rosea* Jacq. (*Clusiaceae*) populations in South Africa. *Bothalia - African Biodiversity & Conservation*. 2017; 47(1): pp. 2311-.
12. Francis J. De árboles de Puerto Rico. [Online]; 2000 [cited 2020 junio 20. Available from: https://rngr.net/publications/arboles-de-puerto-rico/clusia-rosea/at_download/file.

13. Reyes Chilpa R, Huerta Reyes M. Compuestos naturales de plantas de la familia Clusiaceae: Inhibidores del virus de inmunodeficiencia humana tipo 1. *Interciencia*. 2009 junio; 34(6): pp. 385-392.
14. Cuesta-Rubio O, Vélez-Castro H, Frontana-Urbe BA, Cárdenas J. Nemorosone. The major constituent of floral resins of *Clusia rosea*. *Phytochemistry*. 2001; 57: pp. 279-283.
15. Vásquez Villacorta W. Características agronómicas, potencial y uso de plantas medicinales en las comunidades de Moena Caño, Ullpa Caño (zonas inundables), río Itaya. Tesis. Iquitos: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana; 2010.
16. Juárez , Juárez M, Cerdán M, Sánchez-Sánchez A. Hierro en el sistema suelo-planta. Tesis. Alicante: Universidad de Alicante, Agroquímica y Bioquímica; 2007.
17. INTAGRI. Serie Nutrición vegetal, Núm. 130. [Online].; 2019 [cited 2020 marzo 22]. Available from: www.intagri.com.
18. Pro mix. pthorticulture.com. [Online].; 2018 [cited 2020 marzo 20]. Available from: <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/rol-del-hierro-en-el-cultivo-de-plantas/>
19. Figueredo D, Barros P, Cordeiro A, Serra T, Lourenco T, S C, et al. Seven zinc-finger transcription factors are novel regulators of the stress responsive gene *OsDREB1B*. *J Exp Bot*. 2012 marzo 12; 63(10): pp. 3643-3656.
20. Sadeghzadeh B. A review of zinc nutrition and plant breeding. *J. Soil Sci. Plant Nutr*. 21013 octubre 30; 13(4): pp. 905-927.
21. Singh B, Kumar S, Natesan A, Singh BK, Usha K. Improving zinc efficiency of cereals under zinc deficiency. *Current Science*. 2005 enero 10: pp. 36-44.
22. Biblioteca electrónica de documentación científica sobre medidas nutricionales (eLENA). [Online].; 2019: 21 CEST [cited 2020 marzo 30]. Available from: https://www.who.int/elena/titles/micronutrientpowder_infants/es/.
23. Development Initiatives. “Arrojar luz sobre la nutrición para inspirar nuevas iniciativas”. Bristol (Reino Unido). [Online].; 2018 [cited 2020 marzo 30]. Available from: globalnutritionreport.org.
24. Promix. Pthorticulture. [Online]; 2018 [cited 2020 marzo 01]. Available from: pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/la-funcion-del-cobre-en-el-cultivo-de-plantas/.
25. Millaleo R, Reyes-Díaz M, Ivanov AG, Mora ML, Alberdi M. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. *J. Soil Sci. Plant Nutr*. 2010; 10(4): pp. 476-494.
26. O’Neal SL, Zheng W. Manganese Toxicity Upon Overexposure: a Decade in Review. *Curr Environ Health Rep*. 2015 septiembre; 2(3). Shanker AK,

- Cervantes C, Loza-Tavera H, Avudainayagam S. Chromium toxicity in plants. *Environment International*. 2005; 31: pp. 739-753.
27. Singh HP, Mahajan P, Mahajan S, Batish DR, Kohli RK. Chromium toxicity and tolerance in plants. *Environ Chem Lett*. 2013 abril 18; 11: pp. 229-254.
 28. Shanker AK, Cervantes C, Loza-Tavera H, Avudainayagam S. Chromium toxicity in plants. *Environment International*. 2005; 31: pp. 739-753.
 29. Prashanth L, Kattapagari KK, Chitturi T, Reddy Baddam VR, Prasad LK. *Journal of Dr. NTR University of Health Sciences*. 2015; 4(2): pp. 75-85.
 30. Giardina EB, Heredia OS, Castro MA, Efron DN. Fitotoxicidad del cromo sobre *Phaseolus vulgaris* L. *Rev. Agronomía & Ambiente*. 2012; 32(1-2): pp. 75-80.
 31. Macuso L, Arienti S. Petroleum coke (petcoke). *Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technologies*. 2017.
 32. Ramírez AV. Exposición ocupacional y ambiental al arsénico. Actualización bibliográfica para investigación científica. *An Fac med*. 2013; 74(3): pp. 237-247.
 33. Xie Y, Hu X, Du B, Sun X, Amombo E, Fan J, et al. Effects of Cadmium Exposure on Growth and Metabolic Profile of Bermudagrass [*Cynodon dactylon* (L.) Pers.]. *PLoS ONE*. 2014 diciembre 29; 9(12).
 34. Thirulogachandar A, Rajeswari M, Ramya S. Assessment of Heavy Metals in Gallus and their Impacts on Human. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2014 marzo; 4(6).
 35. Azcona-Cruz MI, Ramírez y Ayala R, Vicente-Flores G. Efectos tóxicos del plomo. *Rev Esp Méd Quir*. 2015 enero-marzo; 20: pp. 72-77.
 36. Osoreo Plenge F, Grández Urbina A, Fernández Luque JL. Mercurio y salud en Madre de Dios, Perú. *Acta Med Per*. 2010; 27(4): pp. 310-314.
 37. Viehweger K. How plants cope with heavy metals. *Botanical Studies*. 2014; 55(35).
 38. Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, Mathew B, Beeregowda KN. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdiscip Toxicol*. 2014; 7(2): pp. 60-72.
 39. Carnicer JM. Módulo I: Contaminación Ambiental. [Online]; 2007/2008.
 40. Nowrouzi M, Mansouri , Nabizadeh S, Pourkhabbaz. Analysis of heavy metals concentration in water and sediment in the Hara biosphere reserve, southern Iran. *Toxicology and Industrial Health*. 2014; 30(1): pp. 64-72.
 41. Cepeda Dovala JM. Química de suelos. México D.F.: Trillas; 2016.
 42. Apacla Pérez RE, Pezo Lloja AF. Evaluación de metales en corteza de *Maytenus macrocarpa* (chuchuhuasi) de uso etnomedicinal en Ila región. Tesis. Iquitos: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Farmacia y Bioquímica; 2015.

CAPÍTULO IX. ANEXOS

Anexo 1. Certificación de la especie vegetal.



Centro de Investigación de
Recursos Naturales
Herbarium Amazonense - AMAZ

INSTITUCION CIENTIFICA NACIONAL DEPOSITARIA DE MATERIAL BIOLÓGICO
CODIGO DE AUTORIZACION AUT-ICND-2017-005

CONSTANCIA

El coordinador del Herbarium Amazonense (AMAZ) del CIRNA, de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana

HACE CONSTAR:

Que, la muestra botánica presentado por **GILMA BELLA DELIA RAMOS FREITAS**, Bachiller de la Escuela de Formación Profesional de Farmacia y Bioquímica, de la Facultad de Farmacia y Bioquímica, de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, pertenece a la tesis titulada: **"RELACIÓN DEL CONTENIDO DE METALES DE LA ESPECIE *Clusia rosea* (renaquilla) DE USO ETNOMEDICINAL Y EL SUELO QUE LA SUSTENTA, PUERTO ALMENDRA – NINA RUMI"**, fue verificado y determinado en este Herbarium Amazonense (AMAZ), del Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIRNA), de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana (UNAP), como a continuación se indica:

Cod.Amaz	Nombre vulgar	Nombre Científico	Familia
37482	renaquilla	<i>Clusia rosea</i> Jacq.	Apocynaceae

Se expide la presente constancia al interesado, para los fines que estime conveniente.

Atentamente,

Iquitos, 30 de diciembre, 2020


Blgo. Richard J. Huaranca Acostupa M.Sc.
Coordinador de Herbarium AMAZ
CIRNA-UNAP



Anexo 2. Operacionalización de variables.

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Tipo de variable por su naturaleza	Indicador	Escala de medición ppm (VMP)	Valores de las categorías
Independiente: Metales en el suelo	Metales presentes en suelos donde crece <i>Clusia rosea</i> (renaquilla)	Concentración de metales presentes en calicatas de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm	Cuantitativa	Presencia de metales: Fe, Cu, Cr, Mn, Zn, As, Cd, Pb y Hg	As no >0,1 Cd no >0,02 Pb no >0,2 Hg no >0,01	mg/kg
Dependiente: Metales en la especie vegetal	Metales absorbidos por la especie vegetal <i>Clusia rosea</i> (renaquilla)	Metales presentes en la raíz, tallo y las hojas de <i>Clusia rosea</i> (renaquilla)	Cuantitativa	Metales absorbidos: Fe, Cu, Cr, Mn, Zn, As, Cd, Pb y Hg	As no >0,1 Cd no >0,02 Pb no >0,2 Hg no >0,01	mg/kg