

Autonomisation Nutritionnelle Et Energétique Par Valorisation Des Déchets D'exportation De Fruits. Tendance A L'autonomie Energétique Face Au Changement Climatique. Etude De Cas De Madagascar Premium Exotica (MPE) Toamasina

[Nutritional Self-Sufficiency In Edible Oil And Energy By Recycling Fruit Export Waste. Trends In Self-Sufficiency In The Face Of Climate Change. Case Study Of Madagascar Premium Exotica (MPE) Toamasina]

¹RAVAOARIMALALATIANA Miora Vatosoa, ²RAMAMONJISOA Mamitiana, ³RASOANAIVO Jean Luc, ⁴RAVONINJATOVO Achille, ⁵ANDRIANAIVO Lala

¹EDSTII, Email: miora.vatosoa@gmail.com ²CNRT, Email: mtr.mamitiana@gmail.com ³EDSTII, Email: jeanlucnj@gmail.com ⁴EDSTII, Email: achillegc@yahoo.fr

⁵EDSTII, Email: andrianaivo.andri@gmail.com



Résumé : La Société Madagascar Premium Exotica (MPE, SA), Toamasina, exporte des fruits tropicaux comme le litchi, la mangue, le fruit de la passion, la goyave rosée, l'ananas, le corossol et le gingembre. Ces fruits d'exportation génèrent beaucoup de déchets de conditionnement et de transformation au niveau de l'usine. Ces déchets sont pour le moment mis en décharge et non gérés à chaque campagne. Trouver une solution fiable et durable pour ces déchets est un défi pour la société. Ce travail de recherche a pour objectif de valoriser à des fins nutritionnelle et énergétique les noyaux de litchi en huile alimentaire, en biochar, source d'énergie alternative au bois énergie et en biodiesel. La finalité de ce travail est de primo, déterminer les principaux indices physico-chimiques de l'huile de noyau de mangue, secundo d'évaluer leur potentialité énergétique en biochar et en biodiesel pour une autonomie énergétique de la société MPE (SA). Les résultats obtenus montrent que l'huile de noyau de mangue présente un indice de saponification de $193,4 \pm 1,8$ mg KOH/g, un indice d'acide de 1,25

$\pm 0,10$ mg KOH/g, un indice d'iode de $48,6 \pm 1,2$ g I₂/100 g et un indice de peroxyde de $2,8 \pm 0,3$ meq O₂/kg. Ces valeurs sont conformes aux normes internationales pour les huiles végétales alimentaires. La comparaison avec des huiles conventionnelles met en évidence une bonne stabilité oxydative et un équilibre lipidique favorable. Le Pouvoir calorifique inférieur de biochar obtenu est de 6337,2 kcal/kg ou 7,365 kwh/kg et celui du biodiesel à base de l'huile de noyau de mangue pour un rendement de transestérification de 95% est de 37 MJ/kg ou 9,8kwh/kg correspondant à 3,4 kwh/kg de production électrique réelle pour un rendement moteur de 35 %.

Durant les cinq campagnes d'exportation (2019 à 2023) de fruit de MPE, la quantité de noyaux de litchi et de mangue enregistrée au niveau de la société a augmenté considérablement. Pour le litchi, on a enregistré respectivement de la 1^{ère} année à la 5^{ème} année : 242,9 t, 315,7 t, 410,5 t, 533,6 t et 693,7 t soit une totalité de 1608,8 t. Par contre, pour le noyau de mangue, on a obtenu respectivement : 27,4 t en 2019, 35,7 t en 2020, 46,4 t en 2021, 60,3 t en 2022 et 78,4 t en 2023, soit une totalité de 248,2 t.

L'évaluation du potentiel énergétique à partir de la totalité de ces déchets de noyau de litchi et de mangue a permis d'obtenir dans le

domaine énergétique

- Primo, 12234344,83 kwh ou 12234,34 Mwh d'énergie électrique, à partir du biochar, en tenant compte que le PCI du biochar est de 6337,2 kcal/kg
- Secundo, 21514,2242 Kwh ou 21,514 Mwh d'énergie électrique produite à partir de l'huile de noyau de mangue pour la production de biodiesel
- Tertio, 2233800000 kcal ou $2,23 \times 10^9$ kcal dans le domaine de nutrition si on envisage transformer les 248,2 t de noyau de mangue (des 5 années de campagnes) en huile alimentaire en considérant la conversion nutritionnelle standard de 9000 kcal pour 1 kg d'huile.

Mots clés : noyau fruit, biochar, huile végétale, biodiesel, Autonomie énergétique.

Abstract: Madagascar Premium Exotica (MPE, SA), Toamasina, exports tropical fruits such as lychee, mango, passion fruit, pink guava, pineapple, soursop and ginger. These export fruits generate a lot of packaging and processing waste at the plant. For the time being, this waste is landfilled and not managed during each campaign. Finding a reliable and sustainable solution for this waste is a challenge for the company. The aim of this research project is to valorize lychee kernels for nutritional and energy purposes into edible oil, biochar, an alternative energy source to wood energy, and biodiesel. The aim of this work is firstly, to determine the main physico-chemical indices of mango kernel oil, and secondly, to evaluate their energy potential in biochar and biodiesel for the energy autonomy of MPE (SA). The results obtained show that mango kernel oil has a saponification value of 193.4 ± 1.8 mg KOH/g, an acid value of 1.25 ± 0.10 mg KOH/g, an iodine value of $48.6 \pm$

1.2 g I₂/100 g and a peroxide value of 2.8 ± 0.3 meq O₂/kg. These values are in line with international standards for edible vegetable oils. Comparison with conventional oils highlights good oxidative stability and favorable lipid balance. The Lower Calorific Value of biochar obtained is 6337.2 kcal/kg or 7.365 kwh/kg and that of biodiesel based on mango kernel oil for a transesterification yield of 95% is 37 MJ/kg or 9.8kwh/kg corresponding to 3.4 kwh/kg of actual electrical production for an engine efficiency of 35%.

During MPE's five fruit export campaigns (2019 to 2023), the quantity of lychee and mango kernels recorded by the company increased considerably. For lychee, from year 1 to year 5 respectively:

242.9 t, 315.7 t, 410.5 t, 533.6 t and 693.7 t were recorded, for a total of 1,608.8 t. On the other hand, for mango kernels, we obtained respectively: 27.4 t in 2019, 35.7 t in 2020, 46.4 t in 2021, 60.3 t in 2022 and 78.4 t in 2023, i.e. a total of 248.2 t.

The assessment of the energy potential from all of this lychee and mango core waste yielded the following energy-related results:

- Firstly, 12234344.83 kwh or 12234.34 Mwh of electrical energy from biochar, taking into account that the PCI of biochar is 6337.2 kcal/kg.
- Secondly, 21514.2242 Kwh or 21.514 Mwh of electrical energy produced from mango kernel oil for biodiesel production.
- Thirdly, 2233800000 kcal or 2.23×10^9 kcal in the field of nutrition if we plan to transform the 248.2 t of mango kernels (from the 5 years of campaigns) into edible oil, considering the standard nutritional conversion of 9000 kcal for 1 kg of oil.

Keywords: fruit kernel, biochar, vegetable oil, biodiesel, energy autonomy.

1. Introduction

La Société Madagascar Premium Exotica (MPE, SA), Toamasina, travaille dans le domaine de l'exportation, de conditionnement et de transformation des fruits tropicaux. Ces fruits génèrent beaucoup de déchets au niveau de l'usine. Aucune solution fiable et appropriée pour la valorisation de ces déchets n'a été adoptée par la société jusqu'à présent. Les déchets sont stockés à la décharge et posent un problème d'encombrement à l'environnement de la société.

La transformation industrielle du litchi et de la mangue génère d'importantes quantités de coproduits, notamment les noyaux, qui sont généralement sous-exploités. La société MPE consciente de cette situation envisage de valoriser ces coproduits pour éviter les pertes de valeur économique et les impacts environnementaux y générés. Or, les noyaux de ces fruits ont chacun leur spécificité. Le noyau de mangue peut être valorisé en biochar, source d'énergie alternative au bois énergie, tandis que les noyaux de mangue contiennent de l'amande qui renferme de l'huile présentant des caractéristiques physico-chimiques intéressantes,

susceptibles de répondre aux exigences des huiles alimentaires et pouvant être transformé en biodiesel.

L'objectif de la présente étude est de :

- primo, valoriser les noyaux de litchi en biochar, et évaluer ses potentiels énergétiques en tant que combustible alternatif au bois énergie ;
- secundo, caractériser l'huile de noyau de mangue par l'analyse de ses indices physico-chimiques clés et la transformer en biodiesel ;
- tertio, évaluer le potentiel de valorisation alimentaire de l'huile de noyau de mangue, en comparaison avec des huiles végétales conventionnelles, dans une perspective de développement durable ;
- quarto, évaluer le potentiel énergétique de production du biochar et du biodiesel pour les cinq années de campagnes de production de MPE
- quinto, déterminer la tendance sur la possibilité de l'autonomie énergétique de MPE vis-à-vis du changement climatique et du potentiel énergétique généré par le biochar et le biodiesel

2. Matériels et Méthodes

2.1. Matériels : Cadre d'étude : la société Madagascar Premium Exotica SA

2.1.1. Présentation de la société Madagascar Premium Exotica SA

La société MPE ou «Madagascar Premium Exotica» est une entreprise industrielle du groupe SCRIMAD œuvrant pour le développement de l'agroalimentaire, et créée en 2014 par deux entreprises renommées et reconnues dans leurs secteurs, en réponse à la demande croissante d'ingrédients à base de fruits de qualité.

D'abord SCRIMAD SA [3] : une entreprise leader dans le secteur agricole basée à Madagascar depuis 1993 et travaillant exclusivement avec les organisations de producteurs sur toute l'île. Elle a été la première entreprise à obtenir le certificat de Commerce Equitable à Madagascar dans la filière litchi. Par ailleurs, ETHIQUABLE, [4] une coopérative française dont tous les produits sont certifiés équitables et biologiques.

MPE SA est depuis devenue la première entreprise du genre à Madagascar. S'engager à fournir à ses clients un produit sur mesure basé sur le respect de la nature, la préservation des saveurs authentiques avec un haut niveau de service et de qualité. Les valeurs du « Développement durable, équitable et inclusif » sont illustrées par notre politique de développement responsable des producteurs paysans partenaires.

Ainsi, SCRIMAD est devenu un Groupe regroupant actuellement trois (03) sociétés :

- SCRIMAD exporte du litchi, des grains secs (haricot, pois du cap...) ainsi que des épices (poivre, baie rose, cannelle...),
- MPE (Madagascar Premium Exotica) collecte des fruits (grenadelle, mangue, tamarin, corossol, litchis, fruit de la passion...) et les transforme en jus concentré et de la purée pour exclusivement l'exportation [5] .
- AGRITRADE conditionne et exporte de la vanille.

Par son savoir-faire et son expérience, le Groupe fait figure de leader et de pionnier sur plusieurs points, notamment dans les labels « commerce équitable » ainsi que dans les certifications et normes du « Développement durable ».

Au fil des années, SCRIMAD S.A a su s'adapter aux réalités locales ainsi qu'à la demande internationale :



Photo 1 : Siège de la société "MPE" SA à Toamasina

2.1.2. Matières

Dans le cadre de ce travail de recherche, deux matières ont été l'objet de l'étude :

- le litchi et ses noyaux,
- la mangue et ses noyaux

2.1.2.1. Le litchi et ses noyaux

Depuis l'année 2019 à 2023, les déchets de fruits de litchi de la société MPE sont récapitulés dans le tableau1.

Tableau 1 : Types de déchets de litchi de 2019 à 2023

Répartition déchets (t)	2019	2020	2021	2022	2023	Coeff
Litchi : écorce	78,9	102,6	133,4	173,4	225,4	0,13
Litchi : noyau	242,9	315,7	410,5	533,6	693,7	0,4
Litchi: machine	30,4	39,5	51,3	66,7	86,7	0,05

Ce tableau montre que les déchets de litchi comprennent l'écorce, les noyaux et les déchets obtenus après la transformation par la machine. Ce tableau montre la quantité de noyaux à valoriser dans le cadre de cette recherche pour les cinq années de campagne..



Photo 2: Noyau litchi

2.1.2.2. La mangue et ses noyaux

Depuis l'année 2019 à 2023, les déchets de mangue et ses noyaux de la société MPE sont récapitulés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Types de déchets de mangue de 2019 à 2023

Répartition déchets (t)	2019	2020	2021	2022	2023	Coeff
Mangue : peau	24,7	32,1	41,8	54,3	70,6	8,18
Mangue : Noyau	27,4	35,7	46,4	60,3	78,4	0,2
Mangue : machine	9,6	12,5	16,2	21,1	27,4	0,07

Ce tableau montre que les déchets de mangue comprennent la peau, les noyaux et les déchets obtenus après la transformation par la machine. Ce tableau montre la quantité de noyaux à valoriser dans le cadre de cette recherche, pour les cinq années de campagne.



Photo 3: Noyau de mangue

2.1.3. Matériels de laboratoire

2.1.3.1. Pour la production de biochar

Plusieurs matériels ont été utilisés entre autres : le séchoir solaire pour le séchage de la matière : noyau de litchi et de mangue.

a. Séchoir solaire : Il est composé respectivement de :

- Capteur Solaire : une surface vitrée ou translucide qui permet de capter les rayons du soleil et de convertir cette énergie en chaleur.
- Chambre de Séchage : Un compartiment où les produits à sécher sont placés. La chaleur absorbée par le capteur solaire est dirigée vers cette chambre.
- Circulation de l'Air : La conception permet une bonne circulation de l'air chaud à travers les produits, évacuant ainsi l'humidité.

b. Matériels pour la carbonisation, le broyage et le compactage

- Matériel de carbonisation : C'est un fût de récupération qui a été utilisé pour faciliter le déroulement des activités.
- Matériel de broyage : c'est un matériel manuel à pilon de laboratoire
- Matériel de compactage : c'est une presse manuelle qui a pour rôle de donner une forme le biochar.

c. Matériels pour la transformation des noyaux de mangue

• **Pour la détermination des valeurs nutritionnelles dans les noyaux de mangue** Pour pouvoir déterminer les valeurs nutritionnelles dans les noyaux de mangue, différents matériels sont utilisés que ce soit pour déterminer :

- la teneur en cendre
- la teneur en lipide
- la teneur en Protéine
- la teneur en glucide

2.2. Méthodes

La méthode adoptée dans le cadre de ce travail de recherche consiste à entreprendre différentes activités entre autres :

- la première activité : correspond à la production de biochar à partir des noyaux de litchi, la détermination de ses caractères physico chimiques et l'évaluation de son potentiel énergétique ;
- la seconde activité : correspond à la détermination des valeurs nutritionnelles de la poudre de mangue après broyage du noyau ;
- la troisième activité : concerne l'extraction d'huile de poudre de noyau de mangue par méthode soxhlet, la caractérisation de ses composants, la détermination de ses indices physico chimiques ;
- la quatrième activité : consiste à la production de biodiesel à partir de l'huile de noyau de mangue et de l'évaluation de son potentiel énergétique

2.2.1. Méthode pour la production de biochar à partir de noyaux de litchi

L'approche adoptée consiste respectivement à

a. Production de biochar :: il faut passer par les différentes étapes suivantes :séchage d'abord des noyaux, puis carbonisation, broyage, tamisage, malaxage avec les liants, agglomération dans la presse pour donner de la forme aux produits agglomérés et enfin séchage pour pouvoir déterminer ses caractères physico chimiques.

b. Détermination des caractères physico chimiques du biochar : Parmi ses caractères physico chimiques, on peut citer : l'humidité, la teneur en Matière volatile, la teneur en cendre, la teneur en carbone fixe et enfin le Pouvoir calorifique Inférieur

(PCI).

c. Evaluation potentiel énergétique du biochar : Pour évaluer ce potentiel, il faut d'abord connaître le PCI du biochar et la quantité de noyau à transformer ainsi que le facteur de conversion permettant de convertir le pouvoir calorifique en équivalent énergie électrique.

2.2.2. Méthode pour la détermination des valeurs nutritives des poudres de noyaux de mangue et la caractérisation de l'huile extraite dans la poudre de noyau de mangue

a) Détermination des valeurs nutritives des poudres de noyaux de mangue

La méthode adoptée pour déterminer les valeurs nutritives des poudres de noyau de mangue et la caractérisation de l'huile extraite de ces poudres de noyau de mangue consiste respectivement à :

- Peser les noyaux de mangue ; sécher pour avoir la teneur en Matière sèche après 4 jours de séchage; broyer et tamiser les produits séchés ;
- Déterminer les valeurs nutritives du poudre de noyau de mangue en déterminant respectivement : son humidité, sa teneur en lipide, sa teneur en cendre brute, la teneur en lipide, la teneur en protéine, la teneur en glucide et la valeur énergétique.
 - Formules pour déterminer :

$$L(\%) = \frac{M3 - M1}{M2}$$

○ **Le lipide**

Avec : M1 : Masse du ballon vide M2 : Masse de la prise d'essai

M3 : Masse du ballon + prise d'essai après étuvage

○ **La Protéine**

Pour déterminer la teneur en Protéine dans un aliment, il faut d'abord déterminer la teneur en Azote dans l'aliment par méthode Kedjal et après on multiplie cette teneur en Azote par un coefficient de conversion de l'Azote qui est : 6,25.

$$\text{Ainsi, } P(\%) = N(\%) \times 6,25$$

○ **Mode de calcul de la teneur en Glucide**

Pour connaître la teneur en glucide d'un aliment, il faut connaître respectivement : la teneur en eau, en protéine, en lipide et en cendre. On peut calculer directement la teneur en glucide par la relation suivante :

$$G(\%) = 100\% - [L(\%) + P(\%) + H(\%) + C(\%)]$$

Avec G(%) : Teneur en glucide, L(%) : Teneur en lipide ; P(%) : Teneur en protéine ; H(%) : Teneur en eau et C(%) : Teneur en cendre

○ **Mesure de la valeur énergétique dans la poudre de noyau de mangue**

La valeur énergétique d'un aliment provient de l'énergie libérée par ses nutriments au cours de leur métabolisme. D'après les travaux d'Atwater [6], on admet que l'énergie libérée par le métabolisme est de 4 kcal/g pour les glucides et les protéines, 9 kcal/g pour les lipides et 7 kcal/g pour l'alcool.

Les compilateurs de tables de composition ont pendant longtemps affecté aux teneurs d'un aliment en glucides, protéines, lipides et alcool ces fameux coefficients et calculé la somme des résultats pour obtenir sa valeur énergétique. Le tableau 3 informe les Coefficients de conversion en énergie applicables à tous les aliments, en kilocalories et kiloJoules par gramme.

Tableau 3: Coefficients de conversion en énergie applicables à tous les aliments, en kilocalories et kiloJoules par gramme.

	kcal/g	kJ/g
Protéines	4,00	17,0
Lipides	9,00	37,0
Glucides disponibles	3,75	16,0
Ethanol	7,00	29,0
Acide acétique	3,50	15,0
Acide citrique	2,50	10,0
Acide lactique	3,60	15,0
Acide malique	2,40	10,0

En appliquant la relation suivante :

Valeur Energétique (VE) dans poudre de noyau de mangue = $G(\%) \times 4 + L(\%) \times 9 + P(\%) \times 4$ et en tenant compte de la valeur de la teneur en glucide, en lipide et en protéine dans les noyaux de mangue.

b) Extraction de l'huile par méthode Soxhlet dans la poudre de noyaux de mangue et détermination de ses caractères physico chimiques.

- **Extraction de l'huile par méthode Soxhlet**

L'extraction de l'huile se fait par soxhlet, c'est-à-dire extraction de l'huile par solvant qui est l'hexane. Il faut passer par la distillation de l'hexane qui n'est pas pure pour avoir de l'hexane pure, puis à l'évaporation pour séparer le mélange liquide (huile+hexane).



Photo 4 : Mélange liquide (Huile + hexane)

- **Evaporation**

Afin de séparer ce mélange liquide (Huile + hexane), il faut passer à l'évaporation de ce mélange.

A la fin de cette opération, l'hexane et l'huile sont bien séparés. On obtient 02 variétés d'huile : l'huile claire et l'huile trouble.

- **Détermination des caractères physico chimiques de l'huile de poudre de noyau de mangue**

La caractérisation physico chimique de l'huile des poudres des noyaux de mangue dans ce travail est focalisée à la détermination de l'indice de réfraction et la détermination de la densité relative.

- **Indice de réfraction**

C'est à partir des essais d'expérimentation, qu'on peut tirer la relation entre la température et l'indice de réfraction.

○ **Densité relative (NFT 75-11)**

La densité relative de l'huile peut être obtenue en appliquant la formule ci-dessous :

$$d = \frac{M2 - M0}{M1 - M0} + 0,0007 (t-20)$$

Mo : Masse du pycnomètre vide

M1 : Masse du pycnomètre + eau distillée M2 : Masse du pycnomètre + huile

2.2.3. Détermination des indices physico chimique de l'huile de noyau de mangue

Les analyses physico-chimiques ont été réalisées conformément aux méthodes standards de l'Association of Official Analytical Chemists (AOAC) et de l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (IUPAC). Ces indices comprennent respectivement : l'indice de saponification, l'indice d'acide, l'indice d'ester, l'indice d'iode et l'indice de peroxyde.

a. Indice de saponification (IS)

L'indice de saponification correspond à la quantité de KOH (mg) nécessaire pour saponifier 1 g d'huile. Il renseigne sur la longueur moyenne des chaînes d'acides gras.

• Procédure expérimentale :

Environ 2 g d'huile ont été pesés avec précision dans un ballon à fond rond. Vingt-cinq millilitres de solution alcoolique de KOH 0,5 N ont été ajoutés, puis le mélange a été chauffé sous reflux pendant 30 minutes. Après refroidissement, l'excès de KOH a été titré par une solution d'acide chlorhydrique (HCl) 0,5 N en présence de phénolphthaléine comme indicateur. Un essai à blanc a été réalisé dans les mêmes conditions.

$$\text{Formule : IS (mg KOH/g)} = [(Vb - Vs) \times N \times 56,1] / m$$

b. Indice d'acide (IA)

L'indice d'acide mesure la quantité d'acides gras libres présents dans l'huile, traduisant son degré d'hydrolyse.

• Procédure expérimentale :

Cinq grammes d'huile ont été dissous dans un mélange éthanol-éther (1:1, v/v). Après addition de quelques gouttes de phénolphthaléine, la solution a été titrée par une solution de KOH 0,1 N jusqu'à l'apparition d'une coloration rose persistante.

$$\text{Formule : IA (mg KOH/g)} = (V \times N \times 56,1) / m$$

• Interprétation sur le plan alimentaire

Le tableau 4 présente les différentes valeurs d'indice d'acide

Tableau 4 : Valeurs de l'indice d'Acide

Indice d'acide	Interprétation	source
< 0,6 mg KOH/g	Huile vierge de très bonne qualité	Codex Alimentarius Commission. (2019). Standard for named vegetable oils (CODEX STAN 210-1999). FAO/WHO.
0,6 – 4	Acceptable pour alimentation	Codex Alimentarius Commission. (2019). Standard for named vegetable oils (CODEX STAN 210-1999). FAO/WHO.
> 4	Dégradation avancée	1. Shahidi, F., & Zhong, Y. (2010). Lipid oxidation and improving the oxidative stability. Chemical Society Reviews, 39(11), 4067–4079. 2. Gunstone, F. D., Harwood, J. L., & Dijkstra, A. J. (2007). The lipid handbook (3rd ed.). CRC Press.

Pour le cas de l'huile de noyau de mangue alimentaire, la valeur de l'Indice d'Acide :

IA ≤ 2 mg KOH/g est recommandée.

c. Indice d'ester (IE)

L'indice d'ester correspond à la fraction estérifiée des acides gras de l'huile.

- **Procédure expérimentale**

Il faut procéder par la méthode suivante en connaissant l'indice de saponification (IS) et l'indice d'Acide (IA) et faire la différence entre eux.

Formule : IE (mg KOH/g) = IS – IA

- **Interprétation alimentaire**

- **1^{er} cas : si : IE élevé :**
 - La Majorité des acides gras sont sous forme de triglycérides ou
 - On a une Bonne qualité nutritionnelle
- **2^{ème} cas : si : IE faible :**
 - hydrolyse, rancissement ou mauvais stockage

d. Indice d'Iode (II)

L'indice d'iode exprime le degré d'insaturation de l'huile par la quantité d'iode fixée par les doubles liaisons des acides gras.

- **Procédure expérimentale**

Environ 0,2 g d'huile ont été dissous dans du chloroforme, puis un excès de réactif de Wijs a été ajouté. Le mélange a été laissé à l'obscurité pendant 30 minutes. Une solution de KI a ensuite été ajoutée et l'iode libéré a été titré par une solution de thiosulfate de sodium (Na₂S₂O₃) 0,1 N, en présence d'amidon comme indicateur.

- **Interprétation alimentaire**

Le tableau 5 informe les différentes valeurs de l'Indice d'Iode

Tableau 5 : Valeurs de l'Indice d'Iode

Indice d'iode	Signification	Source
< 40	Huile très saturée	ISO. (2018). ISO 3961: Animal and vegetable fats and oils — Determination of iodine value. International Organization for Standardization.
40–60	Équilibre nutritionnel idéal ✓□	Gunstone, F. D., Harwood, J. L., & Dijkstra, A. J. (2007). The lipid handbook (3rd ed.). CRC Press
> 100	Très insaturée, oxydation rapide	Choe, E., & Min, D. B. (2006). Mechanisms and factors for edible oil oxidation. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 5(4), 169–186

L'huile de noyau de est nutritionnellement équilibrée et stable à la cuisson douce car mangue car l'indice d'Iode (II) dispose de la valeur comprise entre (40–55).

e. Indice de Peroxyde (IP)

L'indice de peroxyde mesure la concentration des hydroperoxydes, premiers produits de l'oxydation lipidique.

- **Procédure expérimentale**

Cinq grammes d'huile ont été dissous dans un mélange acide acétique–chloroforme (3:2, v/v). Après addition de solution saturée de KI, le mélange a été maintenu à l'obscurité pendant une minute. De l'eau distillée a ensuite été ajoutée et l'iode libéré a été titré par une solution de thiosulfate de sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0,01 N en présence d'amidon.

- **Interprétation alimentaire**

Le tableau 6 informe les différentes qualités de l'huile

Tableau 6 : Valeurs des qualités de l'huile

Indice de peroxyde (meq O_2/kg)	Qualité	source
< 5	Huile fraîche ✓	ISO. (2018). ISO 3961: Animal and vegetable fats and oils — Determination of iodine value. International Organization for Standardization.
5–10	Début d'oxydation	Choe, E., & Min, D. B. (2006). Mechanisms and factors for edible oil oxidation. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 5(4), 169–186
> 10	Rancissement	Gunstone, F. D., Harwood, J. L., & Dijkstra, A. J. (2007). The lipid handbook (3rd ed.). CRC Press

Pour consommation humaine, $\text{IP} \leq 5 \text{ meq } \text{O}_2/\text{kg}$ est fortement recommandé.

2.2.4. Production de biodiesel et évaluation de son potentiel énergétique par rapport à l'huile de noyau de mangue dans les déchets durant les 5 campagnes de production de MPE.

a. Production de biodiesel

La production de biodiesel sera connue une fois qu'on connaît le PCI biodiesel et la quantité d'huile obtenue à partir des 248,2 t de noyau de mangue. Par contre, il faut convertir en énergie électrique utile parce qu'il faut tenir compte non seulement le rendement du moteur de l'ordre de 35% mais aussi l'équivalence en kwh d'1 kg d'huile car : 1kg d'huile = 9,76 kwh ce qui devient aussi à 3,416 car le rendement du moteur est de 35%, soit : $9,76 \text{ kwh} \times 0,35 = 3,416 \text{ kwh}$.

Donc, **Potentiel énergétique sous forme de biodiesel = quantité huile x 3,416 kwh utiles.**

3. Résultats

Les résultats de ce travail sont subdivisés en deux parties :

- 1^{ère} partie : Résultats de la valorisation du noyau de litchi mettant en évidence :
 - la production de biochar,
 - la détermination des caractères physico chimiques du biochar ;
 - l'évaluation du potentiel énergétique du biochar
- 2^{ème} partie : Résultat de la valorisation du noyau de mangue mettant en exergue :
 - La détermination des valeurs nutritives de poudre de noyau de mangue,
 - l'extraction de l'huile de poudre de noyau de mangue,
 - la détermination des caractères physico chimiques de l'huile ;
 - la détermination des indices physico chimiques de l'huile
 - la détermination de la production de biodiesel
 - l'évaluation du potentiel énergétique en biodiesel de l'huile de noyau de mangue obtenue à partir des 248,2 t de noyaux

3.1. Résultats des caractères physico chimiques du biochar

3.1.1. Taux d'humidité

Le tableau 7 informe la teneur moyenne en humidité

	Taux d'humidité (TH)
	Noyau du litchi
N° 01	7,03
N° 02	8,65
Moyenne	7,84

En moyenne, le taux d'humidité est de 7,84%

3.1.2. Taux de Matière Volatile

Le tableau 8 informe la teneur moyenne en Matière volatile

	Teneur en matière volatile (MV%)
	Noyau du litchi
N° 01	20,6
N° 02	21,49
Moyenne	21,045

En moyenne, le taux de Matière Volatile est de 21,045%

3.1.3. Taux en Cendre

Le tableau 9 informe la teneur moyenne en Cendre

	Teneur en cendres (%)
	Noyau du litchi
N° 01	20,37
N° 02	21,2
Moyenne	20,785

En moyenne, le taux de Cendre est de 20,78%

3.1.4. Taux en carbone fixe

Le tableau 10 informe la teneur moyenne en Carbone fixe

	Teneur en carbone fixe (%)
	Noyau du litchi
N° 01	50,33
N° 02	51,05
Moyenne	50,69

En moyenne, le taux de Cendre est de 50,69%

Selon les différents essais effectués des briquettes des déchets de fruit, la valeur du PCI moyen est appliquant la formule de CASSAN suivante : $PCI = 80 (100 - C)$. Où : C = teneur en cendre (%) et PCI (Kcal/kg).

3.1.5. Pouvoir calorifique Inférieur (PCI)

Le tableau 11 informe le Pouvoir calorifique Inférieur (PCI)

	PCI moyen (Kcal/kg)
	Noyau du litchi
N° 01	6370,4
N° 02	6304
Moyenne	6337,2

La valeur du pouvoir calorifique inférieur (PCI) du biochar de noyau de litchi de 6337,2 kcal/kg montre que ce biochar peut concurrencer le charbon de bois d'eucalyptus avec son PCI de 6700 kcal/kg. Son adoption au niveau des ménages aura certainement un impact sur la réduction de la pression sur les ressources forestières.

3.1.6. Evaluation du potentiel énergétique en biochar à partir des 1608,8 t de déchets de noyau de litchi

Puisque le PCI biochar est de 6337,2 kcal/kg et que la totalité des déchets de noyau de litchi est de 1608,2 t, l'énergie

calorifique obtenue est de : $6337,2 \times 1608800 \text{ kg} = 10195287360 \text{ kcal}$.

En utilisant le facteur de conversion de l'énergie calorifique en énergie électrique, 1 Kilocalories = 0,0012 Kilowatt heures, on a donc en faisant le calcul :

$$10195287360 \times 0,0012 = 12234344,8 \text{ kwh}$$

Donc, le potentiel en énergie électrique du biochar est de : 12234344,8 kwh ou **12234,344 Mwh**

3.2. Résultats de la valorisation du noyau de mangue

3.2.1. La détermination des valeurs nutritives de poudre de noyau de mangue

La détermination des valeurs nutritives de poudre de noyau de mangue consiste respectivement à déterminer : la teneur en humidité, la teneur en cendre, la teneur en lipide, la teneur en protéine et la teneur en glucide. C'est à partir de la détermination de ces différentes teneurs qu'on peut connaître la valeur nutritive de la poudre de noyau de mangue

3.2.1.1. Teneur en humidité

Deux essais d'expérimentation ont été réalisés pour déterminer l'humidité des deux échantillons et évidemment la teneur en Matière sèche (MS)

Tableau 12 : Résultat de la teneur en Matière sèche (MS)

Capsule	MS(%)
1	6,12
2	6,14
Moyenne	6,13

Les deux prises d'essai de cette analyse montrent que la teneur en matière sèche de la poudre de noyau de la mangue est environ 6,13%.

3.2.1.2. Teneur en Cendre

Calcul de la teneur en cendre C(%) est obtenu en appliquant la formule suivante:

$$C(\%) = \frac{C3 - C1}{C2} \times 100$$

C1 : Masse de la capsule vide en g C2 : Masse de l'échantillon en g

C3 : Masse de la capsule + échantillons après étuvage en g

Tableau 13 : Résultat de la teneur en cendre des deux échantillons incinérés

Echantillon	C(%)
1	2,1321
2	2,135
Moyenne	2,134

D'après ces procédés, on trouve que la teneur en cendre brute de la poudre du noyau de la mangue est 2,1335%.

3.2.1.3. Teneur en Lipide

Après pesage à vide et pesage avec échantillon dans la capsule

Tableau 14 : Résultat de mesure ballon vide et prise d'essai

	Masse (en g)
Ballon vide	11,7635
Prise d'essai	5,3037

On pèse ce ballon après étuvage. On trouve 112,2383g (ballon + après étuvage) Calcul du pourcentage du lipide est obtenu en appliquant la formule :

$$L (\%) = \frac{M3-M1}{M2} \times 100$$

M1 : Masse du ballon vide M2 : Masse de la prise d'essai

M3 : Masse du ballon + prise d'essai après étuvage

Ainsi, la teneur en matière grasse (lipide) contenue dans la poudre du noyau de mangue est de 8,9522%.

3.2.1.4. Teneur en Protéine

L'objectif de cette analyse est de chercher la teneur en protéine contenu dans la poudre de noyau de mangue. Pour savoir la teneur en protéine, il faut d'abord chercher la teneur en azote N dans la poudre par la méthode Keidjall et après on multiplie par le coefficient de conversion de l'azote qui est : 6,25. Lecture de la burette : Détermination du volume de la solution utilisée durant la période de la titration (Volume de la chute de burette)

Tableau 15 : Résultat du volume de chute de burette

Echantillon	Volume de la chute de burette (ml)
1	3,7
2	4

On applique la relation suivante :

$$N(\%) = \frac{V \times M \times 100 \times 0.001 \times n}{m}$$

Avec : N(%) : Teneur en azote

V : Volume de la chute de burette M : Masse molaire de l'azote

n : Normalité de la solution d'acide sulfurique (0,109N) m : Masse de la prise d'essai

Tableau 16 : Résultat de la teneur en Azote

Echantillon	N(%)
1	1,1087
2	1,1155
Moyenne	1,1121

Alors, la moyenne de la teneur en azote est 1,1121%

Donc, on peut calculer la teneur en protéine par la relation suivante :

$$P(\%) = N(\%) \times 6,25 = 6,9506\%$$

P(%) : Teneur en protéine

6,25: C'est le coefficient de conversion de l'azote

3.2.1.5. Teneur en Glucide

Une fois qu'on connaît la teneur en lipide, en protéine, en eau et en cendre, la teneur en glucide est connue en appliquant la relation suivante :

$$\text{Formule : } G(\%) = 100\% - [L(\%) + P(\%) + H(\%) + C(\%)]$$

Après calcul, la teneur en glucide est de :

$$G(\%) = 100\% - [L(\%) + P(\%) + H(\%) + C(\%)] = 75,8337\%$$

La teneur en glucide contenu dans la poudre de noyau de mangue est 75,8331%

3.2.1.6. Détermination de la valeur énergétique dans la poudre de noyaux de mangue

En tenant compte de la valeur des coefficients de conversion en énergie applicables à tous les aliments, en kilocalories et kiloJoules par gramme ci-dessous :

- 1g de lipide = 9 Kcal
- 1g de protéine = 4 Kcal
- 1g de glucide = 4 Kcal

Ainsi, on a pu obtenir la valeur énergétique : (VE) = 411,7046/100 g. Ce qui signifie que la valeur énergétique dans la poudre de noyaux de mangue est de 441,7046 kcals dans 100 g de poudre du noyau de mangue.

3.2.2. Résultat de l'Extraction de l'huile de poudre de noyau de mangue

Afin de séparer ce mélange liquide (Huile + hexane), il faut passer à l'évaporation de ce mélange. A la fin de cette opération, l'hexane et l'huile sont bien séparés. On obtient 02 variétés d'huile :

- L'huile claire qui représente 75 à 80% d'huile totale
- L'huile trouble qui représente 20 à 25% d'huile totale Ainsi, le rendement d'huile totale varie entre 7 à 9%.

3.2.3. Résultat de la détermination des composants chimiques de l'huile de poudre de noyau de mangue

L'analyse chromatographique des échantillons d'huile de poudre de noyau de mangue a informé les composés chimiques dans l'échantillon de poudre de noyau de mangue. Le tableau 15 récapitule les différents composés chimiques dans l'huile de la poudre de noyau de mangue.

Tableau 17 : Récapitulatif des composants de l'huile de noyau de mangue par analyse chromatographie

Acide gras	Symbole	Echantillon (%)	Valeur indicative (1) (%)	Valeur indicative (2) (%)
Acide palmitique	16 :0	7,15	8,55	5 à 8
Acide palmitoleique	16 :1w9	0,17		
Acide stéarique	18 :0	38,97	41,61	30 à 40
Acide oléique	18 :1w9	42,87	41,03	30 à 45
Acide linoléique	18 :2w6	7,91		
Acide linoléique	18 :3w3	0,56		
Acide arachidique	20 :0	1,64		
Acide Gandoleique	20 :1w9	0,17		

(1) Beurre végétale de mangue, AROMA-ZONE-2015

(2) Beurre de mangue : COMPAGNIE DES SENS

3.2.4. Résultat de la détermination des caractères physico chimiques de l'huile

La caractérisation physico chimique de l'huile des poudres des noyaux de mangue dans ce travail est focalisée à la détermination de l'indice de réfraction et la détermination de la densité relative.

3.2.4.1. Indice de réfraction

Après des essais d'expérimentation, les résultats sont récapitulés dans le tableau 13 après avoir appliqué la relation suivante :

$$n = nt' + 0,0004(t' - 20)$$

Tableau 18 : Résultat des essais de calcul des indices de réfraction

Essais	Indice de réfraction (n)	(t')Température (°C)
1	1,4622	28°C
2	1,4628	26°C
3	1,4629	27°C
Moyenne	1,4626	

Après ces opérations, on a obtenu 3 résultats plus ou moins semblables de l'indice de réfraction avec une moyenne de 1,4626 pour une température de 26°C à 28°C.

3.2.4.2. Densité relative (NFT 75-11)

C'est le Rapport de la masse d'un certain volume de l'échantillon d'huile à 20°C et la masse d'un égal volume d'eau distillée à 20°C. La mesure de la densité relative a été effectuée en utilisant un pycnomètre de 10ml.

En appliquant la relation permettant de calculer la densité, on a :

$$d = \frac{M2 - M0}{M1 - M0} + 0,0007 (t-20)$$

Mo : Masse du pycnomètre vide

M1 : Masse du pycnomètre + eau distillé M2 : Masse du pycnomètre + huile

Tableau 19: Résultats des essais d'expérimentation

Essais	m (g)	t(°C)	d ²⁰ ₂₀
1	6,0286	27	0,9222
2	6,0248	28	0,9068
3	6,0242	28	0,9057

3.2.4.3. Résultat de la détermination des indices physico chimiques de l'huile

Les analyses physico-chimiques ont été réalisées conformément aux méthodes standards de l'Association of Official Analytical Chemists (AOAC) et de l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (IUPAC).

Le tableau 20 récapitule les résultats des travaux de laboratoire pour la détermination respective des indices de saponification, d'acide, d'ester, d'iode et de peroxyde.

Tableau 20 : Récapitule les résultats des indices physico chimiques de l'huile de noyau de mangue

Indice	Unité	Valeur obtenue	Normes alimentaires
Indice de saponification	mg KOH/g	193,4 ± 1,8	180–210
Indice d'acide	mg KOH/g	1,25 ± 0,10	≤ 4,0
Indice d'ester	mg KOH/g	192,2 ± 1,7	Élevé attendu
Indice d'iode	g I ₂ /100g	48,6 ± 1,2	40–60
Indice de peroxyde	meq O ₂ /kg	2,8 ± 0,3	≤ 10

Ce tableau montre que l'huile de noyau de mangue satisfait aux normes internationales de qualité pour un usage alimentaire.

3.2.4.4. Résultat de la production de biodiesel et de l'évaluation du potentiel en énergie électrique du biodiesel à partir de l'huile obtenue des 248,2 t de noyaux de mangue

a. Production de biodiesel

La production de biodiesel sera connue une fois qu'on connaît le PCI biodiesel et la quantité d'huile obtenue à partir des 248,2 t de noyau de mangue. Par contre, il faut convertir en énergie électrique utile parce qu'il faut tenir compte non seulement le rendement du moteur de l'ordre de 35% mais aussi l'équivalence en kwh d'1 kg d'huile car : 1kg d'huile = 9,76 kwh ce qui devient aussi à 3,416 car le rendement du moteur est de 35%, soit : 9,76 kwh x 0,35 = 3,416 kwh.

Donc, **Potentiel énergétique sous forme de biodiesel = quantité huile x 3,416 kwh utiles.**

En tenant compte que le pouvoir calorifique inférieur du biodiesel (esters méthyliques d'acides gras) est généralement compris entre 36,5 et 37,5 MJ/kg, avec une valeur moyenne de 37 MJ/kg largement retenue dans la littérature et les normes internationales, en raison de la présence d'oxygène dans sa structure moléculaire (Knothe et al., 2010 ; Demirbas, 2008). Et en

tenant compte que le rendement de transestérification est de 95% c'est-à-dire que 1 kg d'huile produit 0,95 kg de biodiesel, donc le PCI Biodiesel (MJ/kg) est devenu : $37 \times 0,95 = 35,15$ MJ. Cela signifie que 1 kg d'huile de noyau de mangue permet de produire 35,15 MJ d'énergie sous forme de biodiesel.

De plus, la quantité de noyau de mangue de MPE pour les 5 campagnes est évaluée à 248,2 t et le volume obtenu à partir de ces 248,2 t est de 6298,075 kg puisque selon les résultats des essais de laboratoire, montrant que pour : « **8 kg de noyau de mangue on pourrait obtenir 2,9 kg de poudre de noyau de mangue et 0,203 kg d'huile pour un rendement de 7% par rapport à la poudre de noyau de mangue** », donc : en faisant le calcul, on a :

$248200 \times 0,203 \text{ kg} / 8 \text{ kg} = 6298,075 \text{ kg}$ d'huile de noyau de mangue.

Puisque le PCI biodiesel est de 35,15 MJ/kg, signifiant que 1 kg d'huile de noyau de mangue permet de produire 35,15 MJ, donc, pour les 6298,075 kg d'huile, on aura donc en faisant le calcul :

$6298,075 \times 35,15 \text{ MJ/kg} = 221377,3363 \text{ MJ}$ d'énergie sous forme de biodiesel.

En convertissant sous forme d'énergie électrique utile, il faut tenir compte que : 1 kg d'huile = 9,76 kwh et pour un rendement du moteur de 35%, on aura donc : $9,76 \text{ kwh} \times 0,35 = 3,416 \text{ kwh}$ signifiant que 1 kg d'huile produit une énergie électrique utile de 3,416 kwh..

Ainsi, le potentiel en énergie électrique utile de l'huile est de :

$6298,075 \text{ kg d'huile} \times 3,416 = 21514,2242 \text{ kwh}$, soit : **21,514 Mwh**

3.2.5. Energie électrique totale obtenue à partir biochar et biodiesel

Après les différents calculs effectués sur le biochar et le biodiesel, on a pu déterminer respectivement :

- le potentiel en énergie électrique du biochar est de : 12234344,8 kwh ou **12234,344 Mwh**
- le potentiel en énergie électrique utile de l'huile est de : 21514,2242 kwh, soit : **21,514 Mwh** Ainsi, l'Energie électrique totale obtenue à partir biochar et biodiesel est la somme du potentiel électrique du biochar et du biodiesel, soit :

Potentiel Energie Electrique Biochar et Biodiesel = 12234,344 Mwh + 21,514 Mwh = 12255,858 Mwh

Par rapport à ce résultat, on peut dire que ce travail d'évaluation du potentiel énergétique du biochar et du biodiesel montre la dominance du biochar par rapport au biodiesel. le biodiesel joue un rôle complémentaire mais stratégique.

La valorisation énergétique de 1 608,8 tonnes de noyaux de litchi sous forme de biochar, combinée à la production de biodiesel à partir de 6 298 kg d'huile issue des noyaux de mangue, permet de générer un potentiel électrique annuel total estimé à 12 255,9 MWh. Sur le plan pratique, cette énergie est suffisante pour couvrir les besoins annuels en électricité d'environ 20 000 ménages malgaches (avec une consommation moyenne annuelle d'un ménage rural ou périurbain est de l'ordre de 500 à 700 kWh/an/ménage) tout en contribuant à la réduction des déchets agricoles, à l'amélioration de l'accès à l'énergie et au renforcement de la résilience énergétique locale.

4. Discussion

Les données de production de la société Madagascar Premium Exotica (MPE) montrent une augmentation continue des quantités de noyaux de mangue et de l'huile extraite sur la période 2019–2023. Cette croissance s'inscrit dans une dynamique positive de valorisation des déchets de fruits tropicaux, traduisant une meilleure collecte et traitement des résidus de l'industrie fruitière.

Le rendement d'extraction d'huile observé est constant autour de 2,5 %, ce qui indique que l'accroissement de la production d'huile est principalement attribuable à l'augmentation des volumes de matière première disponibles plutôt qu'à une amélioration progressive du procédé d'extraction. Cela suggère également une homogénéité de la qualité des noyaux traités sur l'ensemble des campagnes considérées.

Cependant, la tendance observée sur cinq campagnes reste insuffisante pour affirmer une croissance structurelle assurée. En effet, les systèmes agricoles tropicaux, et en particulier la culture de *Mangifera indica*, sont fortement influencés par les conditions météorologiques et climatiques, qui deviennent de plus en plus variables sous l'effet du changement climatique (Ahmed et al., 2025). Plusieurs études montrent que des variables climatiques telles que la température moyenne, les extrêmes thermiques et la répartition des précipitations influencent directement la phénologie, la floraison, le rendement fruitier et la qualité de la mangue (Ahmed et al., 2025; MDPI, 2025). Une irrégularité accrue des pluies ou une montée des températures peut entraîner des perturbations physiologiques, réduisant l'efficacité de la pollinisation et la formation des fruits, voire générer du stress hydrique susceptible de compromettre la nouaison et le remplissage des amandes (Turn0search0; Turn0search1).

Dans ce contexte, l'accroissement observé de la production d'huile à partir des noyaux de mangue pourrait ne pas se maintenir à long terme si les conditions climatiques deviennent moins favorables.

L'intégration du biochar issu des noyaux de litchi dans le mix énergétique apporte une certaine robustesse au système, car ce type de ressource énergétique est moins sensible à la variabilité climatique interannuelle que ne l'est l'huile de mangue. Le biochar peut être stocké à long terme et offre une source énergétique de base plus stable, ce qui est crucial pour assurer l'autonomie électrique de l'usine. Ainsi, la combinaison biodiesel-biochar doit être envisagée comme un système dual, où le biodiesel issu de l'huile de mangue constitue une source complémentaire et variable, tandis que le biochar représente une source de base plus résiliente.

5. Conclusion

La valorisation énergétique des déchets de mangue et de litchi pour l'autonomie électrique de l'usine MPE est techniquement faisable et présente un potentiel énergétique annuel important. Le biochar constitue une source stable, tandis que le biodiesel reste dépendant des conditions climatiques. L'intégration d'une stratégie adaptative, incluant un facteur de sécurité climatique et la diversification des intrants, est essentielle pour garantir la robustesse du système dans un contexte de changement climatique.

Référence

- [1] : Carte des 22 Régions, FTM2000, modifiée par H. Ratsimba 2015
- [2] MEI/CREAM, 2009- Monographie Atsinanana
- [3] www.scrimad.com, consulté le 19/03/23
- [4] : Répartition du commerce équitable www.ethiquable.com
- [5] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1998). Mango: Post-harvest operations. FAO.
- [6] Codex Alimentarius Commission. (2019). Standard for olive oils and olive pomace oils (CXS 33-1981). FAO/WHO
- [7] Gunstone, F. D. (2004). The chemistry of oils and fats. CRC Press.
- [8] Ahmed, M., Awan, B., Uz Zaman, B. et al. (2025). *Impact of Climate Change on Mango (Mangifera indica L.), Phenology, Yield, and Quality*. Global Res. J. Nat. Sci. Technol.
- [9] Climate-Induced Heat Stress Responses on Indigenous Varieties and Elite Hybrids of Mango. (2025). *Agriculture* (MDPI)
- [10] Assessment of the Impact of Annual Growing Conditions on the Physicochemical Properties of Mango Kernel Fat. (2025). MDPI.
- [11] Climatic vulnerability, adoption of climate-resilient technologies, and its socioeconomic-institutional-agroecological determinants. (2023). Climate Services, 32, 100414.