

UNA ALIMENTACIÓN SANA Y SOSTENIBLE ES POSIBLE: DISEÑO DE MENÚS PERSONALIZADOS CON PROGRAMACIÓN MULTIOBJETIVO

FRANCISCO MARTOS-BARRACHINA

fmeco@uma.es

Universidad de Málaga, Programa de Doctorado de Economía y Empresa, Departamento de Economía Aplicada (Matemáticas)

Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Campus de Ejido, Málaga

Recibido (29/07/2024)

Revisado (04/10/2024)

Aceptado (07/10/2024)

RESUMEN: En las últimas décadas, los hábitos de consumo propios de los países europeos han sido reemplazados por alternativas menos saludables. Además existe una creciente preocupación por definir sistemas alimentarios sostenibles, reflejados en los Objetivos de Desarrollo Sostenibles incluidos en la Agenda 2030.

En este trabajo, se propone un modelo de optimización multiobjetivo para el diseño de menús individuales, dentro del marco de costumbres españolas. Éstos deben ajustarse a ciertas condiciones saludables (nutricionales y derivadas de la dieta Mediterránea), a la vez que se minimiza el coste y las emisiones de gases de efecto invernadero, tratando de mantenerse lo más similar posible a un menú de partida.

Para resolver este problema combinatorio se aplican estrategias metaheurísticas (GRASP e ILS) que permiten generar una extensa frontera de Pareto. Cada una de las soluciones eficientes que definen esta frontera de Pareto, representa un menú saludable. Además, en este caso concreto, se obtuvieron más de mil menús eficientes, los cuales son alternativas más sostenibles y económicas que el menú de partida.

Palabras Clave: Diseño de Menús, Modelo combinatorio, Metaheurísticas, Palatabilidad, Sostenibilidad, Salud

ABSTRACT: In recent decades, dietary patterns among European countries have been replaced by less healthy alternatives. In addition, there is a growing concern to define sustainable food systems, reflected in the 2030 Sustainable Development Goals.

In this paper, we propose a multi-objective optimization model for the design of individual menus, within the framework of Spanish customs. These must be adjusted to certain healthy conditions (nutritional and derived from the Mediterranean diet), while minimizing the cost and greenhouse gas emissions, trying to remain as similar as possible to a starting menu.

To solve this combinatorial problem, metaheuristic strategies (GRASP and ILS) are applied to generate an extensive Pareto boundary. Each of the efficient solutions that define this Pareto front represents a healthy menu. In addition, in this specific case, more than a thousand efficient menus were obtained, which are more sustainable and economical alternatives to the starting menu.

Keywords: Menu Planning Problem, Combinatorial model, Metaheuristics, Palatability, Sustainability, Health

1. Introducción

La dieta juega un papel clave en nuestras vidas. Tanto, que cada vez son más los estudios que indican que los hábitos de alimentación son uno de los principales factores de riesgo de muerte prematura e invalidez en el mundo (Afshin et al., 2019). Además, las dietas tradicionales están perdiendo fuerza en las culturas europeas, siendo reemplazadas por alternativas menos saludables pero con elementos más económicos. Se han sustituido las dietas con más arraigo regional, algunas tan bien consideradas como la *Dieta Mediterránea*, por un patrón alternativo más global repleto de alimentos procesados y que puede tener efectos negativos en nuestra salud. La tendencia de consumo actual muestra un consumo excesivo de alimentos de la era industrial, que incluyen productos lácteos, cereales, azúcares y aceites vegetales refinados, carnes grasas, sal, y una combinación de estos alimentos (Cordain et al., 2005) que en la mayoría de países occidentales es predominante. En esta línea, Johnston et al. (2014) afirma que "Hay un aumento sin precedentes en la prevalencia de obesidad, y por tanto, en enfermedades no contagiosas como enfermedades cardiovasculares, diabetes e hipertensión". Y es que, en los países más desarrollados del mundo, a pesar de la amplia disponibilidad de guías de alimentación y de salud, y del alto grado de educación de sus ciudadanos acerca de la alimentación, los casos de obesidad y malnutrición siguen aumentando. Esta situación nos lleva a preguntarnos *¿por qué no adoptamos hábitos de vida más saludable?*

El diseño de dietas humanas resulta un proceso complejo por la gran cantidad de factores a tener en cuenta. Que la dieta sea saludable (nutricionalmente adecuada y con buenos resultados en su impacto en nuestra salud) y asequible (que podamos pagarla) es sólo el primer paso. La salubridad de una dieta es quizá el tema que históricamente más ha tratado la bibliografía científica. En general, la creación de dietas se ha trabajado de forma que se ajusten a los requisitos nutricionales y que sean compatibles con distintas enfermedades que limitan las posibilidades alimenticias de los pacientes (Snorgaard et al., 2017). No es de extrañar entonces que se intenten diseñar dietas que cumplan una serie de condiciones. Las características deseadas más estudiadas han sido tradicionalmente dos: coste y nutrición. Con ello, se definía un problema de optimización sencillo, en el que los requisitos nutricionales se tomaban como restricciones del modelo y se minimizaba el coste de la dieta. George J. Stigler, en 1945, fue pionero en el desarrollo de un modelo matemático que formulase este problema con el objeto de proporcionar dietas nutritivas con un coste mínimo. Su artículo "*The Cost of Subsistence*" (Stigler, 1945), reconocía el trabajo previo realizado por diversos nutricionistas que habían tratado de diseñar dietas nutritivas y baratas ad-hoc, pero su modelo conseguía un coste mucho menor que sus antecesores sin dejar de lado los requisitos nutricionales deseados.

Desde entonces, se han desarrollado una gran multitud de modelos que pueden clasificarse en cuatro grandes grupos, según el aspecto en que se centra:

- Modelos que minimizan el coste de la dieta (Bai et al., 2021).
- Modelos que maximizan la palatabilidad (Haigh et al., 2022).
- Modelos que minimizan el impacto ambiental (Benvenuti et al., 2019).
- Modelos que aúnan varios de estos objetivos (Martos-Barrachina et al., 2023).

En los últimos años, los patrones alimenticios en España han evolucionado de la tradicional Dieta Mediterránea, considerada uno de los pilares de la cultura española (Martos-Barrachina et al., 2019). Como se refleja en la Tabla 1, estos cambios recogen un incremento en el consumo de procesados y azúcares, así como se reduce la ingesta de frutas, verduras y otros cereales que, en su momento, fueron la base de la Dieta Mediterránea.

Con el fin de mejorar ciertos aspectos de la sanidad pública, esto implica la idea de fomentar el consumo de alimentos tradicionales propios de la zona mediterránea, como frutas, verduras, cereales integrales y aceite de oliva, a la vez que se reduce el consumo de alimentos procesados

Tabla 1. Comparación de la situación actual en España, frente a la recomendación de la Dieta Mediterránea.

Grupo	Recomendado	Dieta Española
Carbohidratos	55 % - 60 % del total de energía	Por debajo de lo recomendado (max. 45 %)
Azúcar	≤ 10 % del consumo calórico total	16 % del la kilocalorías consumidas
Sal	≤ 5 gramos al día	8 gramos al día
Frutas y Verdura	≥ 400 gramos al día	≤ 400 gr.
Lácteos	consumo moderado	300 gr. (aprox)
Proteína	10 % - 15 % de la energía total	15 % - 17 % de la energía total
Grasas	alrededor de 30 % del consumo total de calorías	38 % del total calórico consumido
Alcohol	moderado o nulo	2 % del total de calorías consumida.

con alto contenido en azúcares y grasas no saludables. Además es cuestión, también, de promover hábitos de alimentación saludable en edad temprana y asegurar opciones de alimentos nutritivos a un precio más económico. De esta forma, implementando estrategias comprensivas y basadas en la evidencia, España tiene potencia para reconducir la tendencia negativa hacia hábitos de vida más saludable con dietas sostenibles.

Recientemente, se ha incorporado a la Agenda 2030 el desafío de avanzar hacia sistemas alimentarios sostenibles¹. Concretamente, el ODS 2 hace un llamamiento para poner fin al hambre y a todas las formas de malnutrición, e incorpora algunas metas que tratan específicamente "la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos, el mantenimiento de los ecosistemas, la adaptación al cambio climático, la mejora de la calidad de los suelos o la conservación de la biodiversidad". También otros ODS plantean desafíos relacionados como la reducción del desperdicio alimentario (ODS 12), hacer sostenible la explotación pesquera (ODS 14 y 6), preservar los ecosistemas terrestres y luchar contra la desertificación (ODS 15), entre otros. La sostenibilidad de nuestra alimentación tiene también ramificaciones que tratan de cuestiones tan diversas como la adecuada gestión del agua, el espacio y la energía, la situación sanitaria, la igualdad de género o el empleo decente. Por tanto, la manera en que se enfoquen todos estos objetivos repercutirá en las posibilidades de acabar con el hambre y con todas las formas de malnutrición.

La necesidad de transitar hacia pautas de consumo y sistemas alimentarios más sostenibles cobró importancia en los años 80, y parece cada vez más evidente, pero lograrlo representa un desafío mayúsculo. La lucha contra la pobreza, que toma forma como primer objetivo de desarrollo sostenible (ODS 1), implica un retroceso paulatino en el interés por las dietas sostenibles y las zonas agro-ecológicas, con el planteamiento que tienen en ese momento. En el contexto actual se produce un retorno a la idea de que la sostenibilidad es un rasgo imprescindible en los sistemas de producción, distribución y consumo de alimentos. En el contexto europeo, es cada vez más frecuente el interés en promover políticas de actuación que nos lleven hacia una alimentación más sostenible, saludable, nutritiva y económica (Rutten et al., 2018).

Existen diversos trabajos que abordan esta problemática, que aún el impacto ambiental y el económico de las dietas simultáneamente. Así, Macdiarmid et al. (2012) proponen un modelo lineal que muestra que la población -este modelo fue resuelto con datos de Reino Unido- puede seguir una dieta saludable que, sin ningún coste adicional, consigue reducir las emisiones de gases con efecto invernadero. Otros se limitan a introducir cotas sobre factores ligados al impacto ambiental, como Wilson et al. (2013) para Nueva Zelanda, van Dooren and Aiking (2015) para Dinamarca y Horgan et al. (2016) para Reino Unido. Los dos últimos buscan minimizar los cambios en una dieta concreta, introduciendo otro de los objetivos clave, la palatabilidad. Donati et al. (2016) consideran seis escenarios en función del objetivo perseguido en el modelo lineal planteado: la minimización del coste total de la dieta, la minimización de las emisiones de dióxido de carbono, la minimización del

¹<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

consumo de agua, la minimización de la huella ecológica, la simultánea minimización de estos tres últimos objetivos -por una mera agregación- y, por último, la minimización de los tres objetivos medio ambientales y el económico. El problema es resuelto mediante la agregación de todos los objetivos, considerando que el económico tiene la misma importancia que la suma de los tres objetivos medioambientales.

En este contexto, surge de manera natural el planteamiento de modelos multiobjetivo con el fin de diseñar dietas alineadas con objetivos nutritivos, medioambientales y económicos. Todos ellos, confluyen en el trabajo de Mertens et al. (2016), que presenta un nuevo concepto de dieta, definida sobre distintas dimensiones: sostenible ambientalmente, saludable, accesible para consumidores y que apoya también al sector agrícola, segura y estable en su oferta, y acorde con las preferencias alimentarias. A éstas, por sus siglas en inglés, las denominamos **dietas SHARP** (Sustainable, Healthy, Affordable, Reliable, Palatable).

- *S: Sostenible* implica el uso de recursos que no se ponga en riesgo el bienestar de futuras generaciones (Temme et al., 2014; Horgan et al., 2016; Perignon et al., 2016; Springmann et al., 2018; Gustafson et al., 2022; Macdiarmid et al., 2012).
- *H: Saludable* en el sentido de que sean nutritivas y tengan un efecto positivo sobre nuestra salud (Martos-Barrachina et al., 2022).
- *A: Asequible* se refiere a que sean asequibles para la población europea, independientemente del nivel de renta (Herforth et al., 2020; Dorward, 2013; Drewnowski, 2010).
- *R: Fiable* indica seguridad alimentaria y estabilidad en la cadena de suministros (Pool and Dooris, 2021).
- *P: Palatable* con consistencia con las normas culturales y las preferencias de la población y/o individuo (Anguah et al., 2017; van Bussel et al., 2019; Marty et al., 2022; Duckworth et al., 2022; Färe et al., 2011; Kanellopoulos et al., 2020).

De esta forma, las dietas SHARP deberían generar opciones de un consumo sostenible, a la vez que nutricionalmente seguro y que pueda ser aplicado en cualquier ámbito o contexto. El interés científico por este tema y la vigencia que tiene es palpable. Un buen ejemplo es SUSFANS, un equipo europeo multidisciplinar de trabajo en el campo de la alimentación. Su trabajo tiene tres pilares fundamentales en el ámbito de la Unión Europea: el asesoramiento sobre seguridad alimentaria y sostenibilidad, previsión y guía en la política europea de alimentación y el diseño de modelos y de métricas cuantitativas en el ámbito de las dietas. En sus años de trabajo, han diseñado un marco conceptual para el desarrollo de métricas de sostenibilidad de alimentación, una herramienta de visualización de datos cuantitativos en cambios de dietas, han realizado propuestas en términos de innovación en sistemas de producción y política, y han publicado un marco para fomentar la operatividad de los aspectos de salud de las dietas sostenibles.

Actualmente, y como se ha puesto de manifiesto, el diseño de dietas SHARP es un desafío. Nuestro objetivo, entonces, es diseñar un modelo matemático que genere dietas humanas, aceptando inputs diversos y que aporte soluciones factibles distintas para cada conjunto de datos, en función de una variedad de factores, como pueden ser la edad, el peso, las creencias personales o una enfermedad como la diabetes. La sostenibilidad es, en sí misma, una magnitud de enorme complejidad que, sumado a la fiabilidad (en términos de seguridad alimentaria y de la cadena de suministros), convierten un problema a priori global en uno que debe resolverse teniendo en cuenta las características regionales y que, por tanto, tiene que ser capaz de adaptarse a estas. La aceptabilidad, recogida como palatabilidad en el modelo SHARP, será el punto sobre el que pivotará nuestro modelo, ya que de nada sirve diseñar una dieta que al receptor (sea una población o un individuo) no le guste y que por tanto no vaya a seguir.

Tras la revisión de la literatura, concluimos que -desde el punto de vista de diseñar menús

específicos- se presenta un menor número de trabajos que formulan este problema como un modelo de optimización que incorpore distintas dimensiones de las dietas SHARP. En concreto, la literatura muestra modelos de generación y análisis del problema de la dieta, que trabajan - por lo general- a nivel de ingredientes, alimento por alimento, y obtienen unos resultados en forma de gramos de cada alimento a consumir de forma separada. Por lo que, con el fin de acercar esta problemática a los patrones de consumo reales del ser humano, se persigue convertir los resultados en una propuesta de menú, con platos en lugar de ingredientes. Para ello, utilizaremos un modelo de optimización con criterios múltiples, donde se busca maximizar la palatabilidad, a la vez que se minimiza el coste y se minimiza el consumo de agua. Los resultados constituyen menús eficientes, a la vez incluyen restricciones generales nutricionales y de salud y propias de la Dieta Mediterránea.

Actualmente, existen otras tendencias en el estudio del diseño del menú para las que se aplican distintas metodologías. Por ejemplo, encontramos la aplicación de Análisis Envolvente de Datos (DEA) en el trabajo de Kanellopoulos et al. (2020). Por otro lado, se extiende el uso de estrategias metaheurísticas definidas sobre una población como es el caso de Syahputra et al. (2017) que aplican algoritmos genéticos para diseñar el menú de pacientes diabéticos. Marrero et al. (2020), compararon un algoritmo memético con una estrategia híbrida (ILS-MOEA/D) para generar un menú saludable, equilibrado y económico en una cafetería de escuela, por lo que sólo contempla una ingesta diaria. En general la resolución de un Problema de Planificación de Menú, suele considerarse como base para el diseño e implementación de la oferta de alimentos en instituciones sanitarias, prisiones, escuelas u hospitales (Lancaster, 1992; Sufahani and Ismail, 2014; Moreira et al., 2018; Aggarwal et al., 2020). Así, la mejora de la capacidad computacional ha impactado también en este problema, donde tradicionalmente sólo se contemplaba el coste y dos conjuntos de restricciones para asegurar la palatabilidad y los requisitos nutricionales (Leung et al., 1995). Estos avances han permitido trabajar en nuevos algoritmos para desarrollar aproximaciones en las que el diseño de los menús se apoya en modelos de computación. En este contexto se han introducido modelos de soporte de decisiones a los profesionales con la evaluación de los menús en problemas que incorporan múltiples objetivos (Petot et al., 1998; Marling et al., 1999).

Este trabajo pretende ser una ayuda a esta problemática, estudiando el problema de planificación del menú, que juega un papel crucial en el planteamiento de retos, determinados por el estado actual de la dieta española y con numerosas implicaciones sanitarias. Por tanto, el objeto principal de este trabajo es proporcionar una herramienta de ayuda a la toma de decisiones, a nivel personal y para los nutricionistas profesionales, en la elaboración de un menú saludable y sostenible. Para valorar los distintos objetivos simultáneamente, se ha usado una función de logro, propuesta por Wierzbicki, que se optimiza implementando un algoritmo híbrido de las estrategias metaheurísticas GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) e ILS (*Iterated Local Search*) con distintas combinaciones de pesos de la función de logro, para explorar distintas regiones de la frontera eficiente.

El presente texto incluye una amplia descripción del modelo utilizado (Sección 2), con un análisis del problema y los datos. A continuación, la Sección 3 recoge la metodología utilizada para resolver dicho modelo, mientras que la Sección 4 culmina el trabajo con la exposición de los resultados obtenidos y una discusión de los mismos. Finalmente, se exponen las conclusiones en la Sección 5.

2. Descripción del modelo

Originalmente, el conocido como "problema de la dieta" persigue conocer la combinación óptima -más barata- de alimentos (dietas) a consumir, de forma que se verifiquen una serie de condiciones nutricionales. Además, en este caso, se añaden otras exigencias propias de una dieta sana, la calidad de la grasa y características propias de la Dieta Mediterránea (Hernández et al., 2021). Más

allá, se introduce una componente adicional y es que las unidades a tratar son recetas o platos y no con alimentos de forma individual. Para ello, resulta necesario definir cantidades estándar para la ingesta de cada plato, de forma que transforme el problema de la dieta, con variables continuas, en un problema definido por variables binarias: el problema del diseño del menú para D-días.

A continuación, se describen los datos empleados para el planteamiento del problema, así como se define el modelo multiobjetivo que será resuelto en la Sección 4.

2.1. Datos

El diseño de menús como un problema de optimización combinatoria, que ya no considera variables continuas sino binarias que usamos en este trabajo, se apoya en Martos-Barrachina et al. (2022). Para ello, siguiendo los estándares de consumo en España (Martos-Barrachina et al., 2019), se organizan las ingestas en una estructura diaria, tal y como se indica en la Tabla 2. Así, cada día se define como un desayuno, un almuerzo -que es la comida más copiosa del día e incluye un bollo de 100g de pan-, una cena y una porción de frutos secos, como snack.

Tabla 2. Definición de la estructura diaria del menú.

m	Ingesta	k	¿Qué?
1	Desayuno	1	Bebida caliente
		2	Zumo o pieza de fruta
		3	Desayuno principal
2	Almuerzo	4	Bollito de pan
		5	Bebida fría
		6	Entrante
		7	Plato principal
		8	Postre
3	Cena	9	Bebida fría
		10	Plato principal
		11	Postre
4	Extra	12	Snacks

De esta forma, se definen dos bases de datos relacionadas. La primera formada por 275 alimentos, de los que se conocen los valores nutricionales (Moreiras et al., 2017). En este caso, los alimentos se consideran crudos o mínimamente procesados, teniendo en cuenta la parte comestible del alimento. La selección ha sido realizada sobre el Panel de Consumo Alimentario, del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) ². Estos alimentos han sido clasificados en 14 categorías, siendo las verduras, pescados y carnes los grupos más representativos, de acuerdo a la Figura 1: Huevo, Lácteos, Carnes, Pescados, Grasas, Hidratos de Carbono, Legumbres, Vegetales, Fruta, Frutos Secos, Dulces, Líquidos, Condimentos y Salsas y otros.

Por otro lado, se define una base de 227 recetas tradicionales españolas, las cuales son etiquetadas según su consumo, enmarcado en la estructura de K ingestas diarias (Tabla 2). Un sistema de etiquetado adicional contribuye a la transformación del problema, y es que los platos han sido etiquetados de acuerdo a 7 grandes grupos, para los que se asocia una cantidad ingerida, de acuerdo a la Tabla 3.

El uso de la Tabla 3 es posible ya que las recetas de cada plato vienen dadas por el porcentaje

²<https://www.mapa.gob.es/es/alimentacion/temas/consumo-tendencias/panel-de-consumo-alimentario/>

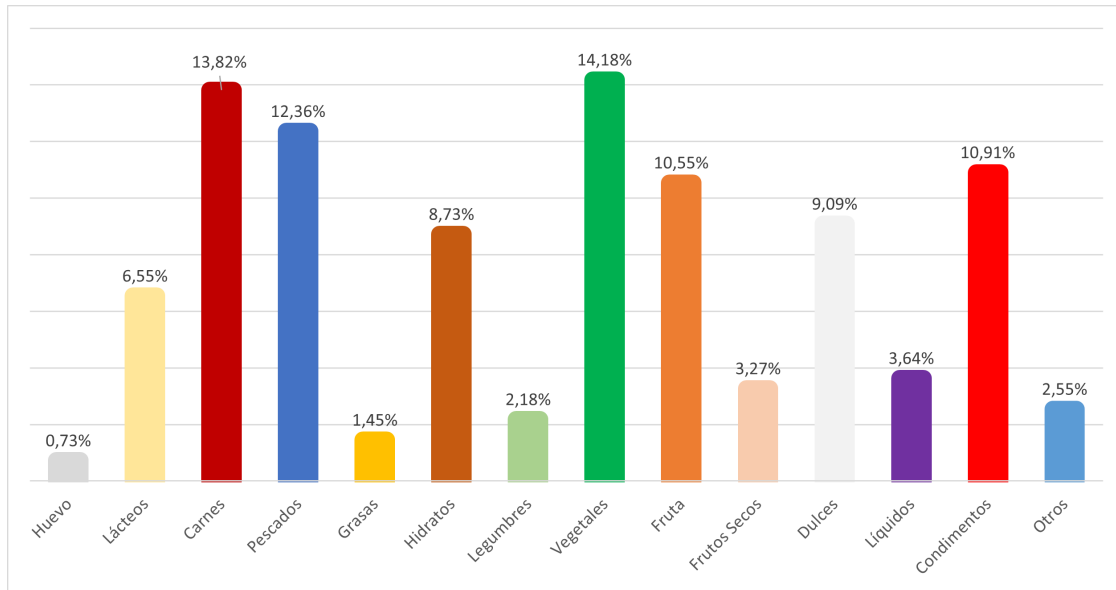


Figura 1. Distribución de alimentos presentes en la base de datos por categorías

Tabla 3. Definición estándar de cantidad según la categoría.

Categoría	Cantidad sugerida (g)
Frutos secos o snacks	30
Un vaso de bebida fría	200-250
Una taza de bebidas calientes	175-200
Fruta	100
Dulces y postres	80-100
Pan	75-100
Plato principal	200-250

necesario de cada ingrediente. Además, esto es clave para definir el problema como un problema de optimización combinatoria con variables de decisión binarias, que se detalla a continuación.

2.2. Modelo de optimización combinatoria

Para afrontar el problema, se considera que el conjunto de variables de decisión no sólo contempla si una receta se consume o no, sino que también recoge información acerca del día y el momento de la ingesta (ver Tabla 2). Así, para cada ingesta $k = 1 \dots K$ de cada día $d = 1 \dots D$, definimos las *variables de decisión* $x_{A,p}^{k,d}$, que toman el valor 1 si en el menú A, se consume el plato p en el momento k del día d y 0 en otro caso.

Por tanto, las soluciones o menús factibles se representan mediante una matriz de tamaño $K \times D$, donde K es el número de ingestas diarias y D el horizonte temporal (medido en días) sobre el que se planifica el menú, que verifican las restricciones relativas a la Dieta Mediterránea y los requisitos nutricionales. De forma habitual, y para facilitar el cálculo, usamos un vector que mide la frecuencia de consumo de cada plato en el menú A: F_A . Este vector tiene una longitud tan extensa como el número de platos, P , e indica cuántas veces el menú A sugiere su consumo. El

cálculo de cada una de las componentes de este vector es sencillo (Eq. 1) a partir de las variables de decisión:

$$F_A^p = \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K x_{A,p}^{k,d} \quad \forall p = 1, \dots, P \quad (1)$$

Definir este vector tiene una serie de ventajas. Entre otras, permite simplificar la notación, tomando una variable auxiliar que representa la cantidad (en gramos) consumida de cada plato p (Q_A^p). Para ello, consideremos el vector R^p -cuya longitud es igual al número de ingredientes o alimentos (N)- que describe la composición de cada gramo del plato p . Este vector nos permite calcular la cantidad individualizada de cada uno de los alimentos ingeridos en el menú A, ya que basta multiplicar Q_A^p por el vector R^p .

$$Q_A^p = F_A^p \cdot C_p \quad \forall p = 1, 2, \dots, P \quad (2)$$

donde C_p es un vector paramétrico que representa la cantidad sugerida del plato p , tal y como se indica en la Tabla 3. Esta definición también hace más sencilla la evaluación de las restricciones consideradas. Además, nos permite rescatar la idea original del problema de la dieta, y conocer cuál es la cantidad de cada alimento consumida en el menú A mediante la agregación de cada producto escalar resultante de R^p y Q_A^p , para cada $p = 1, \dots, P$.

Por tanto, un **menú factible** verifica una serie de restricciones que podemos agrupar en 3 grandes grupos: (i) los requerimientos de nutrientes, (ii) otras exigencias propias de una dieta sana, junto a la calidad de la grasa y (iii) características propias de la Dieta Mediterránea.

Hay que tener en cuenta que, aunque nuestro modelo sea flexible y pueda ser modificado, para las instancias resueltas se ha utilizado el perfil de una mujer activa de unos 30 años de edad. Este perfil da lugar a unos requisitos nutricionales específicos que se detallan a continuación.

En una primera agrupación, encontramos las restricciones nutricionales. En este caso, debemos atender a los límites, inferiores y superiores, de cada uno de los nutrientes indicados. Estos requisitos aparecen en la Tabla 4, expresados como cantidades diarias (Moreiras et al., 2017). Sin embargo, éstas se pueden extender a un número de días D , para encontrar soluciones factibles.

Las restricciones derivadas de esta tabla dependen de los ingredientes, que pueden ser calculados multiplicando la cantidad a consumir de cada uno en cada receta, por su composición nutricional.

A continuación, otras características propias de una dieta saludable incorporan restricciones que delimitan la energía que puede ser obtenida desde cada uno de los macronutrientes. Nótese que estas restricciones se definen en términos proporcionales respecto a la energía consumida.

La Tabla 5 resume estas restricciones, de forma que: las proteínas deben aportar entre un 10 y un 20% del total de la energía consumida, las grasas entre un 25 y un 40% y, como fuente principal de la energía, se encuentran los carbohidratos aportando entre el 40 y 60%, donde la energía procedente del azúcar está acotada por un 15%.

Además, existen condiciones relacionadas a la calidad de la grasa consumida. Se conoce que la grasa puede ser: saturada (AGS), monoinsaturada (AGM) y polinsaturada (AGP). En general, las grasas polinsaturadas y monoinsaturadas contribuyen a reducir los niveles de colesterol y protegen de enfermedades cardiovasculares, frente a las saturadas que hacen los alimentos más sabrosos o palatables. Siguiendo las pautas de Moreira et al. (2018), el menú A factible debe responder a las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\sum_{p=1}^P AGP_p \cdot Q_A^p}{\sum_{p=1}^P AGS_p \cdot Q_A^p} \geq 0,5 \quad (3)$$

Tabla 4. Resumen restricciones nutricionales.

Nutriente	Cota inferior	Cota superior
Energía (Kcal)	1 840	2 300
Fibra (g)	25	-
Colesterol (mg)	-	300
Calcio (mg)	750	-
Hierro (mg)	14	-
Magnesio (mg)	330	-
Sodio (mg)	-	2 000
Potasio (mg)	2 000	-
Fósforo (mg)	700	-
Niacina (mg)	15	-
Folato (μg)	400	-
Vit. B12 (μg)	2	-
Vit. C (mg)	80	-
Vit. A (μg)	800	-
Vit. D (μg)	5	-
Vit. E (mg)	12	-
Agua (g)	2 000	-

Tabla 5. Macronutrientes obtenidos de la energía total.

Macronutrientes (% Total Kcal)	Cota inferior	Cota superior
Proteínas	10	20
Carbohidratos	40	60
Azúcares	-	15
Grasas	25	40

donde AGP_p denota el porcentaje de grasa poli-insaturada por gramo consumido del plato p , mientras AGS_p denota la grasa saturada.

$$\frac{\sum_{p=1}^P AGM_p \cdot Q_A^p + AGP_p \cdot Q_A^p}{\sum_{p=1}^P AGS_p \cdot Q_A^p} \geq 2 \quad (4)$$

donde AGM_p denota el porcentaje de grasa mono-insaturada por gramo consumido del plato p .

Por supuesto, se incorporan los patrones culturales de alimentación nacionales, asociados a la Dieta Mediterránea, que han demostrado sus efectos beneficiosos para la salud, y además pueden considerarse sostenibles. Como se comentaba previamente, esta dieta se caracteriza por fomentar un consumo de alimentos de origen vegetal y pescado, junto con ingestas moderadas de carne y productos lácteos, y el uso del aceite de oliva como grasa principal para elaborar las preparaciones culinarias (de la Dieta Mediterránea, 2010).

A continuación, de acuerdo a los *Objetivos nutricionales para la población española* (Aranceta and Majem, 2011), se ajusta la cantidad diaria recomendada para algunos grupos de alimentos, así como algunos alimentos concretos como el aceite de oliva, la mantequilla o el vino.

Como se observa en la Tabla 6, se han fijado cotas inferiores para el consumo de fruta, pescados, aceite, legumbres y frutos secos, mientras se han definido límites superiores para la mantequilla, los dulces, la carne roja y procesadas (embutidos). Además, en referencia a la Dieta Mediterránea, se han añadido algunas restricciones adicionales con el fin de ajustar el consumo de procesados y

Tabla 6. Resumen limitaciones por categoría de alimentos.

Categoría	Cota inferior (g)	Cota superior (g)
Verduras	300	-
Fruta	250	-
Aceite de oliva	25	-
Mantequilla	0	10
Carnes Procesadas	0	20
Carne Roja	0	50
Pescados	40	-
Legumbre	6,5	-
Frutos Secos	22	-
Dulces	0	15

carnes. Así, se impone que la ingesta de carnes rojas ha de ser inferior a la de carne blanca (Eq. 5) y se motiva un mayor consumo de pescados que de carne (Eq. 6):

$$\sum_{p=1}^P CR_p \cdot Q_A^p \leq \sum_{p=1}^P CB_p \cdot Q_A^p \quad (5)$$

donde CB_p denota la proporción de carne blanca y CR_p la proporción de carne roja consumidas en la receta p .

$$\sum_{p=1}^P Carne_p \cdot Q_A^p \leq \sum_{p=1}^P Pescado_p \cdot Q_A^p \quad (6)$$

donde los parámetros $Carne_p$ y $Pescado_p$ indican la proporción de carne y pescado, respectivamente, contenida en el plato p .

Adicionalmente, se han incorporado restricciones que aportan variabilidad y promueven la palatabilidad de los menús generados. Por un lado, se decide limitar el número de veces (T) que se repite un plato en un menú concreto, con excepción de las bebidas, los elementos del desayuno y el pan. Por otro lado, para proporcionar una ingesta diaria equilibrada se añaden dos condiciones: (i) Se permite un margen, en la energía total consumida, del 25 % (Según los valores de la Tabla 4); (ii) No se permite repetir la proteína animal en el mismo día. Esto quiere decir que si se toma pescado en el almuerzo, el menú no debería sugerir tomar pescado también en la cena, reflejados en las siguientes ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\sum_p \sum_{k \in \text{Almuerzo}} Carne_p \cdot x_{A,p}^{k,d} \right) \cdot \left(\sum_p \sum_{k \in \text{Cena}} Carne_p \cdot x_{A,p}^{k,d} \right) = 0 \quad \forall d = 1, 2, \dots, D \\ \left(\sum_p \sum_{k \in \text{Almuerzo}} Pescado_p \cdot x_{A,p}^{k,d} \right) \cdot \left(\sum_p \sum_{k \in \text{Cena}} Pescado_p \cdot x_{A,p}^{k,d} \right) = 0 \quad \forall d = 1, 2, \dots, D \end{array} \right. \quad (7)$$

Una vez establecidas las limitaciones que definen la factibilidad de los menús, procedemos a formular las funciones objetivo de este trabajo. Concretamente, trabajamos bajo **3 criterios**: minimizar el coste, maximizar la palatabilidad, minimizar las emisiones de gases.

1. El *coste* de cada plato, es el resultado de sumar el coste de sus ingredientes. Por tanto, puede

ser calculado como sigue

$$Cost(Menu_A) = \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^R C_p \cdot x_{A,p}^{k,d} \quad (8)$$

2. La palatabilidad, constituye un objetivo difícil de formular matemáticamente. Tal y como se explica en Martos-Barrachina et al. (2023), la función de palatabilidad medirá la similitud entre dos menús, considerando 3 factores: el número de platos que tienen en común, el número de platos que incluyen el ingrediente principal y el número de platos que pertenecen al mismo grupo o subgrupo. En cada cálculo, los platos contabilizados no se contemplan, para evitar la redundancia. De esta forma definimos la función de similitud como sigue:

$$Sim(Menu_A, Menu_B) = \frac{P_{A,B} + Ig_{A,B} \cdot w_{Ig} + SG_{A,B} \cdot w_{SG} + G_{A,B} \cdot w_G}{D \cdot K} \quad (9)$$

donde

- $Sim_{A,B}$ representa la similitud entre el menú A y el B ($Menu_A$ y $Menu_B$), proporcionando un valor entre 0 y 1.
- $P_{A,B}$ es el número de platos en común entre ambos menús. Se puede calcular empleando el vector de frecuencias:

$$P_{A,B} = \sum_{r=1}^R \min\{F_{r,A}, F_{r,B}\}$$

- $Ig_{A,B}$, $SG_{A,B}$, $G_{A,B}$ representa el número de platos de los menús A y B que comparten el ingrediente principal, su subgrupo o su grupo.
- w_{Ig} , w_{SG} , w_G hacen referencia a los pesos que miden cómo de aceptable sería el cambio entre dos platos que comparten el mismo ingrediente principal, su subgrupo o grupo. Por supuesto, la importancia relativa de estos factores viene dada por el agente decisor. Concretamente, como ejemplo, se propone un conjunto de pesos: $w_I = 0,75$, $w_{SG} = 0,5$, y $w_G = 0,25$.

Por tanto, la palatabilidad se aborda mediante la construcción de menús, considerando un menú de referencia (CM), que corresponde con el consumo actual de una persona en D días.

3. Finalmente, el impacto ambiental de un menú- tal y como ocurría con el coste- se define como la suma de emisiones por ingredientes sugeridos (Eq. 10). Concretamente, se considera la emisión de gases de efecto invernadero como representante para este objetivo:

$$GHGE(M_A) = \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^R ghge_p \cdot x_{A,p}^{k,d} \quad (10)$$

Una vez definidos todos los elementos del modelo, la Sección 3 recoge la metodología empleada para su resolución, es decir, para obtener un conjunto de menús eficientes, en el marco del modelo definido.

3. Metodología

La formulación del Problema de Diseño del Menú (MPP, de sus siglas en inglés: *Menu Planning Problem*) ha sido estudiada en el marco de la optimización combinatoria, como un problema NP completo (Gazan et al., 2018) y, por tanto, no pueden ser resueltos mediante métodos exactos (Goldreich, 2010; Lewis, 1983). Concretamente, se trata de un problema que presenta alrededor de $227^{180} = 1,22 \cdot 10^{424}$ combinaciones posibles.

En este trabajo se utiliza la función de logro de Wierzbicki (Wierzbicki, 1980) para explorar la frontera eficiente del problema multiobjetivo del diseño de menús. Esta función, se define como

la combinación lineal de funciones minimax, cada una asociada a una función objetivo. Una de las ventajas de esta aproximación, es que de cada combinación de pesos resulta en una solución factible. Esto implica que, resolviendo el problema iterativamente con distintos pesos, obtendríamos distintas soluciones eficientes.

Una vez unificado el carácter de los objetivos planteados en la Sección 2, a minimizar, podríamos formular la función de Logro Extendida de Wierzbicki (Lewandowski and Wierzbicki, 1989), que permite alcanzar soluciones Pareto eficientes, evitando obtener soluciones débilmente eficientes.

$$\begin{aligned} \min \{ & \max \{ w_1 \cdot \frac{f_1^{max} - f_1(s_j)}{f_1^{max} - f_1^{ref}}, w_2 \cdot \frac{f_2^{max} - f_2(s_j)}{f_2^{max} - f_2^{ref}}, w_3 \cdot \frac{f_3^{max} - f_3(s_j)}{f_3^{max} - f_3^{ref}} \} \} \\ & + \rho \cdot (w_1 \cdot \frac{f_1^{max} - f_1(x_j)}{f_1^{max} - f_1^{ref}} + w_2 \cdot \frac{f_2^{max} - f_2(x_j)}{f_2^{max} - f_2^{ref}} + w_3 \cdot \frac{f_3^{max} - f_3(x_j)}{f_3^{max} - f_3^{ref}}) \end{aligned} \quad (11)$$

donde $f_i(s_j)$ representa el valor del objetivo i en la solución-menú j (s_j). Además, se define como punto de referencia el ideal. Teniendo en cuenta que f_1 representa el coste, f_2 el valor de la función de similitud y f_3 el impacto ambiental, este punto viene dado por:

$$(f_1^{ref}, f_2^{ref}, f_3^{ref}) = (0, 1, 0)$$

Nótese que f_2 tiene un carácter maximizador, por lo que se considera $-f_2$. Por otro lado, $(f_1^{max}, f_2^{max}, f_3^{max})$ corresponde con el valor anti-ideal. Esta función permite explorar las distintas regiones de la Frontera de Pareto, partiendo de un menú (no necesariamente factible) y considerando diferentes combinaciones de pesos.

La frontera de Pareto del problema ha sido generada empleando un algoritmo en dos fases (Alg. 1). La primera se enmarca en una estructura GRASP (Resende and Ribeiro, 2016) para generar soluciones factibles; mientras que la segunda, consiste en un proceso iterativo de búsquedas locales (ILS, de sus siglas en inglés) para encontrar soluciones eficientes y explorar la Frontera de Pareto (*ParetoFront*). Esta combinación GRASP-ILS se ejecuta $numIter \times numPesos$ veces - siendo $numPesos$ el número de combinaciones de pesos asignados en la función de logro extendida (Eq. 11). Además, a lo largo del proceso, el conjunto *ParetoFront* almacena los distintos menús eficientes generados.

Algorithm 1 Esquema general de GRASP - ILS.

```

procedure GRASP+ILS
   $S \leftarrow \emptyset$ 
   $ParetoFront \leftarrow \emptyset$ 
  for  $peso = 1 : numPesos$  do
    Generar pesos aleatorios para Eq. 11
     $S' = GRASP(constante)$ 
     $S', ParetoFront = ILS(BL_1, BL_2, BL_3)$ 
     $S = S \cup S'$ 
  end for
  return  $S, ParetoFront$ 
end procedure

```

En esta línea, para no duplicar soluciones, conviene entender cuándo dos (o más) menús se consideran idénticos entre sí. Esto ocurre cuando tanto la frecuencia general de todas las recetas como la estructura diaria (independientemente de la ordenación de los días) de cada día son exactamente las mismas. Por lo que, al acabar cada fase se llevará a cabo un filtrado de menús únicos.

GRASP arranca la fase de construcción de un menú parcialmente construido del que sólo se conocen los almuerzos. A continuación (Alg. 2), se completa el menú iterativamente, proporcionando un menú factible ($s \in S$). Para cada ingesta ($k \in \{1, 2, 3, 8, 9, 10, 11, 12\}$) se añade un plato en cada día. Para ello, se definen Listas de Candidatos Restringidas (*RCL*) con un tamaño fijo (*constante*). Estas listas de platos candidatos (satisfacen las condiciones del problema) se ordenan según el mejor valor de la función de logro de Wierzbicki que presentaría la solución. Finalmente, un plato de la *RCL* es seleccionado aleatoriamente e introducido en el menú, en la posición (ingesta k y día d) que le corresponde.

A la fase de construcción, le sigue un breve proceso de mejora que consiste en dos búsquedas locales: (i) quitar del menú aquel plato que supone un mayor incremento de la función objetivo y reemplazarlo por otro; (ii) buscar un plato (fuera del menú) que más contribuya mejorar el valor de la función objetivo e introducirlo en el menú, cambiándolo por otro. Nótese que, para este problema, cualquier movimiento que suponga introducir un plato en el menú, requiere tener en cuenta el sistema de etiquetado explicado en la Sección 2, lo cual reduce el tiempo de computación y mejora el sistema de búsquedas.

Algorithm 2 Esquema general de GRASP.

```

procedure GRASP(constante)
   $S$ 
  for  $it = 1 : numIter$  do
    semilla = GenerarSemilla();
     $s = Construcccion(constante, semilla)$ 
     $s' = Mejora(s)$ ;
    if  $f(s') \leq f(s)$  then
       $s = s'$ ;
       $f_{mejor} = f(s')$ ;
       $S = S \cup \{s'\}$ 
    end if
  end for
  return  $S$ 
end procedure

```

Por tanto, dada una combinación de pesos para la función de logro extendida de Wierzbicki, este algoritmo se ejecuta un número de veces (*numIter*) que coincide con el número de semillas generadas mediante GRASP. Esto, permite explorar (y almacenar) un conjunto inicial de menús factibles. A continuación, la exploración continúa con un procedimiento de búsqueda local que encadena las búsquedas locales descritas secuencialmente, de forma que si no se encuentran nuevas soluciones factibles para un número determinado de iteraciones (*maxIter*), el proceso se reinicia con otro par de soluciones.

Para ello, nos apoyaremos en tres búsquedas locales, que se aplican como sigue:

- **Búsqueda Local 1 (BL_1):** Para un menú completo (s), se permutan aleatoriamente, bien las ingestas asociadas al almuerzo o a la cena y se comprueba si el resultado es factible y mejor que lo obtenido anteriormente.
- **Búsqueda Local 2 (BL_2):** Dados dos menús factibles s_1 y s_2 , se generan dos nuevos menús, obtenidos al intercambiar todas las ingestas correspondientes a un número aleatorio de días.
- **Búsqueda Local 3 (BL_3):** Dados menús factibles s_1 y s_2 , soluciones del problema, se generan dos nuevos menús, obtenidos al intercambiar todos los almuerzos o cenas.

Algorithm 3 Esquema general de la búsqueda local extendida o ILS.

```

procedure ILS(  $S, BL$ )
   $maxIter = 10$ ;
  for  $bl_i \in BL$  do
     $noMejora = 0$ ;
    while  $noMejora \leq maxIter$  do
       $s_1, s_2 \in S$ 
       $s_1^*, s_2^* = BL_i(s_1, s_2)$ ;
      if  $s_1^*$  es factible then
         $S = \{s_1^*\} \cup S$ ;
        if  $f(s_1^*) \leq f(s_1)$  o  $f(s_1^*) \leq f(s_2)$  then
           $noMejora = 0$ ;
        else
           $noMejora = noMejora + 1$ ;
        end if
        if  $s_1^*$  es eficiente then
           $ParetoFront \leftarrow ParetoFront \cup s_1^*$ 
           $actualiza(ParetoFront)$ 
        end if
      else
         $nonMejora = nonMejora + 1$ ;
      end if
      if  $s_2^*$  es factible then
         $S = \{s_2^*\} \cup S$ ;
        if  $f(s_2^*) \leq f(s_1)$  o  $f(s_2^*) \leq f(s_2)$  then
           $nonMejora = 0$ ;
        else
           $nonMejora = nonMejora + 1$ ;
        end if
        if  $s_2^*$  es eficiente then
           $ParetoFront \leftarrow ParetoFront \cup s_2^*$ 
           $actualiza(ParetoFront)$ 
        end if
      else
         $nonMejora = nonMejora + 1$ ;
      end if
    end while
     $actualizar(S)$ 
  end for
  return  $S, ParetoFront$ .
end procedure

```

Para simplificar la explicación, definimos la lista de búsqueda local: $BL = BL_1, BL_2, BL_3$ e iteramos sobre ella como se indica en el Algoritmo 3. Nótese que en el caso de BL_1 no se generarían dos soluciones, sino una, pero el procedimiento de comprobaciones sería análogo al expuesto.

El algoritmo definido ha sido aplicado sobre los datos detallados en la Sección 2, teniendo en cuenta las limitaciones del problema que se aborda. Para ello, se ha implementado el algoritmo en

MATLAB2018b, donde $numIter = 3500$ y se han considerado $numPesos = 100$ combinaciones de pesos distintas.

4. Análisis de resultados

La aplicación de nuestro método ha dado resultados notables en la búsqueda de un extenso frente de Pareto, rico en diversas compensaciones entre los objetivos a optimizar. Este logro implica una profunda comprensión de la interacción entre el costo, el impacto ambiental y la palatabilidad en el contexto de la planificación del menú. A través de iteraciones sistemáticas de nuestro modelo con diferentes combinaciones de pesos para la función objetivo, hemos trazado con éxito un extenso frente de Pareto, ofreciendo una variedad de menús eficientes que se adaptan a distintas preferencias y prioridades.

Así, definimos un horizonte temporal de $D = 15$ días y procedemos a resolver nuestro problema, de acuerdo a lo expuesto anteriormente. Para ello, se requiere definir un menú de partida (CM), que presumiblemente es el actual que consume una persona.

Esquema diario	Toma (k)	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
Desayuno	1	Café con leche semidesnatada sin azúcar	Café con leche semidesnatada sin azúcar	Café con leche semidesnatada sin azúcar	Café con leche semidesnatada sin azúcar	Café con leche semidesnatada sin azúcar	Café con leche semidesnatada sin azúcar	Café con leche semidesnatada sin azúcar
	2	Pitufu de jamón cocido con aceite y tomate	Bol de cereales con leche semidesnatada	Sándwich jamón cocido y queso	Tostadas de mantequilla y mermelada	Pitufu de jamón cocido con aceite y tomate	Tostadas de mantequilla y mermelada	Pitufu de jamón cocido con aceite y tomate
	3	Zumo de Naranja y Zanahoria	Zumo de Naranja y Zanahoria	Zumo de Naranja y Zanahoria	Zumo de Sandía y Fresa	Zumo de Sandía y Fresa	Zumo de Sandía y Fresa	Zumo de Manzana y Uva
Almuerzo	4	Vaso de refresco	Agua	Copa de vino	Vaso de refresco	Tercio de cerveza	Vaso de refresco	Tercio de cerveza
	5	Paella de Pollo y Verduras	Paella de Pollo y Verduras	Ensalada Malagueña	Ensalada Malagueña	Sopa de cebolla	Puré de Verduras	Sopa de cebolla
	6	Bollo de Pan Blanco (100g)	Bollo de Pan Blanco (100g)	Bollo de Pan Integral (100g)	Bollo de Pan Integral (100g)	Bollo de Pan Integral (100g)	Bollo de Pan Integral (100g)	Bollo de Pan Blanco (100g)
	7	Berenjenas a la plancha	Champiñones a la plancha	Solomillo al pedro Ximenez con patatas fritas	Ensalada Simple de Espinacas	Espárragos a la plancha con mayonesa	Tofu al pil pil con ensalada mixta y arroz	Conejo al ajillo con patatas
	8	Zumo de Naranja, Piña y Fresa	Ración de Ciruelas	Yogurt	Ración de Ciruelas	Ración de Coco	Ración de Granada	Ración de sandía
Cena	9	Caña de cerveza	Tercio de cerveza	Copa de vino	Vaso de refresco	Copa de vino	Vaso de refresco	Tercio de cerveza
	10	Dorada a la plancha con ensalada mixta	Bacalao a la plancha con ensalada mixta	Bacalao a la plancha con ensalada mixta	Espárragos salteados al ajo	Espárragos a la plancha con mayonesa	Ensalada Simple de Acelgas	Atún a la plancha con ensalada mixta
	11	Ración de fresas	Yogurt con nueces	Yogurt con cereales	Ración de Mango	Yogurt con nueces	Yogurt con nueces	Ración de fresas
Snack	12	Almendras	Mezcla fruto seco	Nuez pelada	Almendras	Cacahuets fritos con sal	Mezcla fruto seco	Almendras

Figura 2. Muestra de 7 días del menú de partida.

CM presenta un coste diario de 5,86 € y una emisión de gases de efecto invernadero que ascienden a 82,1 kg de CO_2 (o equivalente). El valor de la similitud de este menú es, de manera trivial, 1. Además, destaca por un elevado consumo de verduras, frutas y lácteos, seguido de hidratos de carbono.

En el lado opuesto, este menú destaca por un reducido consumo de legumbres, huevos y dulces. A pesar de que no presenta ningún consumo escandaloso o demasiado alejado de un hábito saludable, los menús eficientes generados han de marcar una transición hacia un patrón más saludable - asociados a la Dieta Mediterránea- a la vez que se reduce el volumen de emisiones de gases de efecto invernadero.

Tras aplicar el algoritmo, se han obtenido más de 170 000 menús factibles únicos de los cuales 1 100 son eficientes, que encapsulan una amplia gama de opciones dietéticas, cada una optimizada con un énfasis único en el coste, el impacto ambiental y la palatabilidad.

La Tabla 7 recoge los valores óptimos obtenidos para cada criterio, es decir, la matriz de pagos. De acuerdo a la formulación descrita en la Sección 2, se persigue minimizar el coste y las emisiones de CO_2 , y maximizar el nivel de similitud con un menú de partida dado. En esta tabla, el coste viene dado en euros, mientras el criterio de emisión viene dado por gramos de CO_2 emitidos a la atmósfera, en un horizonte temporal de $D = 15$ días.

Un análisis individualizado de cada uno de los objetivos nos muestra que el coste diario de los

Coste	Similitud	GHEG
53,55 €	0,66	58 931,74
76,98 €	0,87	70 103,68
63,29 €	0,73	53 387,70

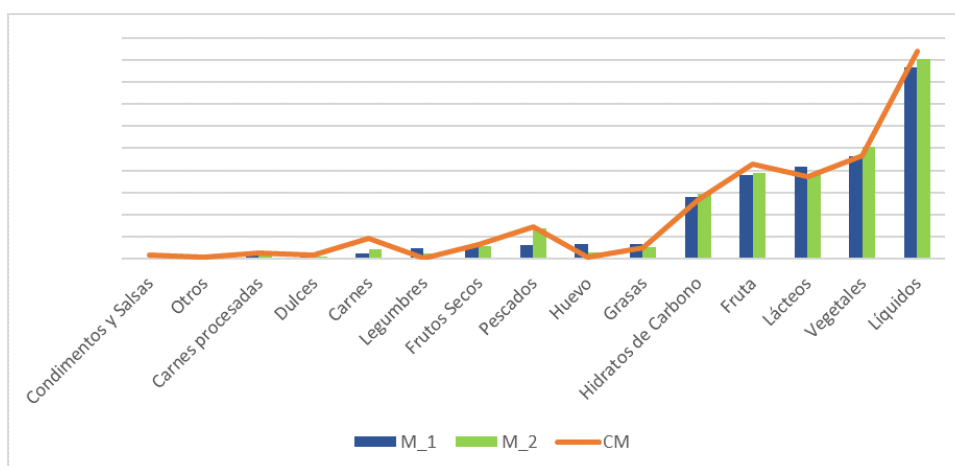
Tabla 7. Matriz de pagos obtenida.

menús eficientes oscila entre los 3,57 €y los 5,18 €. Nótese que en este trabajo, el coste (por gramo de alimento) que se toma como referencia es del año 2018. Por otro lado, los menús eficientes presentan un impacto ambiental que oscila entre los 53 000 y los 70 000 gr. de CO_2 . En la frontera de Pareto obtenida se aprecia cierta relación de los márgenes obtenidos de emisiones con los valores que presenta el menú de partida (CM), que es elevado (82 094,76 g de CO_2). En concreto, aquellos menús eficientes cuya similitud con el menú de referencia supera el 70 %, presentan emisiones más altas. Con el fin de maximizar la similitud con el menú de partida, los menús de la frontera de Pareto presentan valores entre el 63 % y el 87 % de similitud, lo cual resalta la bondad del método para no alterar mucho del consumo de partida de un individuo concreto.

Además, en el peor de los casos, entre los menús eficientes generados se presentan mejoras en el coste del menú de partida - que ascendía a 5,86 €- y el volumen de emisiones de carbono - que superaba los 82 mil gramos de CO_2 .

A continuación, a modo ilustrativo, se presentan los menús eficientes que presentan valores opuestos -el mejor y el peor- en el objetivo de similitud. Para ello, tomamos un menú eficiente (M_1) con un 63 % de similitud con respecto al menú de partida y otro con un 87 % (M_2). A grandes rasgos, esta similitud entre menús viene a reflejar las diferencias que presentan estos menús respecto al menú de partida. En concreto, M_2 supone 164 cambios de platos, mientras que M_1 sólo 62 cambios. Estos cambios supondrían las variaciones que tendría que realizar un individuo con el fin de acercar su consumo hacia una dieta más saludable, a la vez que se intenta conservar sus preferencias personales, en términos de hábitos de consumo.

Atendiendo al resto de objetivos, el primero de estos menús eficientes presenta un coste diario de 3,71 €, mientras que el segundo asciende a 5,19 €. Además, la diferencia en términos de emisiones también es importante. En esta línea, M_1 suma unas emisiones de 55 611 gramos de CO_2 , mientras que M_2 presenta unas emisiones que superan los 70 000 gramos de CO_2 .

Figura 3. Comparación M_1 , M_2 y el menú de partida.

La Figura 3 muestra las diferencias, respecto al menú de partida, en cuanto al consumo por grupos de alimentos. Así, M_1 sugiere reducir, en gran medida, el consumo de carnes, pescados y frutas, así como frutos secos a cambio de incrementar la ingesta de grasas, huevo, lácteos y -sobre todo- legumbres. Sin embargo, M_2 motiva la ingesta de verduras, hidratos de carbono y huevo, a la vez que reduce el consumo de carne y fruta drásticamente. Por otro lado, M_2 presenta un menor consumo de grasas, huevos y lácteos, frente a lo que recoge M_1 . Mientras que M_1 sugiere un menor consumo de pescados y carnes frente a M_2 .

En cuanto a las restricciones culturales, asociadas al consumo de los alimentos por subgrupos, los menús eficientes M_1 y M_2 mejoran en cualquier caso el menú de partida. Recordemos que algunas características del menú de partida incluyen un alto consumo de aceite de oliva, mantequilla, carne roja, vino, dulces y, por el contrario, una ingesta prácticamente nula de legumbres. El consumo de frutas, verduras, pescados y frutos secos supera ligeramente el mínimo indicado en la Tabla 6. En este sentido, si comparamos los menús eficientes (M_1 y M_2) con el menú de partida (CM) se aprecia un alto consumo de verduras en el menú M_2 , superando a M_1 y CM que presentan valores muy similares. Por otro lado, tanto M_1 como M_2 sugieren reducir el consumo de frutas, pescado y carne roja, respecto al menú de partida. En el caso de M_2 , el consumo de pescado que sugiere es prácticamente el doble que el obtenido en M_1 , cuyos valores apenas superan el umbral mínimo sugerido por las restricciones (ver Figura 4). Esta ingesta de proteína parece ser sustituida por legumbres en ambos menús eficientes, destacando M_1 . Además, ambos menús eficientes presentan nula la ingesta de platos que contienen mantequilla o carne roja.

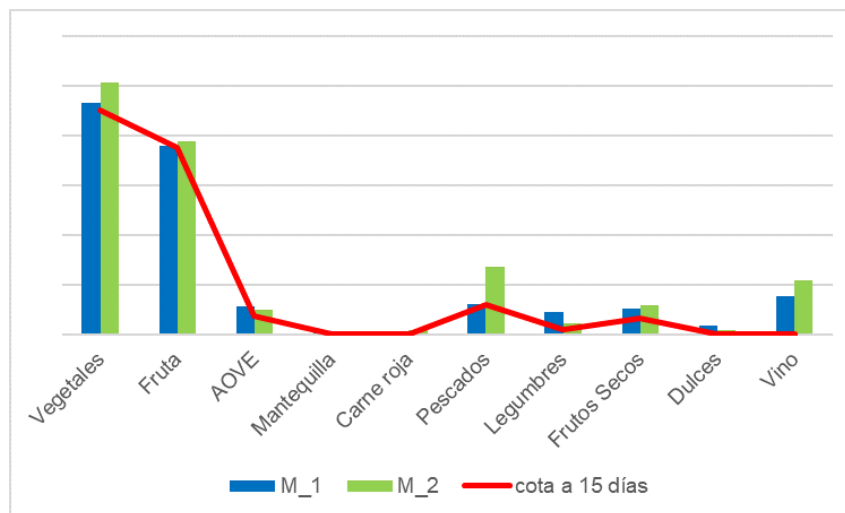


Figura 4. Comparación M_1 , M_2 con las cotas de la Tabla 6.

Por supuesto, este análisis se puede realizar con cualquiera de las soluciones eficientes obtenidas. Con esta muestra se desea resaltar el *poder* de la herramienta presentada en este trabajo, capaz de guiar el consumo individual de una persona hacia una dieta más sostenible y saludable, con el menor volumen de cambio posible.

5. Conclusiones

El problema de la planificación de menús es un problema de optimización combinatoria que surge en un contexto tanto individual como industrial, del diseño de menús, la planificación de

dietas y la gestión de la cadena de suministro de alimentos. El objetivo principal de este problema es encontrar un conjunto de comidas que satisfaga las necesidades nutricionales de un grupo de individuos, minimizando al mismo tiempo el costo y el impacto ambiental de las comidas.

A lo largo de este trabajo, hemos presentado un enfoque holístico de SHARP para el MPP que considera primero el problema de factibilidad con la salud y la fiabilidad que componen el conjunto de restricciones, luego la asequibilidad y la palatabilidad como objetivos conflictivos y, por último, pero no menos importante, la inclusión de la sostenibilidad como un objetivo específico.

El problema de la planificación del menú ha atraído una atención considerable en el campo de la investigación operativa y la ciencia de la nutrición. Con su naturaleza multifacética, el presente trabajo aborda objetivos como la nutrición, el costo, la sostenibilidad y la palatabilidad. Más allá, este trabajo busca introducir explícitamente la sostenibilidad ambiental como un objetivo del problema utilizando datos de Análisis de Ciclo de Vida (como el uso de la tierra, el consumo de agua o los gases de efecto invernadero) de los alimentos presentes en los planes de menú.

Para su resolución, se han combinado estrategias metaheurísticas con las cuales se ha generado un conjunto amplio de menús eficientes. En este trabajo, la consideración del enfoque SHARP implica el uso de técnicas de optimización multiobjetivo para equilibrar los tres objetivos en conflicto y generar la frontera de Pareto. Para integrar estas dimensiones, se ha empleado la función de Logro de Wierzbicki, con el fin de diseñar menús que no solo cumplan con los requisitos nutricionales, sino que también se alineen con los objetivos de sostenibilidad y satisfagan las preferencias individuales. Esta función de logro se optimiza mediante el uso de búsquedas locales que modifica un menú y lo acerca a la frontera eficiente. Para los objetivos de minimizar el coste y el impacto ambiental, y maximizar la función de similitud respecto a un menú de referencia, se generan diferentes combinaciones de pesos aleatorios, que permiten explorar distintas regiones de la región factible y encontrar un conjunto diverso de soluciones eficientes.

Los resultados obtenidos en el curso de este trabajo muestran que los menús SHARP son posibles y pueden ser atractivos para la población en general. Esto no quiere decir que introducirlos y que sean aceptados por un gran porcentaje de la población pueda ser una cuestión trivial, pero los resultados obtenidos ponen de manifiesto que existen herramientas que pueden contribuir a su diseño e implementación.

Así, además del conjunto de soluciones eficientes, se ofrece una herramienta que permite mejorar los patrones alimenticios actuales. Por tanto, la relevancia de este trabajo reside en el hecho de tomar un menú y ofrecer un conjunto de alternativas posibles que sean lo más similares a este y, a su vez, sean más sostenibles y más económicas.

Referencias

- Afshin, A., Sur, P. J., Fay, K. A., Cornaby, L., Ferrara, G., Salama, J. S., Mullany, E. C., Abate, K. H., Abbafati, C., Abebe, Z., Afarideh, M., Aggarwal, A., Agrawal, S., Akinyemiju, T., Alahdab, F., Bacha, U., Bachman, V. F., Badali, H., Badawi, A., Bensenor, I. M., Bernabe, E., Biadgilign, S. K. K., Biryukov, S. H., Cahill, L. E., Carrero, J. J., Cerey, K. M., Dandona, L., Dandona, R., Dang, A. K., Degefa, M. G., Zaki, M. E. S., Esteghamati, A., Esteghamati, S., Fanzo, J., e Sá Farinha, C. S., Farvid, M. S., Farzadfar, F., Feigin, V. L., Fernandes, J. C., Flor, L. S., Foigt, N. A., Forouzanfar, M. H., Ganji, M., Geleijnse, J. M., Gillum, R. F., Goulart, A. C., Grosso, G., Guessous, I., Hamidi, S., Hankey, G. J., Harikrishnan, S., Hassen, H. Y., Hay, S. I., Hoang, C. L., Horino, M., Ikeda, N., Islami, F., Jackson, M. D., James, S. L., Johansson, L., Jonas, J. B., Kasaeian, A., Khader, Y. S., Khalil, I. A., Khang, Y.-H., Kimokoti, R. W., Kokubo, Y., Kumar, G. A., Lallukka, T., Lopez, A. D., Lorkowski, S., Lotufo, P. A., Lozano, R., Malekzadeh, R., März, W., Meier, T., Melaku, Y. A., Mendoza, W., Mensink, G. B., Micha, R., Miller, T. R., Mirarefin, M., Mohan, V., Mokdad, A. H., Mozaffarian, D., Nagel, G., Naghavi, M., Nguyen, C. T., Nixon, M. R., Ong, K. L., Pereira, D. M., Poustchi, H., Qorbani, M., Rai, R. K., Razo-García, C., Rehm, C. D., Rivera, J. A., Rodríguez-Ramírez, S., Roshandel, G., Roth, G. A., Sanabria, J., Sánchez-Pimienta, T. G., Sartorius, B., Schmidhuber, J., Schutte, A. E., Sepanlou, S. G., Shin, M.-J., Sorensen, R. J., Springmann, M., Szponar, L., Thorne-Lyman, A. L., Thrift, A. G., Touvier, M., Tran, B. X., Tyrovolas, S., Ukwaja, K. N., Ullah, I., Uthman, O. A., Vaezghasemi, M., Vasankari, T. J., Vollset, S. E., Vos, T., Vu, G. T., Vu, L. G., Weiderpass, E., Werdecker, A., Wijeratne, T., Willett, W. C., Wu, J. H., Xu, G., Yonemoto, N., Yu, C., and Murray, C. J. L. (2019). Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990–2017: a systematic analysis for the global burden of disease study 2017. *The Lancet*, 393(10184):1958–1972.
- Aggarwal, M., Grady, A., Desai, D., Hartog, K., Correa, L., Ostfeld, R. J., Freeman, A. M., McMacken, M., Gianos, E., Reddy, K., Batiste, C., Wenger, C., Blankstein, R., Williams, K., Allen, K., Seifried, R. M., Aspary, K., and Barnard, N. D. (2020). Successful implementation of healthful nutrition initiatives into hospitals. *The American Journal of Medicine*, 133(1):19–25.
- Anguah, K., Lovejoy, J., Craig, B., Gehrke, M., Palmer, P., Eichelsdoerfer, P., and McCrory, M. (2017). Can the palatability of healthy, satiety-promoting foods increase with repeated exposure during weight loss? *Foods*, 6(2):16.
- Aranceta, J. and Majem, L. S. (2011). Objetivos nutricionales para la población española. *Revista española de nutrición comunitaria*, 17(4):178–199.
- Bai, Y., Alemu, R., Block, S. A., Headey, D., and Masters, W. A. (2021). Cost and affordability of nutritious diets at retail prices: evidence from 177 countries. *Food policy*, 99:101983.
- Benvenuti, L., De Santis, A., Di Sero, A., and Franco, N. (2019). Concurrent economic and environmental impacts of food consumption: are low emissions diets affordable? *Journal of Cleaner Production*, 236:117645.
- Cordain, L., Eaton, S. B., Sebastian, A., Mann, N., Lindeberg, S., Watkins, B. A., O’Keefe, J. H., and Brand-Miller, J. (2005). Origins and evolution of the western diet: health implications for the 21st century^{1,2}. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 81(2):341–354.
- de la Dieta Mediterránea, F. (2010). Pirámide de la dieta mediterránea. Leaflet.
- Donati, M., Menozzi, D., Zighetti, C., Rosi, A., Zinetti, A., and Scazzina, F. (2016). Towards a sustainable diet combining economic, environmental and nutritional objectives. *Appetite*, 106:48–57.
- Dorward, A. (2013). Agricultural labour productivity, food prices and sustainable development impacts and indicators. *Food Policy*, 39:40–50.
- Drewnowski, A. (2010). The nutrient rich foods index helps to identify healthy, affordable foods. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 91(4):S1095–S1101.

- Duckworth, J. J., Randle, M., McGale, L. S., Jones, A., Doherty, B., Halford, J. C., and Christiansen, P. (2022). Do front-of-pack ‘green labels’ increase sustainable food choice and willingness-to-pay in U.K. consumers? *Journal of Cleaner Production*, 371:133466.
- Färe, R., Grosskopf, S., and Margaritis, D. (2011). The diet problem and dea. *Journal of the Operational Research Society*, 62(7):1420–1422.
- Gazan, R., Brouzes, C. M. C., Vieux, F., Maillot, M., Lluch, A., and Darmon, N. (2018). Mathematical optimization to explore tomorrow's sustainable diets: A narrative review. *Advances in Nutrition*, 9(5):602–616.
- Goldreich, O. (2010). *P, NP, and NP-Completeness: The basics of computational complexity*. Cambridge University Press.
- Gustafson, D. I., Decker, E. A., Drewnowski, A., Hamm, M. W., Hwang, J., and Merrigan, K. A. (2022). Making healthy, sustainable diets accessible and achievable: A new framework for assessing the nutrition, environmental, and equity impacts of packaged foods. *Current Developments in Nutrition*, 6(10):6010012.
- Haigh, L., Kirk, C., El Gendy, K., Gallacher, J., Errington, L., Mathers, J. C., and Anstee, Q. M. (2022). The effectiveness and acceptability of mediterranean diet and calorie restriction in non-alcoholic fatty liver disease (nafld): A systematic review and meta-analysis. *Clinical Nutrition*, 41(9):1913–1931.
- Herforth, A., Bai, Y., Venkat, A., Mahrt, K., Ebel, A., and Masters, W. A. (2020). *Cost and affordability of healthy diets across and within countries*. FAO.
- Hernández, M., Gómez, T., Delgado-Antequera, L., and Caballero, R. (2021). Using multiobjective optimization models to establish healthy diets in spain following mediterranean standards. *Operational Research*, 21:1927–2961.
- Horgan, G. W., Perrin, A., Whybrow, S., and Macdiarmid, J. I. (2016). Achieving dietary recommendations and reducing greenhouse gas emissions: modelling diets to minimise the change from current intakes. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 13(1).
- Johnston, J. L., Fanzo, J. C., and Cogill, B. (2014). Understanding sustainable diets: A descriptive analysis of the determinants and processes that influence diets and their impact on health, food security, and environmental sustainability. *Advances in Nutrition*, 5(4):418–429.
- Kanellopoulos, A., Gerdessen, J. C., Ivancic, A., Geleijnse, J. M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., and van't Veer, P. (2020). Designing healthier and acceptable diets using data envelopment analysis. *Public Health Nutrition*, 23(13):2290–2302.
- Lancaster, L. M. (1992). The history of the application of mathematical programming to menu planning. *European Journal of Operational Research*, 57(3):339–347.
- Leung, P., Wanitprapha, K., and Quinn, L. A. (1995). A recipe-based, diet-planning modelling system. *British Journal of Nutrition*, 74(2):151–162.
- Lewandowski, A. and Wierzbicki, A. (1989). *Aspiration Based Decision Support Systems: Theory, Software and Applications*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer.
- Lewis, H. R. (1983). Computers and intractability. a guide to the theory of np-completeness.
- Macdiarmid, J. I., Kyle, J., Horgan, G. W., Loe, J., Fyfe, C., Johnstone, A., and McNeill, G. (2012). Sustainable diets for the future: can we contribute to reducing greenhouse gas emissions by eating a healthy diet? *The American Journal of Clinical Nutrition*, 96(3):632–639.
- Marling, C. R., Petot, G. J., and Sterling, L. S. (1999). Integrating case-based and rule-based reasoning to meet multiple design constraints. *Computational Intelligence*, 15(3):308–332.
- Marrero, A., Segredo, E., León, C., and Segura, C. (2020). A memetic decomposition-based multi-objective evolutionary algorithm applied to a constrained menu planning problem. *Mathematics*, 8(11):1960.
- Martos-Barrachina, F., Delgado-Antequera, L., and Hernández, M. (2023). A novel cost-

- palatability bi-objective approach to the menu planning problem using a path relinking algorithm. *DESC*.
- Martos-Barrachina, F., Delgado-Antequera, L., Hernández, M., and Caballero, R. (2022). An extensive search algorithm to find feasible healthy menus for humans. *Operational Research an International Journal*, 22:5231–5267.
- Martos-Barrachina, F., Delgado-Antequera, L., Hernandez, M., and Diaz-Hidalgo, R. (2019). Patrones de consumo de alimentos en españa. *Rect@*, 20(2):95–130.
- Marty, L., Chambaron, S., de Lauzon-Guillain, B., and Nicklaus, S. (2022). The motivational roots of sustainable diets: Analysis of food choice motives associated to health, environmental and socio-cultural aspects of diet sustainability in a sample of french adults. *Cleaner and Responsible Consumption*, 5:100059.
- Mertens, E., van't Veer, P., Hiddink, G. J., Steijns, J. M., and Kuijsten, A. (2016). Operationalising the health aspects of sustainable diets: a review. *Public Health Nutrition*, 20(4):739–757.
- Moreira, R. P., Wanner, E., Martins, F. V. C., and Sarubbi, J. F. (2018). An evolutionary mono-objective approach for solving the menu planning problem. In *2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, pages 1–8. IEEE.
- Moreiras, O., Carbajal, A., Cabrera, L., and Cuadrado, C. (2017). *Tablas de Composición de Alimentos: Guía de Prácticas*. Grupo Anaya.
- Perignon, M., Masset, G., Ferrari, G., Barré, T., Vieux, F., Maillot, M., Amiot, M.-J., and Darmon, N. (2016). How low can dietary greenhouse gas emissions be reduced without impairing nutritional adequacy, affordability and acceptability of the diet? a modelling study to guide sustainable food choices. *Public Health Nutrition*, 19(14):2662–2674.
- Petot, G. J., Marling, C., and Sterling, L. (1998). An artificial intelligence system for computer-assisted menu planning. *Journal of the American Dietetic Association*, 98(9):1009–1014.
- Pool, U. and Dooris, M. (2021). Prevalence of food security in the UK measured by the food insecurity experience scale. *Journal of Public Health*, 44(3):634–641.
- Resende, M. G. and Ribeiro, C. C. (2016). *Optimization by GRASP*. Springer-Verlag New York.
- Rutten, M., Achterbosch, T. J., de Boer, I. J., Cuaresma, J. C., Geleijnse, J. M., Havlík, P., Heckeley, T., Ingram, J., Leip, A., Marette, S., van Meijl, H., Soler, L.-G., Swinnen, J., van't Veer, P., Vervoort, J., Zimmermann, A., Zimmermann, K. L., and Zurek, M. (2018). Metrics, models and foresight for european sustainable food and nutrition security: The vision of the SUSFANS project. *Agricultural Systems*, 163:45–57.
- Snorgaard, O., Poulsen, G. M., Andersen, H. K., and Astrup, A. (2017). Systematic review and meta-analysis of dietary carbohydrate restriction in patients with type 2 diabetes. *BMJ Open Diabetes Research Care*, 5(1):e000354.
- Springmann, M., Wiebe, K., Mason-D'Croz, D., Sulser, T. B., Rayner, M., and Scarborough, P. (2018). Health and nutritional aspects of sustainable diet strategies and their association with environmental impacts: a global modelling analysis with country-level detail. *The Lancet Planetary Health*, 2(10):e451–e461.
- Stigler, G. J. (1945). The cost of subsistence. *Journal of Farm Economics*, 27(2):303–314.
- Sufahani, S. and Ismail, Z. (2014). A new menu planning model for malaysian secondary schools using optimization approach. *Applied Mathematical Sciences*, 8:7511–7518.
- Syahputra, M. F., Felicia, V., Rahmat, R. F., and Budiarto, R. (2017). Scheduling diet for diabetes mellitus patients using genetic algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*, 801:012033.
- Temme, E. H., Toxopeus, I. B., Kramer, G. F., Brosens, M. C., Drijvers, J. M., Tyszler, M., and Ocké, M. C. (2014). Greenhouse gas emission of diets in the netherlands and associations with food, energy and macronutrient intakes. *Public Health Nutrition*, 18(13):2433–2445.
- van Bussel, L., Kuijsten, A., Mars, M., Feskens, E., and van 't Veer, P. (2019). Taste profiles of

- diets high and low in environmental sustainability and health. *Food Quality and Preference*, 78:103730.
- van Dooren, C. and Aiking, H. (2015). Defining a nutritionally healthy, environmentally friendly, and culturally acceptable low lands diet. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(5):688–700.
- Wierzbicki, A. P. (1980). The Use of Reference Objectives in Multiobjective Optimization. In Fandel, G. and Gal, T., editors, *Multiple Criteria Decision Making Theory and Application*, pages 468–486. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Wilson, N., Nghiem, N., Mhurchu, C. N., Eyles, H., Baker, M. G., and Blakely, T. (2013). Foods and Dietary Patterns That Are Healthy, Low-Cost, and Environmentally Sustainable: A Case Study of Optimization Modeling for New Zealand. *PLoS ONE*, 8(3):e59648.