



Diseño de un Sistema de Elaboración de Menús Saludables

Informe final de actividades llevadas a cabo
al amparo del contrato FORDECYT 265667

Elaborado por: M. en C. Caleb Andrade Cernas
Bajo la supervisión del Dr. Gilberto Calvillo Vives
Enero 2020

Informe final de actividades del M. en C. Caleb Andrade Cernas llevadas a cabo al amparo del contrato FORDECYT 265667 el año 2019

El presente informe tiene como objetivo reportar la investigación realizada en el proyecto “Diseño de un sistema para la elaboración de menús saludables” llevada a cabo al amparo del convenio de colaboración DGAJ-DPI-080617-314 celebrado entre la UNAM y FUNSALUD con fecha 19 de Junio de 2017. Esta investigación se ha realizado con miras a celebrar un convenio específico entre las dos instituciones, previsto en el convenio antes mencionado, para poner en marcha la propuesta metodológica para la elaboración de menús que satisfagan los requerimientos nutricionales en el contexto de comedores industriales en nuestro país, mediante el uso de un modelo matemático.

La investigación se ha realizado en el Laboratorio de Aplicación de las Matemáticas de la Unidad Cuernavaca del Instituto de Matemáticas de la UNAM, llevada a cabo por el Mtro. Caleb Erubiel Andrade Sernas y dirigida por el Dr. Gilberto Calvillo Vives. La investigación se desarrolló en las siguientes etapas:

1. Recopilación y análisis de bibliografía relacionada con el tema de estudio.
2. Desarrollo de un modelo matemático y la metodología para su implantación.
3. Construcción de un formalismo matemático para la representación de un recetario.
4. Implementación de prototipo del modelo en Python, utilizando el sistema Gurobi para solución de problemas de optimización.

El proyecto que así se presenta se divide en tres áreas del conocimiento:

1. Matemáticas. En lo tocante al modelaje matemático.
2. Nutrición. En lo que respecta a los requerimientos nutricionales para la ingesta humana y los aportes respectivos de los alimentos.
3. Ciencia de datos. En lo tocante a la recopilación, manejo y explotación de la información generada por nuestra propuesta metodológica.

Por lo anterior, a partir de este trabajo se pretende elaborar dos o tres artículos, en lo relativo a las tres áreas antes mencionadas, para documentar la investigación realizada, una vez que se hayan llevado a cabo la fase de experimentación (no reportada aquí).

Se adjuntan el convenio UNAM-FUNSALUD que dio el marco a la investigación reportada y el informe detallado de la misma.

A T E N T A M E N T E

M. en C. Caleb Erubiel Andrade Sernas

VoBo

Dr. Gilberto Calvillo Vives

Informe final de actividades del M. en C. Caleb Andrade Cernas llevadas a cabo al amparo del contrato FORDECYT 265667 el año 2019

El presente informe tiene como objetivo reportar la investigación realizada en el proyecto "Diseño de un sistema para la elaboración de menús saludables" llevada a cabo al amparo del convenio de colaboración DGAJ-DPI-080617-314 celebrado entre la UNAM y FUNSALUD con fecha 19 de Junio de 2017. Esta investigación se ha realizado con miras a celebrar un convenio específico entre las dos instituciones, previsto en el convenio antes mencionado, para poner en marcha la propuesta metodológica para la elaboración de menús que satisfagan los requerimientos nutricionales en el contexto de comedores industriales en nuestro país, mediante el uso de un modelo matemático.

La investigación se ha realizado en el Laboratorio de Aplicación de las Matemáticas de la Unidad Cuernavaca del Instituto de Matemáticas de la UNAM, llevada a cabo por el Mtro. Caleb Erubiel Andrade Sernas y dirigida por el Dr. Gilberto Calvillo Vives. La investigación se desarrolló en las siguientes etapas:

1. Recopilación y análisis de bibliografía relacionada con el tema de estudio.
2. Desarrollo de un modelo matemático y la metodología para su implantación.
3. Construcción de un formalismo matemático para la representación de un recetario.
4. Implementación de prototipo del modelo en Python, utilizando el sistema Gurobi para solución de problemas de optimización.

El proyecto que así se presenta se divide en tres áreas del conocimiento:

1. Matemáticas. En lo tocante al modelaje matemático.
2. Nutrición. En lo que respecta a los requerimientos nutricionales para la ingesta humana y los aportes respectivos de los alimentos.
3. Ciencia de datos. En lo tocante a la recopilación, manejo y explotación de la información generada por nuestra propuesta metodológica.

Por lo anterior, a partir de este trabajo se pretende elaborar dos o tres artículos, en lo relativo a las tres áreas antes mencionadas, para documentar la investigación realizada, una vez que se hayan llevado a cabo la fase de experimentación (no reportada aquí).

Se adjuntan el convenio UNAM-FUNSALUD que dio el marco a la investigación reportada y el informe detallado de la misma.

ATENTAMENTE



M. en C. Caleb Erubiel Andrade Sernas

VoBo



Dr. Gilberto Calvillo Vives

Diseño de un sistema para la elaboración de menús saludables

Caleb Andrade, Gilberto Calvillo

21 de febrero de 2020

Unidad Cuernavaca del Instituto de Matemáticas, UNAM

Resumen

Debido a la gran necesidad que existe en México en materia de salud y nutrición, es necesario utilizar las herramientas matemáticas y tecnológicas disponibles para proponer mecanismos efectivos que ayuden a resolver el problema de la malnutrición en nuestro país. Uno de los principales problemas de salud pública en México es la gran incidencia de la diabetes en la población, siendo la principal causa de muerte para las mujeres y la segunda causa de muerte para los hombres en México[17]; por otro lado, la desnutrición infantil es prevalente en gran parte de la población infantil de México. La obesidad en la población mexicana nos ha ganado uno de los primeros lugares a nivel mundial con este problema de salud pública, así pues, encontrar soluciones para atacar el problema de la mala alimentación en México resulta imperativo. En este trabajo¹ se plantea un modelo matemático para la elaboración de menús para comedores industriales, de tal suerte que los costos de elaboración sean mínimos y se satisfagan las demandas nutricionales de la mejor manera. Asimismo, este modelo considera las preferencias de los usuarios mediante un sistema de calificación, lo cual permite elaborar un menú acorde a los gustos de los usuarios. Por otro lado, es importante que el modelo incluya la manera de que haya variedad en los platillos, evitando la repetición monótona de platillos y diversificando las posibles combinaciones de los mismos. El modelo matemático empleado en este trabajo es el de programación lineal entera. Nuestro planteamiento es secuencial, es decir, para un periodo de n días, se resuelve el problema para cada día de manera independiente, de este modo se reduce la complejidad del problema. El paradigma que se utiliza es el del control adaptivo, es decir, el problema se resuelve un día a la vez, generando información sobre los consumos reales y de esta manera regulando un vector de promedios móviles que retroalimenta al sistema para la generación del menú del siguiente día.

¹Este proyecto se realizó con el apoyo del CONACYT a través del Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación (FORDECYT) con clave de proyecto 265667

1. Introducción

1.1. Malnutrición

1.1.1. Encuesta Nacional de Salud y Nutrición

La situación en materia de nutrición ha sido documentada en México a partir del año 1988 a través de encuestas nacionales, como la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT). Por medio de estos instrumentos se ha logrado detectar que la malnutrición es uno de los principales retos de salud pública en México, ya que se asocia con ciertas condiciones de salud como lo es la obesidad y la diabetes. En el año 2012 la ENSANUT [11] puso de manifiesto que el sobrepeso y la obesidad afectaban a 7 de cada 10 adultos y a 3 de cada 10 niños y a todos los grupos socioeconómicos del país.

Dentro de la información recabada por la ENSANUT 2016 [12] se encuentra la relacionada con la diversidad dietética a partir del cuestionario de Frecuencia de Consumo de Alimentos, que consideró 140 alimentos y bebidas. Estos alimentos y bebidas se clasificaron en 13 grupos de alimentos de acuerdo a sus características nutrimentales. Así pues, con respecto a la diversidad de la dieta en los distintos grupos de edades, se observaron en general bajas proporciones de consumidores regulares de grupos de alimentos asociados con mejores niveles de salud (grupos recomendables), y por otro lado, se observó un elevado consumo de alimentos cuyo consumo cotidiano aumenta los riesgos de obesidad o enfermedades crónicas (grupos de alimentos no recomendables para consumo cotidiano). Por ejemplo, para el grupo de mexicanos en edad escolar, solo 22.6 % consumen regularmente verduras, 45.7 % frutas y 60.7 % leguminosas, mientras que 81.5 % consumen regularmente bebidas azucaradas no lácteas, 61.9 % botanas, dulces y postres y 53.4 % cereales dulces. La diversidad total de la dieta en el ámbito nacional se registró en 6.5 grupos de alimentos por día, de los cuales 4.2 son grupos de alimentos recomendables y 2.3 son grupos de alimentos no recomendables para consumo cotidiano.

1.1.2. SEDESOL: Desnutrición infantil y pobreza en México 2003

En el año 2003 la Secretaría de Desarrollo Social generó el reporte: “Desnutrición infantil y pobreza en México” [9], en el cual se estudia el problema de la desnutrición infantil en México y la condición de pobreza de los hogares, centrandó su análisis en tres aspectos:

- La falta de recursos económicos suficientes para contar con los alimentos necesarios para cubrir una dieta adecuada.
- La falta de acceso a productos alimentarios, que tiene que ver con dificultades de disponibilidad en determinados ámbitos geográficos por aislamiento y dispersión de comunidades.
- La falta de información sobre nutrición, salud e higiene.

Este reporte se basa en los análisis de los datos de la Encuesta Nacional de Nutrición (ENN) realizada entre 1998 y 1999 por el Instituto Nacional de Salud Pública, con una muestra representativa para todo el país. En la base de datos de la ENN 1999 se cuenta con variables que indican la condición nutricional de los menores de 5 años, mismos que se tomaron en cuenta para el reporte. Entre los resultados principales se encontró que

- La desnutrición infantil se concentra principalmente en los hogares más pobres. Para hogares con pobreza alimentaria, el porcentaje de niños desnutridos fue de 34.3 %; para hogares con pobreza de capacidades, el porcentaje de niños desnutridos fue de 16.6 %; para hogares con pobreza de patrimonio, el porcentaje de niños desnutridos fue de 8.6 %; para hogares sin pobreza, el porcentaje de niños desnutridos fue de 6.8 %.
- La desnutrición infantil se presenta con mayor intensidad en los lugares que residen en localidades rurales. En hogares con pobreza alimentaria, la desnutrición alcanzó un porcentaje de 36.8 % en zonas rurales, mientras que alcanzó un 29.2 % en zonas urbanas.
- La desnutrición infantil es mayor cuando falta información en los hogares. La proporción de niños con desnutrición en hogares donde la mamá no tiene instrucción alcanzó el 37.6 %, mientras que en hogares donde la mamá estudió más de la secundaria la proporción de niños con desnutrición alcanzó el 7.5 %.

1.1.3. UNICEF: Reporte de Nutrición Mundial 2011

Según el informe mundial “Mejorando la Nutrición en los niños: el imperativo alcanzable para el progreso mundial” [19], la desnutrición crónica afecta a casi uno de cada cuatro niños menores de 5 años a nivel mundial. La desnutrición crónica, o baja estatura para la edad, se asocia con un desarrollo anormal del cerebro, lo cual repercute en el futuro del individuo, el cual presenta por lo general un menor rendimiento escolar, según estudios realizados en países de bajo y medio ingreso [16]. El ausentismo escolar y el bajo rendimiento, cuya causa subyacente es la desnutrición, se traduce en que los niños tengan bajos salarios cuando sean adultos, según estudios que sugieren una pérdida del 22 % en los ingresos anuales durante la etapa adulta [8].

El informe indica que la desnutrición crónica es más prevalente en zonas rurales, pues un tercio de los niños menores de 5 años en zonas rurales sufre desnutrición crónica, en comparación con una cuarta parte de los que viven en zonas urbanas. Asimismo, los menores de 5 años que viven en comunidades más pobres tienen el doble de probabilidades de sufrir desnutrición crónica que los que viven en comunidades más ricas.

Debido a que el momento crucial para atender las necesidades nutricionales de un niño son los primeros mil días desde el embarazo de la madre, las deficiencias de crecimiento comienzan durante el embarazo y continúan hasta los 24 meses de edad, aproximadamente. Este tipo de daño es en gran parte

irreversible, pues las posibilidades de recuperar el crecimiento más adelante son mínimas. Así pues, una madre desnutrida durante su embarazo, tiene mayor probabilidad de dar a luz un niño con bajo peso al nacer que una madre nutrida de manera adecuada. Se estima que entre el 60 % y 80 % de muertes neonatales ocurren entre bebés con bajo peso al nacer.

Pero el bajo peso al nacer no es la única manifestación de malnutrición, el sobrepeso es también una manifestación de una nutrición inadecuada. En 2011, más de dos tercios de los niños menores de 5 años con sobrepeso residían en países de ingresos bajos-medios. A nivel mundial, se estima que 43 millones de niños menores de 5 años tienen sobrepeso de acuerdo a este informe.

1.1.4. COFEPRIS: Programa México Sano

El Programa México Sano (PROMESA), desarrollado de manera conjunta por la Secretaría de Salud y la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), surgió como una estrategia para combatir el sobrepeso y la obesidad en México, al fomentar la oferta de alimentos más saludables en restaurantes y comedores industriales. El objetivo general de este programa es adherir a México a la Estrategia Mundial Sobre Alimentación Saludable, la actividad física y salud para la prevención de enfermedades crónicas. Esta iniciativa es en respuesta a que más del 70 % de la población adulta en México tiene índices inadecuados de masa corporal [4] y al aumento de las enfermedades crónicas cuyo factor preponderante para su desarrollo es la malnutrición, como el caso de la diabetes que constituye un problema de salud pública importante en nuestro país.

Entre los objetivos específicos del programa, resumidos en un decálogo, se encuentra el reducir la ingesta de alimentos hipercalóricos de poco valor nutricional, reducir el consumo de sal, incluir en la variedad del menú platillos a base de verduras y legumbres, reducir el consumo de azúcares refinados e intercambiarlos por el consumo de frutas, reducir las porciones así como utilizar otras técnicas de cocción que eviten el uso de gran cantidad de grasas. Estos objetivos se pretenden implementar en comedores industriales y restaurantes afiliados a la Cámara Nacional de la Industria de Restaurantes y Alimentos Condimentados (CANIRAC), mediante el estímulo de un reconocimiento a los establecimientos que cumplan con dicho lineamiento.

1.2. Acciones para combatir la desnutrición en México

A partir de la información anterior, resulta clara la gran necesidad que tiene México de contar con mecanismos para facilitar una mejor educación nutricional, tener una correcta política social de prevención a la obesidad, así como la implementación de herramientas tecnológicas que propicien una mejor nutrición para la población mexicana. Parte de estos esfuerzos se han realizado a través del IMSS, con su “Guía para el Cuidado de la Salud”, como parte de su programa PREVENIMSS, en la cual se da información nutricional de acuerdo al grupo de edad y se provee de una guía práctica para la elaboración de menús por

medio de el “Plato del bien comer”. Otro esfuerzo que ha realizado la Secretaría de Salud es a través de su “Guía de Alimentos para la Población Mexicana”, en la cuál se provee de una información más detallada de los contenidos nutricionales de alimentos y los distintos grupos de alimentos que existen para la población mexicana, y se provee de indicaciones generales para la elaboración de un plan de alimentación. Asimismo el programa PROMESA pretende fomentar cambios sustanciales en la alimentación proporcionada por restaurantes y comedores industriales mediante un decálogo que resume los objetivos específicos del programa.

A pesar de los esfuerzos realizados, en México aún tenemos un rezago importante en materia de nutrición. Por ejemplo, de acuerdo con el Instituto Nacional de Salud Pública, desde el año 2000 la diabetes mellitus en México es la primera causa de muertes entre las mujeres y la segunda entre los hombres [17]. Así pues, la diabetes se ha convertido en el principal problema de salud pública en México en años recientes. Tan solo en el 2008 se estima que la diabetes le generó al país un gasto aproximado de cerca de 67,000 millones de pesos. Esto deja en claro que aún hace falta mucho por hacer en México en materia de salud pública en lo relativo a nutrición.

Si bien es cierto que se está fomentando a través de las instituciones gubernamentales del sector salud una mejor educación nutricional, hace falta mejorar los mecanismos para hacer que las recomendaciones sean efectivas en la población. En este sentido, un problema que se enfrenta con respecto a concientizar a la sociedad mexicana sobre la necesidad imperativa de mejorar la nutrición, es que el mexicano no tiene el hábito de la lectura, por lo que el proveer de manuales de nutrición para la población mexicana no es un medio completamente efectivo. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía [10], el porcentaje de mexicanos de 18 años en adelante que lee algún tipo de material considerado por el Módulo de Lectura, decreció de 84.2 % en febrero del 2015 a 76.4 % en febrero del 2018. De cada cien personas en este grupo de mexicanos, solo 45 declaró haber leído al menos un libro, en la encuesta del 2018, mientras que en la encuesta del 2015, 50 declararon haber leído al menos un libro. Por otro lado, los manuales que se han mencionado (como la Guía de alimentos para la población mexicana [5], ofrecen información general sobre nutrición pero no se ofrece información detallada sobre los aportes nutricionales de los alimentos y menús mencionados en dicho manual, ni sobre los requerimientos mínimos nutricionales. Por su parte, el Instituto Mexicano del Seguro Social, ha elaborado sus guías de nutrición [7] para los diferentes grupos de edad en el país. De nueva cuenta, encontramos recomendaciones generales que no aportan información detallada sobre el consumo nutricional.

Por las razones descritas, la propuesta de este trabajo es proveer de un sistema que de manera automatizada elabore menús, siguiendo las recomendaciones nutricionales por grupo de edad, requerimiento calórico, y sexo. Asimismo, este sistema tomará en cuenta las preferencias de los usuarios y minimizará el costo para la elaboración del menú. De este modo, se puede proveer a los comensales de un menú que satisfaga sus demandas nutricionales. En este sentido, presentamos a continuación el modelo matemático que nos servirá como base para este

propósito: el problema de la dieta.

1.3. Antecedentes de modelos matemáticos

El problema de la dieta fue uno de los primeros problemas de la programación matemática. George Joseph Stigler lo planteó a finales de la década de los años 30 para determinar un régimen alimenticio óptimo para satisfacer las demandas nutricionales para las tropas del ejército americano, al mismo tiempo que se minimizaban sus costos [18]. Dicho problema fue resuelto en la ausencia de métodos matemáticos exactos, por medio de heurísticas, y se obtuvo una dieta con elementos básicos para satisfacer ciertas demandas nutricionales. El problema de la solución de Stigler es que solamente contenía cinco materias primas (harina, leche evaporada, col, espinaca, frijoles), lo cual resulta impráctico, una alimentación basada exclusivamente en esos cinco elementos no es realista. Pocos años más tarde, el innovador método simplex de George Dantzig para resolver problemas de programación lineal, fue utilizado para resolver el problema de la dieta de manera exacta por Jack Laderman, utilizando los datos de Stigler [6].

El problema ha ido evolucionando con el tiempo, y se han hecho diversos planteamientos del mismo, pero el objetivo sigue siendo básicamente el mismo: lograr satisfacer las demandas nutricionales a un costo mínimo. A continuación exploraremos algunos trabajos que se han hecho en este sentido.

1.3.1. Nutrición humana y planificación de menú institucional

A principios de la década de los noventa del siglo XX, un grupo de investigadores yugoslavos desarrollaron una variante del problema de la dieta, para aplicarlo al diseño de menús en ambientes institucionales, en este caso de tipo militar. El artículo que describe la metodología y sus resultados fue el fruto de diez años de trabajo. Este enfoque fue utilizado de manera exitosa por varios años para la planificación de nutrición humana en instituciones militares [15], aunque los autores creen que su enfoque se puede extender a comedores en otros tipos de instituciones, como hospitales.

El enfoque utilizado por este grupo de investigadores consiste en dos fases, en una fase se determinan los alimentos a utilizar, cumpliendo con los requerimientos básicos nutricionales, y en la otra fase cuántas veces se han de utilizar los menús seleccionados y la programación detallada de cuándo se utilizarán. El modelo matemático empleado permite la selección de cuáles alimentos serán utilizados en el periodo de planeación y la determinación de la cantidad de veces que serán utilizados. El paradigma es el de la programación por objetivos, donde el objetivo es minimizar las desviaciones del presupuesto mientras se satisfacen los requerimientos nutricionales. Este modelo considera la compatibilidad de los alimentos en un menú, así como el evitar la repetición monótona de alimentos, logrando una mayor satisfacción en los usuarios.

Las dimensiones del problema, alrededor de 50,000 - 100, 000 variables binarias y cerca de 150 - 250 restricciones activas, restringían el uso de métodos

de programación por objetivos entera tan solo para obtener soluciones factibles, por lo cuál se utilizaron métodos Monte Carlo para generar un conjunto de soluciones factibles, de entre las cuáles se elegía la mejor.

Los autores reportan que el modelo fue utilizado con éxito durante diez años para el diseño de menús en instalaciones militares, habiendo desarrollado incluso un software que permitía el mantenimiento de una base de datos, el manejo del modelo y las soluciones generadas, así como la generación de reportes.

1.3.2. Planeación computarizada de menús alimenticios

En [14] se sugiere modelar el problema como un *knapsack* multidimensional y resolverlo por medio de un algoritmo evolutivo. El conjunto de soluciones factibles obtenidas de esta manera representan un frente de Pareto, donde un humano hace la selección final. El modelo del knapsack multidimensional consiste en la selección de la combinación más valiosa de alimentos que cabe en una *bolsa (knapsack)* de volumen definido. El valor de los alimentos está definido de manera subjetiva con respecto a la calidad de la comida, costo y parámetros estéticos (sabor, consistencia, color, temperatura, forma y método de preparación). Una dificultad es que los alimentos son seleccionados de una base de datos con miles de alimentos con decenas de parámetros cada uno, por tanto, el espacio de soluciones contiene una gran cantidad de soluciones potenciales. Las restricciones del problema son en tres niveles: comida del día, menú diario, menú por n días. Estas restricciones se refieren a las recomendaciones de ingesta de nutrientes (proteínas, lípidos, carbohidratos, sales y minerales, etc) y se incorporan al modelo de optimización mediante el uso de una función de penalización. Las soluciones que no son factibles son reparadas con métodos de optimización local, al reemplazar componentes de una comida del día, o platillos en un menú del día o del menú por n días, para satisfacer las restricciones de ingesta de nutrientes, número de unidades recomendadas por grupo alimenticio y diversidad en los platillos.

1.3.3. Aplicación de un algoritmo genético multi-objetivo al problema de la elaboración de menús

En [13] se explica un método de optimización basado en un algoritmo genético multi objetivo, que provee al usuario un menú diario que contiene todas las cantidades requeridas de nutrientes a un costo mínimo y una calificación máxima, donde de la calificación de los alimentos está especificado por el usuario en una escala de 0 a 10. En este enfoque se utilizó una versión modificada del problema de la dieta. El clásico problema de la dieta consiste en un problema del tipo 0/1 knapsack multidimensional, con el objetivo de generar un menú con el mínimo costo sujeto a ciertas restricciones de requerimientos nutricionales, definidos mediante cotas inferiores y superiores a las cantidades recomendadas de ingesta por nutriente. En este trabajo se presenta una versión modificada del problema de la dieta original, donde se tiene el objetivo adicional de maximizar las preferencias del usuario. A diferencia del problema original donde las

variables de decisión son binarias, 0 representa que un platillo no es incluido en el menú y 1 representa que sí lo está, se utilizan valores enteros en el rango $[0,3]$ para representar la cantidad de porciones del platillo correspondiente que se incluyen en el menú. Los datos utilizados con respecto a los valores nutricionales se tomaron de la Food and Nutrition Board of the National Academy of Sciences de los Estados Unidos. Los costos de los alimentos fueron estimados únicamente para el grupo de la comida rápida, de los demás grupos alimenticios no se tiene información sobre el costo. Otro factor que se toma en cuenta es que los niveles de nutrientes varían dependiendo del sexo y la edad, por lo que también se toma en cuenta durante la optimización.

Un posible problema con este enfoque es la libertad que se le da al usuario para calificar a los alimentos. Si el usuario no tiene buenos hábitos alimenticios, es posible que favorezca con buena calificación a alimentos, o grupos de alimentos, que no tengan alto valor nutricional (los azúcares, por ejemplo), mientras que otorgue calificaciones bajas a alimentos con mayor valor nutricional (como verduras, por ejemplo). En un caso extremo, si el usuario califica con 0 a ciertos alimentos con alto valor nutritivo, que incluso sean los únicos en contener ciertos elementos nutricionales, puede ser que no haya entonces solución factible para el problema. Un enfoque tal vez más realista sea tomar los promedios de calificaciones individuales de un grupo de personas. Otro inconveniente acerca de calificar es que el usuario tiene que calificar una gran cantidad de alimentos (que puede estar en el orden de los cientos) antes de poder utilizar el modelo.

2. Problema de la elaboración de menús aplicado a comedores industriales en México

2.1. Modelo

2.1.1. Contextualizando el problema

Existe en la literatura evidencia de diversos trabajos que se han realizado para resolver el problema de la elaboración de menús en diferentes contextos. Algunos enfoques no consideran en lo absoluto la preferencia de los usuarios por ciertos alimentos o grupos alimenticios, mientras que otros sí incorporan en su metodología las preferencias del usuario. Se puede decir en cierta manera que el problema de la elaboración de menús se ha resuelto desde diferentes perspectivas, no obstante, la pregunta natural que surge es: ¿qué tan buenos son los métodos de resolución en la práctica?, es decir, ¿qué impacto real tienen las soluciones que se han propuesto en la vida real? Por un lado, al querer comprobar la bondad de una metodología empleada para el diseño de menús alimenticios que satisfagan las demandas nutricionales, es menester realizar un estudio estadístico con un grupo de control para validar la efectividad de la misma. Una metodología puede, en teoría, dar soluciones factibles que satisfagan las demandas nutricionales y que minimizen los costos, sin embargo, qué tan efectiva es dicha metodología en realidad no solo se refiere a las mediciones

objetivas, sino también a la percepción de los usuarios. Recordemos que se trata de diseñar menús alimenticios para humanos que tienen preferencias y gustos, así que dejar de lado este aspecto, así como el contexto sociocultural de los individuos, puede resultar en una metodología que en la teoría se vea bien, pero que en la práctica resulte infructuosa.

Si deseamos aplicar alguna metodología de optimización para resolver el problema de la elaboración de menús, es importante contextualizarlo geosocialmente. No todos los estratos sociales están acostumbrados al mismo tipo de alimentación. No en todas las regiones del país se consumen los mismos alimentos. Un enfoque que podría resultar exitoso tomaría en cuenta esta situación. Sin embargo, no puede ser el principio que gobierne la metodología, puesto que el hecho de que un usuario tenga una gran preferencia por algún alimento, no significa que sea una elección nutritiva. Parte del reto en diseñar un menú es lograr que el usuario aprenda a alimentarse de manera saludable, aunque no esté totalmente familiarizado con el menú. En este sentido, es posible pensar en un enfoque ponderado, donde parte de los objetivos sea maximizar la preferencia del usuario pero con una ponderación específica.

2.1.2. Diversificación

Otro punto importante a considerar es la diversidad de los platillos. Si pensamos en un menú a un plazo dado de n días, se puede incorporar en la función objetivo una calificación del menú que sea proporcional a la diversidad y variedad de los platillos, de esta manera se evita la situación donde haya menús óptimos que contengan platillos que se repiten con demasiada frecuencia.

2.1.3. Propuesta de modelo

En lugar de utilizar una metodología que considere los ingredientes por separado, se emplea una base de datos con platillos. Cada platillo debe ir acompañado de una receta que indique los ingredientes y las cantidades. Las recetas se capturan en una hoja de cálculo siguiendo un formato definido para su lectura por medio de un código computacional. Se ha diseñado un programa que lee la receta y a partir de la cantidad y los ingredientes determina el valor nutricional con respecto a una base de datos que contiene los ingredientes con sus valores nutricionales. Los platillos se clasifican de acuerdo al momento del día para su ingesta (desayuno, comida, cena), por lo que parte de las restricciones es seleccionar el menú diario considerando el momento de ingesta. Otra consideración pertinente es la del maridaje. Se puede asignar un mecanismo de calificación con respecto a la compatibilidad de los alimentos, pensemos en una gráfica completa de todos los platillos, donde las aristas tienen asignado un peso que es la calificación del maridaje para los platillos (vértices) que conforman la arista. Las calificaciones de los platillos y de los maridajes pueden ser inicializados con el mismo valor, para irse actualizando en cada ciclo de optimización. Las calificaciones se actualizan al aplicarse una encuesta breve a los usuarios al final de cada comida.

Arroz Rojo				
Porciones	6			
Gramaje	1787.5			
Clasificación	0	3	2	
Cantidad	Unidad	Gramos	Ingrediente	Instrucciones
1.5	tza	300	arroz blanco	Enjuagar y escurrir el arroz
3	cda	45	aceite vegetal	Freír el arroz con el aceite hasta que los granos comiencen a dorarse
2	pza	300	jitomate	Licuar el jitomate, ajo y cebolla hasta formar una pasta suave
1.5	cda	30	cebolla	Revolver la pasta de jitomate con el arroz y dejar que se absorba el agua
1	pza	5	ajo	
3.5	tza	875	caldo de pollo	Añadir el caldo de pollo con la sal, los chicharos y la zanahoria picada
1	tza	150	chicharo	Cocinar a fuego medio hasta que toda el agua haya sido absorbida
1	pza	80	zanahoria	
0.5	cdita	2.5	sal	

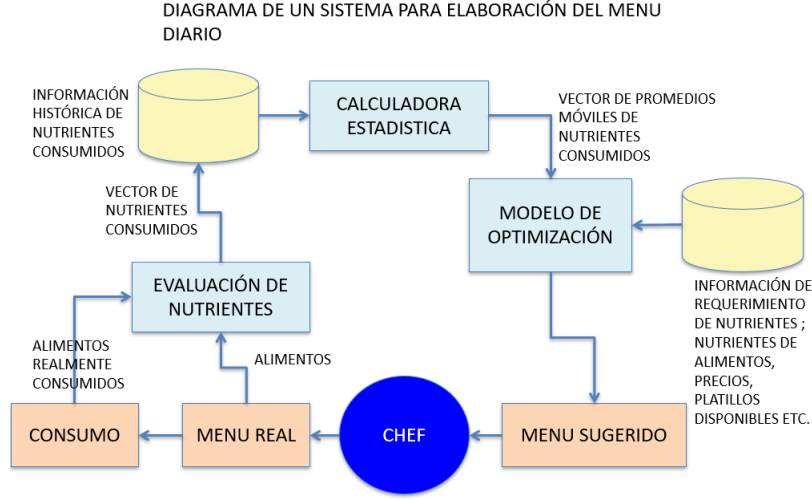
Fig 1. Ejemplo de receta “Arroz Rojo”.

2.2. Sistema para la elaboración de menús

El sistema que proponemos requiere de diversos componentes que retroalimentan al sistema. A continuación daremos una breve descripción de las fases del sistema.

- Modelo de optimización. El modelo representa una parte fundamental del sistema, donde el paradigma seleccionado es el de la optimización lineal entera. Este modelo se alimenta de una serie de parámetros, como la información de requerimiento de nutrientes, las recetas de los platillos, los costos de las materias primas y un vector de promedios móviles que reflejan el consumo real de nutrientes. Durante el proceso de optimización se elige un menú para las tres comidas del día que cumpla los requisitos nutricionales al menor costo.
- El menú sugerido por el modelo de optimización pasa a manos del chef, quien está encargado de implementarlo. Ahora bien, existen factores que pueden influir en que el menú real difiera del menú sugerido, por la ausencia de algún ingrediente o por la sustitución de algún otro ingrediente. Es por eso que se deben evaluar los aportes nutricionales reales que se almacenan en un vector de nutrientes consumidos. Para este fin, es preciso recabar información del consumo real de alimentos por parte de los comensales.
- Una vez evaluados los nutrientes consumidos, estos se almacenan en una base de datos, que lleva el historial de la información generada en cada ciclo del sistema.
- La información recabada durante cada ciclo del sistema se puede utilizar para realizar análisis estadísticos, entre otros, actualizar el vector de promedios móviles de los nutrientes consumidos.

A continuación el sistema explicado en un diagrama.



2.3. Modelo matemático

Ahora daremos mayor detalle del modelo de optimización. El modelo que proponemos es de tipo secuencial, es decir, debido a que un ciclo del sistema aplica a un solo menú, se realizarán tantos ciclos como días de planeación se requieran, pero cada ciclo se resolverá en tiempo real. Así que, en primer lugar, la función objetivo que proponemos para modelar el problema es la siguiente, para el k -ésimo día

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^5 \sum_{j \in A_k} \left(\alpha_{ij} + \varphi \frac{v(x_j)}{d(x_j)} - \lambda a_{ij} \right) x_{ij} + \sum_{i=1}^5 \sum_{j \in B_k} \left(\beta_{ij} + \varphi \frac{v(y_j)}{d(y_j)} - \lambda b_{ij} \right) y_{ij} \\ + \sum_{i=1}^4 \sum_{j \in C_k} \left(\gamma_{ij} + \varphi \frac{v(z_j)}{d(z_j)} - \lambda c_{ij} \right) z_{ij}, \end{aligned}$$

siendo las restricciones

$$\begin{aligned} \sum_{j \in A_k} x_{ij} &= 1, i = 1, \dots, 5 \\ \sum_{j \in B_k} y_{ij} &= 1, i = 1, \dots, 5 \\ \sum_{j \in A_k} z_{ij} &= 1, i = 1, \dots, 4 \end{aligned}$$

$$r_m^- \leq \sum_{i=1}^5 \sum_{j \in A_k} N_m(x_{ij}) + \sum_{i=1}^5 \sum_{j \in B_k} N_m(y_{ij}) + \sum_{i=1}^4 \sum_{j \in C_k} N_m(z_{ij}) \leq r_m^+.$$

Considerando que el desayuno está compuesto por cinco elementos: platillo principal, dos guarniciones, fruta y una bebida, así pues se designan cinco variables para cada elemento del desayuno $x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, x_{4j}, x_{5j}$. De manera análoga para la comida tenemos las variables $y_{1j}, y_{2j}, y_{3j}, y_{4j}, y_{5j}$, y para la cena las variables $z_{1j}, z_{2j}, z_{3j}, z_{4j}$. Estas variables son binarias, y el subíndice j recorre un conjunto de índices A_k, B_k, C_k para los distintos platillos que hay disponibles para cada categoría en el k -ésimo día. Si el valor de una variable es 1 eso indica que tal platillo se selecciona para el día en cuestión, si el valor es 0 significa que no ha sido seleccionado.

Las variables α_{ij}, β_{ij} y γ_{ij} son los costos de los platillos correspondientes. Las variables a_{ij}, b_{ij} y c_{ij} son las preferencias de los usuarios. Dado que las calificaciones se encuentran en el rango $[0, 5]$, todos los alimentos tienen una calificación inicial de 2.5, conforme el modelo se va utilizando, los usuarios deben calificar un menú con una calificación entre 0 y 5, y de esta manera se promedian las calificaciones asignadas con la calificación histórica acumulada de cada platillo de dicho menú. Para evitar la repetición monótona de algún platillo y para promover la variedad se incluye el cociente $\frac{v(x_{ij})}{d(x_{ij})}$, donde $v(x_{ij})$ se refiere al número de veces que se ha utilizado el platillo x_{ij} hasta el momento, $d(x_{ij})$ se refiere al número de días que han transcurrido desde la última vez que se utilizó. Los factores λ y φ son factores de conversión para interpretar las preferencias de los usuarios y el cociente $\frac{v}{d}$ como costos.

2.4. Cálculo nutricional

Para el cálculo de los valores nutricionales de los platillos de la base de datos que se elaboró, se utilizaron las tablas de composición de alimentos provenientes de dos fuentes, el United States Department of Agriculture (USDA) y el Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP) [1]. Los ingredientes de las recetas se buscaron de la manera más acorde con aquellos presentados en estas tablas. Un programa computacional lee los ingredientes de la receta y los busca en la tabla de composición de alimentos, se multiplican los valores nutricionales de 27 nutrientes reportados en las tablas por el gramaje de cada ingrediente, y se suman los valores obtenidos por ingrediente. Este método para calcular los valores nutricionales, aunque sencillo y natural, presenta algunos inconvenientes. El primero de ellos es que el cálculo de nutrientes en muchos casos es para materias primas en crudo. Es bien sabido que los procesos de cocción pueden cambiar los valores de algunos nutrientes en los alimentos, sin embargo, un cálculo detallado de los valores nutricionales de una receta requiere el conocimiento a priori (o cálculo experimental) de dos parámetros, el factor de rendimiento, que nos dice cuánto del peso de un alimento se preserva después de la cocción; y el factor de retención, que nos dice cuánto de un nutriente

se conserva después de la cocción. Este tipo de cálculo requiere por lo general realizar pruebas de laboratorio (para una discusión más detallada véase [2] y [20]), lo cuál queda fuera del enfoque de este trabajo, por lo cual nos quedaremos con el enfoque ya descrito.

2.5. Recomendaciones nutricionales

Para las recomendaciones nutricionales, seguimos aquellas propuestas en [3] para México.

Edad	Peso (Kg)	Sexo	Energía			Proteínas	
			Kcal			g/kg	Dieta mixta*
0-3 m	4.7	M-F	550			2.5	17
3-6 m	6.7	M-F	650			2.2	17
6-9 m	8.3	M-F	800			2.0	18
9-12 m	9.4	M-F	950			2.0	19
1-2 a	11.2	M-F	1100			1.6	18
2-3 a	13.4	M-F	1300			1.55	21
3-5 a	16.4	M-F	1500			1.5	25
5-7 a	20.7	M	1750			1.35	27
5-7 a	19.7	F	1600			1.35	27
7-10 a	26.7	M	2000			1.35	36
7-10 a	26.6	F	1700			1.35	36
Actividad Física							
			Liviana	Moderada	Fuerte		
Hombres							
10-12	35	2050	2200	2400		1.35	47
12-14	42	2150	2350	2650		1.35	57
14-16	52	2350	2650	3050		1.3	68
16-18	62	2650	3000	3400		1.2	74
18-65	68	2650	3100	3600		1.0	68
≥ 65	65	2050	2300	2600		1.0	68
Mujeres							
10-12	36	1750	1900	2000		1.35	47
12-14	43	1850	2000	2150		1.3	56
14-16	48	1900	2100	2350		1.2	58
16-18	50	1950	2150	2400		1.1	55
18-65	53	1950	2100	2350		1.0	53
≥ 65	55	1750	1850	2100		1.0	53
Energía y proteína adicional:							
Embarazo	285						6
Lactancia	500					≤ 6 m	23
						≥ 6 m	16

Hidratos de carbono	
60%-70% de la energía total	
Fibra dietética	
18-24 g	También puede usarse: 8-10 g por cada 1000 kcal tanto en niños como en adultos
Lípidos	
No mas de 30% de la energía total Un máximo de 25% es recomendado	
Acidos grasos saturados:	
No mas de 10% de la energía total	
Acidos grasos poliinsaturados:	
No menos de 7%-10% de la energía total	
Primeros 4-6 meses:	
50%-55% de la energía total en forma de grasa láctea (pecho materno)	
2-5 años de edad:	
30% de la energía y no más de 10% como ácidos grasos saturados	
Acidos grasos esenciales:	
3%-5%	
Colesterol:	
≤ 300 mg	
También puede usarse: 100 mg por cada 1000 kcal	
Proteínas	
10%-14%	

Hidratos de carbono

60%-70% de la energía total

Fibra dietética

18-24 g

También puede usarse:
8-10 g por cada 1000 kcal
tanto en niños como en adultos

Lípidos

No mas de 30% de la energía total
Un máximo de 25% es recomendado

Ácidos grasos saturados:

No mas de 10% de la energía total

Ácidos grasos poliinsaturados:

No menos de 7%-10% de la energía total

Primeros 4-6 meses:

50%-55% de la energía total en forma
de grasa láctea (pecho materno)

2-5 años de edad:

30% de la energía y no más de
10% como ácidos grasos saturados

Ácidos grasos esenciales:

3%-5%

Colesterol:

≤ 300 mg

También puede usarse:
100 mg por cada 1000 kcal

Proteínas

10%-14%

RECOMENDACIONES DIETICAS DIARIAS DE VITAMINAS Y NUTRIMENTOS INORGANICOS
Sugeridas para mantener una buena nutrición en prácticamente toda la población

Edad	A	Tia- mina	Ribo- flavina	Niacina	B6	A. Fólico	B12	C	D +	E + ET	Vit. K*	Biotina *	A. Pan- ténico *	Ca	Na (1)	K (1)	P	Mg (2) *	Mn	Fe	Zn	I - mcg	F - mg	Cu - mg	Se - mcg	Clor* mg
Niños	mcg ER	mg	mg	mg EN	mg	mcg	mcg	mg	mcg	mg	mcg	mcg	mg *	mg	mg	mg	mg	mg *	mg	mg	mg	mcg	mg	mg	mcg	mg
meses:																										
0-3	400	0.35	0.45	6	0.3	25	0.3	35	8	3	5	10	2	450	120	500	350	40	0.1-0.6	10	5	40	0.3	0.5	10	210
3-6	400	0.35	0.45	6	0.3	25	0.3	35	8	3	5	10	2	450	120	500	350	40	0.1-0.6	10	5	40	0.3	0.5	10	210
6-12	400	0.45	0.55	7	0.6	35	0.5	40	10	4	10	15	3	600	200	700	500	60	0.1-1.0	10	5	50	0.5	0.6	12	300
años:																										
1-3	400	0.5	0.8	9	1.0	50	0.7	40	10	6	15	20	3	800	225	1000	700	80	0.2-1.5	15	10	70	1.0	8.0	15	300
3-7	500	0.7	1.1	12	1.1	75	1.0	45	10	7	20	25	3.5	800	300	1400	800	120	0.3-2.0	15	10	90	1.5	1.2	20	430
7-10	700	1.0	1.2	14	1.4	100	1.4	45	10	7	30	30	4.5	800	400	1800	800	120	0.4-3.0	15	15	150	2.0	1.5	30	550
HOMBRES																										
10-12	1000	1.5	1.5	17	1.7	150	2.0	60	10	10	45	50	5.5	1200	500	2000	1200	350	0.8-5.0	15	15	150	2.0	2.0	35	800
12-14	1000	1.5	1.7	17	1.7	150	2.0	60	10	10	45	50	5.5	1200	500	2000	1200	350	0.8-5.0	15	15	150	2.0	2.0	45	800
14-18	1000	1.5	1.8	20	2.0	200	2.0	60	10	20	65	50	5.5	1200	500	2000	1200	400	0.8-5.0	15	15	150	2.0	2.0	60	800
18-25	1000	1.5	1.7	20	2.0	200	2.0	80	10	20	70	30-100	4.7	1200	500	2000	1200	350	1.4-5.0	15	15	150	3.0	2.5	70	900
25-65	1000	1.5	1.7	20	2.0	200	2.0	60	5	20	80	30-100	4.7	800	500	2000	800	350	1.4-5.0	15	15	150	3.0	2.5	70	900
≥ 65	1000	1.2	1.4	17	2.0	200	2.0	60	5	20	80	30-100	4.7	800	500	2000	800	350	1.4-5.0	15	15	150	3.0	2.5	70	900
MUJERES																										
10-12	800	1.2	1.3	15	1.4	150	2.0	60	10	20	45	50	5.5	1200	500	2000	1200	300	0.8-5.0	15	15	150	2.0	2.0	40	800
12-14	800	1.2	1.5	15	1.4	150	2.0	60	10	20	45	50	5.5	1200	500	2000	1200	300	0.8-5.0	20	15	150	2.0	2.0	45	800
14-18	800	1.2	1.5	17	1.6	200	2.0	60	10	20	45	50	5.5	1200	500	2000	1200	400	0.8-5.0	20	15	150	2.0	2.0	55	800
18-25	800	1.2	1.5	17	1.6	200	2.0	60	8	20	60	30-100	4.7	1200	500	2000	1200	300	1.4-5.0	20	15	150	3.0	2.5	60	900
25-65	800	1.2	1.5	17	1.6	200	2.0	80	5	20	65	30-100	4.7	800	500	2000	800	300	1.4-5.0	20	15	150	3.0	2.5	60	900
≥ 65	800	1.0	1.3	15	1.6	200	2.0	60	5	20	65	30-100	4.7	800	500	2000	800	300	1.4-5.0	15	15	150	3.0	2.5	60	900
Cantidades recomendadas durante:																										
Embarazo	1000	1.5	1.7	17	2.2	400 (3)	2.2	70	10	20	65			1200			1200	300		24**	15	200		3	5	
Lactancia	1300	1.6	1.8	20	2.2	300	2.6	95	10	20	65			1200			1200	400		15**	19	200		3	15	

Algorithm 1 Planeación de Menús

```
1: Inicializar categories, minNutrition, maxNutrition
2: recipees, food_table, cost_table = recipeeBuilder()
3: recipee_category, recipee_cost, nutrition_values = recipeeBook(recipees)
4: foods, cost = multidict(recipee_cost)
5: m = Model("mip1")
6: buy = m.addVars(foods, vtype = GRB.BINARY, name="buy")
7: m.setObjective(buy.prod(cost), GRB.MINIMIZE)
8: m.addConstrs()
9: m.optimize()
```

3. Resultados

3.1. Métodos de resolución exactos: Gurobi

Debido al planteamiento secuencial del modelo que proponemos, las dimensiones del problema permiten la utilización de metodos de resolución exactos. En nuestro caso recurrimos al solver desarrollado por Gurobi para este fin. A continuación daremos una descripción del seudo código utilizado. En el paso 1 se inicializa una estructura de datos que almacena los límites, inferior y superior, o tolerancias de la ingesta recomendada de cada nutriente. En el paso 2 se leen las recetas, la tabla de composición de alimentos y la tabla de costos de alimentos. En el paso 3 se calculan los precios de cada receta y su valor nutricional en un vector de nutrientes. En el paso 4 se construye una estructura de datos que almacena los costos de las recetas. En los pasos 5-9 se construye el modelo de programación lineal mixta, se generan las restricciones y se determina la función objetivo, por último, se optimiza el modelo, obteniendo como salida el menú para un día.

Referencias

- [1] N. Alfaro. *Tabla de Composición de Alimentos de Centroamerica*. INCAP, 2007.
- [2] A. Bogнар. Tables on weight yield of food and retention factors of food constituents for the calculation of nutrient composition of cooked foods (dishes). Technical report, Berichte der Bundesforschungsanstalt fur Ernährung, 2002.
- [3] A. Chavez V. and A. Ledesma. Recomendaciones de Nutrimientos para México. <http://www.nutripac.com.mx/software/rec-mex.pdf>, 1997.
- [4] COFEPRIS. Programa México Sano. <http://salud.michoacan.gob.mx/programa-mexico-sano-promesa/>.

- [5] J. A. Cordova Villalobos. *Guia de alimentacion para la poblacion mexicana*. Secretaria de Salud, 2010.
- [6] G. Dantzig. The Diet Problem. *INTERFACES*, 1990.
- [7] I. M. del Seguro Social. Guía para el cuidado de la salud. Internet.
- [8] S. Grantham-McGregor, Y. Bun, S. Cueto, and P. Glewwe. Developmental potential in the first 5 years for children in developing countries. *The Lancet*, 369(9555):60–70, Jan. 2007.
- [9] D. Hernandez, B. Cristina, A. Camacho, and H. Vera. *Desnutricion infantil y pobreza en México*. Number 12 in Cuadernos de Desarrollo Humano. Secretaria de Desarrollo Social, Oct. 2003.
- [10] INEGI. Disminuye la poblacion lectora en México. Comunicado de prensa, Apr. 2018.
- [11] INSP. Encuesta nacional de salud y nutricion, 2012.
- [12] INSP. Encuesta nacional de salud y nutricion de medio camino, 2016.
- [13] E. Kaldirim and K. Zekeriya. Application of a multi-objective genetic algorithm to the modified diet problem. Department of Computer Engineering, Istanbul Technical University, 2005.
- [14] B. Korousic Seljak. Computer-based dietary menu planning. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2009.
- [15] M. Martic, J. Petric, S. Krcevinac, and N. Mladenovic. Some experience in human nutrition and institutional menu planning and programming - models, solution methods, applications. *Yugoslav Journal of Operations Research*, 1(2):1, 1991.
- [16] R. Martorell, B. Horta, L. Adair, and A. Stein. Weight gain in the first two years of life is an important predictor of schooling outcomes in pooled analyses from five birth cohorts from low and middle-income countries. *The Journal of Nutrition*, 140(2):348–354, Feb. 2010.
- [17] M. R. Rojas Martinez. Epidemiología de la diabetes mellitus en México. *Academia Nacional de Medicina en México*, 2015.
- [18] G. Stigler. The Cost of Subsistence. *Journal of Farm Economics*, 27(2):303–314, May 1945.
- [19] UNICEF. *Improving Child Nutrition: The achievable imperative for global progress*. UNICEF, Apr. 2013.
- [20] A. L. Vasquez, S. Bell, and B. Hartmann. Report on collection of rules on use of recipe calculation procedures including the use of yield and retention factors for imputing nutrient values for composite foods. Technical report, European Food Information Resource, 2007.