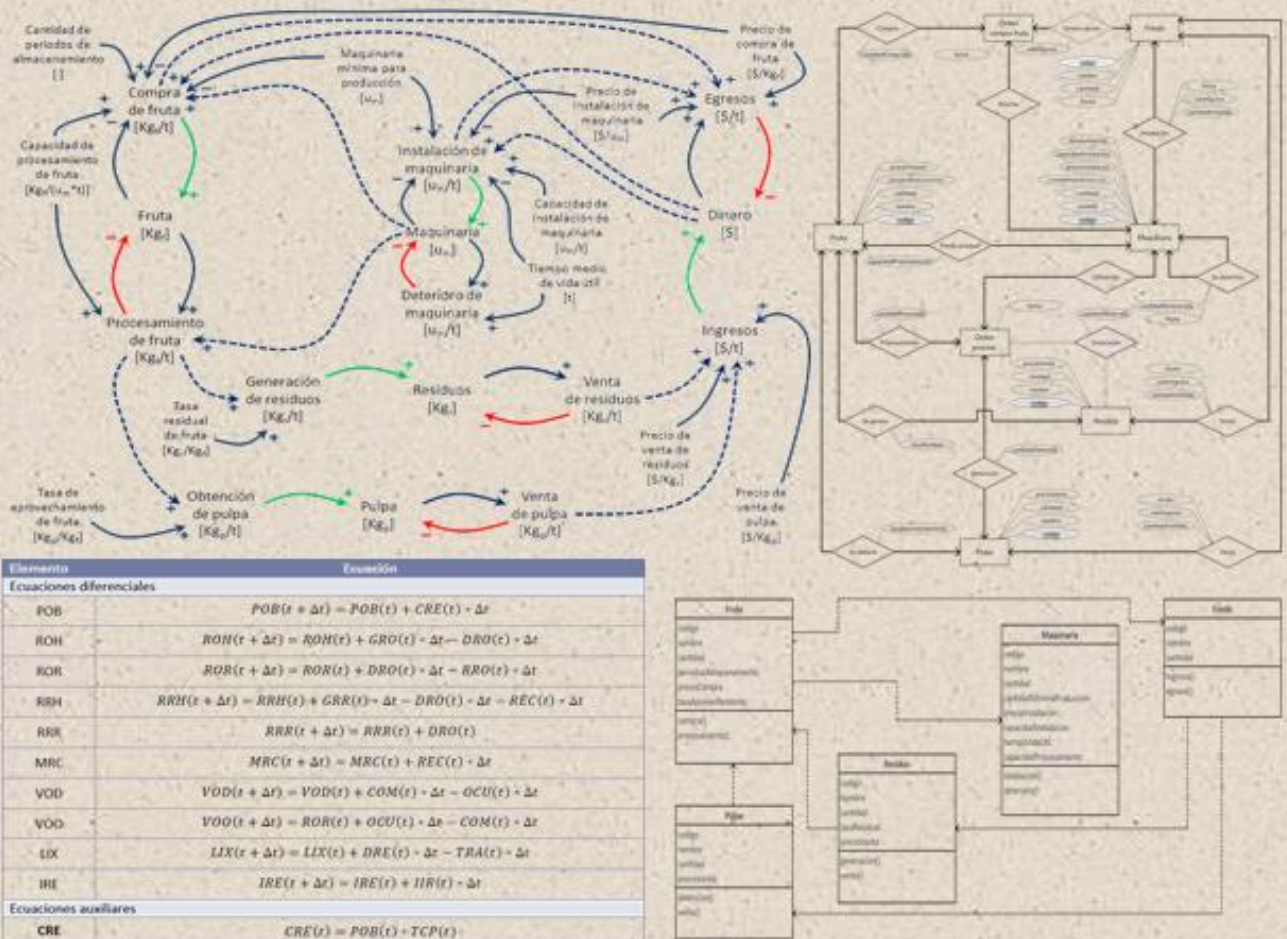


Desarrollo de Software conducido por modelamiento con Dinámica de Sistemas

Propuesta metodológica



Ricardo Vicente Jaime Vivas
 Carlos Andrés Palma Suárez
 Alexandra Soraya Beltrán Castro
 Danith Patricia Solórzano Escobar

**Desarrollo de Software
conducido por modelamiento con
Dinámica de Sistemas**
Propuesta metodológica

Desarrollo de Software conducido por modelamiento con Dinámica de Sistemas

Propuesta metodológica

**Ricardo Vicente Jaime Vivas
Carlos Andrés Palma Suárez
Alexandra Soraya Beltrán Castro
Danith Patricia Solórzano Escobar**

Desarrollo de Software conducido por modelamiento con Dinámica de Sistemas – Propuesta metodológica

Autores: Ricardo Vicente Jaime Vivas ricardojaime@udi.edu.co
Carlos Andrés Palma Suárez carlos.palma@udi.edu.co
Alexandra Soraya Beltrán Castro abeltran1@udi.edu.co
Danith Patricia Solórzano Escobar dsolorzano1@udi.edu.co

ISBN: 978-958-8796-08-6

Primera edición: Diciembre de 2018

La información contenida en esta obra es resultado del trabajo de los autores como integrantes del Grupo de Investigación en nuevas tecnologías aplicadas a la Educación – GIDSAW, de la Universidad de Investigación y Desarrollo – UDI.



©2018 Unidad de Publicaciones Universidad de Investigación y Desarrollo – UDI

Calle 9 # 23-55. Bucaramanga, Santander, Colombia.

Tel.: (+57-7) 6352525

Correo electrónico: investigaciones@udi.edu.co

Sitio web: www.udi.edu.co/investigaciones/142-publicaciones

Catalogación de la publicación en la Universidad de Investigación y Desarrollo UDI

Jaime, Ricardo; Palma, Carlos; Beltrán, Alexandra; Solórzano, Danith.

Desarrollo de Software conducido por modelamiento con Dinámica de Sistemas - Propuesta metodológica.

Primera edición.

Bucaramanga, Unidad de Publicaciones Universidad de Investigación y Desarrollo – UDI, 2018

244 páginas: ilustraciones; 21 x 28 cm.

ISBN: 978-958-8796-08-6

5 - Programación. Programas. Datos de computadores

UMZW - Ingeniería del software orientado a objetos

Contenido

| | |
|---|-----------|
| Prólogo | ix |
| 1 Contexto de la investigación..... | 1 |
| 1.1 Abordaje de casos soportado en herramientas simplificadas..... | 2 |
| 1.2 Programación Orientada a Objetos en Arquitectura de Capas | 4 |
| 1.3 Modelamiento con Dinámica de Sistemas | 5 |
| 1.4 Abordaje colectivo argumentado de casos de estudio | 6 |
| 1.5 Modelamiento en matemáticas..... | 7 |
| 1.6 Ingeniería del Software orientada por modelos..... | 7 |
| 1.7 Estructura del libro..... | 10 |
| Referencias | 12 |
| 2 Modelamiento en la ingeniería del software | 15 |
| 2.1 Introducción | 15 |
| 2.2 Las fases y los productos finales de ingeniería | 16 |
| 2.3 Implementación de los productos de ingeniería | 18 |
| 2.4 Diseño de productos de ingeniería | 20 |
| 2.5 Importancia de la Dinámica de Sistemas en el modelamiento de software | 23 |
| 2.6 Concepción y análisis de los productos de ingeniería | 24 |
| 2.7 Conclusiones | 25 |
| Referencias | 26 |
| 3 Transformación de modelos en diseños de software..... | 29 |
| 3.1 Desarrollo conducido por modelos..... | 29 |
| 3.2 Dinámica de Sistemas | 30 |
| 3.2.1 Modelamiento cuantitativo con Dinámica de Sistemas..... | 30 |
| 3.2.2 Modelamiento semántico. | 31 |
| 3.2.3 Perspectivas de Dinámica de Sistemas en modelamiento semántico | 31 |
| 3.3 Metodología propuesta. | 32 |
| 3.3.1 Modelamiento de la estructura básica del sistema. | 32 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3.2 | Modelamiento cuantitativo..... | 34 |
| 3.3.3 | Modelamiento enriquecido del sistema. | 35 |
| 3.3.4 | Transformación del modelo de Dinámica de Sistemas. | 37 |
| 3.3.5 | Depuración | 42 |
| | Referencias | 42 |
| 4 | Especies invasoras – Caso de estudio..... | 45 |
| 4.1 | Formulación del caso | 45 |
| 4.1.1 | Planteamiento | 45 |
| 4.1.2 | Pregunta | 46 |
| 4.2 | Solución de referencia | 46 |
| 4.2.1 | Modelamiento cualitativo de la estructura básica del sistema | 46 |
| 4.2.2 | Modelamiento cuantitativo..... | 48 |
| 4.2.3 | Modelamiento enriquecido del sistema | 49 |
| 4.2.4 | Simulación | 50 |
| 4.3 | Transformación del modelo de Dinámica de Sistemas | 53 |
| 4.3.1 | Diagrama de clases | 54 |
| 4.3.2 | Diagrama Entidad Relación..... | 55 |
| 4.4 | Implementación de prueba | 55 |
| 4.5 | Depuración y consideraciones finales | 58 |
| | Referencias | 61 |
| 5 | Productos financieros – Caso de estudio..... | 63 |
| 5.1 | Formulación del caso | 63 |
| 5.1.1 | Planteamiento | 63 |
| 5.1.2 | Preguntas..... | 64 |
| 5.2 | Solución de referencia | 64 |
| 5.2.1 | Modelamiento cualitativo de la estructura básica del sistema | 64 |
| 5.2.2 | Modelamiento cuantitativo..... | 65 |
| 5.2.3 | Modelamiento enriquecido del sistema | 67 |
| 5.2.4 | Simulación | 68 |
| 5.3 | Transformación del modelo de Dinámica de Sistemas | 71 |
| 5.3.1 | Diagrama de clases | 71 |
| 5.3.2 | Diagrama Entidad Relación..... | 72 |
| 5.4 | Implementación de prueba | 72 |
| 5.5 | Ampliación de la solución de referencia..... | 74 |
| 5.5.1 | Modelamiento cualitativo de la estructura básica del sistema | 74 |
| 5.5.2 | Modelamiento cuantitativo..... | 75 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.5.3 | Modelamiento enriquecido del sistema | 76 |
| 5.5.4 | Simulación | 77 |
| 5.6 | Transformación del modelo de Dinámica de Sistemas | 79 |
| 5.7 | Depuración y consideraciones finales | 82 |
| | Referencias | 86 |
| 6 | Procesamiento de frutas – Caso de estudio | 87 |
| 6.1 | Formulación del caso | 87 |
| 6.1.1 | Planteamiento | 87 |
| 6.1.2 | Pregunta | 88 |
| 6.2 | Solución de referencia | 89 |
| 6.2.1 | Modelamiento cualitativo de la estructura básica del sistema | 89 |
| 6.2.2 | Modelamiento cuantitativo..... | 92 |
| 6.2.3 | Modelamiento enriquecido del sistema | 100 |
| 6.2.4 | Simulación | 102 |
| 6.3 | Transformación del modelo de Dinámica de Sistemas | 110 |
| 6.3.1 | Diagrama de dominio | 110 |
| 6.3.2 | Diagrama de clases | 112 |
| 6.3.3 | Diagrama Entidad Relación..... | 116 |
| 6.4 | Depuración y consideraciones finales | 117 |
| 6.5 | Implementación de prueba | 118 |
| | Referencias | 127 |
| 7 | Derivados lácteos – Caso de estudio | 129 |
| 7.1 | Formulación del caso | 129 |
| 7.1.1 | Planteamiento | 129 |
| 7.1.2 | Pregunta | 130 |
| 7.2 | Solución de referencia | 130 |
| 7.2.1 | Modelamiento cualitativo de la estructura básica del sistema | 130 |
| 7.2.2 | Modelamiento cuantitativo..... | 135 |
| 7.2.3 | Modelamiento enriquecido del sistema | 147 |
| 7.2.4 | Simulación | 149 |
| 7.3 | Transformación del modelo de Dinámica de Sistemas | 151 |
| 7.3.1 | Diagrama de dominio | 152 |
| 7.3.2 | Diagrama de clases | 154 |
| 7.3.3 | Diagrama Entidad Relación..... | 157 |
| 7.4 | Depuración y consideraciones finales | 158 |
| 7.5 | Implementación de prueba | 160 |

| | |
|--|------------|
| Referencias | 164 |
| 8 Manejo forestal urbano – Caso de estudio..... | 167 |
| 8.1 Formulación del caso | 167 |
| 8.1.1 Planteamiento | 167 |
| 8.1.2 Pregunta | 168 |
| 8.2 Solución de referencia | 169 |
| 8.2.1 Modelamiento cualitativo de la estructura básica del sistema | 169 |
| 8.2.2 Modelamiento cuantitativo..... | 171 |
| 8.2.3 Modelamiento enriquecido del sistema | 176 |
| 8.2.4 Simulación | 178 |
| 8.3 Transformación del modelo de Dinámica de Sistemas | 181 |
| 8.3.1 Diagrama de dominio | 181 |
| 8.3.2 Diagrama de clases..... | 182 |
| 8.3.3 Diagrama Entidad Relación..... | 185 |
| 8.4 Depuración y consideraciones finales | 186 |
| 8.5 Implementación de prueba | 188 |
| Referencias | 195 |
| 9 Residuos sólidos urbanos – Caso de estudio | 197 |
| 9.1 Formulación del caso | 197 |
| 9.1.1 Planteamiento | 197 |
| 9.1.2 Pregunta | 199 |
| 9.2 Solución de referencia | 199 |
| 9.2.1 Modelamiento cualitativo de la estructura básica del sistema | 199 |
| 9.2.2 Modelamiento cuantitativo..... | 202 |
| 9.2.3 Modelamiento enriquecido del sistema | 209 |
| 9.2.4 Simulación | 212 |
| 9.3 Transformación del modelo de Dinámica de Sistemas | 215 |
| 9.3.1 Diagrama de dominio | 216 |
| 9.3.2 Diagrama de clases..... | 217 |
| 9.3.3 Diagrama Entidad Relación..... | 219 |
| 9.4 Depuración y consideraciones finales | 221 |
| 9.5 Implementación de prueba | 223 |
| Referencias | 231 |

Prólogo

Ricardo Jaime

Los lectores familiarizados con la Ingeniería del Software y los Sistemas de Información, ese híbrido que en Colombia denominamos Ingeniería de Sistemas, encontrarán aquí una propuesta para incorporar rigor y técnica matemática en el modelamiento conducente al desarrollo de software. Si son estudiantes de pregrado es probable que la Dinámica de Sistemas no haya llegado a sus oídos ni sea de su interés, ocupados como suelen estar en medio de paradigmas de programación y metodologías de desarrollo. Si nos dan a los autores un voto de confianza inicial, la lectura de este libro puede que responda a una pregunta frecuente: ¿para qué estudiamos matemáticas los que por cualquier razón nos enrolamos en esta disciplina? Acaso encuentren la motivación que hallaron una buena parte de los estudiantes del programa de pregrado en Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Investigación y Desarrollo UDI, que durante varios semestres participaron, desde sus cursos, como parte de los grupos experimentales y de control de los proyectos que dieron origen a este texto.

La versatilidad y el alcance generalista de la Dinámica de Sistemas están más que probados; los hilos de discusión en la estructura clásica de su evento más representativo, la *International System Dynamics Conference*, así lo evidencian: negocios, economía, medio ambiente, salud, comportamiento humano, información y conocimiento, política pública, recursos, seguridad, estrategia, entre otros. Los lectores en este campo encontrarán la misma propuesta hecha a los del párrafo anterior, salvo que al revés: una forma en que el modelamiento, además de su utilidad para la simulación y la consultoría, ampliamente divulgada en ponencias, artículos y libros, puede ser llevado a otro tipo de productos, como los sistemas de información.

Esta propuesta no se enmarca del todo en la ortodoxia de la Dinámica de Sistemas; tampoco en la de la Ingeniería del Software. No obstante su intención disruptiva, no pretende alejarse del todo de la identidad prevalente en ambas disciplinas, sino generar una posibilidad de cooperación. Ese es el propósito a partir de la página 1 en arábigos. Antes de eso, en este bloque numerado en romanos, corresponde mencionar aspectos menos metodológicos del proceso, y sin embargo influyentes. Voy a aprovechar esta sección en que me tomo la vocería del grupo de autores, para relatar desde mi perspectiva la trayectoria en que esta idea se concretó. Será el único privilegio que me arrogue de forma inconsulta, y espero no dar motivo para quejas de ninguno de mis compañeros.

Han sido al menos tres largas etapas, contando desde un intento de fuga del pregrado en Ingeniería de Sistemas de la Universidad Industrial de Santander UIS, hace ya muchos años. En el curso de *Sistemas Dinámicos II*, armado de un libro introductorio escrito por Javier Aracil y las

memorias de un congreso internacional, el profesor Hugo Andrade nos presentó la Dinámica de Sistemas. Conformó para tal fin un ambiente estimulante de discusión sobre problemas de la actualidad de entonces, como el racionamiento de energía eléctrica por el que esa época terminó siendo llamada la del apagón, al inicio de la última década del siglo XX. Me quedaba la reflexión sobre lo complejo e interesante que resulta modelar un sistema para entender su comportamiento, en comparación con lo rutinario de programar computadores para resolver problemas puntuales de nómina, contabilidad e inventarios, típicos del desarrollo de sistemas de información, oficio que como candidato a desertor me parecía poco llamativo, a decir verdad más por el encierro en las salas de informática que por la programación en sí misma. Mi nota final del curso fue el resultado de un extraño cómputo entre lo correspondiente a un logro incipiente y lo que se me otorgó como enorme voto de confianza; me hizo sentir comprometido a solicitar ingreso al Grupo SIMON de Investigación en Modelamiento y Simulación, fundado y dirigido por el mismo profesor.

Un trabajo final de pregrado después, inusualmente prolongado, vino el llamado del profesor Hugo para unirme a su equipo de apoyo, ya que él había aceptado ser coautor del libro *Pensamiento Sistémico – Diversidad en búsqueda de unidad*. Me permitió contribuir en algunos diagramas y párrafos acerca de nuestra forma de modelar con Dinámica de Sistemas. Todo esto sin hacer nada de software, de modo que la fuga transcurría exitosa.

Pero un buen día hay que sentar cabeza, ponerse a trabajar en el sentido remunerado del término, cosa difícil cuando ya era costumbre hacerlo por el solo gusto de seguir en la UIS. ¿Y en qué trabajaría un ingeniero de sistemas de esos años? ¡Pues... desarrollando software!

Los aspectos sociales no suelen quedar mencionados en las incidencias ni en los resultados de los proyectos de investigación, pero los co-producen. La empresa para la que empecé a desarrollar software - el sistema, como suele decirse - no tenía sala de informática con aire acondicionado sino un kiosco en medio de una plantación, en donde se lidiaba en principio con lo de costumbre: la nómina. De hecho no había ni un solo computador. Luego del primer "sistema" de nómina, el Dr. Edgar Restrepo, por cuya invitación llegué a la empresa, amplió la oportunidad de echar líneas de código y sobre todo números a otros asuntos de la agroindustria, como producción, suelos, plagas, fisiología y varios más, expuesto tanto al conocimiento institucional del agrónomo egresado de la Universidad Nacional, como al conocimiento vernáculo de los campesinos que recorren la plantación haciendo el duro trabajo del mantenimiento y la cosecha. En este ambiente el desarrollo de software servía a la causa de generar confianza mutua entre empresarios y trabajadores para lo cual, desde la trastienda, mediante la Dinámica de Sistemas modelaba tratando de entender en qué lío me había metido.

En la UDI se configuró el escenario para formalizar lo que hasta entonces era solo una idea acompañada de bosquejos. Fue determinante el encuentro paulatino con los tres ingenieros coautores en el Grupo de Investigación GIDSAW: Carlos Palma y Alexandra Beltrán, expertos en Ingeniería del Software y modelamiento de bases de datos relacionales respectivamente; y Danith Solórzano, quien para entonces discurría - ¡discurría, profesora Danith! - con el desarrollo de software orientado por modelos durante sus estudios de maestría. Los cuatro hacemos parte de un colectivo más amplio de docentes del programa de Ingeniería de Sistemas

que discute permanentemente sobre el currículo. Con este equipo se ensambló el material inédito generado en proyectos de investigación. Surtido el proceso formal institucional, dos pares evaluadores que fungen como garantes recomendaron la publicación, por cumplir con los términos exigibles para un libro resultado de investigación en el modelo vigente de medición de resultados de los grupos por parte de COLCIENCIAS.

¿Vale la pena publicarlo? Con estas palabras al calor de un café fui emplazado a asegurar que el libro, aún en fase temprana de elaboración, presentaría aportes originales y significativos; que no gestionaría su publicación sólo por la necesidad práctica del grupo frente al modelo de evaluación, y mucho menos por la vanidad de figurar como autor. Este escepticismo es indispensable en el oficio académico; por eso, y máxime viniendo de alguien de cuyas opiniones y pesquisas severas en todo aspecto me fío, me propuse responder la pregunta.

Mi indagadora estuvo encargada de la revisión de estilo para la revista de investigaciones de la UDI. Para analizar un artículo resaltaba con diferentes colores las partes de cada párrafo, a medida que comparaba diversas opciones de reorganización. Según me contó, lo aprendió en las bases de lingüística en su licenciatura y ahora que cursa doctorado lo sigue aplicando en sus propios escritos, como recurso para identificar referencias explícitas o implícitas a ideas, voces e ideologías, asumiendo la lectura y la escritura como procesos en que ambos, el autor y el lector, dan sentido a los textos que construyen y deconstruyen. Ella lo explica mejor que yo, desde luego, pero voy a tomar de aquí elementos, quizás solo pretextos, para responder.

Hemos tomado al menos tres riesgos a lo largo del proyecto que produjo este libro: prescindir del diagrama de flujos y niveles, también llamado Diagrama de Forrester; restringir inicialmente a sustantivos y verbos los elementos del diagrama de influencias; y atribuirle significado a los colores de las líneas en este último. En la *33rd International System Dynamics Conference* hubo opiniones divididas al respecto. Un evaluador calificó esto como una contravención frente a la tradición de líneas siempre negras, continuas o punteadas; pero no lo rechazó de forma tajante, al contrario, abrió el espacio para su exposición.

Lo de los colores en este prólogo puede ser solo un artificio para conectar dos anécdotas. No obstante, con los colores también destacamos y ordenamos ideas aquí. Resaltamos cosas como que entre sustantivos-verbos en el aspecto lingüístico, variables-derivadas en el ámbito matemático, y atributos-métodos en el campo del desarrollo orientado a objetos, existe una correspondencia que consideramos conveniente aprovechar para el proceso de construcción del conocimiento con respecto a sistemas en los que se plantee intervenir mediante desarrollos de software. Esta idea como mínimo es original, y para que alguien más pueda adherir o disentir de ella, pienso que sí vale la pena echar este libro a andar.

Agradecimientos

Además de los ya mencionados, agradecemos en general a la planta de docentes del programa de Ingeniería de Sistemas y a sus estudiantes, a quienes han sido integrantes del Grupo de Investigación GIDSAW, y de forma particular a la Dra. Lina Margarita Henao por su apoyo y diligencia desde la Dirección de Investigaciones de la Universidad de Investigación y Desarrollo.

1 Contexto de la investigación

Este libro surge formalmente como resultado del proyecto de investigación *Ingeniería de Software orientada por modelos con Dinámica de Sistemas*. Sin embargo su origen se remonta a una secuencia de proyectos anteriores, que constituyen un proceso de largo aliento en el Grupo de Investigación en Nuevas Tecnologías aplicadas a la Educación GIDSAW, de la Universidad de Investigación y Desarrollo UDI.

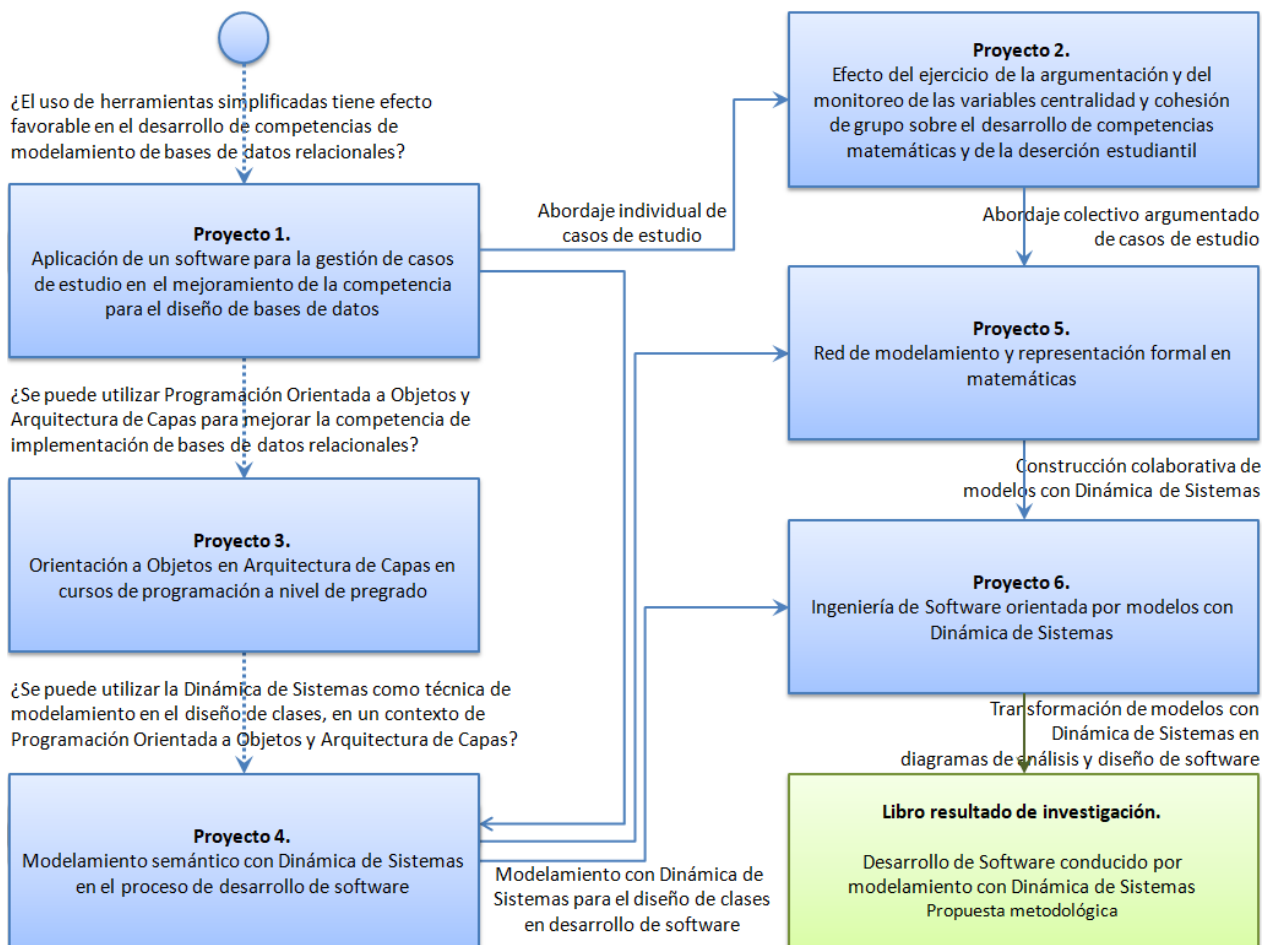


Figura 1.1 Traza de proyectos de investigación que preceden a este libro

La Figura 1.1 muestra la traza de dichos proyectos, en que se generaron las experiencias metodológicas (líneas continuas) y las preguntas de investigación aplicada con experimentación en el aula (líneas punteadas) que condujeron a este resultado.

1.1 Abordaje de casos soportado en herramientas simplificadas

En el marco de una reestructuración del sistema de investigaciones de la UDI, en el año 2008 se abrió una convocatoria interna de proyectos. El grupo GIDSAW, cuya área de desempeño inicial era el desarrollo de software y aplicativos web, amplió su campo de acción hacia una línea de investigación en nuevas tecnologías aplicadas a la educación, asumiendo como propósito transversal a sus proyectos ejercer una influencia favorable en la docencia, de la que los estudiantes de la UDI fueran beneficiarios.

En varios cursos del programa de pregrado en Ingeniería de Sistemas se presentaba la problemática de bajo rendimiento y deserción académica. Uno de los casos más preocupantes era el curso de Bases de Datos I, dedicado al aprendizaje de análisis y diseño de bases de datos relacionales.

Connolly & Begg (2006) señalan que el aprendizaje en este campo es particularmente difícil y que, según diversos estudios, es una de las competencias más deficientes en el ámbito profesional en Ciencias de la Computación y Sistemas de Información, tanto en Estados Unidos como en Europa. Entre las principales causas mencionan la persistencia de un enfoque objetivista en los cursos de bases de datos, orientados exclusivamente a la presentación de conceptos técnicos que los estudiantes atienden de forma pasiva. Philip (2007) agrega a la problemática la existencia de áreas frecuentes de confusión, por conceptos no suficientemente definidos en los textos y no clarificados en la práctica.

Las herramientas utilizadas en los cursos de bases de datos también constituyen parte del problema. Si bien no existen mayores reparos a Oracle, PostgreSQL e incluso Microsoft Access como herramientas apropiadas para uso a nivel comercial, sí hay cuestionamientos acerca de su conveniencia como herramientas para el aprendizaje, dado que su alta complejidad lleva al estudiante a enfrentar dos problemas a la vez: aprender a diseñar bases de datos y aprender a utilizar software de implementación sin la destreza ni el conocimiento suficientes en cuanto al análisis y el diseño (Bogdanovic, Stanimirovic, Davidovic, & Stoimenov, 2008).

Las anteriores consideraciones dieron origen al proyecto ***Aplicación de un software para la gestión de casos de estudio en el mejoramiento de la competencia para el diseño de bases de datos***, a la postre uno de los seleccionados en la convocatoria interna de la UDI, que luego se ejecutó entre los años 2008 y 2010. La pregunta de investigación fue: ¿El uso de herramientas simplificadas tiene efecto favorable en el desarrollo de competencias de modelamiento de bases de datos relacionales?

Se revisaron argumentos a favor de la adopción de un enfoque constructivista basado en problemas (Cheong, 2008; Connolly & Begg, 2006; Van Gorp & Grissom, 2001), la inclusión de actividades de implementación de los diseños para efectos de comprobación por parte de los estudiantes (Abdullat, 2001), el uso de herramientas de propósito general como las hojas de cálculo para introducir al estudiante en actividades de organización de la información (Steinberg, 2007), la utilización de software educativo desarrollado a partir de requisitos didácticos específicos del curso (Bogdanovic et al., 2008; Wals Zurita, 2005) y el modelamiento

con datos reales sobre temas significativos para los estudiantes durante el trabajo de diseño (Chen, 2000; Chen & Ray, 2004).

Se desarrolló un software para el modelamiento de bases de datos relacionales denominado **MBD**, cuya versión 3.0 se consideró estable para ser incorporada a un curso experimental orientado por una metodología basada en casos de estudio: en primera instancia se formula un planteamiento de caso, se acompaña al estudiante en su exploración temática, proponiendo al comienzo temas cercanos a sus intereses, y poco a poco exponiéndolos a mayor necesidad de investigación en temas nuevos; como resultado de su exploración los estudiantes recopilan datos sobre el tema propuesto y proceden al modelamiento de los mismos para generar un diseño de base de datos, que luego implementan en el software. En una sesión de clase posterior se realiza la socialización de los diseños y se abre la discusión sobre la calidad de los mismos. En promedio a lo largo de la fase experimental cada dos semanas los estudiantes de forma individual diseñaron una base de datos relacional, la pusieron a prueba incluyendo datos reales, formulando y ejecutando consultas, y sustentando el trabajo frente a sus pares.

Como resultado de este primer proyecto, se encontraron avances en varios aspectos: los estudiantes mejoraron su competencia para utilizar internet como fuente de información, exploraron grandes cantidades de datos, ganaron destreza en las técnicas de diseño de bases de datos relacionales y pudieron formular consultas con varias semanas de anticipación con respecto al curso tradicional (Jaime, 2009).

Desde luego, también surgieron dificultades, siendo la más significativa la dependencia que los estudiantes desarrollaron con respecto a la herramienta didáctica, por lo que durante la replicación del experimento en periodos posteriores se buscó un equilibrio entre la cantidad y complejidad de casos desarrollados con el software didáctico, y los desarrollados con los manejadores usuales en la práctica profesional, tales como Oracle o PostgreSQL.

Aunque su objetivo directo era el curso académico de Bases de Datos I, este proyecto generó conclusiones importantes acerca de la favorabilidad del aprendizaje basado en casos de estudio, de la utilización de herramientas informáticas simplificadas, y de no restringir el acceso a Internet durante las sesiones de clase y las evaluaciones, sino elaborar estrategias para incorporarlo a la dinámica del proceso de aprendizaje incluso durante la evaluación.

El abordaje temprano de la construcción de consultas en lenguaje SQL, generó preguntas de tipo práctico por parte de los estudiantes, acerca de la manera como se implementan estas consultas ya no en una herramienta didáctica ni en un manejador de bases de datos, sino a nivel de desarrollo de aplicaciones en un lenguaje de programación; es decir, los estudiantes empezaron a requerir la integración entre lo que aprendían en el curso de Bases de Datos I y lo que estudiaban en los cursos de programación.

Estas nuevas inquietudes de los estudiantes contribuyeron a que se buscara la posibilidad de incluir nociones básicas de programación con acceso a bases de datos. Pero un obstáculo en este propósito era que las bases de datos se suelen estudiar aparte de la programación, de manera que cursos que se veían simultáneos como Estructuras de Datos y Bases de Datos, eran percibidos como pertenecientes a líneas de estudio diferentes.

Ante la imposibilidad de destinar horas del curso de Bases de Datos I a repasar conceptos de programación, para poder introducir la conexión a bases de datos se formuló la conveniencia de que previo a este curso los estudiantes alcanzaran a trabajar en la implementación de persistencia de datos, un tema tradicionalmente tardío en los cursos de programación. Se buscó una estrategia para anticipar el aprendizaje de manejo de archivos planos en los cursos de fundamentos de programación, como precursores para que en el curso de Bases de Datos I se pudiera incluir el componente de programación con acceso a bases de datos. Una manera posible de conseguirlo era incorporar fundamentos de Programación Orientada a Objetos en Arquitectura de Capas desde el primer año, de manera que para los estudiantes fuera claro que el acceso a una base de datos es una función especializada de las clases que conforman la capa de datos, separada de las capas de reglas y de presentación.

1.2 Programación Orientada a Objetos en Arquitectura de Capas

Este proyecto obtuvo del anterior la pregunta de investigación: ¿Se puede utilizar Programación Orientada a Objetos y Arquitectura de Capas para mejorar la competencia de implementación de bases de datos relacionales?

Introducir Programación Orientada a Objetos en el primer curso de programación, sin pasar por la etapa de programación secuencial o estructurada, era ya romper con una tradición arraigada. Proponer nociones de Arquitectura de Capas suponía además reflexionar si era prudente adelantar en casi 2 años el estudio de un tema hasta ahora reservado para los cursos de Ingeniería del Software, y se corría el riesgo de sobrecargar a los estudiantes que apenas iniciaban su carrera.

Acerca de la conveniencia de introducir técnicas y conceptos de Ingeniería del Software en los cursos básicos de programación, Towhidnejad & Salimi (1996) reportan resultados satisfactorios al introducir técnicas de *Personal Software Process (PSP)* en los dos primeros cursos de programación, en un intento por incorporar métodos de desarrollo disciplinado de software desde el inicio de la carrera de Ciencias de la Computación.

Westin & Nordström (2004) afirman que no se cuenta con libros textos apropiados, y que los entornos de desarrollo usuales en lenguajes como Java son a su vez demasiado complejos para principiantes; una problemática similar a la ya comentada con respecto al campo de las Bases de Datos.

La formulación del proyecto ***Orientación a Objetos en Arquitectura de Capas en cursos de programación a nivel de pregrado*** alcanzó un grado de dificultad superior al que se había estimado, pues implicaba cambios de enfoque de programación estructurada a Programación Orientada a Objetos, cambio de textos, de entornos de desarrollo, y sobre todo dejar de lado la aproximación algorítmica a la programación por la concepción de arquitectura de software, más propio de los cursos avanzados de Ingeniería del Software.

1.3 Modelamiento con Dinámica de Sistemas

La Dinámica de Sistemas consiste en la formulación, prueba y depuración de explicaciones de las causas internas del comportamiento de un sistema, para el desarrollo de políticas de manejo y toma de decisiones, haciendo uso de mapas informales, modelos formales y simulaciones computarizadas que representan el origen endógeno del comportamiento del sistema (Richardson, 2011).

Esta disciplina ha tenido una presencia tradicional en el plan de estudios de Ingeniería de Sistemas en la UDI, como metodología de modelamiento para la simulación. Sin embargo, por el perfil del egresado y el tipo de labores que caracteriza a esta profesión en el área de influencia de la institución, la simulación es un área que ha perdido interés.

El proyecto anterior dejó abierta una pregunta: ¿Se puede utilizar la Dinámica de Sistemas como técnica de modelamiento en el diseño de clases, en un contexto de Programación Orientada a Objetos y Arquitectura de Capas?

Esta pregunta, junto al interés por encontrar una nueva aplicación de la Dinámica de Sistemas diferente a la simulación, generó el contexto propicio para un nuevo proyecto denominado **Modelamiento semántico con Dinámica de Sistemas en el proceso de desarrollo de software**, en el que se optaba por una tendencia menos ortodoxa de modelamiento cualitativo, en la cual los diagramas propios de la metodología tradicional se utilizan para ayudar a las personas a externalizar y enriquecer sus modelos mentales (Wolstenholme, 1999), orientar discusiones, explicar el comportamiento de los sistemas a partir de estructuras cíclicas, ampliar el contexto de abordaje de un problema, y facilitar el paso entre el lenguaje natural y el lenguaje matemático (Coyle, 2000).

Partiendo de los conceptos de atributo y método, fundamentales en orientación a objetos, siendo los primeros características de los objetos y los segundos eventos de cambio de dichas características, se exploró la posibilidad de hacer corresponder los conceptos atributo y método con los de variable de estado y variable de flujo respectivamente, que son fundamentales en el uso clásico de la Dinámica de Sistemas para la simulación, y luego con los conceptos de variable y derivada propios del cálculo diferencial que hace parte de la base matemática de la Dinámica de Sistemas, para finalmente hacerlos corresponder también con los conceptos de sustantivo y verbo, no en el sentido gramatical sino en sentido estricto matemático. Con esto se estableció un puente entre la orientación a objetos y el lenguaje natural, que ahora habría que recorrer en sentido inverso, mediante una metodología resultado del proyecto de investigación (Jaime, 2012).

La metodología resultante, que se explica en detalle en el siguiente capítulo, fue incorporada a los cursos de Dinámica de Sistemas que pasaron de estar orientados a la simulación por computador, y se convirtieron en cursos de matemáticas para la Ingeniería de Sistemas, con el propósito de impactar favorablemente el desarrollo de competencias en diseño y desarrollo de software, experiencia a partir de la cual el curso fue seleccionado para integrarse a un nuevo proyecto de investigación.

1.4 Abordaje colectivo argumentado de casos de estudio

En el año 2010 el Ministerio de Educación Nacional, la Red Nacional Académica de Tecnología Avanzada RENATA y el Centro de Investigación de las Telecomunicaciones CINTEL, abrieron una convocatoria para conformar un banco de proyectos elegibles para apoyar la investigación, el desarrollo y la innovación educativa.

El grupo GIDSAW de la UDI, en asocio con los grupos TECNICE y TECNIMAT de la Universidad Central y el grupo KISHURIM de la Universidad Hebrea de Jerusalén, presentaron un proyecto titulado ***Efecto del ejercicio de la argumentación y del monitoreo de las variables centralidad y cohesión de grupo sobre el desarrollo de competencias matemáticas y de la deserción estudiantil***. Este proyecto hizo parte de los elegibles al cierre de la convocatoria.

El objetivo general era evaluar una estrategia pedagógica para el desarrollo de competencias mediante procesos argumentativos en la solución de casos matemáticos apoyados por computador. La experimentación se orientó al desarrollo de sesiones de solución de problemas en contexto, de forma colaborativa en línea, en grupos compuestos por estudiantes de primer semestre de ingeniería. Se introdujo el uso de categorías ontológicas en las sesiones de discusión, y se analizó la relación entre centralidad, cohesión de grupo, categoría argumentativa y el desarrollo de competencias matemáticas.

Según la definición de Gruber (1993), una ontología constituye una conceptualización formal y explícita de un conocimiento compartido. En esta definición, la conceptualización se refiere a un modelo abstracto de algún fenómeno del mundo del que se identifican los conceptos que son relevantes; explícito hace referencia a la necesidad de especificar de forma consciente los distintos conceptos que conforman una ontología; formal implica que la especificación debe representarse por medio de un lenguaje de representación formalizado; y compartido determina que una ontología debe, en el mejor de los casos, dar cuenta de conocimiento aceptado como mínimo, por el grupo de personas que deben usarla (Maldonado, Serrano Iglesias, Rodríguez, & Jaime, 2012).

Aunque la población objetivo de este proyecto era distinta, la experiencia desarrollada en el proyecto ***Aplicación de un software para la gestión de casos de estudio en el mejoramiento de la competencia para el diseño de bases de datos***, en cuanto al desarrollo de actividades de aprendizaje basadas en casos de estudio, fue importante para el diseño y ejecución de la fase experimental de este nuevo proyecto, y el salto cualitativo estaba dado por el hecho de que ya el interés del ejercicio pedagógico no se circunscribía a la comparación entre las respuestas que cada individuo realizó con respecto a un caso de estudio, sino al proceso de construcción colectiva de soluciones a los casos, y a los argumentos y dinámicas mediante los cuales cada uno de los estudiantes trata de convencer a los otros durante la construcción de la solución.

La experimentación en la UDI se efectuó con dos grupos de estudiantes del curso de matemáticas de primer semestre de Ingeniería. Un grupo participó en las sesiones de discusión de casos; el otro grupo fue de control.

Los resultados finales del proyecto fueron un tanto paradójicos. Por una parte, entre la media de las notas del grupo experimental y del grupo de control no hubo diferencia significativa; pero por otra parte, el número de sesiones en que los estudiantes participaban, y la cantidad de vínculos directos que establecían durante las mismas, resultaron ser muy buenos predictores de las notas finalmente obtenidas. Con base en esto se concluyó que en términos generales, el ejercicio de la argumentación en el abordaje de casos en un contexto de aprendizaje colaborativo soportado por computador tiene una incidencia favorable en el éxito académico y el desarrollo de competencias matemáticas. Pero se dejó establecido también que varios elementos del diseño metodológico, relacionados con el tipo de software a utilizar, el tipo y número de las categorías ontológicas, y la metodología de acompañamiento por parte de los docentes como moderadores de las sesiones de argumentación, requerirían de nuevos experimentos para poder afirmar o negar su impacto favorable en el aprendizaje (Jaime, Lizcano, Muñoz, & Gutiérrez, 2012).

1.5 Modelamiento en matemáticas

Finalmente, en este punto convergen el interés por mejorar el diseño metodológico del proyecto anterior, el indicio de la incidencia favorable del trabajo colaborativo soportado en computador, la necesidad de seguir buscando soluciones a los problemas de logro académico en el área de las matemáticas, y la expectativa de transformar el curso de Dinámica de Sistemas de estar orientado a las matemáticas para la simulación, a enfocar su interés en el modelamiento matemático para la mejora de las competencias de diseño en el desarrollo de software orientado a objetos.

Al equipo del proyecto anterior se unió el grupo de investigación COGNITEK de la Universidad Pedagógica Nacional, y de nuevo se obtuvo un resultado favorable en la convocatoria de RENATA y CINTEL del año 2011. Esta vez el proyecto se denominó ***Red de modelamiento y representación formal en matemáticas***.

El diseño metodológico y los materiales generados en este proyecto serán presentados en mayor detalle en los capítulos posteriores. Por ahora basta referir que, en cuanto a resultados, esta vez el grupo experimental aventajó al grupo de control, siendo las medias de las notas del último examen del semestre 4,07 y 3,28 respectivamente, lo que en términos cuantitativos es una diferencia del 24% a favor del grupo de control. Dado que la única diferencia entre el grupo experimental y el de control fue la mediación del software, se pudo atribuir un efecto favorable de la utilización de software para la mediación en el abordaje de casos de estudio en trabajo colaborativo, en el logro de competencias de modelamiento matemático con Dinámica de Sistemas (Jaime & Lizcano, 2015).

1.6 Ingeniería del Software orientada por modelos

Dos circunstancias de la dinámica en el programa de Ingeniería de Sistemas en la UDI propiciaron el contexto para la fase final de elaboración de este libro.

La Ingeniería de Sistemas, como sucede en general con las disciplinas profesionales del área de Tecnologías de la Información, atraviesa por un periodo crítico de baja demanda de admisión y deserción académica más elevada que la media de los programas universitarios de pregrado en Colombia.

Por otra parte, considerando el contexto regional de actuación de sus egresados, la UDI ofrece el programa de Ingeniería de Sistemas como un híbrido entre 3 de las 5 disciplinas que conforman el currículo propuesto por la *Association for Computing Machinery ACM* y el *Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE*, las dos instituciones internacionales de referencia en cuanto a currículo en el campo de la computación: Sistemas de información, Tecnología de la información, e Ingeniería del software. De la evolución reciente de estas tres disciplinas ha surgido la necesidad de que el plan de estudios migre del énfasis en la programación al énfasis en las arquitecturas implicadas en un proyecto de desarrollo de software: arquitectura de datos, de software, del negocio y arquitectura organizacional.

Por iniciativa de los docentes del programa se abordó la formulación de una propuesta de reforma curricular, de la cual resultó beneficiado el proyecto sobre Dinámica de Sistemas, pues de la discusión curricular emergió la propuesta de formalizar el método de obtención de diagramas de clases y diagramas relacionales, para depurarla y presentarla como una metodología de transformación de los modelos de influencias construidos con Dinámica de Sistemas, en el marco de lo que se conoce como Desarrollo de Software orientado por Modelos MDD (*Model Driven Development*). La metodología debía tener la capacidad de definir transformaciones de modelos de alto nivel de abstracción del sistema siguiendo un conjunto de reglas de transformación (Herrero & Carmona, 2013).

Se decidió entonces que, en paralelo con el estudio de la reforma curricular, el grupo GIDSAW llevara a cabo un proyecto de investigación que se denominó ***Ingeniería de Software orientada por modelos con Dinámica de Sistemas***, cuyo objetivo era formalizar la metodología de transformación de modelos con Dinámica de Sistemas en diagramas de análisis y diseño de software; de manera que los diagramas de clases, diagramas relacionales que conforman el análisis y diseño de los sistemas, que luego mediante técnicas de Ingeniería del Software se depuraran en diagramas de diseño de software que heredaran el rigor matemático con que se validan los diagramas de influencias a partir de los cuales son obtenidos mediante un proceso sistemático de transformación.

El resultado es el proceso que se presenta de forma preliminar en la Figura 1.2 y para cuya ampliación se dedica el resto de este libro. Comúnmente el proceso de análisis y diseño de software se lleva a cabo en ambiente de deliberación y negociación entre usuarios y desarrolladores; estos últimos utilizan Lenguaje Unificado de Modelamiento UML para construir las representaciones necesarias del sistema. Diversos autores, entre ellos Tignor (2004), señalan que ninguno de los modelos de UML representa la estructura ni el comportamiento de un sistema, por lo que la Dinámica de Sistemas es más conveniente para el modelamiento del problema. A lo anterior se agrega que los diagramas UML, como el diagrama de clases o el diagrama entidad relación, carecen de recursos matemáticos para la validación de su consistencia. La propuesta metodológica busca que los modelos UML puedan ser considerados

matemáticamente consistentes, en razón de ser obtenidos mediante transformación sistemática de modelos en Dinámica de Sistemas matemáticamente validados (Jaime, 2015).

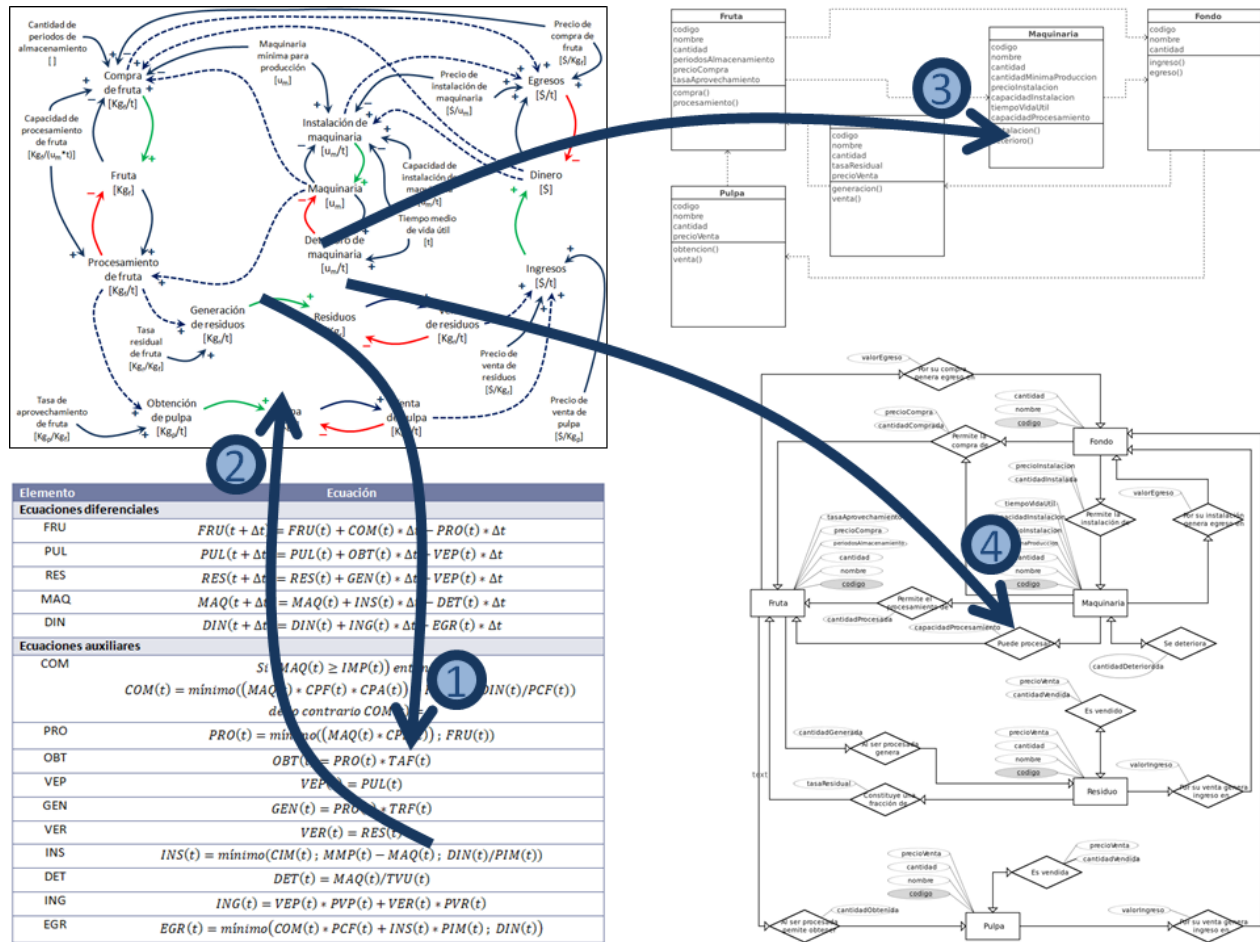


Figura 1.2 Presentación preliminar de la metodología propuesta.

Mediante la secuencia mostrada en la Figura 1.2, cuya presentación y ampliación se hará de forma gradual en los restantes capítulos, se propone un proceso cíclico de modelamiento entre diagramas de influencias y modelamiento matemático (1 y 2), que con algunas restricciones metodológicas sobre el proceso tradicional en Dinámica de Sistemas permita llegar a un diagrama de influencias susceptible de ser transformado en los diagramas UML del proceso de desarrollo de software, como el diagrama de clases (3) y el diagrama entidad relación (4).

Es preciso mencionar que el proceso de modelamiento dinámico sistémico tiene un valor adicional como recurso conversacional, con potenciales consecuencias favorables en el resultado de la discusión entre usuarios y desarrolladores de software. Partiendo del hecho de que el desarrollo de software está asociado a la intención de intervenir en un sistema problemático, para optimizarlo o controlarlo, el modelamiento con Dinámica de Sistemas permite ayudar a los grupos a construir conocimiento compartido acerca del problema o situación a intervenir, a ampliar gradualmente la complejidad del sistema considerada en la discusión, a enfocarse en la forma en que los procesos internos del sistema funcionan juntos

(Peterson, 2010). Estas características proveen una estructuración que con frecuencia hace falta en la interacción entre las partes involucradas en el proceso de desarrollo de software.

1.7 Estructura del libro

El capítulo 2 tiene el propósito de orientar a los lectores familiarizados con la Dinámica de Sistemas acerca del campo de aplicación que en este libro se le quiere dar a nivel metodológico dentro del proceso subyacente al desarrollo de software cuanto éste se hace como producto de ingeniería. La masificación del desarrollo de aplicaciones en el marco de programas gubernamentales de apoyo al emprendimiento digital, ha tenido un cierto efecto perverso de acrecentar una idea socialmente arraigada, que desvincula el desarrollo del software con la disciplina de la ingeniería. Este capítulo también cumple un rol en la agenda de restituir la concepción del desarrollo de la computación como producto de ingeniería, para lo cual la Dinámica de Sistemas se propone como base matemática de modelamiento y validación.

La Ingeniería del Software propone varios enfoques de desarrollo, uno de los cuales es el desarrollo conducido por modelos, que implica un altísimo nivel de abstracción. Ha sido el escenario escogido para el capítulo 3, en que la propuesta metodológica de modelamiento con Dinámica de Sistemas, resultante de la investigación en la UDI, se inserte formalmente en el desarrollo de software conducido por modelos, de modo que no se constituya en una propuesta completamente alternativa, sino inscrita en los esquemas comúnmente aceptados en la comunidad académica de la computación a nivel de ingeniería.

Los capítulos restantes presentan aspectos de la formulación, desarrollo e incremento de la complejidad de algunos casos utilizados en la fase experimental, y otros generados o revisitados en la replicación posterior de la metodología. En todos se hace un recorrido completo desde el planteamiento del caso, pasando por el modelamiento con Dinámica de Sistemas, hasta la formulación de una propuesta de desarrollo de software para el campo de acción implicado en el planteamiento correspondiente. Aunque la utilización propuesta para la Dinámica de Sistemas no es la simulación, se incluyó en la práctica experimental e igualmente en los capítulos de casos, como recurso para que el estudiante se familiarice con la idea de que la estructura de un sistema, que rige su comportamiento, puede ser expresada mediante un conjunto de ecuaciones en cuya elaboración emergen elementos que complementan y enriquecen los diseños de software. Con la ayuda del software MBD 3.0 mencionado ya en un apartado anterior, se realizó una implementación de prueba, que permite a su vez tener una visión preliminar de las funcionalidades y requisitos de un software diseñado a partir de modelos con Dinámica de Sistemas.

El capítulo 4 se basa en el modelo poblacional vegetativo, tradicional en los textos de Dinámica de Sistemas, de un grado de complejidad mínimo pero útil para introducir a los estudiantes sin experiencia previa al modelamiento mediante la identificación de elementos gramaticales y su asociación con elementos matemáticos y finalmente con conceptos de orientación a objetos y diseño de software.

El capítulo 5 es una aplicación igualmente sencilla, de un alcance básico para que fuera casi la replicación del caso anterior, pero que además implicaba para los estudiantes que participaron en la fase experimental del proyecto, el reconocer en la Dinámica de Sistemas un abordaje matemático alternativo al que aprendían en otros cursos de su plan de estudios como Matemáticas Financieras, con la ventaja de la conexión directa que se puede establecer entre el modelamiento con Dinámica de Sistemas y el diseño de software.

Los dos capítulos siguientes presentan casos de la etapa intermedia de la fase de experimentación, un poco más complejos y relacionados a entornos productivos de cierta familiaridad para los estudiantes. En el capítulo 6 se modela un proceso de producción de pulpas por fraccionamiento de la fruta como materia prima, mientras que en el capítulo 7 se modela un proceso de transformación de los componentes de la leche por parte de poblaciones de bacterias en la producción de derivados lácteos, renglones de la industria con presencia importante en la economía de la ciudad.

Los dos capítulos finales presentan casos relacionados con controversias públicas en el tema ambiental con los cuales además del objetivo directo de aprendizaje en cuanto al modelamiento matemático, se busca la posibilidad de motivar al estudiante de Ingeniería de Sistemas a discutir el papel de los desarrollos informáticos en la solución de problemas de la sociedad. En el capítulo 8 el caso trata del manejo forestal urbano y su relación con el control de la contaminación producida por los vehículos, y el capítulo 9 aborda el tema del manejo de residuos sólidos, álgido a nivel local para la época de la fase experimental.

Es pertinente anotar que los modelos presentados como desarrollo de los casos no constituyen nuevo conocimiento en sí mismos, y que su alcance debe ser entendido en el contexto de una experiencia pedagógica y metodológica. No obstante, se ha buscado que aún dentro de su limitación tengan una consistencia matemática que pueda servir al estudiante como referente de la conveniencia de incorporar modelos matemáticos al desarrollo de software.

La continuación de cada proceso de modelamiento, así como su utilización para problemas reales de producción de sistemas informáticos es cuestión de asumir un proceso de complejidad creciente, en el cual además se debería tener la participación de expertos, junto a los cuales el profesional de Ingeniería de Sistemas tendría la oportunidad de desplegar competencias de trabajo interdisciplinario que también hacen parte de su formación.

Finalmente, todo el esfuerzo de fortalecer las competencias matemáticas del estudiante de Ingeniería de Sistemas cobra sentido si este advierte que su aporte a la sociedad no es importante solamente en cuanto al desarrollo de aplicaciones informáticas, sino en cuanto a su visión como ingeniero, que le permita incorporarla como medio efectivo de solución a problemas de la sociedad.

Referencias

- Abdullat, A. A. (2001). Teaching A Database Systems Design Course : Is It Theory Or Practice? In *2001 Information Systems Educators Conference Proceedings*. Cincinnati.
- Bogdanovic, M., Stanimirovic, A., Davidovic, N., & Stoimenov, L. (2008). The development and usage of a Relational Database design tool for educational purposes. In *Proceedings of the Informing Science & IT Education Conference 2008*.
- Chen, C. (2000). Using realistic business data in teaching business problem solving. *Information Technology, Learning and Performance Journal*, 18(2), 41–50.
- Chen, C., & Ray, C. (2004). The systematic approach in teaching Database Applications: is there transfer when solving realistic business problems ? *Information Technology, Learning and Performance Journal*, 22(1), 9–21.
- Cheong, F. (2008). Using a problem-based learning approach to teach an intelligent systems course. *Journal of Information Technology Education*, 7, 47–60.
- Connolly, T. M., & Begg, C. E. (2006). A Constructivist-Based approach to teaching Database Analysis and Design. *Journal of Information Systems Education*, 17(1), 43–53.
- Coyle, G. (2000). Qualitative and quantitative modelling in system dynamics : some research questions. *System Dynamics Review*, 16(3), 225–244.
- Gruber, T. R. (1993). A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. *Knowledge Acquisition*, 5(2), 199–220.
- Herrero, J., & Carmona, P. (2013). A model-driven approach to develop high performance web applications. *The Journal of Systems & Software*, 86(12), 3013–3023.
- Jaime, R. (2009). An Educational Software Supported Constructivist Methodology for Data Modeling and Database Design Skills Improvement. *Proceedings of 2009 Information Systems Education Conference Isecon*, 26(Washington DC), 1–7. Retrieved from <http://proc.isecon.org/2009/4144/ISECON.2009.Jaime.pdf>
- Jaime, R. (2012). Modelamiento Semántico con Dinámica de Sistemas en el proceso de desarrollo de software. *RISTI Revista Ibérica de Sistemas y Tecnologías de La Información*, (10), 19–34.
- Jaime, R. (2015). System Dynamics for a mathematical modeling approach in Software Engineering and Information Systems. In *33rd International Conference of the System Dynamics Society* (pp. 1494–1507). Cambridge, Massachusetts, USA: Curran Associates.
- Jaime, R., & Lizcano, A. (2015). ICT mediated collaborative work in system dynamics learning. *DYNA*, 82(189), 59–67.
- Jaime, R., Lizcano, A., Muñoz, O., & Gutiérrez, J. (2012). Análisis de redes y desarrollo de competencias matemáticas. In *Memorias del 11° Congreso Iberoamericano de Informática Educativa*. Bogotá D.C.
- Maldonado, L. F., Serrano Iglesias, E., Rodríguez, M., & Jaime, R. (2012). Gestión de redes de aprendizaje: revisión de investigaciones. *Revista de Ciencia, Educación, Innovación y Cultura Apoyadas Por Redes de Tecnología Avanzada*, 2(3), 145–163.
- Peterson, S. (2010). Systems thinking for anyone: practices to consider. In J. Richmond, L. Stuntz, K. Richmond, & J. Egner (Eds.), *Tracing connections - Voices of Systems Thinkers* (1st ed., pp. 30–51). Acton, Massachusetts, USA: ISEE Systems & The Creative Learning Exchange.
- Philip, G. C. (2007). Teaching Database Modeling and Design: areas of confusion and helpful hints.
-

Journal of Information Technology Education, 6, 481–497.

- Richardson, G. P. (2011). The field of System Dynamics. Retrieved from <http://www.systemdynamics.org/what-is-s/>
- Steinberg, G. (2007). Teaching Relational Database concepts to computer literacy students: the spreadsheet metaphor. In *Proceedings of the Information Systems Educator's Conference* (Vol. 24, pp. 1–11).
- Tignor, W. (2004). System Engineering and System Dynamics models. In M. Kennedy, G. Winch, R. Langer, J. Rowe, & J. Yanni (Eds.), *Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society* (Vol. 34, p. 110). Oxford, Inglaterra: System Dynamics Society. <http://doi.org/10.1093/carcin/bgt388>
- Towhidnejad, M., & Salimi, A. (1996). Incorporating a disciplined software development process into introductory Computer Science Programming courses: initial results. In *Proceedings of Frontiers in Education Conference* (pp. 497–500). Salt Lake City, Utah: IEEE.
- Van Gorp, M. J., & Grissom, S. (2001). An empirical evaluation of using constructive classroom activities to teach introductory programming. *Computer Science Education*, 11(3), 247–260. <http://doi.org/10.1076/csed.11.3.247.3837>
- Wals Zurita, I. (2005). *Herramienta Web para la enseñanza de Bases de Datos* (1st ed.). Sevilla, España: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática. Universidad de Sevilla.
- Westin, L. K., & Nordström, M. (2004). Teaching OO Concepts - A new approach. In *Proceedings of Frontiers in Education Conference* (pp. 6–11). Savannah, GA: IEEE.
- Wolstenholme, E. (1999). Qualitative vs Quantitative Modelling : the evolving balance. *The Journal of the Operational Research Society*, 50(4), 422–428.
-

2 Modelamiento en la ingeniería del software

2.1 Introducción

Los inicios de la ingeniería se remontan hasta hace más de 3000 años, con la fabricación de las primeras máquinas para diferentes campos como la manufactura, la construcción y la guerra, aplicando conocimientos técnicos para inventarlas, desarrollarlas y mejorarlas por medio del aprovechamiento de diferentes recursos y logrando así realizar labores con menor esfuerzo y mayor eficacia. Para lograr su fabricación la ingeniería utiliza conceptos de otras áreas de conocimiento como las matemáticas, la física, la química, entre otras ciencias con el fin de desarrollar nuevas tecnologías, aplicar o modificar con eficiencia las existentes, y manejar los recursos con los que puede contar.

Los elementos resultantes de un proceso de ingeniería, tales como máquinas en ingeniería mecánica, edificaciones en ingeniería civil, redes de generación, transporte y distribución en ingeniería eléctrica, dispositivos en ingeniería electrónica, software en ingeniería de sistemas, son construidos y evaluados bajo parámetros de calidad a través de diferentes fases o actividades, durante los cuales se verifican diferentes modelos de representación basados en la resolución de las necesidades presentadas por los usuarios o clientes que utilizarán los productos finales. El modelamiento realizado en el proceso de ingeniería se torna fundamental para comprobar los parámetros de calidad y verificar el aporte del producto a la solución de un problema en un contexto particular.

Al igual que en la fabricación de elementos físicos, para el desarrollo de software, lo que incluye los programas de computador, su documentación y las estructuras de datos requeridos para su funcionamiento (Sommerville, 2011), se aplican conocimientos técnicos con el fin de mejorar los procesos de ingreso, almacenamiento, procesamiento, transporte y presentación de la información, aprovechando los diferentes recursos con los que se cuenta durante su desarrollo. La implementación de procesos de ingeniería en el desarrollo de software ha tomado gran importancia, dado que este se ha vuelto indispensable para los negocios, las ciencias y como gran apoyo en otros campos de ingeniería, y ha permitido la creación de tecnologías nuevas o la ampliación de las existentes.

Además, el software se ha vuelto tan importante que está cambiando la manera en que las organizaciones desarrollan sus actividades y logran mejoras importantes a partir de la automatización de procesos de negocio, la obtención de información de apoyo para una toma de decisiones adecuada, y la consecución de ventajas competitivas.

2.2 Las fases y los productos finales de ingeniería

Todo proceso de ingeniería se ejecuta en una serie de etapas o fases que, de manera muy generalizada, comprenden: una fase inicial de pre-diseño o análisis donde se identifican y se especifican las necesidades de los usuarios o interesados en el resultado final, se establece la viabilidad y alcance de la solución; una fase intermedia de diseño en la que se bosqueja y detalla el producto a través de la generación de modelos, planos, cálculos y la determinación de parámetros de cumplimiento; y una fase final de implementación en que se fabrica el producto, se prueba para verificar su calidad y se entrega al usuario final.

En el caso del desarrollo del software, para cada fase se define un conjunto de tareas organizadas mediante una estructura de trabajo llamada ciclo de vida de desarrollo de software, que presenta enfoques adaptables respecto a su secuencia y al tiempo, dependiendo del tipo de proyecto, de la metodología a implementar y de la experiencia del equipo de trabajo. En la Figura 2.1 se presenta la generalización de estas fases: análisis, diseño e implementación, esta última conformada por las etapas de programación y pruebas. No se consideran aquí otras actividades relacionadas con el software después de que está listo para su implantación dentro de la organización, ni otras actividades paralelas que envuelven todo el proceso de gestión del desarrollo de una aplicación software.

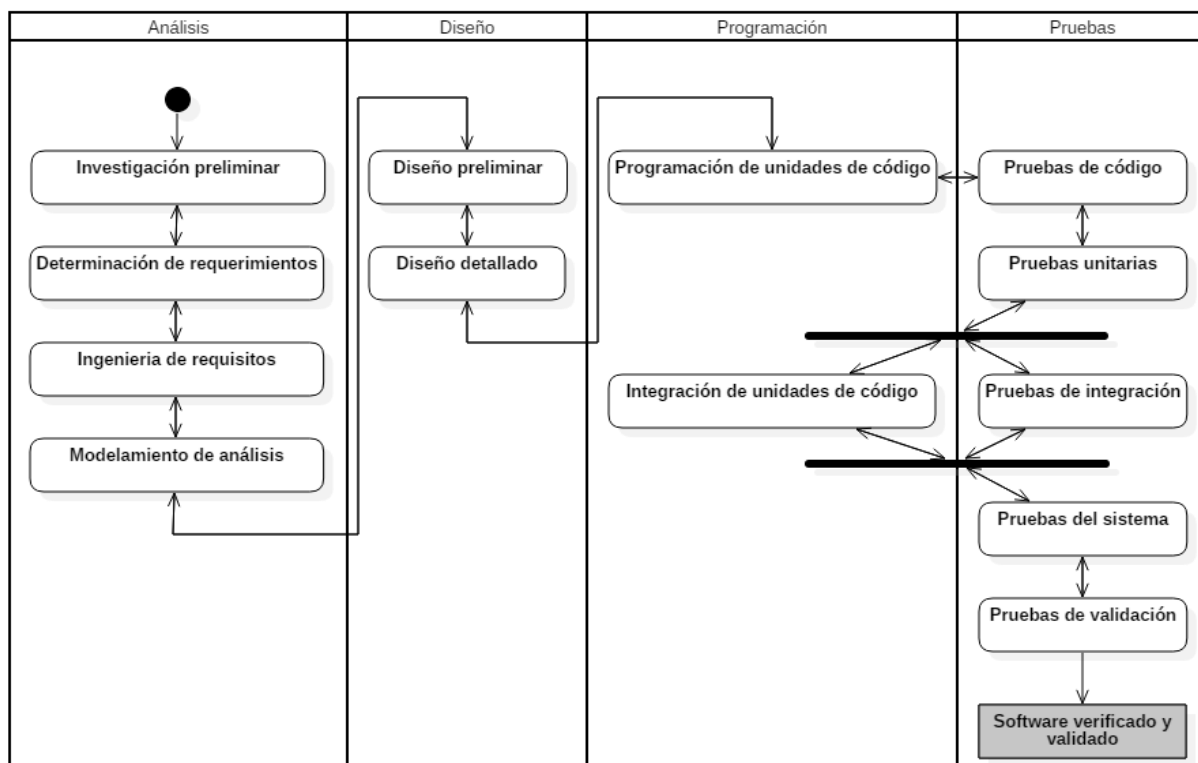


Figura 2.1 Representación del ciclo de vida del desarrollo de software antes de ser implantado

Los productos resultantes finales que se entregan al usuario (máquinas, edificaciones, dispositivos electrónicos, software) no son los únicos elementos que se generan en la aplicación

de un proceso de ingeniería adecuado. Por ejemplo, un motor no llega a ser un motor sin una concepción inicial, un análisis de la necesidad de los futuros usuarios, unas métricas y cálculos, un conjunto de planos, una determinación de parámetros de calidad, un plan de pruebas para determinar su eficiencia, y por supuesto, la máquina ensamblada adecuadamente. En todo proceso de ingeniería se aplica una serie de actividades que conllevan a la generación de un conjunto de entregables, llamados **productos de ingeniería**.

Un paralelo de algunos de los productos de ingeniería en diversas ramas es presentado a continuación, tomando como referencia un producto final para entregar en cada rama, y teniendo como factor de comparación la fase en la que se desarrolla. Estos listados no son estandarizados debido a que pueden variar dependiendo del producto final que se espera, e incluso de la metodología con la que se fabrica.

Tabla 2.1 Comparativo de productos de ingeniería en diferentes ramas

| INGENIERÍA MECÁNICA | INGENIERÍA CIVIL | INGENIERÍA ELÉCTRICA | INGENIERÍA DE SISTEMAS |
|---|---|---|---|
| Producto final esperado: máquina | Producto final esperado: puente | Producto final esperado: circuito | Producto final esperado: sistema TPS |
| Fase de pre-diseño <ul style="list-style-type: none"> Listado de requerimientos Descripciones de la máquina, componentes y funciones Especificaciones para diseño, criterios de fallo, determinación de materiales y dimensiones Estudio de viabilidad Planos y diseños de concepto | Fase de concepción <ul style="list-style-type: none"> Listado de requerimientos Estudio de alternativas de edificación y viabilidad Estudios geotécnicos, hidráulicos y viales Determinación de condiciones de nivelación Maquetas generales | Fase de requerimientos <ul style="list-style-type: none"> Listado de requerimientos Descripciones de funciones del circuito Especificación o captura de componentes Estudio de viabilidad Esquema inicial de circuito | Fase de análisis <ul style="list-style-type: none"> Visión del sistema Modelos semánticos y de procesos de negocio (influencias, entidades, controles, DFD, modelos de dominio, BPM) Listado de necesidades de interesados y estudio de viabilidad Especificación de requisitos del software Establecimiento de criterios de aceptación Modelos de escenarios |
| Fase de diseño <ul style="list-style-type: none"> Planos de piezas, mecanismos, ensamblaje de componentes, estructuras y sistemas alternos de lubricación, accionamiento y regulación Cálculos de diseño (estático, cinemático y dinámico) y determinación de parámetros de calidad | Fase de diseño <ul style="list-style-type: none"> Diseño estructural de cimientos y sistemas de losa y suspensión (planos y maquetas de secciones) Cálculos geotécnicos y estructurales Especificación de materiales Determinación de condiciones de esfuerzo, deformación y carga. Diseño de sistemas constructivos Determinación de condiciones de seguridad | Fase de diseño <ul style="list-style-type: none"> Diseño de esquemas electrónicos de nuevos componentes (planos de circuitos y esquemas) Listado de conexiones estandarizado Determinación de técnicas, herramientas y productos para la fabricación de la placa Cálculos de diseño (resistencia, voltaje, intensidad, potencia, pérdidas) | Fase de diseño <ul style="list-style-type: none"> Diseño arquitectónico y detallado estructural (clases, paquetes, componentes, estructura compuesta) Diseño de secuencia, estados, componentes, despliegue y comunicación Diseño de datos (modelos E/R, diagrama relacionales, diccionarios de datos) Diseño de escenarios e interfaz de usuario (casos de uso, actividades, blueprints, wireframes, mockups) |
| Fase de construcción <ul style="list-style-type: none"> Piezas, mecanismos y estructuras Pruebas de resistencia, eficiencia motriz, entre otros <i>Máquina ensamblada</i> Manual de normativas técnicas aplicadas, descripción de condiciones de la máquina Manual de operación | Fase de construcción <ul style="list-style-type: none"> Elementos de soporte, losas, torres de apoyo, armado mediante sistema de suspensión Pruebas de carga Verificación de deformaciones <i>Puente terminado</i> Manual de normativas técnicas aplicadas, descripción de condiciones del puente | Fase de construcción <ul style="list-style-type: none"> Placa base <i>Circuito ensamblado con componentes</i> Pruebas funcionales y ajustes Pruebas de calidad y fiabilidad Manual de normativas y condiciones de operación del circuito | Fase de implementación <ul style="list-style-type: none"> Componentes desarrollados Componentes ensamblados en módulos <i>Software desarrollado</i> Resultados pruebas unitarias, de sistema y de validación Manuales de usuario e implantación |

La importancia de los productos de ingeniería radica fundamentalmente en la determinación y verificación no solo de las funcionalidades esperadas sino también de los aspectos de calidad a tener en cuenta en la construcción del resultado final. Esto significa que todo producto de ingeniería debe estar enmarcado bajo parámetros de calidad establecidos incluso desde su ideación. Así como los productos tangibles o físicos cuentan con atributos de calidad (eficiencia,

robustez, resistencia, velocidad, duración, capacidad), el software también cuenta con atributos tales como la confiabilidad, la mantenibilidad, la seguridad, la portabilidad, entre otros (ISO, 2011).

2.3 Implementación de los productos de ingeniería

La implementación o construcción es la fase final del proceso que permite obtener un producto final de ingeniería. En esta fase se adquieren, producen, ensamblan y prueban los componentes del resultado requerido. El resultado final toma una forma tangible y verificable que puede ser presentada al usuario final mientras se construye y/o cuando se tenga ensamblado en su totalidad. Es importante recalcar que durante esta fase se desarrolla de manera permanente el proceso de verificación, dado que en este punto se ejecutan principalmente todas las diferentes pruebas que determinan si el producto cumple con los parámetros de calidad y con las especificaciones establecidas en el diseño e incluso desde su ideación para satisfacer las necesidades de los usuarios finales. Es por ello que en esta fase se usa una gran variedad de mediciones de verificación usando diferentes herramientas.



Figura 2.2 Adquisición de materiales y ensamble de piezas en la construcción de un componente

En el desarrollo del software se presenta la misma situación: la producción y ensamblaje de los componentes del software implica la ejecución de un proceso de programación y de pruebas para corroborar que el software cumple con las expectativas y necesidades planteadas por los usuarios (Pressman, 2010). Los resultados finales toman una forma verificable que puede ser presentada al usuario mientras se construye, a través de prototipos, y/o cuando se tenga programado en su totalidad como aplicación terminada.

La programación es el conjunto de actividades en donde se codifica, depura y organiza el código fuente del software para su mantenimiento. El propósito de la programación es crear unidades de código que presenten el comportamiento establecido de acuerdo a lo planteado en la fase de diseño del software. La programación sigue un comportamiento algorítmico, es decir,

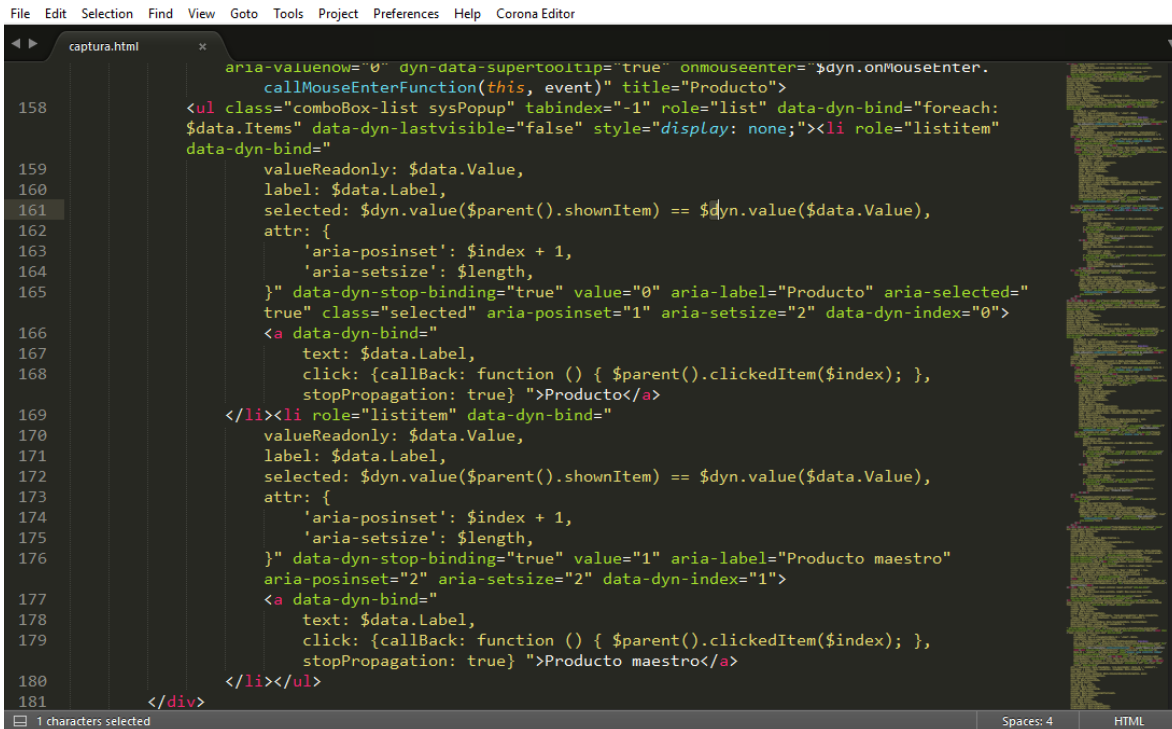
se rige por ciertas reglas y expresiones que permiten establecer una secuencia ordenada y entendible de órdenes o instrucciones precisas, definidas y finitas (Joyanes Aguilar, 2008) para que el software se comporte de una forma previamente determinada por el diseño. Un software desarrollado exitosamente debe haber sido sometido a un conjunto de pruebas, actividades que se planean por adelantado y de manera sistemática con el fin de descubrir errores inadvertidos durante su desarrollo. Las pruebas son realizadas a través de varios niveles (ISTQB, 2016) mientras se codifican y ensamblan los diferentes componentes.

| Microsoft Dynamics 365 | | PRUEBA DE ACEPTACIÓN DE USUARIO (UAT) | | | | | |
|------------------------|---|---------------------------------------|---|----------------------------|--|-----------|-----|
| em | 1 | Específic. | Ingreso de producto | Versión | Final release | Encargado | CAP |
| Criterio | Descripción de criterio de aceptación | Crítico (Si / No) | Condiciones de prueba | Resultado (Pasa / No pasa) | Comentarios | | |
| 1 | El sistema debe permitir el ingreso de los datos de un nuevo producto, indicando su número de identificación, nombre, tipo y subtipo. Además se debe indicar su vínculo con la empresa a través de un código interno, categoría comercial y unidades usadas para su inventario, compra y venta. | No | Normal, datos completos, correctos y no repetidos con otro producto en la base de datos. Ingreso de 5 productos | (5/5) Pasa | | | |
| 2 | El sistema debe permitir el ingreso de los datos de un nuevo producto, indicando su número de identificación, nombre, tipo y subtipo. Además se debe indicar su vínculo con la empresa a través de un código interno, categoría comercial y unidades usadas para su inventario, compra y venta. | No | Datos incompletos, incorrectos o repetidos con otro producto en la base de datos. Ingreso de 6 productos. | (6/6) Pasa | Se sugiere acortar el mensaje de dato repetido | | |

Figura 2.3 Formulario ERP de Microsoft Dynamics (Microsoft Corporation, 2017) y prueba de aceptación de usuario

La Figura 2.3 presenta la versión final de un formulario que integra un módulo de software ERP llamado *Dynamics 365 for Finance and Operations*, desarrollado por Microsoft Corporation y una sección del formato usado de una prueba de aceptación de usuario (UAT) realizada para este módulo, que presenta el cumplimiento de los criterios de aceptación planteados en su desarrollo.

Es necesario tener en cuenta que para programar cada una de las unidades de código y que cumplan un objetivo particular y predeterminado, los programadores deben tener claro qué y cómo se va a implementar. Por ello deben basarse en algunos documentos que presenten el diseño de la aplicación antes de iniciar su implementación. En la imagen siguiente se muestra una parte del código realizado para la generación del formulario presentado inicialmente.



```
File Edit Selection Find View Goto Tools Project Preferences Help Corona Editor
captura.html x
aria-valuenow="0" dyn-data-supertooltip="true" onmouseenter="$dyn.onmouseenter.
callMouseEnterFunction(this, event)" title="Producto">
158 <ul class="comboBox-list sysPopup" tabindex="-1" role="list" data-dyn-bind="foreach:
$data.Items" data-dyn-lastvisible="false" style="display: none;"><li role="listitem"
data-dyn-bind="
159 valueReadOnly: $data.Value,
160 label: $data.Label,
161 selected: $dyn.value($parent().shownItem) == $dyn.value($data.Value),
162 attr: {
163   'aria-posinset': $index + 1,
164   'aria-setsize': $length,
165 }" data-dyn-stop-binding="true" value="0" aria-label="Producto" aria-selected="
true" class="selected" aria-posinset="1" aria-setsize="2" data-dyn-index="0">
166 <a data-dyn-bind="
167   text: $data.Label,
168   click: {callback: function () { $parent().clickedItem($index); },
stopPropagation: true} ">Producto</a>
169 </li><li role="listitem" data-dyn-bind="
170 valueReadOnly: $data.Value,
171 label: $data.Label,
172 selected: $dyn.value($parent().shownItem) == $dyn.value($data.Value),
173 attr: {
174   'aria-posinset': $index + 1,
175   'aria-setsize': $length,
176 }" data-dyn-stop-binding="true" value="1" aria-label="Producto maestro"
aria-posinset="2" aria-setsize="2" data-dyn-index="1">
177 <a data-dyn-bind="
178   text: $data.Label,
179   click: {callback: function () { $parent().clickedItem($index); },
stopPropagation: true} ">Producto maestro</a>
180 </li></ul>
181 </div>
1 characters selected Spaces: 4 HTML
```

Figura 2.4 Sección de código fuente del formulario ERP anterior

El formulario se desarrolló usando una combinación de varios lenguajes tanto de programación (JavaScript) como de etiquetado (HTML) y de estilo (CSS) para la generación de los diferentes componentes visuales y la programación de su comportamiento externo. La implementación del formulario está basada en algunos modelos de diseño previamente elaborados.

2.4 Diseño de productos de ingeniería

Antes de fabricar un producto los fabricantes deben tener claro qué y cómo se va a construir, y deben basarse en documentos que describan los productos a fabricar mediante diferentes representaciones del producto desde varios puntos de vista. A dichas representaciones iniciales

del producto real se les conoce como **modelos**, presentan en todas las ramas de ingeniería tales como maquetas y planos en ingeniería civil, circuitos y prototipos en ingeniería electrónica, modelos 3D y dibujos en ingeniería mecánica, entre otros. Todo diseño busca agrupar y aplicar principios, conceptos y prácticas que conlleven al desarrollo de productos de alta calidad, y siempre se debe basar el diseño en las necesidades que han presentado previamente los interesados en el producto.

Un modelo es una representación abstracta (física, gráfica, textual, matemática) que presenta una visión o perspectiva diferente del elemento que está siendo analizado. Estas representaciones abstractas se presentan en todos los campos con el fin de comprender fenómenos, sistemas o procesos a fin de describirlos, explicarlos, simularlos, predecirlos y verificarlos. No existe un único modelo para representar una situación completa, por lo que siempre es necesario realizar diferentes modelos según el punto de vista requerido.

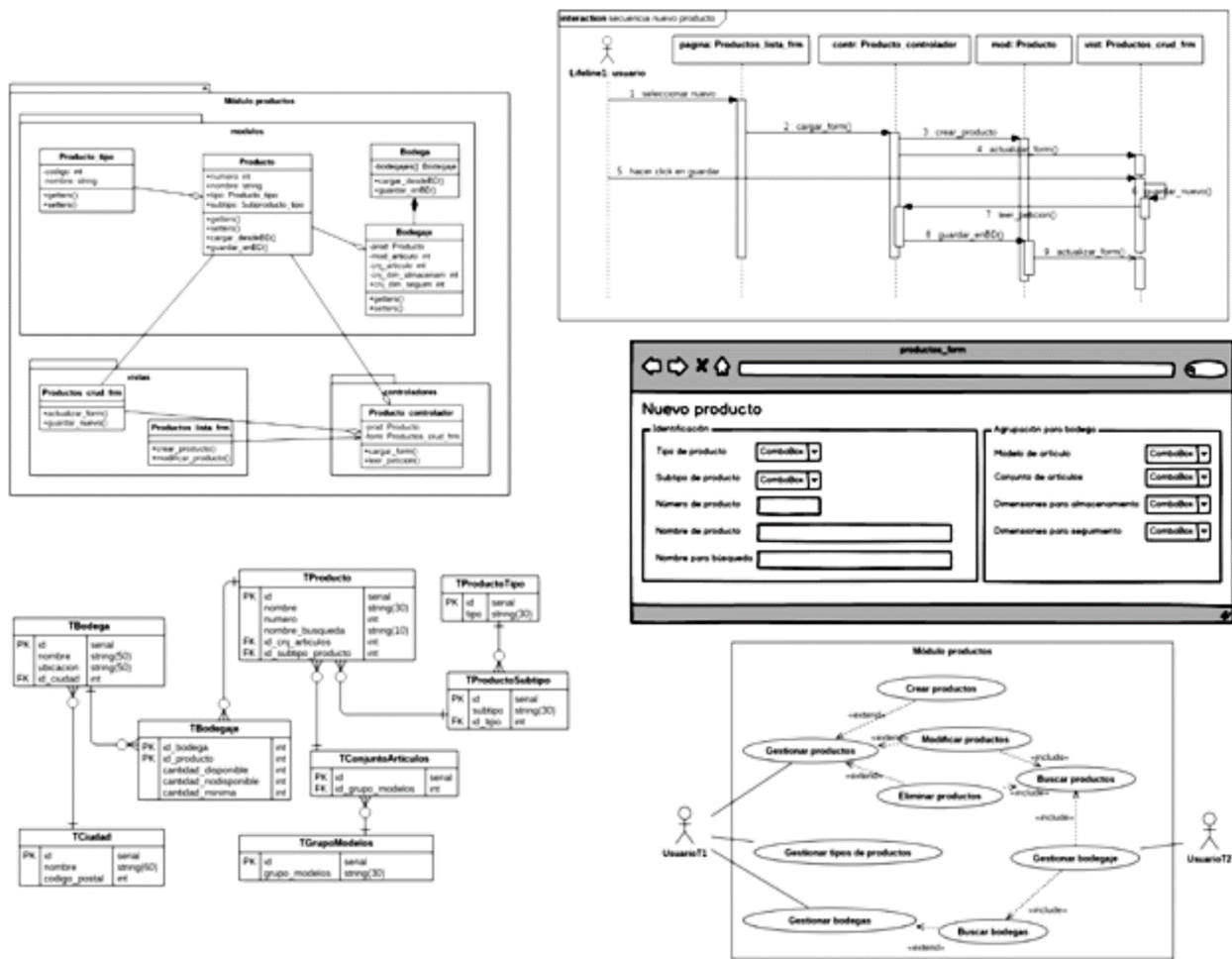


Figura 2.5 Modelos comunes durante el diseño de software

Al igual que en el diseño de los productos físicos de ingeniería, el diseño de software se desarrolla bajo un proceso iterativo por medio del cual se traducen los requisitos en planos detallados para construirlo. Estos modelos se desarrollan usando un tipo de representación

llamada lenguaje de modelado unificado - UML (Booch, Rumbaugh, & Jacobson, 1999). No obstante, es posible encontrar múltiples tipos de diseños que no siempre se desarrollan usando UML sino cualquier otro lenguaje de modelamiento. Incluso, es posible encontrar modelos de diseño basados únicamente en texto.

Para iniciar el diseño primero se generan modelos de análisis, los cuales presentan una visión general del software, es decir, se representa en un nivel alto de abstracción en el que se rastrea directamente el objetivo específico del sistema basados en los requisitos de datos, estructura, funcionamiento y comportamiento esperados. Con estos modelos se determina, en una primera etapa, la estructura general del sistema y la forma en que esta se puede organizar para poder darle integridad conceptual; en otras palabras, pretende obtener el diseño arquitectónico del sistema y del software, reflejando la forma como se organizará el sistema como conjuntos de componentes en continua comunicación. En una segunda etapa, se desarrollan diversos niveles de abstracción más específicos, tanto de procedimientos como de datos. Mientras se van generando los diferentes modelos de diseño de manera iterativa, aparecen mejoras que conducen a niveles menores de abstracción.

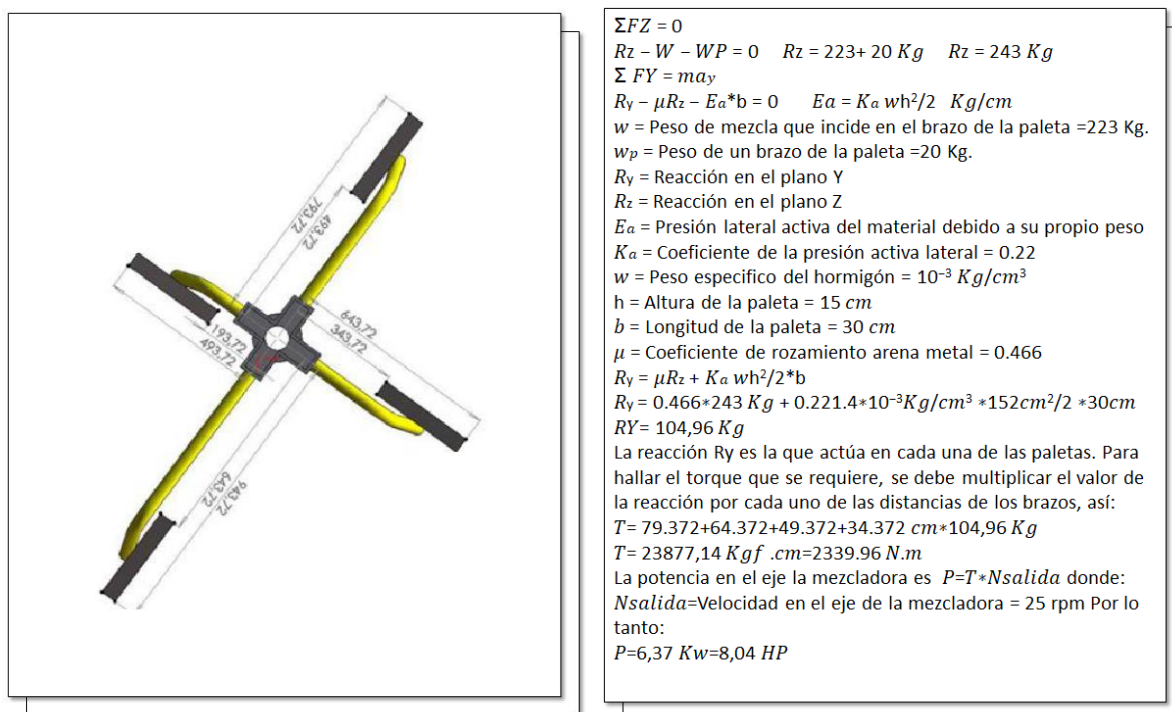


Figura 2.6 Validación del diseño de un componente mediante cálculo matemático

En todas las ramas de ingeniería, los modelos pueden ser verificados y validados a través de diversos cálculos de diseño, los cuales son útiles para diseñar nuevas estructuras y para corroborar el cumplimiento de sus aspectos de calidad. Un ejemplo de estas validaciones se observa en los cálculos de potencia de motores a usarse en algunas máquinas. Diversas unidades de medida que presentan las piezas o componentes de la máquina son utilizados como variables iniciales en los cálculos de fuerzas, desplazamientos para determinar cuál es el motor adecuado que brinde unas características mínimas y óptimas de potencia para que todo

el componente funcione adecuadamente. Adicionalmente se realizan cálculos de resistencia en las piezas que, debido a su diseño, puedan romperse a causa de fuerzas excesivas en algunos puntos mientras ejecutan su trabajo.

Errores de diseño conllevan a fallos en su implementación (ya sean leves o graves) que pueden producir accidentes, generando pérdidas económicas o humanas. Casos cercanos como el puente Chirajara, construcción localizada en la vía Bogotá-Villavicencio, que colapsó en febrero de 2018 por causa de errores de diseño (Grupo Aval Acciones y Valores S.A., 2018), así como muchos otros casos, comprueban la importancia del proceso de verificación y validación de diseño a través de cálculos matemáticos que sustenten su fiabilidad.



Figura 2.7 Fallo de un producto de ingeniería como consecuencia de errores en diseño

2.5 Importancia de la Dinámica de Sistemas en el modelamiento de software

Como se comentó en el apartado anterior, en todas las ramas de ingeniería, los modelos pueden, y deben ser validados por medio de cálculos de diseño, los cuales son muy importantes para comprobar el cumplimiento de sus aspectos de calidad. Muchos de estos cálculos usan medidas basadas en las leyes conocidas de la física.

En la ingeniería de sistemas, no es posible usar medidas físicas, por lo que se han generado otros tipos de medidas particulares para entender mejor los atributos de las entidades que representan los procesos, productos o sistemas que se construyen o se ejecutan, y para comprobar aspectos como tiempos, tamaños, aspectos de cumplimiento y de calidad de los elementos característicos que conforman el software (Fenton & Bieman, 2014). Incluso es posible desarrollar modelos formales matemáticos de un sistema -como el caso de la notación Z (ISO, 2002)-, particularmente para realizar una especificación más detallada de sistemas complejos. Sin embargo, el uso de la lógica de predicados, la creación de esquemas, la

simbología nueva en esta notación, entre otros factores, hace que no sea tan práctica su aplicación en el desarrollo de software de baja complejidad. Además, ninguno de los modelos UML representa o permite comprender el comportamiento del problema visto desde el punto de vista de los datos o características particulares del sistema. El punto de vista dinámico solo presenta el comportamiento del sistema visto desde el punto de vista del usuario, es decir, muestra cómo se debe comportar el sistema frente a estímulos externos, pero sin tener en cuenta el comportamiento de los datos o las características del sistema respecto al tiempo, y esto ha generado una falencia en la capacidad de UML para simular el comportamiento de un sistema de información (Tignor, 2004), y por ello no es posible solo con UML comprobar si un sistema ha sido diseñado y validado matemáticamente. Por esta razón es conveniente aplicar la Dinámica de Sistemas para realizar y validar el modelamiento del problema y convertirlo en un modelamiento de un sistema. En este punto es apropiado establecer la diferencia entre validar el software y verificar el software. De acuerdo con (Boehm, 1984), la verificación es el conjunto de tareas que permiten garantizar que el software implementa correctamente una función especificada previamente: se verifica si el software (o algún componente de éste) es desarrollado correctamente. La validación, por otro lado, es un conjunto de tareas que permiten asegurar que el software se desarrolló siguiendo los requerimientos del cliente: se valida si se desarrolla el software (u otro componente) correcto.

La orientación por modelos con Dinámica de Sistemas, objeto de este libro, busca justamente formalizar la metodología de transformación de modelos utilizando el estudio de la dinámica de sistemas en modelos de análisis. Los diagramas de influencias a partir de los cuales son obtenidos mediante el proceso sistemático de transformación, validados con el rigor matemático requerido, permiten crear los diagramas de clases y modelos de datos relacionales que conforman el análisis de los sistemas y luego, mediante técnicas de ingeniería del software se depurarán en diagramas de diseño.

2.6 Concepción y análisis de los productos de ingeniería

Como se dijo anteriormente, siempre se debe basar el diseño de los productos de ingeniería en las necesidades que han presentado previamente los interesados en dichos productos. La fase inicial del proceso de ingeniería es la de concepción o de análisis, y podría ser considerada la más importante en todo el desarrollo pues busca comprender exactamente qué necesitan los usuarios para determinar las características del producto final de ingeniería que se puede ofrecer como solución a su necesidad.

Durante esta fase es muy común encontrar productos de ingeniería basados únicamente en texto, tales como documentos con información sobre normativas, reglamentos, contratos, leyes, requerimientos, aspectos técnicos, operativos, tecnológicos, metodológicos, económicos, financieros, entre otros, que no solo conciben la idea para el desarrollo del producto sino que también envuelven todo el proceso de ingeniería a aplicar. Entre estos documentos, se presenta el documento de identificación de requerimientos de interesados, el cual debe presentar un consolidado de las necesidades de los usuarios, así como los criterios que se tendrán en cuenta para la aceptación del resultado final por parte del cliente o usuario. La

información contenida en este documento se toma como guía base para la especificación de las funciones y los parámetros de diseño de los productos finales. Otro conjunto de documentos, los cuales son los más importantes y representativos en esta fase, lo conforman guías basadas en normativas de instituciones importantes (IPC, ISO, IEEE, ASTM, ICONTEC...) que permiten presentar de forma organizada y detallada las descripciones o requisitos de los productos finales de ingeniería a fabricar; a estos se les conocen como documentos de especificación de requisitos.

Al igual que los productos tangibles de ingeniería, un software que se considere exitoso funciona en una forma que cumpla con las expectativas razonables del cliente (Pressman, 2010). La forma para corroborar que realmente cumple con las expectativas razonables se basa en el cumplimiento de las necesidades que hayan sido planteadas por los usuarios desde la concepción del proyecto. El análisis en la ingeniería de sistemas busca comprender desde el inicio las necesidades de los usuarios que requieran interactuar con datos para determinar la entrada o el flujo de datos de manera sistemática, procesar o transformar los datos, almacenarlos y producir información en el contexto de una organización específica, con el fin de identificar y resolver problemas concretos. Esto permite caracterizar una aplicación software que les brinde dichas soluciones de gestión de información, y esta caracterización se refleja en el documento de especificación de requisitos, el cual puede presentar dos formas de expresión, ya sea descrito desde el punto de vista del mismo sistema –llamado requisito- (IEEE, 1998), o desde el punto de vista del usuario -llamado historia de usuario- (Kniberg, 2007).

Adicionalmente se busca aquí analizar, diseñar e implementar las mejoras en el apoyo para los usuarios y en las funciones de negocios que se puedan llevar a cabo mediante el uso de sistemas de información computarizados. Los procesos de negocio son los grupos de actividades relacionadas lógicamente que usan los recursos de una organización para proveer resultados definidos que soporten los objetivos de dicha organización. El entendimiento de estos procesos se realiza por medio de la identificación del comportamiento esperado del negocio, y sus realizaciones por parte de los empleados y las entidades (objetos y acciones). Cada uno de los objetos encontrados, las acciones para alterar el estado de estos objetos y sus formas de medición son los elementos principales usados para representar el conocimiento del dominio del problema usando un lenguaje común y fácil de comprender, llamado modelamiento semántico, que pueda ayudar a la construcción de los requerimientos (Loucopoulos & Preskas, 2003). Este modelamiento semántico es fundamental en la definición de las necesidades de información por parte de los usuarios y en la creación de los diagramas de influencias, componentes iniciales para la aplicación de la metodología planteada en este libro.

2.7 Conclusiones

Desde el entendimiento de los procesos de negocio de una organización hasta la entrega de un producto que cumpla con las expectativas de los usuarios, la ingeniería envuelve un conjunto de actividades en las que se busca hacer un esfuerzo concertado para entender el problema en un contexto antes de desarrollar una solución que satisfaga la necesidad planteada; estudiar de manera cuidadosa las diferentes interacciones de los componentes de la solución que se

plantea para poder desarrollarla, adaptarla y mejorarla; y garantizar el correcto funcionamiento de la solución. Para lograrlo, los diferentes componentes a construir deben ser modelados, verificados y validados con el fin de corroborar sus parámetros de funcionalidad y calidad.

En el caso de los productos finales desarrollados en la ingeniería de sistemas, la importancia del software radica en su alta dependencia en las organizaciones para tomar decisiones acertadas. Para lograr desarrollar un software de calidad, el profesional de Ingeniería de Sistemas debe realizar desde la fase de análisis, un efectivo modelamiento que sea válido y útil para problemas reales de producción de los sistemas informáticos, y por eso se propone en este libro una forma de validación matemática a través de la metodología basada en dinámica de sistemas.

La propuesta metodológica que ofrece este documento puede aplicarse en la resolución de problemas en el que implique una toma de decisiones adecuada para la incorporación de elementos importantes en el diseño, fundamento particularmente en cálculos matemáticos que permiten validar su incorporación. Como se mencionó al inicio de este libro, todo el esfuerzo de fortalecer las competencias matemáticas del estudiante de Ingeniería de Sistemas, cobra sentido si este advierte que su aporte a la sociedad no es importante solamente en cuanto al desarrollo de aplicaciones informáticas, sino en cuanto a su visión como ingeniero, que le permita incorporarla como medio efectivo de solución a problemas de la sociedad.

Referencias

- Boehm, B. (1984). Verifying and validating software requirements and design specifications. (IEEE, Ed.) *IEEE Software*, 1(1), 75-88. doi:10.1109/MS.1984.233702
- Booch, G., Rumbaugh, J., & Jacobson, I. (1999). *The Unified Modeling Language User Guide*. Reading, U.S.A.: Addison-Wesley Longman Inc.
- Fenton, N., & Bieman, J. (2014). *Software Metrics: A Rigorous and Practical Approach* (3a ed.). Boca Raton, U.S.A: CRC Press.
- Grupo Aval Acciones y Valores S.A. (2018). *Report Of Foreign Private Issuer Pursuant To Rule 13a-16 Or 15d-16 Of The Securities Exchange Act Of 1934*. Washington: United States Securities and Exchange Commission. Obtenido de <https://ih.advn.com/p.php?pid=nmona&article=77308104>
- IEEE. (1998). *830-1998 - IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications*. IEEE. Obtenido de <http://ieeexplore.ieee.org/document/720574/>
- ISO. (2002). *ISO/IEC 13568:2002 Information technology — Z formal specification notation — Syntax, type system and semantics*. International Organization for Standardization, Geneva. Obtenido de [http://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/c021573_ISO_IEC_13568_2002\(E\).zip](http://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/c021573_ISO_IEC_13568_2002(E).zip)
- ISO. (2011). *ISO/IEC 25010:2011 Systems and software engineering - Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuARE) - System and software quality models*. Geneva:
-

International Organization for Standardization. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/35733.html>

ISTQB. (2016). *International Software Testing Qualifications Board - Foundation Level Syllabus*. Obtenido de The Certified Tester Foundation Level in Software Testing: <https://www.istqb.org/downloads/send/2-foundation-level-documents/3-foundation-level-syllabus-2011.html4>

Joyanes Aguilar, L. (2008). *Fundamentos de programación. Algoritmos, estructura de datos y objetos* (4a. ed.). Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. U.

Kniberg, H. (2007). *Scrum y XP desde las trincheras. Como hacemos Scrum*. C4Media Inc.

Microsoft Corporation. (2017). *Introduction to Microsoft Dynamics 365 for Finance and Operations*. Recuperado el 10 de noviembre de 2017, de <https://docs.microsoft.com/en-us/dynamics365/unified-operations/fin-and-ops/>

Pressman, R. (2010). *Ingeniería del Software. un enfoque práctico* (7a. ed.). Mexico, D.F.: McGraw-Hill Interamericana.

Sommerville, I. (2011). *Ingeniería de Software* (9a. ed.). Juarez, México: Pearson Education, Inc.

Tignor, W. W. (2004). System Engineering and System Dynamics Models. *International Conference of the System Dynamics Society* (pág. 32). Oxford, England: Science Applications International Corporation.

3 Transformación de modelos en diseños de software

3.1 Desarrollo conducido por modelos

El desarrollo de software basado en modelos integra propuestas que se enfocan en alguno de cuatro niveles básicos de abstracción del modelo de software: por especificaciones, por modelos, centrado en la arquitectura, y basado en componentes.

El desarrollo conducido por modelos MDD (por *Model Driven Development*) se enfoca en modelos de diseño de software. Entre sus ventajas está que promueve el uso activo de modelos a lo largo del proceso de desarrollo de software, conducente a la generación automática de la aplicación final (de Lara, Guerra, & Sánchez Cuadrado, 2015).

Para que una metodología de modelamiento se pueda incorporar a MDD debe tener la capacidad de definir transformaciones de modelos de alto nivel de abstracción del sistema a modelos específicos de plataforma, siguiendo un conjunto de reglas de transformación (Herrero & Carmona, 2013). Thiry & Thirion (2009) proponen tres capas de abstracción: en M1 trabajan los expertos en el sistema; en M2 los diseñadores de herramientas; y en M3 los proveedores del entorno genérico. Los primeros modelan, analizan y diseñan sistemas; los segundos operacionalizan e integran; los terceros proponen arquitecturas de modelamiento.

La separación de propósitos es una estrategia clave en el desarrollo de software conducido por modelos. Modelos declarativos de alto nivel soportan la separación entre las propiedades esenciales de la aplicación y los patrones de código utilizados para implementarlas; asimismo reduce el esfuerzo requerido para el desarrollo y mantenimiento de aplicaciones (Hemel, Kats, Groenewegen, & Visser, 2010).

Quintero y Anaya, explicando los principios de la arquitectura orientada por modelos, aportan elementos para asegurar que dado que el modelamiento con Dinámica de Sistemas es específico del dominio del problema, puede incorporarse al proceso MDD: la estrategia de representación directa se basa en el principio de abstracción, que hace énfasis en el dominio del problema más que en la tecnología. Los diferentes tipos de modelos mencionados buscan precisar una semántica que claramente separe los aspectos relevantes del problema de las decisiones de tecnología. Esta estrategia parte de la hipótesis de que los impactos considerables en el desarrollo y mantenimiento de una solución de software se dan por cambios en el negocio, más que por la diversidad de plataformas y la evolución tecnológica (Quintero & Anaya, 2007).

3.2 Dinámica de Sistemas

La Dinámica de Sistemas es un enfoque basado en computador, propuesto originalmente para el análisis de políticas en el campo de la administración, y actualmente utilizado en diversas áreas en todo el mundo (Richardson, 2011). Es un método para describir, modelar, simular y analizar sistemas complejos, los cuales se representan gráficamente como estructuras de las que luego son formuladas las ecuaciones con las cuales se simula su comportamiento del sistema (Pruyt, 2013). El propósito fundamental de la Dinámica de Sistemas ha sido la simulación basada en computador, para dar soporte en la toma de decisiones.

En Colombia, la Dinámica de Sistemas se suelen incorporar en cursos de modelado y simulación en el currículo de pregrado de Ingeniería de Sistemas. Pero el interés en la simulación se ha reducido debido a que no se identifica como una habilidad necesaria para los ingenieros de software cuando trabajan en el desarrollo de sistemas de información; solo una parte de los profesionales en Ingeniería de Sistemas, quienes se dedican al desarrollo de sistemas de control o de software científico, siguen interesados en la simulación por computador.

Una institución de nivel mundial, **System Dynamics Society**, impulsa el desarrollo y la incursión de la Dinámica de Sistemas en diversos campos del conocimiento, para lo cual promueve publicaciones académicas y organiza eventos científicos, siendo la de mayor importancia la **International System Dynamics Conference**, que en el año 2018 alcanzó su trigésimo sexta edición, una vigencia posible por el creciente número de practicantes en diversos ámbitos como agricultura y alimentación, biomedicina, negocios, defensa y seguridad, educación, energía, medio ambiente, políticas de salud pública, transporte, entre otras (incluir referencia al sitio).

3.2.1 Modelamiento cuantitativo con Dinámica de Sistemas

Existe un modo ortodoxo de modelar en Dinámica de Sistemas. La metodología aquí propuesta supone unos cambios, justificados desde dos propósitos: contribuir a un mayor logro académico por parte de los estudiantes de Ingeniería de Sistemas, y darle pertinencia al modelamiento en el contexto del desarrollo de software.

El modelamiento con Dinámica de Sistemas suele caracterizarse como el desarrollo iterativo de cuatro modelos (diagrama de influencias, diagrama de flujos y niveles, modelo matemático y simulación del comportamiento) hasta que se obtiene una representación del sistema cuya simulación computacional reproduce el comportamiento observado en la realidad, de manera que permite probar políticas de manejo del sistema. El proceso se describe en tres fases: la conceptualización, que consiste en la descripción verbal del sistema y la construcción de un diagrama de influencias; la representación o formulación, que es la construcción del diagrama de flujos y niveles y el modelo matemático de simulación; y el análisis y evaluación del modelo, consistente en la revisión de los resultados de la simulación, la formulación y prueba de políticas de manejo del sistema (Aracil, 1992; Aracil & Gordillo, 1997).

Los textos de Aracil ejercieron influencia en el estudio de la Dinámica de Sistemas a nivel local durante la década de los noventa. Entre quienes se interesaban por la problemática organizacional se hizo popular Senge (1993), quien propuso el concepto de arquetipos sistémicos, que consistían en estructuras repetitivas que correspondían a comportamientos específicos, construidas con el mismo lenguaje de los diagramas de influencias.

Aquí se debe hacer referencia a Aracil, a Forrester como el pionero, a la simulación como propósito final del modelamiento, a la secuencia de diagramas, a las opiniones encontradas con respecto a los diagramas de influencias, y al trabajo de Wolstenholme como enfoque alternativo.

3.2.2 Modelamiento semántico.

El modelamiento semántico es la actividad de representación del significado (Date, 1998). Date lo aborda desde el diseño de bases de datos: los modelos conceptuales, tales como el modelo relacional, aportan una comprensión limitada del significado de los datos y de algunas de sus interrelaciones.

En el contexto del desarrollo de software y la problemática alrededor de los requerimientos y el diseño, se puede apreciar la importancia del modelamiento semántico: salvo que tengan una preparación específica en desarrollo de software, difícilmente los stakeholders podrán expresar opiniones críticas con respecto a representaciones de diseño como diagramas relacionales o diagramas de clases. Modelamiento semántico en un proyecto de software es la representación del conocimiento en el dominio del problema, en un lenguaje más cercano a los stakeholders que de los desarrolladores. Apunta justamente a una de las recomendaciones mencionadas en la problemática del desarrollo de software.

3.2.3 Perspectivas de Dinámica de Sistemas en modelamiento semántico

Abdel-Hamid simula los efectos de diferentes políticas de aseguramiento de calidad en el costo de desarrollo de software (Abdel-Hamid, 1988). Madachy simula de forma similar estrategias que combinan aspectos técnicos, económicos y organizacionales (Madachy, 2008). Desde la tendencia cuantitativa de DS se han hecho múltiples modelos orientados a la optimización de recursos para el proceso de desarrollo de software (Georgantzas & Katsamakas, 2008). En otros casos se ha propuesto aprovechar las características del modelamiento cuantitativo con DS en escenarios de aprendizaje colaborativo, en el que diferentes especialistas comparten y discuten su conocimiento, a medida que negocian el significado de los datos que debe manejar el software (Luna-Reyes, Black, Cresswell, & Pardo, 2008).

La construcción de significados traza un vínculo con el modelamiento semántico, por la utilización que se puede hacer de los diagramas de DS como objetos de frontera semánticos, en el sentido de proveer a las personas un método para expresar su conocimiento en el dominio de un problema, a través de un modelo o mapa estandarizado (Carlile, 2002) y establecer acuerdos entre diversos campos del conocimiento acerca de los significados comunes creados en el modelamiento (Carlile, 2004). Un modelo con DS, cumpliendo algunas restricciones de estandarización durante su construcción, podría constituirse en objeto de frontera semántico,

es decir, un acuerdo interdisciplinario sobre la mejor representación posible del dominio de un problema, una traducción a un lenguaje común que puede ayudar a la construcción colectiva de los requerimientos a partir de la comprensión del dominio del problema (Loucopoulos & Preskas, 2003).

El alto nivel de transdisciplinariedad, generalidad y escalabilidad de la DS, que la hace aplicable casi en cualquier área del conocimiento, y su orientación a la diagramación, promueven el aprendizaje colaborativo (Schwaninger & Ríos, 2008), y permiten afirmar que un diseño computacional derivado de modelos con DS, no es la interpretación particular del diseñador, sino la transformación de un acuerdo suyo con los stakeholders, en requerimientos y diseños para el software.

El modelamiento semántico puede generar un impacto favorable tanto para la DS como para la Ingeniería de Sistemas. Si se consigue transformar modelos realizados con DS en objetos de frontera, diseños computacionales, bases de datos y líneas de programación, se superaría el factor adverso de que el modelamiento con DS usualmente se queda en el terreno de la comprensión (Roberts, 2007), interesante solo para los stakeholders pero no para los desarrolladores, centrado en la toma de decisiones mas no en su implementación. La DS puede constituir una forma de intervención organizacional mediada por la tecnología informática (Größler, 2007).

3.3 Metodología propuesta.

Esta propuesta es pertinente en problemas en cuyo abordaje convergen expertos en diversas disciplinas, no directamente relacionadas con los saberes de los desarrolladores de software, y cuya gestión implique toma de decisiones con fundamento en cálculos.

Esta metodología prescinde del diagrama de flujos y niveles, también llamado diagrama de Forrester. En todo momento se trabaja con base en el diagrama de influencias, pero se incorporan elementos cuantitativos durante su elaboración que le proveen el rigor matemático que se propone dar a los diagramas propios del proceso de desarrollo de software como el diagrama de clases y el diagrama entidad relación.

Una vez formulado el problema o sistema que se quiere modelar, la metodología consta de los siguientes pasos: 1) modelamiento cualitativo de la estructura básica del sistema; 2) modelamiento cuantitativo; 3) modelamiento enriquecido del sistema; 4) transformación de modelos cualitativos y cuantitativos en diagramas de desarrollo de software.

3.3.1 Modelamiento de la estructura básica del sistema.

Se considera como estructura básica a un abordaje inicial del modelamiento limitado a los sustantivos y verbos del sistema. Los sustantivos son magnitudes medibles en el sistema, asociados a los materiales que se acumulan y fluyen por el mismo. Los verbos son eventos o acciones que tienen como resultado una modificación en el valor de los sustantivos; en cuanto a

unidades de medida siempre son las mismas de los sustantivos a los que afectan, pero relativos al tiempo.

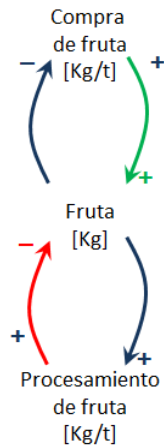


Figura 3.1 Sustantivos y verbos en un diagrama de influencias

La Figura 3.1, tomada del proceso de modelamiento del capítulo 6, muestra el inicio del modelamiento de una empresa dedicada a la transformación de frutas en derivados y que obtiene ingresos por la venta de dichos derivados así como de los residuos generados en el proceso.

Este diagrama, que no contiene la estructura básica completa del sistema sino que se trae aquí a modo de ejemplo sobre aspectos mínimos de la metodología, consta de un sustantivo y dos verbos. El sustantivo **Fruta** es uno de los materiales que fluyen por el sistema y cuya cantidad en inventario se mide en kilogramos [Kg]. A esta cantidad la afectan dos eventos o verbos: la compra de fruta, que hace aumentar el inventario, y el procesamiento que lo disminuye. Por afectar a un sustantivo medido en kilogramos, las unidades de medida de los dos verbos forzosamente deben ser kilogramos por unidad de tiempo.

Con propósitos didácticos en el libro se utiliza el mismo código de colores que se utilizó en la fase experimental del proyecto de investigación que le dio origen. Las influencias de los verbos sobre los sustantivos se representan con una flecha de color verde cuando su efecto es incrementar al sustantivo, y de color rojo en el caso contrario. Por tanto el diagrama literalmente se puede leer como que la **compra de fruta** incrementa la cantidad de **fruta** en el inventario de la empresa, mientras que el **procesamiento de fruta** la disminuye.

Entre tanto, las relaciones de los sustantivos sobre los verbos son representadas con flechas continuas de color azul, también acompañadas de un signo que indica proporcionalidad o efecto directo o inverso. En este caso indican que mientras mayor sea el inventario de **fruta** en la empresa, menores deben ser las compras; en cambio, a mayor cantidad de fruta en existencia, mayor procesamiento puede llevarse a cabo.

Un conjunto de sustantivos y verbos pueden conformar un subsistema, y varios de estos interactúan en un sistema. La Figura 3.2 presenta un modelo propuesto de la estructura básica

del sistema empezado en la Figura 3.1, conformado por cinco subsistemas alrededor de igual número de sustantivos: **fruta**, **maquinaria**, **dinero**, **residuos** y **pulpa**.

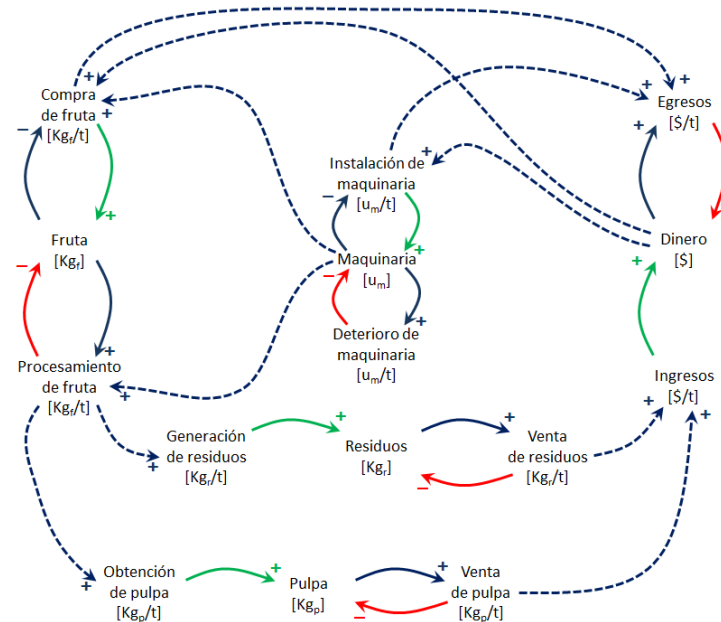


Figura 3.2 Diagrama de influencias de la estructura básica de un sistema

Las influencias entre subsistemas en todo este libro se representan con línea azul discontinua, y en la metodología propuesta están restringidas a llegar siempre a un verbo, ya sea que provengan de un sustantivo como la que va de **maquinaria** a **procesamiento de fruta**, o de un verbo a otro, como la que va de **compra de fruta** a **egresos**, o de **procesamiento de fruta** a **generación de residuos**.

3.3.2 Modelamiento cuantitativo.

Un modelo matemático con Dinámica de Sistemas está conformado por ecuaciones diferenciales ordinarias a razón de una para cada sustantivo, y otras ecuaciones aquí llamadas auxiliares asociadas a los verbos. En el método ortodoxo estas ecuaciones son obtenidas a partir del diagrama de flujos y niveles; en la metodología aquí propuesta no se estimó conveniente dar este paso intermedio entre el diagrama de influencias y la simulación por computador, sino requerir una mayor conciencia desde el diagrama de influencias de las dos categorías antes mencionadas, sustantivos y verbos.

Las ecuaciones diferenciales en general no presentan mayor dificultad, ya que son consistentes en sí mismas porque las unidades de medida de unos y otros son compatibles. Las ecuaciones auxiliares en cambio pueden adoptar diversas formas, y requerir elementos provenientes de matemáticas a diferentes niveles como la simple aritmética, el álgebra, funciones especiales, transformadas, e incluso la estadística, entre otras. Lo interesante es que durante la construcción y validación de estas ecuaciones auxiliares, especialmente en cuanto a las unidades de medida, surgen nuevos elementos necesarios para darles consistencia.

La Tabla 3.1 contiene las ecuaciones formuladas para las 5 ecuaciones diferenciales formuladas para los sustantivos y las 10 ecuaciones correspondientes a los verbos del diagrama de influencias de la estructura básica del sistema presentado en la Figura 3.2.

Tabla 3.1 Modelo matemático del sistema

| Elemento | Ecuación |
|---------------------------------|--|
| Ecuaciones diferenciales | |
| FRU | $FRU(t + \Delta t) = FRU(t) + COM(t) * \Delta t - PRO(t) * \Delta t$ |
| PUL | $PUL(t + \Delta t) = PUL(t) + OBT(t) * \Delta t - VEP(t) * \Delta t$ |
| RES | $RES(t + \Delta t) = RES(t) + GEN(t) * \Delta t - VEP(t) * \Delta t$ |
| MAQ | $MAQ(t + \Delta t) = MAQ(t) + INS(t) * \Delta t - DET(t) * \Delta t$ |
| DIN | $DIN(t + \Delta t) = DIN(t) + ING(t) * \Delta t - EGR(t) * \Delta t$ |
| Ecuaciones auxiliares | |
| COM | Si $(MAQ(t) \geq IMP(t))$ entonces $COM(t) = \text{mínimo}((MAQ(t) * CPF(t) * CPA(t)) - FRU(t); DIN(t)/PCF(t))$ de lo contrario $COM(t) = 0$ |
| PRO | $PRO(t) = \text{mínimo}((MAQ(t) * CPF(t)); FRU(t))$ |
| OBT | $OBT(t) = PRO(t) * TAF(t)$ |
| VEP | $VEP(t) = PUL(t)$ |
| GEN | $GEN(t) = PRO(t) * TRF(t)$ |
| VER | $VER(t) = RES(t)$ |
| INS | $INS(t) = \text{mínimo}(CIM(t); MMP(t) - MAQ(t); DIN(t)/PIM(t))$ |
| DET | $DET(t) = MAQ(t)/TVU(t)$ |
| ING | $ING(t) = VEP(t) * PVP(t) + VER(t) * PVR(t)$ |
| EGR | $EGR(t) = \text{mínimo}(COM(t) * PCF(t) + INS(t) * PIM(t); DIN(t))$ |

3.3.3 Modelamiento enriquecido del sistema.

Como ya se dijo antes, estos diagramas y ecuaciones han sido traídos a esta sección desde el capítulo 6 en donde se encontrarán las explicaciones concernientes; aquí solo cumplen la función de acompañar la descripción de la secuencia metodológica. A falta de tales explicaciones se requiere hacer notar que en las ecuaciones auxiliares presentadas en la Tabla 3.1 han aparecido algunos elementos adicionales, clasificados posteriormente como parámetros en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.**, dado que no hacen parte de la estructura básica del sistema sino que se constituyen en elementos que modifican el comportamiento derivado de la misma.

Tabla 3.2 Elementos del modelo enriquecido del sistema

| Nombre | Abreviatura | Tipo | Unidad |
|---------------------------|-------------|------------|----------------------|
| Fruta | FRU | Sustantivo | [Kg _r] |
| Compra de fruta | COM | Verbo | [Kg _r /t] |
| Procesamiento de fruta | PRO | Verbo | [Kg _r /t] |
| Pulpa | PUL | Sustantivo | [Kg _p] |
| Obtención de pulpa | OBT | Verbo | [Kg _p /t] |
| Venta de pulpa | VEP | Verbo | [Kg _p /t] |
| Residuos | RES | Sustantivo | [Kg _r] |
| Generación de residuos | GEN | Verbo | [Kg _r /t] |
| Venta de residuos | VER | Verbo | [Kg _r /t] |
| Maquinaria | MAQ | Sustantivo | [u _m] |
| Instalación de maquinaria | INS | Verbo | [u _m /t] |

| Nombre | Abreviatura | Tipo | Unidad |
|---|-------------|------------|-----------------------|
| Deterioro de maquinaria | DET | Verbo | [u_m/t] |
| Dinero | DIN | Sustantivo | [\$] |
| Ingresos | ING | Verbo | [\$/t] |
| Egresos | EGR | Verbo | [\$/t] |
| Capacidad de procesamiento de fruta | CPF | Parámetro | [$Kg_f/(u_m * t)$] |
| Cantidad de periodos de almacenamiento | CPA | Parámetro | [] |
| Precio de compra de fruta | PCF | Parámetro | [\$/Kg _f] |
| Maquinaria mínima para producción | MMP | Parámetro | [u_m] |
| Tasa de aprovechamiento de fruta | TAF | Parámetro | [Kg_p/Kg_f] |
| Precio de venta de pulpa | PVP | Parámetro | [\$/Kg _p] |
| Tasa residual de fruta | TRF | Parámetro | [Kg_r/Kg_f] |
| Precio de venta de residuos | PVR | Parámetro | [\$/Kg _r] |
| Capacidad de instalación de maquinaria | CIM | Parámetro | [u_m/t] |
| Precio de instalación de maquinaria | PIM | Parámetro | [\$/u _m] |
| Tiempo medio de vida útil de maquinaria | TVU | Parámetro | [t] |

Los parámetros, y otro tipo de elementos que pueden surgir del modelamiento cuantitativo como los sustantivos auxiliares (ver capítulos 7 y 9), luego son incorporados en una nueva versión del diagrama de influencias a la que aquí se llama modelo enriquecido del sistema.

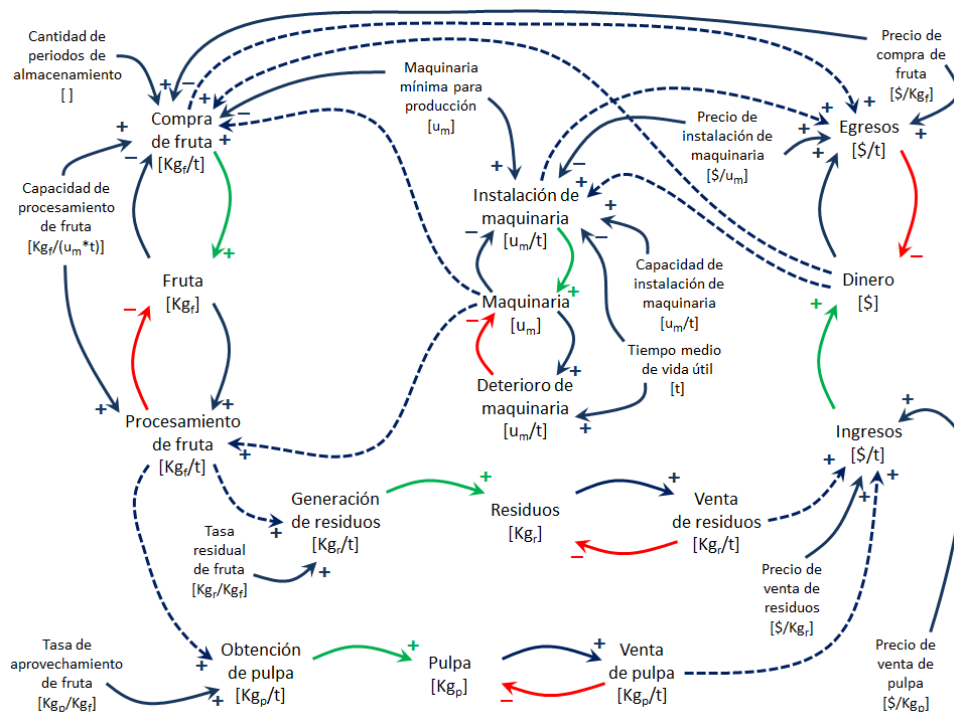


Figura 3.3 Diagrama de influencias del modelo enriquecido del sistema

Este modelo enriquecido del sistema, partiendo del hecho de llevar implícita una validación matemática, es el insumo para la siguiente fase que es la obtención de los diseños propios del proceso de desarrollo de software.

3.3.4 Transformación del modelo de Dinámica de Sistemas.

La restricción hecha en el modelamiento de la estructura básica del sistema a incluir solo sustantivos y verbos tiene como propósito aprovechar su correspondencia matemática con variables y derivadas, para hacerla llegar hasta atributos y métodos en el contexto de la orientación a objetos en el desarrollo de software.

Se propone la transformación del diagrama de influencias del modelo enriquecido del sistema mediante un conjunto sistemático de pasos:

3.3.4.1 Diagrama de dominio

En primer lugar se identifican en el diagrama de influencias los sectores o subsistemas, es decir, conjuntos de sustantivos y sus correspondientes verbos. A partir del sustantivo principal de cada subsistema se agrega una clase al diagrama de dominio. Luego, teniendo en cuenta las influencias entre subsistemas se obtienen las relaciones de dependencias entre clases.

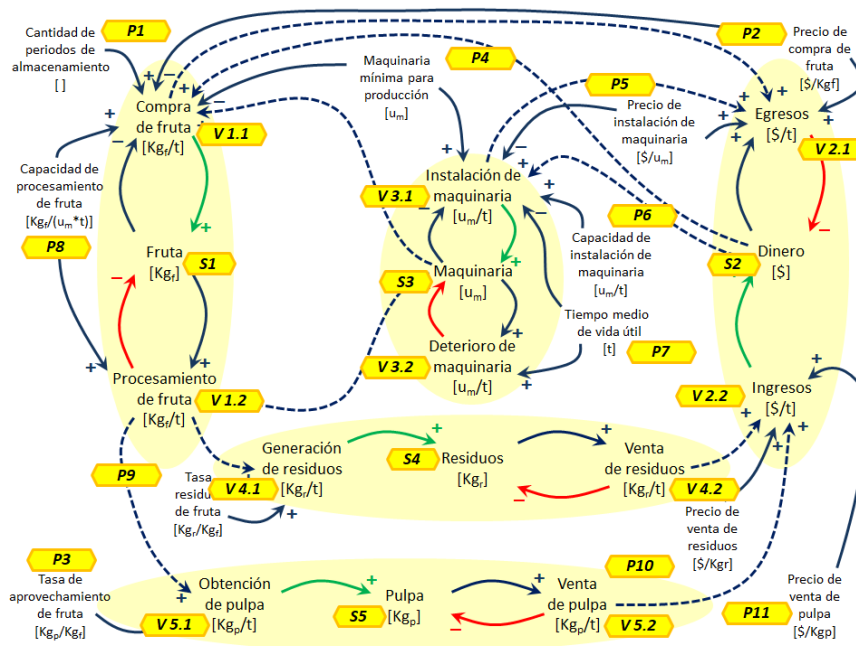


Figura 3.4 Subsistemas y clasificación de elementos en el modelo enriquecido del sistema

En el diagrama de la Figura 3.4 se observan zonas sombreadas que señalan los cinco subsistemas ya mencionados. Esto da origen al diagrama de dominio de la Figura 3.5.

En ocasiones un subsistema ejerce más de una influencia sobre otro, e incluso puede haber influencias mutuas. El modelador determinará, de acuerdo a los criterios y argumentos que hayan sido expuestos durante el proceso de modelamiento con Dinámica de Sistemas, a cuál de tales relaciones da prioridad para sugerir dependencias entre clases.

Es de notar que tratándose de representación mediante flechas, las relaciones entre clases tienen un sentido contrario al de las influencias entre subsistemas.

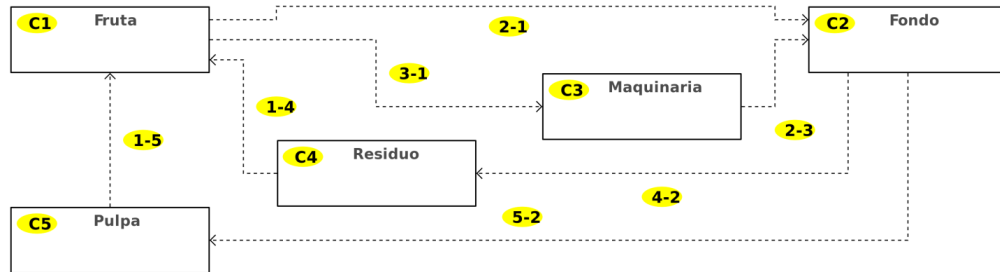


Figura 3.5 Transformación del diagrama de influencias del sistema en diagrama de dominio del software

3.3.4.2 Diagrama de clases

Como suele ocurrir en el proceso habitual de modelamiento de clases, a casi todas se les pueda asignar automáticamente atributos de referenciación de instancias tales como código, nombre y fecha, los cuales no proceden del modelo matemático.

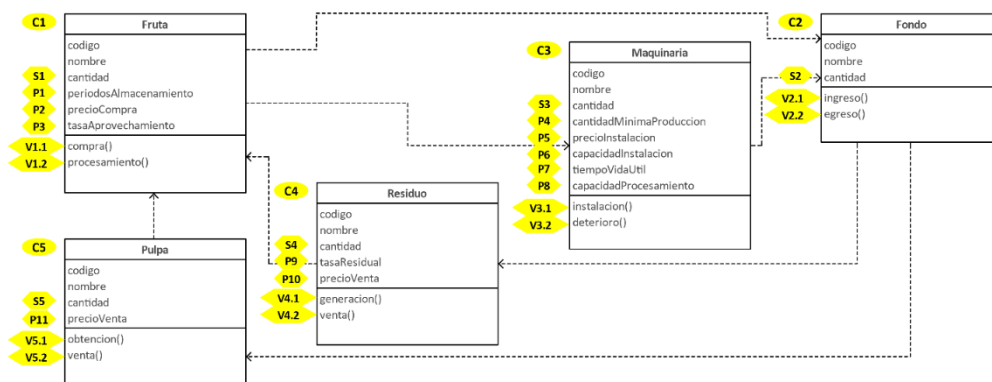


Figura 3.6 Transformación del diagrama de influencias del sistema en diagrama de clases del software

Los elementos que sí están respaldados en el modelo con Dinámica de Sistemas son los sustantivos, verbos, parámetros y sustantivos auxiliares, los cuales por haber surgido de un proceso de validación de consistencia matemática se consideran necesarios en el diseño del software, para lo cual se incluyen con base en los siguientes criterios:

- Los sustantivos se transforman en atributos de la clase correspondiente a su subsistema.
- Los verbos se transforman en métodos de la clase de su correspondiente subsistema.
- Los parámetros se asignan como atributos, preferiblemente a la clase de la cual proviene la influencia que llega al verbo en el que interviene.
- Los sustantivos auxiliares se transforman en métodos, preferiblemente en la clase en donde se encuentren los otros métodos sobre los cuales dichos sustantivos auxiliares intervienen.

Con base en los criterios citados, el diagrama de influencias del modelo enriquecido del sistema se transforma en un diagrama de clases como el que muestra la Figura 3.6. Desde luego, la argumentación durante el proceso de modelamiento puede llevar al modelador a tomar la decisión de crear clases nuevas, especialmente para ubicar algunos parámetros y sustantivos auxiliares para los que no fuera claro determinar la clase a la que pertenecen.

3.3.4.3 Diagrama entidad relación

El diagrama entidad relación, en cuanto diseño de la base de datos del sistema, representa un aspecto del software diferente al del diagrama de clases. Sin embargo, la transformación del diagrama de influencias en diagrama entidad relación sigue criterios similares:

- Los subsistemas se transforman en entidades, a las cuales se les incluyen como primeros atributos los usuales de referenciación como código, nombre y fecha.
- Los sustantivos se transforman en atributos de la entidad correspondiente a su subsistema.
- Los verbos se transforman en relaciones entre las clases desde donde provengan y a donde llegan influencias que incluyan a dichos verbos.
- Los parámetros se asignan como atributos, preferiblemente a la entidad de la cual proviene la influencia que llega al verbo en el que interviene.

Con base en los criterios citados mencionados, el diagrama de influencias del modelo enriquecido del sistema se transforma en un diagrama entidad relación como el que muestra la Figura 3.7. La Figura 3.8 sintetiza la metodología propuesta.

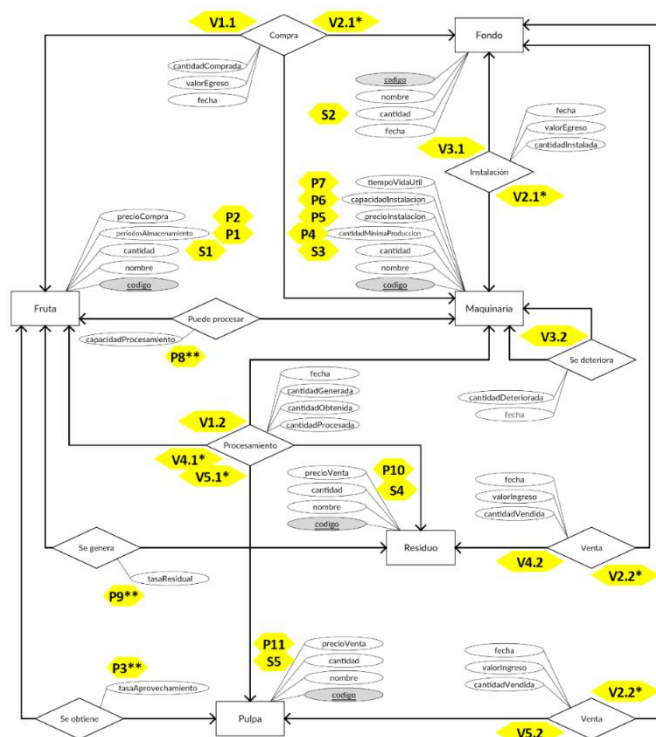


Figura 3.7 Transformación del diagrama de influencias del sistema en diagrama entidad relación del software

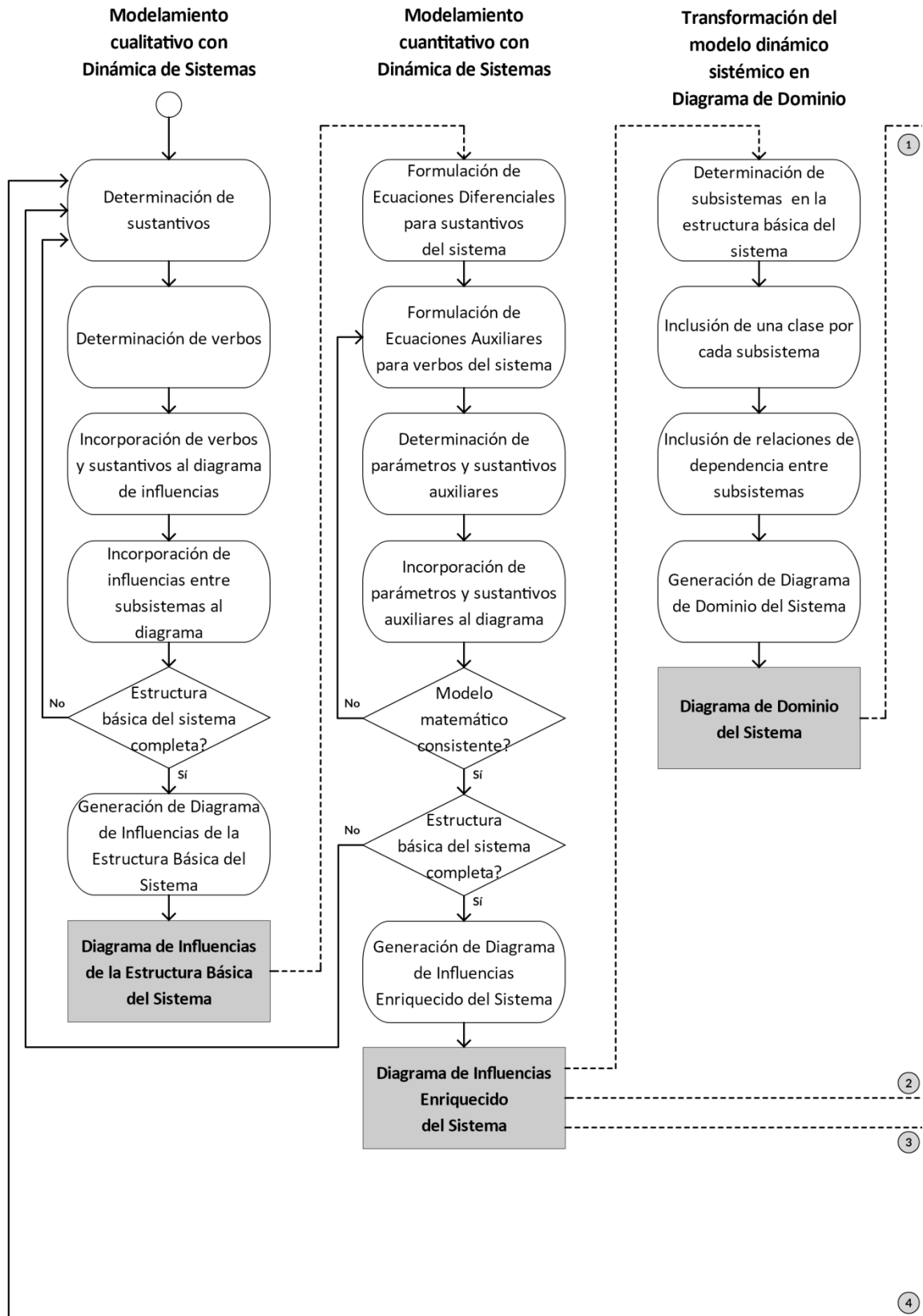


Figura 3.8 Diagrama de flujo de la propuesta metodológica

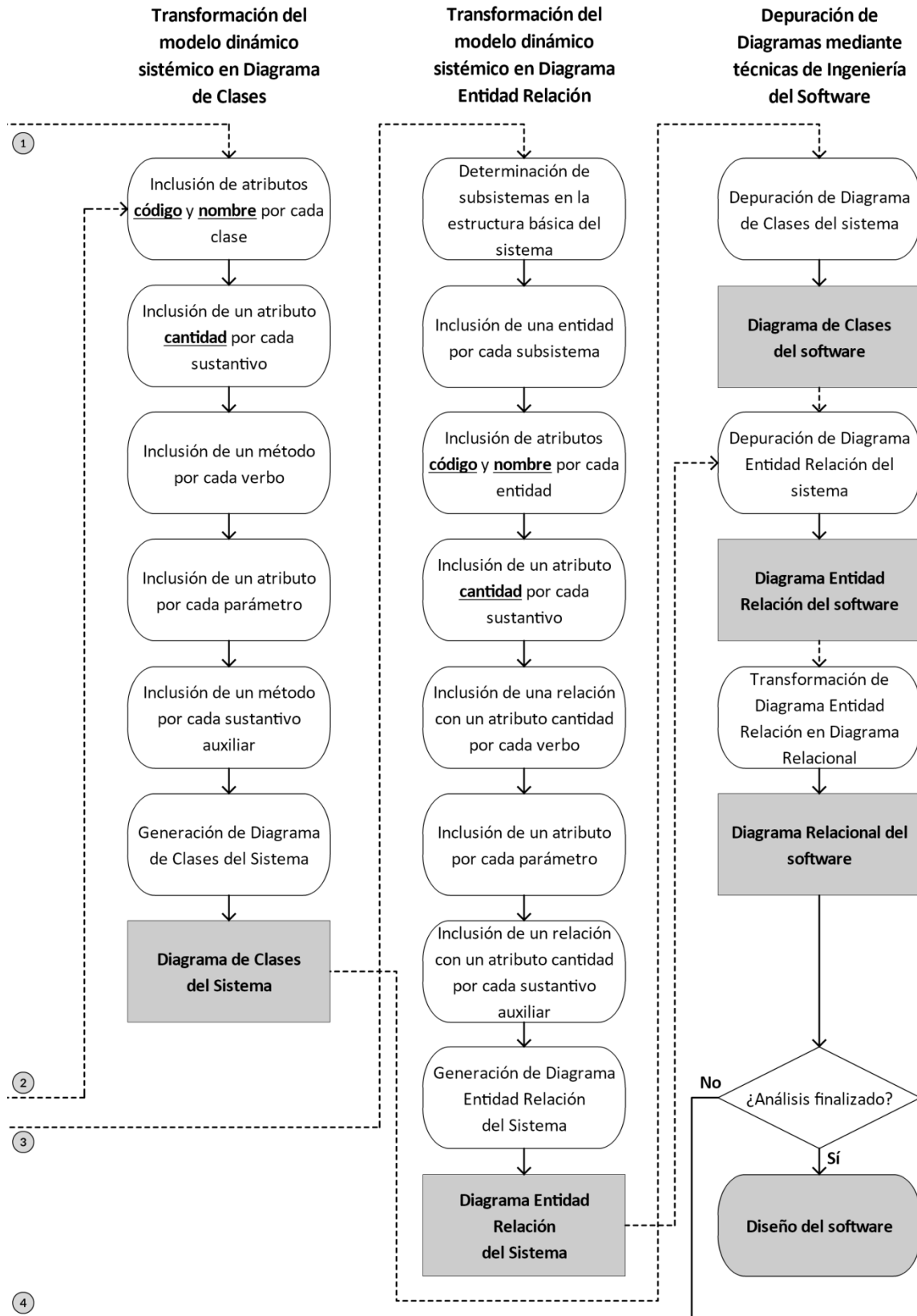


Figura 3.8 ... continuación Diagrama de flujo de la propuesta metodológica.

3.3.5 Depuración

No se pretende sustituir ninguna de las metodologías comúnmente aceptadas por la comunidad académica ni por la industria del desarrollo de software. Al contrario, está claro que a pesar de la consistencia matemática que el diagrama de clases y el diagrama entidad relación pudieran heredar por ser transformaciones metódicas del diagrama de influencias del modelo enriquecido del sistema matemáticamente validado, quedan por aplicar muchos criterios y consideraciones con respecto al modelamiento de clases y de bases de datos que corrijan algunos inconvenientes. De modo que la metodología que aquí se propone es una mediante la cual los autores aspiran a generar un insumo inicial que luego pueda ser depurado y dar origen a software de calidad visto como producto de ingeniería.

En el ámbito de influencia del programa de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Investigación y Desarrollo, son predominantes los enfoques de desarrollo de software basados en especificaciones y en ingeniería de requerimientos. Este libro se enmarca en el desarrollo conducido por modelos, algo que a criterio de quienes proponen la metodología, subsanaría varias de las deficiencias que suelen tener los diseños sujetos a especificaciones, en tanto no provienen de la construcción de conocimiento sobre los sistemas a que se aplican, sino sesgados por la percepción de un problema típicamente de gestión.

Sin embargo, como se mostrará en los 6 capítulos dedicados a casos de estudio, mediante la depuración de los diseños obtenidos por transformación de diagramas de influencias, se puede llegar a desarrollos de software comparables a los que se obtienen del proceso tradicional, con la ventaja de comprender aspectos que mediante especificaciones podrían ser pasados por alto, mientras que en la metodología propuesta emergen del proceso de modelamiento. La versatilidad de la Dinámica de Sistemas, de la cual ya se ha dado un indicador cuando se mencionaron los numerosos campos de acción con que se estructura anualmente el Congreso Internacional de Dinámica de Sistemas, sustenta la expectativa de que la propuesta pudiera ser aplicable en un grupo significativo de escenarios en donde se requieran sistemas informáticos para la gestión.

Referencias

- Accreditation Board for Engineering and Technology ABET. (2011). *Criteria for Accrediting Engineering Programs*.
- Aracil, J. (1992). *Introducción a la Dinámica de Sistemas* (3rd ed.). Madrid: Alianza Editorial.
- Aracil, J., & Gordillo, F. (1997). *Dinámica de Sistemas* (1st ed.). Madrid: Alianza Editorial.
- Association for Computing Machinery ACM, & Institute of Electric and Electronic Engineers - Computer Society IEEE-CS. (2004). *Software Engineering 2004 Curriculum guidelines for Undergraduate Degree Programs in Software Engineering*. Retrieved from <http://sites.computer.org/ccse/SE2004Volume.pdf>
-

- Cohoon, J., & Knight, J. (2006). Connecting Discrete Mathematics and Software Engineering. *Proceedings. Frontiers in Education. 36th Annual Conference*, 13–18. <http://doi.org/10.1109/FIE.2006.322656>
- de Lara, J., Guerra, E., & Sánchez Cuadrado, J. (2015). Model-driven engineering with domain-specific meta-modelling languages. *Software and Systems Modeling*, 14(1), 429–459.
- European Network for Accreditation of Engineering Education ENAEE. (2012). ENAEE / IEA Glossary of Terminology. Retrieved from <http://www.enaee.eu/publications/enaeeiea-glossary-of-terminology>
- Hemel, Z., Kats, L. C. L., Groenewegen, D. M., & Visser, E. (2010). Code generation by model transformation: a case study in transformation modularity. *Software and Systems Modeling*, 9(3), 375–402.
- Henderson, P. B. (2003). The role of modeling in software engineering education. *Proceedings. Frontiers in Education. 33th Annual Conference*, 21–25.
- Herrero, J., & Carmona, P. (2013). A model-driven approach to develop high performance web applications. *The Journal of Systems & Software*, 86(12), 3013–3023.
- Holmboe, C. (2005). Conceptualization and labelling as cognitive challenges for students of data modelling. *Computer Science Education*, 15(2), 143–161. <http://doi.org/10.1080/08993400500150796>
- International Council on Systems Engineering INCOSE. (2009). *Graduate Software Engineering 2009 (GSWE2009) Curriculum Guidelines for Graduate Degree Programs in Software Engineering* (Vol. 2009). Retrieved from http://www.gswe2009.org/fileadmin/files/GSWE2009_Curriculum_Docs/GSWE2009_version_1.0.pdf
- Khait, A. (2003). Goal orientation in mathematics education. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 34(6), 847–858. <http://doi.org/10.1080/00207390310001595438>
- Kling, R. (1991). Computerization and Social Transformations. *Science, Technology, & Human Values*, 16(3), 342–367.
- Kling, R., Rosenbaum, H., & Sawyer, S. (2005). *Understanding and communicating Social Informatics. A framework for studying and teaching the human contexts of Information and Communication Technologies* (1st ed.). Medford, New Jersey, USA: Information Today.
- Luna-Reyes, L. F., Black, L. J., Cresswell, A. M., & Pardo, T. A. (2008). Knowledge sharing and trust in collaborative requirements analysis. *System Dynamics Review*, 24(3), 265–297.
- Muñoz, J., & Pelechano, V. (2005). MDA vs. Factorías de Software. In *II Taller sobre Desarrollo de Software Dirigido por Modelos, MDA y Aplicaciones (DSDM 2005)*.
- Pruyt, E. (2013). *Small System Dynamics models for big issues* (1st ed.). Delft, The Netherlands: TU Delft Library. http://doi.org/10.1007/SpringerReference_7284
- Quintero, J. B., & Anaya, R. (2007). MDA y el papel de los modelos en el proceso de desarrollo de software. *Revista de La Escuela de Ingeniería de Antioquia*, (8), 131–146.

- Richardson, G. P. (2011). The field of System Dynamics. Retrieved from <http://www.systemdynamics.org/what-is-s/>
- Senge, P. (1993). *La Quinta Disciplina: cómo impulsar el aprendizaje en la organización inteligente* (1st ed.). Buenos Aires: Gránica.
- Thiry, L., & Thirion, B. (2009). Functional metamodels for systems and software. *Journal of Systems and Software*, 82(7), 1125–1136. <http://doi.org/10.1016/j.jss.2009.01.042>
- Tignor, W. (2004). System Engineering and System Dynamics models. In M. Kennedy, G. Winch, R. Langer, J. Rowe, & J. Yanni (Eds.), *Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society* (Vol. 34, p. 110). Oxford, Inglaterra: System Dynamics Society. <http://doi.org/10.1093/carcin/bgt388>
- Zheng, Y., & Taylor, R. N. (2013). A classification and rationalization of model-based software development. *Software and Systems Modeling*, (12), 669–678.
-

4 Especies invasoras – Caso de estudio

El modelo poblacional vegetativo es una tradición en los textos de Dinámica de Sistemas. Su estructura puede considerarse como la mínima expresión de un sistema. Es difícil encontrar un fenómeno real que pueda representarse con tan bajo nivel de complejidad, pero sigue siendo conveniente para establecer las bases metodológicas al comienzo del proceso de aprendizaje de la Dinámica de Sistemas.

Este caso se presentó completamente solucionado al grupo experimental, para orientar a los estudiantes con respecto a la selección de los sustantivos y verbos pertinentes para la estructura básica del sistema, a las convenciones que se utilizarían a lo largo del curso para los tipos de influencias y explicar sus diferencias.

4.1 Formulación del caso

4.1.1 Planteamiento

Se considera como invasora una especie no nativa que se establece, prolifera y se disemina en un nuevo ambiente afectando destructivamente los intereses humanos (World Conservation Union, 2001), ya que al establecer poblaciones sostenibles ejerce un efecto adverso en el ambiente natural; entre las más frecuentes se cuentan especies de plantas superiores, insectos, roedores, anfibios, entre otros (Centre for Ecology and Hidrology, 2012). Para que una especie se constituya en invasora, se requiere que encuentre unas condiciones especialmente favorables, como disponer de abundantes fuentes de alimento, no tener depredadores al menos en su vida adulta, y llegar a transformarse en la especie dominante de un hábitat desplazando o eliminando a las nativas (Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad, 2012).

Una especie puede convertirse en invasora por un descuido humano. En 1986 se introdujo a Colombia, importada de Brasil, la especie *Lithobates catesbeianus*, popularmente conocida como Rana Toro o Rana Bramadora. El propósito de esta importación era el manejo y explotación en criaderos para comercializar su carne. Pero las medidas de aislamiento del medio natural fallaron; varios ejemplares de estas ranas escaparon, y su población empezó a crecer fuera de cautiverio (Agencia AUPEC, 2012). Se ha convertido en la especie dominante porque su dieta es muy variada, de manera que dispone de alimento abundante; además, no tiene depredadores durante su vida adulta.



Figura 4.1 Rana Toro (Parker, 2014)

El nombre común de Rana Toro se debe a su gran tamaño y peso: un adulto puede llegar a medir 20 centímetros desde el hocico hasta la cloaca, y a pesar 900 gramos. En cautiverio pueden vivir hasta 16 años, pero en libertad su promedio de vida es de 8 años. Su reproducción es anual, y cada hembra puede poner hasta 25000 huevos por periodo (Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad, 2012). Aunque los huevos son depositados en aguas tranquilas, la gran mayoría de estos y de los renacuajos nacidos son devorados por peces, otros animales, e incluso los machos de su misma especie. Sin embargo, la gran cantidad de huevos es suficiente para que en promedio por cada hembra nazcan 2 ejemplares que lleguen a ser adultos.

Casos de especies invasoras se presentan en diversos ambientes en todo el mundo. Los colonizadores británicos a mediados del siglo XIX llevaron decenas de camellos de Afganistán para explorar la región desértica central de Australia. Dichos camellos eran dejados libres cuando ya no se consideraban aptos para el trabajo. Dado que son animales adaptados al desierto, la población actual de camellos descendiente de aquellos abandonados por los colonizadores es superior al millón de individuos, y son la especie dominante en la región (Agencia EFE, 2009).

4.1.2 Pregunta

¿Cómo modelaría con Dinámica de Sistemas la estructura que genera el comportamiento poblacional de una especie invasora, y que permita determinar cómo cambia el número de individuos a partir de la llegada de los primeros especímenes?

4.2 Solución de referencia

4.2.1 Modelamiento cualitativo de la estructura básica del sistema

En esta fase se identifican los elementos estructurales de un sistema: sustantivos y verbos. Los sustantivos son aquellos elementos - generalmente tangibles - de los cuales se puede

determinar una cantidad expresada en una unidad de medida. Los verbos son las acciones o eventos que cambian el valor de los sustantivos, y su unidad de medida es la misma de estos, pero en relación con la unidad de tiempo.

En el caso de la invasión de la Rana Toro, se describe cómo su población, que es pequeña al comienzo, encuentra las condiciones apropiadas para volverse numerosa. Lo mismo sucede con la invasión de camellos en Australia que pasó de cientos de ejemplares a superar el millón. A la cantidad de ejemplares en cada caso la podemos llamar en términos generales **población**, que puede ser medida en número de individuos $[i]$.

Con respecto a los verbos, habría que preguntarse cómo crece o decrece la cantidad de individuos. El planteamiento menciona los **nacimientos**, que son el número de individuos que nace en un periodo determinado, es decir se miden en $[i/t]$.

El planteamiento del problema también menciona que las Ranas Toro alcanzan un cierto tiempo de vida, con lo cual es de suponer, como en cualquier especie, que hay un verbo que disminuye el valor del sustantivo, que puede denominarse **muerdes**, definido como el número de individuos que muere en un periodo determinado, es decir se miden en $[i/t]$.

Dado que una especie se considera invasora en ausencia total de depredadores y disponibilidad suficiente de alimento, condiciones estas que le permiten convertirse en la especie predominante, no se considera necesario incluir ningún otro elemento a la estructura básica del sistema.

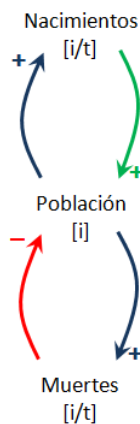


Figura 4.2 Diagrama de influencias de la estructura básica del sistema

La Figura 4.2 muestra las influencias de los verbos sobre los sustantivos con color verde o rojo según impliquen incremento o decremento, y las influencias del sustantivo hacia los verbos con color azul.

Con respecto a las influencias del sustantivo sobre sus propios verbos, tanto nacimientos como muertes son más frecuentes en poblaciones grandes que en poblaciones pequeñas, es decir son directamente proporcionales; la influencia de población sobre los dos verbos es directa.

4.2.2 Modelamiento cuantitativo

Para el modelamiento cuantitativo se suelen utilizar abreviaturas de los elementos del modelo. La Tabla 4.1 contiene los mismos elementos del diagrama de influencias de la Figura 4.2 junta a la abreviatura que se utilizará en la construcción del modelo matemático, y otros datos pertinentes.

Tabla 4.1 Elementos de la estructura básica del sistema

| Nombre | Abreviatura | Tipo | Unidad |
|-------------|-------------|------------|---------------|
| Población | POB | Sustantivo | Individuo [i] |
| Nacimientos | NAC | Verbo | [i/t] |
| Muertes | MUE | Verbo | [i/t] |

A cada sustantivo le corresponde una ecuación diferencial en el modelo matemático de la estructura básica del sistema, con los verbos constituyéndose en las derivadas del sustantivo. Por eso la derivada de la población equivale a los nacimientos menos las muertes.

En la ecuación diferencial en forma de Euler la población al inicio de cada nuevo periodo será igual a la que había al inicio del periodo anterior, incrementada en la cantidad de nacimientos y decrementada en la cantidad de muertes ocurridas durante el periodo anterior, ambos verbos multiplicados por el delta de t.

Tabla 4.2 Ecuaciones diferenciales del sistema

| Elemento | Ecuación diferencial | Ecuación diferencial en forma de Euler |
|----------|-------------------------------|--|
| POB | $\frac{dPOB}{dt} = NAC - MUE$ | $POB(t + \Delta t) = POB(t) + NAC(t) * \Delta t - MUE(t) * \Delta t$ |

A cada verbo del sistema le corresponde una ecuación auxiliar, construida con los elementos de donde llegan relaciones al verbo. Para los nacimientos, el diagrama influencias de la Figura 4.2 indica que debe plantearse una expresión para nacimientos en función de la población.

$$NAC(t) = f(POB(t))$$

Un modelador con experiencia o formación matemática probablemente llegaría con facilidad a la ecuación. Pero si este no fuera el caso, un análisis de las unidades de medida dará las pistas necesarias para conseguirlo. Se requiere obtener las unidades de nacimientos a partir de las unidades de población.

$$[i/t] = f([i])$$

La única forma de transformar una unidad en otra es multiplicándola por un complemento apropiado. Para que [i] sea igual a [i/t], le falta una unidad de medida que tenga t en el denominador.

$$[i/t] = [i] * [1/t]$$

$$[i/t] = [i/t]$$

Un elemento cuya unidad sea $[1/t]$ puede ser considerado como una tasa, en este caso la **tasa de natalidad** de la población, que se abreviará como **TN**. Se entiende por esta tasa la proporción de nacimientos con respecto a la población total, que ocurren en un periodo.

$$NAC(t) = POB(t) * TN(t)$$

Según del diagrama de influencias, las muertes también deben formularse en función de la población.

$$MUE(t) = f(POB(t))$$

$$[i/t] = f([i])$$

En el caso de nacimientos se obtuvo una tasa de natalidad, y sería válido proponer ahora una tasa de mortalidad. Pero dado que el planteamiento del caso menciona la longevidad que puede alcanzar una Rana Toro en libertad, resulta viable proponer que en lugar de multiplicar por $[i/t]$ se podría dividir por $[t]$ con el mismo resultado.

$$[i/t] = [i]/[t]$$

$$[i/t] = [i/t]$$

El elemento cuya unidad es $[t]$ y que influye sobre las muertes es el **tiempo promedio de vida**, que se abreviará como **TPV**, consistente en la cantidad de periodos que en promedio alcanza a vivir un individuo de la especie en el medio. Una aproximación sencilla a la cantidad de muertes puede obtenerse dividiendo la población por dicho elemento, es decir, si una especie vive en promedio n años, cada año morirá aproximadamente la n -ésima parte de la población.

$$MUE(t) = POB(t) / TPV(t)$$

Esta no es la expresión que mejor define la cantidad de muertes en función de la población, pero es una aproximación aceptable, y dado el carácter introductorio de este caso se ha preferido mantener el modelo matemático en la mayor simplicidad posible.

Queda pendiente incorporar la **tasa de natalidad** y el **tiempo promedio de vida** al diagrama de influencias que posteriormente se presentará como la estructura enriquecida del sistema; no están definidos mediante ecuaciones sino mediante valores específicos según el caso particular de la población a la que se quiera aplicar el modelo, lo que se verá más adelante en la sección de simulación. Las ecuaciones auxiliares del sistema se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.3 Ecuaciones auxiliares del sistema

| Elemento | Ecuación |
|----------|---------------------------|
| NAC | $NAC(t) = POB(t) * TN(t)$ |
| MUE | $MUE(t) = POB(t)/TPV(t)$ |

4.2.3 Modelamiento enriquecido del sistema

Agregando los parámetros hallados durante la construcción de las ecuaciones auxiliares, la lista completa de elementos del sistema queda como se muestra en la Tabla 4.4. El diagrama de influencias con la incorporación de los parámetros queda como lo muestra la Figura 4.3.

Tabla 4.4 Elementos del sistema

| Nombre | Abreviatura | Tipo | Unidad |
|-------------------------|-------------|------------|---------------|
| Población | POB | Sustantivo | Individuo [i] |
| Nacimientos | NAC | Verbo | [i/t] |
| Muertes | MUE | Verbo | [i/t] |
| Tasa de natalidad | TN | Parámetro | [1/t] |
| Tiempo promedio de vida | TPV | Parámetro | [t] |

Los signos en las influencias que van de los parámetros a los verbos, mantienen consistencia con su papel en la expresión matemática en que fueron incorporados: la tasa de natalidad multiplica a la población en la expresión para nacimientos, y por eso su influencia es directa, ya que a mayor tasa de natalidad los nacimientos serán más numerosos; el tiempo promedio de vida divide a la población en la expresión para muertes, por tanto su influencia es inversa, ya que a mayor tiempo promedio de vida menos frecuentes serán las muertes.

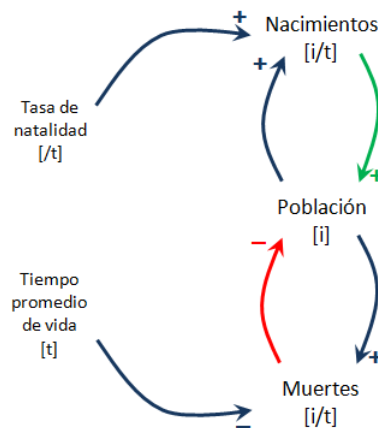


Figura 4.3 Diagrama de influencias del sistema

4.2.4 Simulación

A partir de la información del caso, se definen los siguientes valores para la simulación del proceso en el caso específico de la Rana Toro:

Tabla 4.5 Condiciones iniciales de simulación

| Elemento | Valor inicial |
|-----------------------------|---------------|
| Condiciones iniciales | |
| Población [i] | $POB(0) = 10$ |
| Parámetros | |
| Tasa de natalidad [1/t] | $TN(t) = 1$ |
| Tiempo promedio de vida [t] | $TPV(t) = 8$ |

El valor 1 dado al parámetro TN, se estima a partir de que por cada hembra al año nacen 2 individuos que pueden llegar a ser adultos. Se descartan entonces todos aquellos renacuajos que mueren devorados por enemigos o por canibalismo de su propia especie. Suponiendo que

la mitad de la población es de hembras, se podría decir que en un año, por cada individuo nace otro. Desde luego, habría que buscar más información para estimar mejor este parámetro.

Es posible simular con la ayuda de una hoja de cálculo. Un esquema recomendable es definir un matriz para los elementos del modelo y sus valores iniciales, otra matriz para la generación de los datos de simulación implementando las ecuaciones como fórmulas, y finalmente otra para la graficación. La Figura 4.4 muestra el esquema general propuesto para simular con Microsoft Excel.

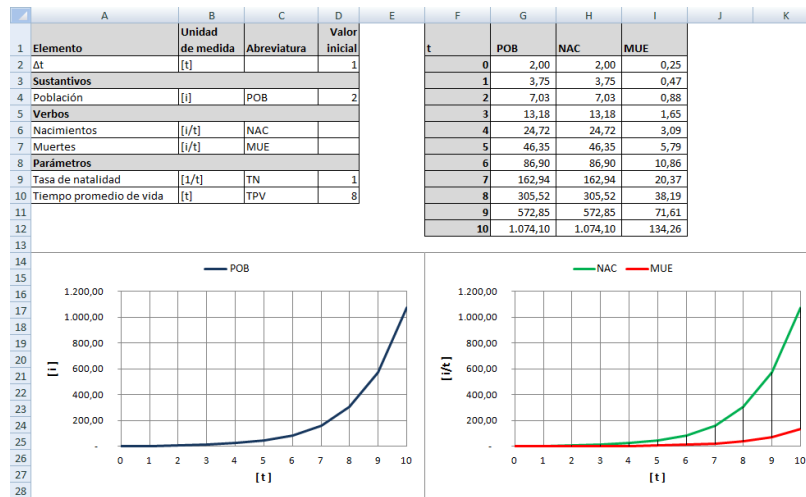


Figura 4.4 Simulación con Dinámica de Sistemas en hoja de cálculo

Solo se requiere una destreza básica del manejo de la hoja de cálculo, por ejemplo para construir fórmulas que incluyan referencias fijas a celdas. La matriz de elementos del sistema, del lado izquierdo de la Figura 4.5, se constituye con los todos los elementos del modelo, como se mostraron en la Tabla 4.4, y los valores iniciales determinados en la Tabla 4.5.

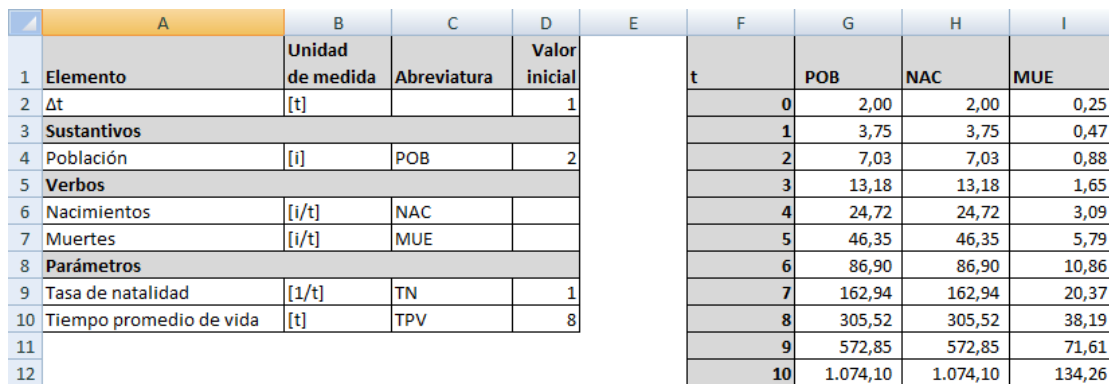


Figura 4.5 Matrices de valores iniciales y de generación de datos

Luego, la matriz de generación de datos de la simulación se conforma definiendo una columna para el tiempo, más una para cada sustantivo y cada verbo del sistema.

Es importante no digitar datos nuevos si estos pueden ser referenciados de la matriz de elementos del sistema. Por ejemplo, la celda **G1** que encabeza la columna de valores de **población**, contiene la fórmula:

$$= \$C\$4$$

Es decir, la celda **G1** no tiene un valor propio, sino que hace referencia al valor de la celda **C4**. El signo \$ antes de cada parte de la coordenada $\$C\4 previene de perder la referencia en caso de tener que copiar la celda y pegarla en otro lugar.

Usualmente el primer valor en la columna del tiempo es cero y su fila correspondiente contiene los valores iniciales de simulación. Por eso, la celda **G2** corresponde al valor inicial de la población; como este dato ya fue determinado, se hace referencia al valor de la celda **D4** en la matriz de elementos y valores iniciales del sistema. Entonces, la fórmula de G2 es

$$= \$D\$4$$

Los valores de los verbos para un periodo t cualquiera, se calculan con base en valores de la misma fila. Las muertes de esta población se rigen por la siguiente ecuación, como fue explicado en una sección anterior.

$$MUE(t) = POB(t) / TPV(t)$$

En la hoja de cálculo, la celda **I2** contiene la siguiente fórmula que calcula su valor:

$$= G2 / \$D\$10$$

Con esta fórmula, I2 toma el valor de G2 que corresponde a la población, y lo divide por el valor en D10 que es el tiempo promedio de vida. Es importante notar que las referencias a celdas de la matriz de generación de valores son libres, mientras que las referencias a celdas de la matriz de elementos del sistema están fijas.

Una vez completadas las celdas de los sustantivos y verbos del primer periodo, se generan los datos de los siguientes, agregando nuevas filas a la matriz. Toda celda siguiente a la de cualquier valor de t representa a $t + \Delta t$ mediante fórmulas como la siguiente, que corresponde a la celda **F3**:

$$= F2 + \$D\$2$$

Finalmente los valores de los sustantivos para cada periodo se calculan con base en los valores del sistema en la fila anterior. Para la población, su ecuación como ya se explicó en una sección anterior, es:

$$POB(t + \Delta t) = POB(t) + NAC(t) * \Delta t - MUE(t) * \Delta t$$

La implementación de esta ecuación se consigue con la fórmula de la celda **G3**:

$$= G2 + H2 * \$D\$2 - I2 * \$D\$2$$

Sobre esta base, el trabajo restante es copiar y pegar las últimas celdas de cada columna tantas veces como sea necesario para llegar hasta la generación de los datos correspondientes al tiempo total de simulación, que para este problema era $t=10$ años. Con modelos más complejos, con mayor cantidad de elementos o para simular series de tiempo más largas, es recomendable implementar cada una de las matrices en una hoja aparte.

Tabla 4.6 Datos generados en la simulación

| t | POB | NAC | MUE |
|----|----------|----------------------------|--------|
| 0 | 2,00 | 2,00 | 0,25 |
| 1 | 3,75 | 3,75 | 0,47 |
| 2 | 7,03 | 7,03 | 0,88 |
| 3 | 13,18 | 13,18 | 1,65 |
| 4 | 24,72 | 24,72 | 3,09 |
| 5 | 46,35 | 46,35 | 5,79 |
| 6 | 86,90 | 86,90 | 10,86 |
| 7 | 162,94 | 162,94 | 20,37 |
| 8 | 305,52 | 305,52 </td <td>38,19</td> | 38,19 |
| 9 | 572,85 | 572,85 | 71,61 |
| 10 | 1.074,10 | 1.074,10 | 134,26 |

La Tabla 4.6 muestra los resultados de simulación, según los cuales a partir de las condiciones iniciales propuestas, al cabo de 10 años la población de ranas toro habría superado los 1.000 individuos, como se aprecia en la Figura 4.6.

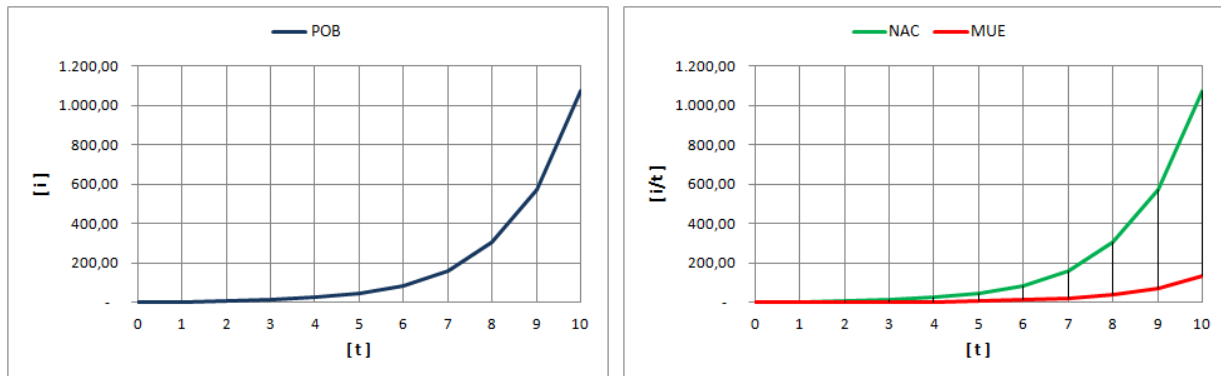


Figura 4.6 Diagrama de simulación de población

Entre nacimientos y muertes hay una diferencia cada vez mayor. Hacia el décimo año ocurren 1074 nacimientos y 134 muertes, con una diferencia entre los dos que llega a 940 individuos por año, lo que a su vez explica el crecimiento acelerado del sustantivo.

4.3 Transformación del modelo de Dinámica de Sistemas

El modelo enriquecido del sistema puede ser transformado en diversos diagramas del proceso de desarrollo de software, como del diagrama de dominio, el de clases o el diagrama entidad relación, siguiendo un conjunto de reglas básicas.

El proceso de transformación comienza con la identificación de subsistemas en la estructura básica; cada subsistema está conformado por sustantivos con la misma unidad de medida y sus correspondientes verbos. Dada la simplicidad de este modelo, que solo contiene un subsistema según la Figura 4.7, no se hará diagrama de dominio sino que se procederá directamente al diagrama de clases.

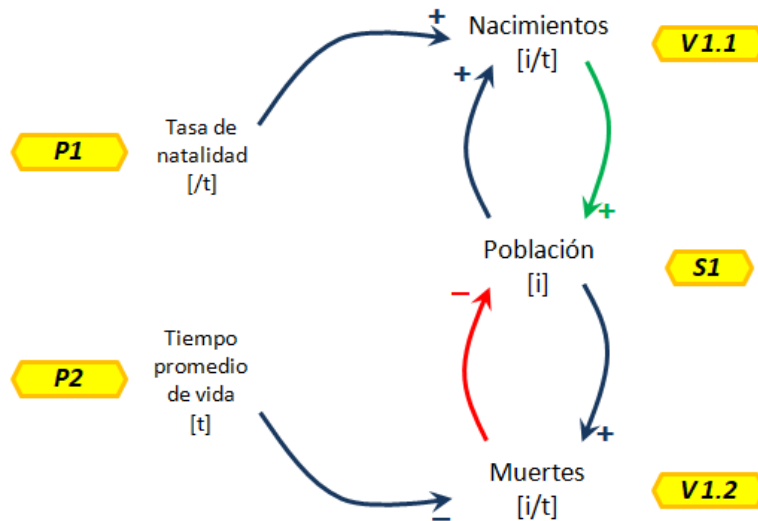


Figura 4.7 Subsistemas, sustantivos y verbos de la estructura básica del sistema

4.3.1 Diagrama de clases

Los sustantivos y verbos del único subsistema se incorporarán como los primeros atributos y los métodos en el diagrama de clases. En el diagrama de la Figura 4.7 han sido señalados todos los sustantivos, verbos y parámetros con rótulos para permitir su posterior ubicación en el diagrama de clases. Los atributos **codigo** y **nombre** no provienen del modelamiento matemático, sino de la necesidad de identificar y denominar instancias de cada clase.

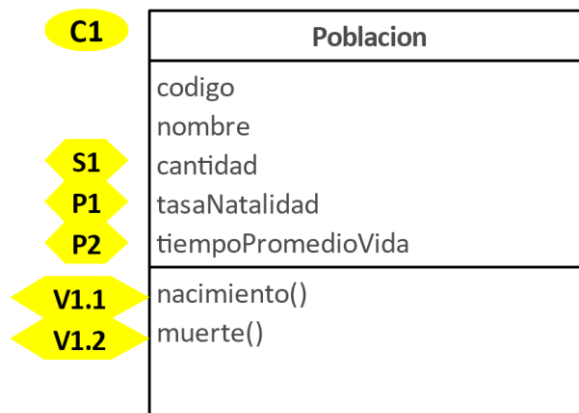


Figura 4.8 Diagrama de clases del sistema

A la única clase se le da el nombre de **Poblacion** coincidiendo con el único sustantivo del diagrama de influencias, que también se constituye en un atributo numérico de acumulación denominado de forma genérica **cantidad**. Los verbos que influyen a cada sustantivo se incorporan a la respectiva clase como métodos. Los restantes atributos se incorporan coincidiendo con los parámetros. El resultado de la transformación se muestra en la Figura 4.8.

4.3.2 Diagrama Entidad Relación

El último diagrama que se propone obtener mediante esta metodología como transformación del modelo con Dinámica de Sistemas es el diagrama Entidad Relación. La Figura 4.9 muestra el que se obtuvo para el presente caso, incluyendo los mismos rótulos con que se puede ubicar el elemento del diagrama de influencias de donde proviene cada entidad, relación o atributo.

El único subsistema da lugar a una entidad, a la cual se dan inicialmente los atributos **codigo** y **nombre**, que no provienen del modelo sino que se requieren para la identificación de instancias de cada entidad, como en su momento se propuso con cada clase. Con base en el sustantivo correspondiente se incluye también un atributo **cantidad**. Los verbos se incorporan como relaciones y como un atributo cantidad en sí mismas.

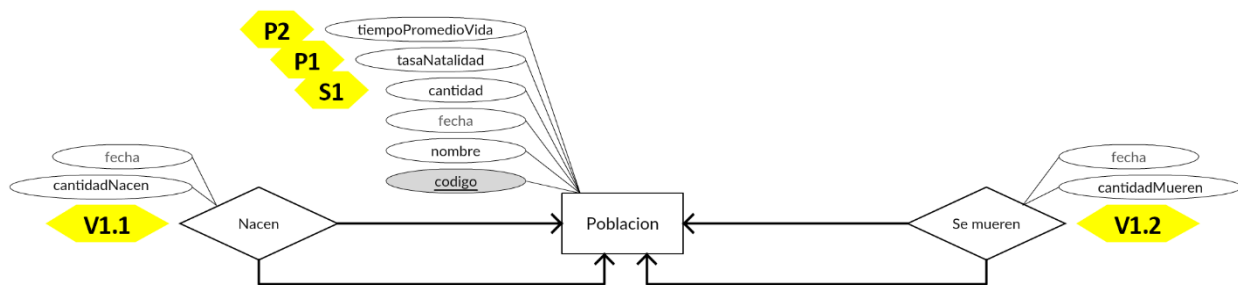


Figura 4.9 Diagrama entidad relación de la base de datos del sistema

4.4 Implementación de prueba

Siguiendo el procedimiento estándar para transformar el diagrama entidad relación en diagrama relacional, con ayuda del software MBD 3.0 se hizo una implementación de demostración del diseño presentado en la sección anterior.

Como se mencionó en el capítulo 1, el software MBD 3.0 fue desarrollado para el curso de Bases de Datos I, de modo que permitiera implementar de forma rápida y comprobar la utilidad de los diseños de bases de datos relacionales. La interfaz genérica de la herramienta no ofrece la misma versatilidad que una interfaz de usuario específica para el problema, pero permite el ingreso de datos y la formulación de consultas, con lo que ahorra el tiempo que requeriría desarrollar por completo un software a partir del diagrama de clases. El diccionario de datos simplificado en la Tabla 4.7, describe la base de datos propuesta.

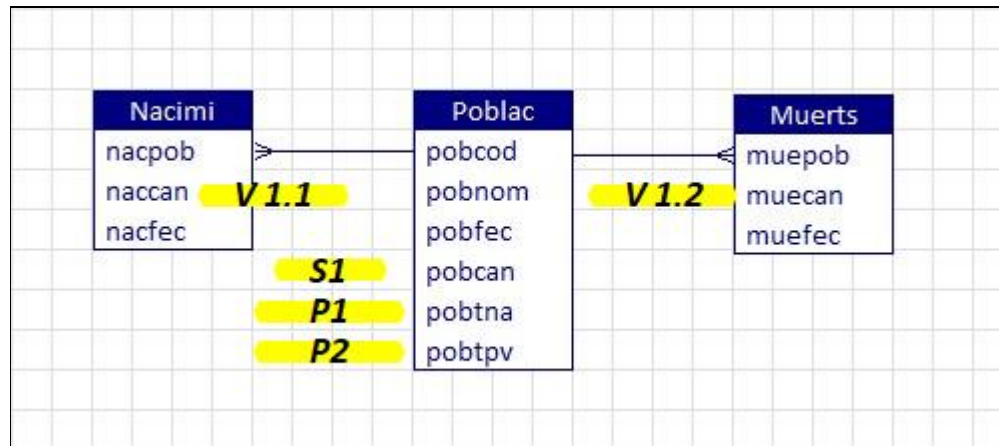


Figura 4.10 Diagrama relacional de la base de datos del sistema

Tabla 4.7 Diccionario de datos de la base de datos del sistema

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|--------|--|----------|---|----------|---------------|----------------------|
| Poblac | Relación de poblaciones consideradas invasoras | pobcod | Código de la población invasora | Primaria | | Autoincremental |
| | | pobnom | Nombre de la especie de la población invasora | | | Cadena de caracteres |
| | | pobfec | Fecha de registro de la cantidad | | | Fecha |
| | | pobcan | Cantidad de individuos de la especie [i] | | | Número entero |
| | | pobtna | Tasa de natalidad [1/año] | | | Número real |
| | | pobtpv | Tiempo promedio de vida en libertad [año] | | | Número real |
| Nacimi | Relación de nacimiento de individuos | nacpob | Referencia a la población en que se registra nacimiento de individuos | Foránea | Poblac.pobcod | Número entero |
| | | naccan | Cantidad de individuos nacidos | | | Número entero |
| | | nacfec | Fecha de registro de nacimientos | | | Fecha |
| Muerts | Relación de muertes de individuos | muepob | Referencia a la población en que se registra nacimiento de individuos | Foránea | Poblac.pobcod | Número entero |
| | | muecan | Cantidad de individuos muertos | | | Número entero |
| | | muefec | Fecha de registro de muertes | | | Fecha |

La interfaz generada de forma automática por la herramienta MBD 3.0 permite la captura de datos de las poblaciones invasoras como se muestra en las Figura 4.11 a Figura 4.13:

Poblac | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 53 bytes | Tamaño total 53 bytes

Código : 1

Especie : Rana Toro

Fecha (dd/mm/aaaa) : 01/06/2018

Cantidad [i] : 1

Tasa de natalidad [1/año] : 8

Tiempo promedio de vida [año] : 43269

Buttons: Agregar, Editar, Grabar, Cancelar, navigation arrows, Salir, Tabla

Figura 4.11 Registro de datos de la población invasora

Nacimi

Población : Rana Toro

Cantidad nacimientos : 9

Fecha (dd/mm/aaaa) : 30/06/2018

Buttons: Agregar, Editar, Grabar, Cancelar, navigation arrows, Salir, Tabla

Figura 4.12 Registro de nacimientos de la población invasora

Muerts

Población : Rana Toro

Cantidad muertes : 2

Fecha (dd/mm/aaaa) : 30/06/2018

Buttons: Agregar, Editar, Grabar, Cancelar, navigation arrows, Salir, Tabla

Figura 4.13 Registro de muertes de la población invasora

Y con esto, se han establecido los potenciales requisitos para un software, pero no partiendo de un acuerdo entre desarrolladores y clientes sino del diagrama resultante de un proceso de aprendizaje y cuya consistencia ha sido validada matemáticamente, proceso durante el cual se hicieron visibles elementos ignorados en la primera fase de modelado.

Este diseño no es necesariamente para un software de simulación; también aplica para, por ejemplo, una herramienta que le permita a la entidad encargada de expedir licencias de establecimiento de zocriaderos de especies no nativas, registrar los datos de las diferentes especies para las que se solicita autorización, exigiendo que el interesado aporte con la debida

sustentación técnica los parámetros con los cuales se pueda determinar si la especie representa un peligro en caso de presentarse fugas, pronosticar el comportamiento de la población una vez que se haya detectado una fuga, implementando los métodos **nacimientos()** y **muerdes()** para calcular los nacimientos esperados a partir de un determinado dato de población, a partir de las ecuaciones que ya están definidas en el modelo matemático, y que se pueden desarrollar en cualquier lenguaje de programación de forma seguramente más versátil que en una hoja de cálculo. Otra aplicabilidad del software sería registrar periódicamente censos de población y compararlos con datos de simulación para identificar cuándo una especie, nativa o no, se está saliendo de sus niveles normales de población, a partir de una comparación con los niveles esperados de acuerdo a la simulación.

4.5 Depuración y consideraciones finales

El diseño obtenido por transformación del diagrama de influencias aún debe ser sometido a los procesos de depuración y optimización pertinentes que se establecen en Ingeniería del Software. Por proceso de desagregación, en el diagrama de clases de la Figura 4.8 se incluiría una nueva clase denominada **Especie** con algunos de los atributos que por ahora pertenecen a la clase **Poblacion**. Por otra parte para la determinación del sitio donde ocurre el fenómeno poblacional se incluye la clase **Lugar**, sin atributos provenientes del modelo matemático sino para la codificación y denominación usual con casi cualquier clase nueva.

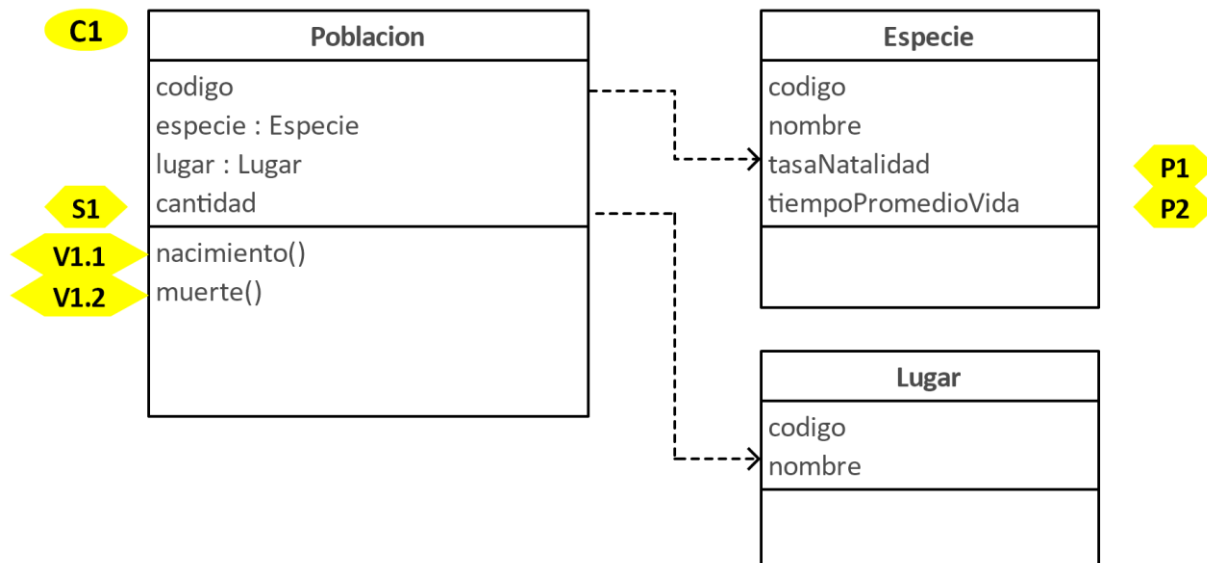


Figura 4.14 Depuración del diagrama de clases

No es del ámbito de este capítulo avanzar más en la depuración del diagrama de clases, que incluye analizar si la relación entre las clases **Poblacion** y **Especie** es de herencia o de otro tipo, lo que daría resultados levemente diferentes. Hasta aquí las relaciones entre clases se asumen como relaciones de dependencia. Lo pertinente es resaltar que el diagrama de clases de la Figura 4.14 contiene los mismos elementos surgidos del modelamiento con Dinámica de Sistemas, redistribuidos según los procesos usuales de depuración en Ingeniería del Software.

Por parametrización del atributo nombre de la entidad **Poblacion** en el diagrama entidad relación de la Figura 4.9 se deduce la necesidad de incluir una nueva entidad **Especie** en el primero, y su correspondiente tabla en el segundo. Asimismo se incluye una nueva entidad **Lugar** para determinar el sitio en que una **Especie** se establece para conformar una **Poblacion**.

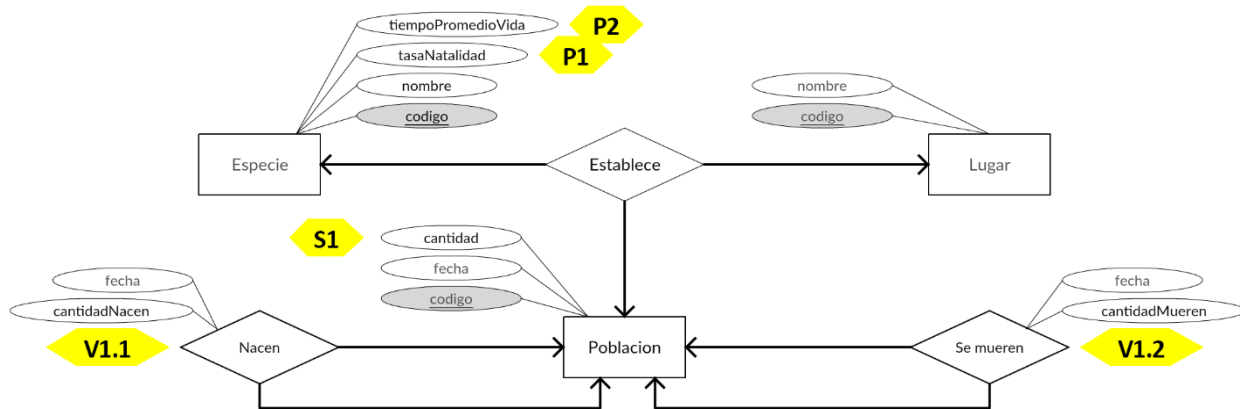


Figura 4.15 Depuración del diagrama entidad relación

También aquí procede una depuración adicional, como por ejemplo la normalización del diagrama relacional de la Figura 4.16, que a su vez es una transformación del diagrama entidad relación de la Figura 4.15. Pero al no ser del ámbito del capítulo, solo resta señalar en los diagramas depurados la presencia de los elementos provenientes del modelo matemático.

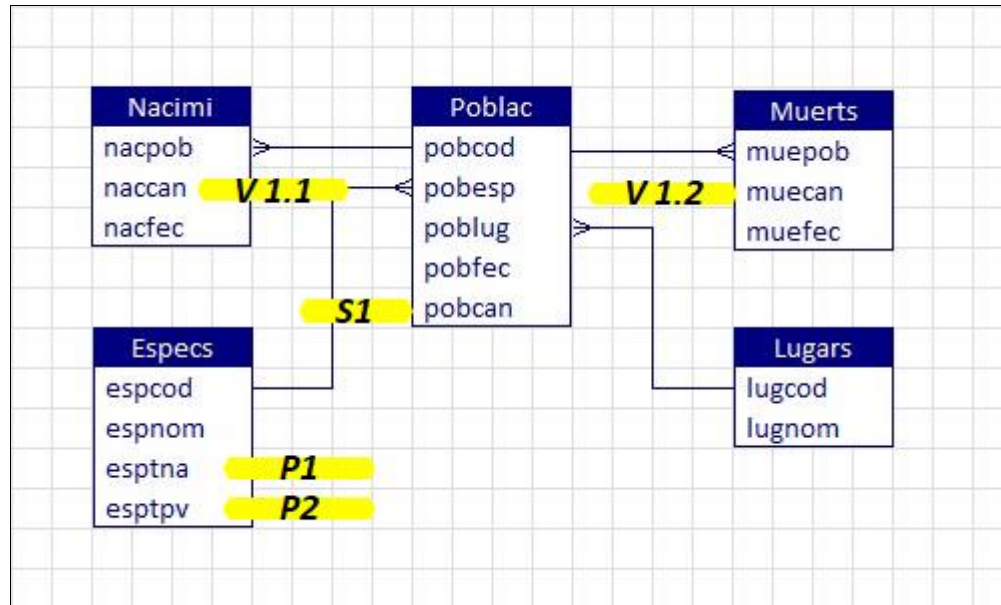


Figura 4.16 Depuración del diagrama relacional

De nuevo con la ayuda del software MBD 3.0 se ha hecho la implementación de la base de datos depurada, a partir del diccionario de datos de la Tabla 4.8. La funcionalidad provista por el software, y que se utiliza para en corto tiempo dar al estudiante una visión aproximada de las posibilidades concretas de la metodología, se muestra de la Figura 4.17 a la Figura 4.19.

Tabla 4.8 Diccionario de datos de la base de datos del sistema

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|---------------|---|---------------|---|----------|---------------|----------------------|
| Especs | Relación de especies invasoras | espcod | Código de la especie invasora | Primaria | | Autoincremental |
| | | espnom | Nombre de la especie invasora | | | Cadena de caracteres |
| | | pobtna | Tasa de natalidad [1/año] | | | Número real |
| | | pobtpv | Tiempo promedio de vida en libertad [año] | | | Número real |
| Lugars | Relación de lugares en que se asientan especies invasoras | lugcod | Código del lugar | Primaria | | Autoincremental |
| | | lugnom | Nombre del lugar | | | Cadena de caracteres |
| Poblac | Relación de poblaciones consideradas invasoras | pobcod | Código de la población invasora | Primaria | | Autoincremental |
| | | pobesp | Referencia a la especie invasora | Foránea | Especs.espcod | Número entero |
| | | poblug | Referencia al lugar en que se asienta la especie invasora | Foránea | Lugars.lugcod | Número entero |
| | | pobfec | Fecha de registro de la cantidad | | | Fecha |
| | | pobcan | Cantidad de individuos de la población [i] | | | Número entero |
| Nacimi | Relación de nacimiento de individuos | nacpob | Referencia a la población en que se registra nacimiento de individuos | Foránea | Poblac.pobcod | Número entero |
| | | naccan | Cantidad de individuos nacidos | | | Número entero |
| | | nacfec | Fecha de registro de nacimientos | | | Fecha |
| Muerts | Relación de muertes de individuos | muepob | Referencia a la población en que se registra nacimiento de individuos | Foránea | Poblac.pobcod | Número entero |
| | | muecan | Cantidad de individuos muertos | | | Número entero |
| | | muefec | Fecha de registro de muertes | | | Fecha |

Especc | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 45 bytes | Tamaño total 45 bytes

Código : 1

Especie :

Tasa de natalidad [1/año] :

Tiempo promedio de vida [año] :

Figura 4.17 Registro de datos de la especie considerada invasora

Lugars | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 29 bytes | Tamaño total 29 bytes

Código : 1

Lugar :

Figura 4.18 Registro del lugar donde se asienta la especie invasora

Poblac | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 20 bytes | Tamaño total 20 bytes

Código : 1

Especie :

Lugar :

Fecha (dd/mm/aaaa) :

Cantidad [i] :

Figura 4.19 Registro de cantidad de individuos de la población invasora

En modelos más complejos que este, que ha sido planteado en un nivel muy sencillo por razones didácticas, el modelador de sistemas cumplirá la función importante de integrar el conocimiento de un conjunto de expertos en una única representación, validar su consistencia, y derivar el diagrama de clases y el diagrama relacional. Esto no es incompatible con acordar luego los requisitos con los clientes, pero teniendo un primer diseño como insumo y no como producto, obtenido a partir de un proceso de aprendizaje y no del análisis de un problema.

Referencias

Agencia AUPEC Información a ciencia cierta. (2012). El temible bramido de la rana toro. Ciencia al día. Retrieved October 09, 2013, from

<http://aupec.univalle.edu.co/informes/diciembre97/boletin56/ranatoro.html>

Agencia EFE. (2009). Las autoridades matarán desde helicópteros a 6.000 camellos salvajes en Australia. 20minutos.es.

Centre for Ecology and Hidrology. (2012). Nearly 2000 Non-Native Species Established in Great Britain. Science Daily. Retrieved August 01, 2012, from <http://www.sciencedaily.com/releases/2012/07/120711074132.htm>

Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad CONABIO. (2012). Invasiones biológicas. Sistema de información sobre especies invasoras en México. Retrieved from <http://www.conabio.gob.mx/invasoras>

Parker, R. (2014). Bullfrog. [Photograph]. Encyclopædia Britannica. Retrieved May 27, 2014, from <http://www.britannica.com/bases.renata.edu.co/EBchecked/media/4662>

World Conservation Union IUCN. (2001). Global Strategy on Invasive Alien Species. (J. A. McNeely, H. A. Mooney, L. E. Neville, P. J. Schei, & J. K. Waage, Eds.) (1st ed., p. 50). Cambridge, UK: World Conservation Union IUCN.

5 Productos financieros – Caso de estudio

Los modelos de menor complejidad, si bien quedan lejos de representar completamente alguna problemática real, son apropiados para introducir a los estudiantes en el proceso de modelamiento. Este caso fue el primero que se presentó para ser solucionado por los estudiantes durante la fase experimental del proyecto, y su propósito era proponer un escenario de baja complejidad para que se apropiaran con menos dificultad a la metodología.

5.1 Formulación del caso

5.1.1 Planteamiento

La cuenta de ahorros es el producto financiero básico que ofrecen los bancos. Le permite al titular de la cuenta guardar su dinero, recibir en la misma cuenta los intereses, y retirar dinero en cualquier momento que lo requiera (Multibanca Colpatria, 2010).

Los intereses son porcentajes de rendimiento por periodos pactados con el banco, llamadas también tasas de captación, pues son las condiciones que ofrecen las instituciones financieras a los ahorradores por la captación de sus recursos (Banco de la República, 2005).



Figura 5.1 Contando dinero (Periodismoinvestigativo.com.co, 2014)

Actualmente la mayoría de los bancos ofrecen cuentas de ahorros con intereses diarios o mensuales, los cuales se liquidan sobre el saldo mínimo del periodo correspondiente. Dado que los intereses se incorporan al saldo de la cuenta, un dinero dejado en una cuenta de ahorros gana más intereses cada periodo.

El titular de una cuenta de ahorros también incurre en un costo dependiendo de la entidad con la que se vincula. El costo más común es la cuota de manejo, que es la cantidad periódica que el banco le cobra al ahorrador por la plataforma tecnológica y de servicios que le ofrece, que incluye tarjeta débito, cajeros electrónicos, entre otros.

Otros productos financieros, como los Certificados de Depósito a Término CDT, reconocen intereses mayores, pero implican que el ahorrador o titular se compromete a dejar el dinero depositado por un término pactado con el banco, tiempo durante el cual el ahorrador no puede hacer uso de dicho dinero (Finanacialred Colombia, 2010).

En el momento de escoger un banco para abrir una cuenta de ahorros, hay que tener en cuenta al menos los siguientes criterios: tasa de interés, cuota de manejo, red de servicios. En un estudio comparativo de bancos en Colombia, la entidad que mejores intereses le ofrecía al ahorrador tiene una tasa de captación de 5,42% efectivo anual, equivalente a 0.4408% mensual, pero no cuenta con red de cajeros; otras entidades con mejores servicios electrónicos, ofrecen tasa de captación de 3,60% efectivo anual, equivalente al 0,2952% mensual, con cuota de manejo de \$8.950 mensuales (Revista Dinero, 2012).

5.1.2 Preguntas

¿Cómo modelaría con Dinámica de Sistemas la estructura y comportamiento de una cuenta de ahorros?

¿Si una persona quiere depositar \$3'500.000, qué cantidad tendrá al cabo de 24 meses en cada una de las opciones presentadas en el último párrafo del planteamiento?

5.2 Solución de referencia

5.2.1 Modelamiento cualitativo de la estructura básica del sistema

En esta fase se identifican los elementos estructurales de un sistema: sustantivos y verbos. Los sustantivos son aquellos elementos (generalmente tangibles) de los cuales se puede observar una cantidad, en una determinada unidad de medida. Un sustantivo presente en este sistema es la cantidad de dinero que el ahorrador tiene en la cuenta, susceptible de aumentar o disminuir. En adelante este sustantivo se llamará **saldo** y su unidad de medida será **[\$]**.

Los verbos son las acciones o eventos que cambian el valor de los sustantivos, y su unidad de medida es la misma de estos, pero en relación con la unidad de tiempo. Al saldo que un usuario tiene en la cuenta lo incrementa un verbo que se puede denominar **abono de intereses**, que consiste en un dinero que periódicamente se agrega al saldo de la cuenta. Por otra parte del saldo se ve disminuido por otro verbo que se puede llamar **deducciones**, consistente en el costo en que incurre el usuario cada periodo por los servicios del banco. Ambos verbos tienen como unidad de medida **[\$/t]**.

La influencia de abono de intereses sobre saldo es un incremento, mientras que la de deducciones es un decremento.

Con respecto a las influencias del sustantivo sobre sus propios verbos, los intereses abonados son mayores para saldos grandes que para saldos pequeños, es decir son directamente proporcionales, por lo que la influencia de saldo sobre abono de intereses es directa.



Figura 5.2 Diagrama de influencias de la estructura básica del sistema

En cuanto a las deducciones con frecuencia su valor periódico es fijo, y por tanto parecería no haber influencia del saldo. Pero, salvo que el sustantivo pueda tener un valor negativo, usualmente se tiene al menos una influencia directa que representa que el verbo está limitado por el valor del sustantivo; en este caso, las deducciones solo se pueden hacer si existe un saldo suficiente. Haría falta una documentación más rigurosa, pero por la simplicidad del caso se va a suponer que el saldo no puede ser negativo, independiente de que las entidades puedan aplicar deducciones retroactivas cuando haya saldo suficiente. La Figura 4.2 muestra el diagrama de influencias.

5.2.2 Modelamiento cuantitativo

Según la segunda pregunta de la formulación, la situación a representar es que se deja un dinero por tiempo indefinido, luego por ahora no se consideran otros verbos como consignaciones y retiros. La lista provisional de elementos se presenta en la Tabla 4.1.

Tabla 5.1 Elementos de la estructura básica del sistema

| Nombre | Abreviatura | Tipo | Unidad |
|--------------------|-------------|------------|----------------|
| Saldo | SAL | Sustantivo | Monetaria [\$] |
| Abono de intereses | ABO | Verbo | [\$/t] |
| Deducciones | DED | Verbo | [\$/t] |

En la forma de Euler de la ecuación diferencial el saldo al inicio de cada periodo será igual al que había al inicio del periodo anterior, incrementado en el abono de intereses y disminuido en la cantidad de deducciones aplicadas durante el periodo anterior.

Tabla 5.2 Ecuaciones diferenciales del sistema

| Elemento | Ecuación diferencial | Ecuación diferencial en forma de Euler |
|----------|----------------------|--|
|----------|----------------------|--|

| | | |
|-------|-------------------------------|--|
| Saldo | $\frac{dSAL}{dt} = ABO - DED$ | $SAL(t + \Delta t) = SAL(t) + ABO(t) * \Delta t - DED(t) * \Delta t$ |
|-------|-------------------------------|--|

A cada verbo del sistema le corresponde una ecuación auxiliar, construida con los elementos de donde llegan relaciones al verbo. Para el abono de intereses, el diagrama influencias indica que debe plantearse en función del saldo.

$$ABO(t) = f(SAL(t))$$

Se requiere obtener las unidades de abono de intereses a partir de las unidades del saldo.

$$[\$/t] = f([\$])$$

La unidad complementaria. Para que $[\$]$ sea igual a $[\$/t]$, debe tener t en el denominador.

$$[\$/t] = [\$] * [1/t]$$

$$[\$/t] = [\$/t]$$

En el planteamiento del caso se menciona un elemento cuya unidad es $[1/t]$: la **tasa de interés** que la entidad financiera reconoce a cada producto, que se abreviará como **TI**.

$$ABO(t) = SAL(t) * TI(t)$$

A partir del diagrama de influencias, las deducciones también deben formularse en función del saldo.

$$DED(t) = f(SAL(t))$$

$$[\$/t] = f([\$])$$

Pero si se sigue el criterio utilizado anteriormente, de buscar una unidad de medida complementaria, surgirá una nueva tasa que implicaría que las deducciones son proporcionales al saldo, lo cual ya fue descartado antes.

El planteamiento del caso menciona una cantidad fija que las entidades le cobran al usuario por sus servicios, con cargo al saldo. De manera que la ecuación de deducciones debe incluir el nuevo elemento denominado **cuota de manejo**, que se mide en $[\$/t]$, y en adelante se abreviará como **CM**.

$$DED(t) = f(SAL(t), CM(t))$$

$$[\$/t] = f([\$], [\$/t])$$

La situación se complica porque ahora la ecuación de deducciones se debe construir con dos elementos, con unidad de medida diferente. En estos casos, una alternativa es establecer prioridades de incorporación de los elementos en la ecuación. Como se dijo anteriormente, el abono de intereses se definen a partir de la cuota de manejo; el saldo solo representa un límite a la deducción que se puede aplicar.

Si el saldo es superior a la cuota de manejo, esta será descontada en su totalidad; de lo contrario, solo se descontará la cantidad que el saldo alcance a cubrir. La expresión se puede formular a partir de expresiones condicionales como la siguiente.

$$\begin{aligned} & \text{Si } (SAL(t) \geq CM(t)) \\ & \text{entonces } DED(t) = CM(t) \\ & \text{de lo contrario } DED(t) = SAL(t) \end{aligned}$$

La expresión es consistente por cuanto las unidades de deducciones y de cuota de manejo son idénticas; y cuando no se cumple la condición, la cantidad de deducción que se aplicará en [\$/t], está limitada por una unidad [\$], y las dos son comparables.

Hay al menos otra manera de formular la expresión para las deducciones. Se puede decir que la deducción será igual al elemento que sea menor entre el saldo y la cuota de manejo.

$$DED(t) = \text{Mínimo}(CM(t); SAL(t))$$

Esta expresión genera el mismo resultado, a partir de una función de comparación. Y en términos de programación, es más útil por ser más breve.

Tabla 5.3 Ecuaciones auxiliares del sistema

| Elemento | Ecuación |
|--------------------|---|
| Abono de intereses | $ABO(t) = SAL(t) * TI(t)$ |
| Deducciones | $DED(t) = \text{Mínimo}(CM(t); SAL(t))$ |

5.2.3 Modelamiento enriquecido del sistema

Agregando los parámetros hallados durante la construcción de las ecuaciones auxiliares, la lista completa de elementos del sistema queda como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 5.4 Elementos del sistema

| Nombre | Abreviatura | Tipo | Unidad |
|--------------------|-------------|------------|----------------|
| Saldo | SAL | Sustantivo | Monetaria [\$] |
| Abono de intereses | ABO | Verbo | [\$/t] |
| Deducciones | DED | Verbo | [\$/t] |
| Tasa de interés | TI | Parámetro | [1/t] |
| Cuota de manejo | CM | Parámetro | [\$/t] |

Las influencias entre todos los elementos del sistema, incluidas las que se originan en los parámetros hallados durante la construcción del modelo matemático, se resumen en la Tabla 5.5. El diagrama de influencias con los parámetros queda como lo muestra la Figura 4.3.

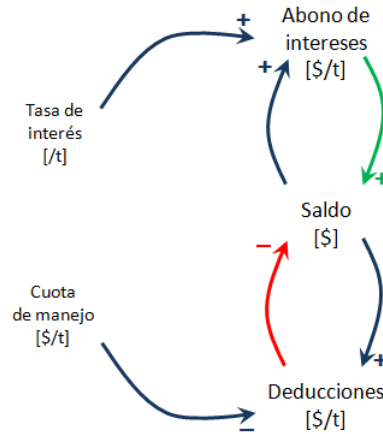


Figura 5.3 Diagrama de influencias del sistema

5.2.4 Simulación

En la primera opción de ahorro que se menciona en la formulación antes de la pregunta, la entidad que mejores intereses le ofrece al ahorrador tiene una tasa de captación de 0.4408% mensual, sin cuota de manejo porque no cuenta con red de cajeros

Tabla 5.5 Condiciones iniciales de simulación de la primera opción

| Elemento | Valor inicial |
|-----------------------|----------------------|
| Condiciones iniciales | |
| Saldo [\$] | $SAL(0) = 3'500.000$ |
| Parámetros | |
| Tasa de interés [1/t] | $TI(t) = 0,004408$ |
| Cuota de manejo [t] | $TPV(t) = 0$ |

Con estas condiciones la simulación genera los siguientes valores:

Tabla 5.6 Resultado de la simulación de la primera opción

| t | SAL | ABO | DED | t | SAL | ABO | DED |
|----|--------------|-----------|-----|----|--------------|-----------|-----|
| 0 | 3.500.000,00 | 15.428,00 | - | | | | |
| 1 | 3.515.428,00 | 15.496,01 | - | 13 | 3.705.955,20 | 16.335,85 | - |
| 2 | 3.530.924,01 | 15.564,31 | - | 14 | 3.722.291,05 | 16.407,86 | - |
| 3 | 3.546.488,32 | 15.632,92 | - | 15 | 3.738.698,91 | 16.480,18 | - |
| 4 | 3.562.121,24 | 15.701,83 | - | 16 | 3.755.179,10 | 16.552,83 | - |
| 5 | 3.577.823,07 | 15.771,04 | - | 17 | 3.771.731,93 | 16.625,79 | - |
| 6 | 3.593.594,11 | 15.840,56 | - | 18 | 3.788.357,72 | 16.699,08 | - |
| 7 | 3.609.434,68 | 15.910,39 | - | 19 | 3.805.056,80 | 16.772,69 | - |
| 8 | 3.625.345,07 | 15.980,52 | - | 20 | 3.821.829,49 | 16.846,62 | - |
| 9 | 3.641.325,59 | 16.050,96 | - | 21 | 3.838.676,12 | 16.920,88 | - |
| 10 | 3.657.376,55 | 16.121,72 | - | 22 | 3.855.597,00 | 16.995,47 | - |
| 11 | 3.673.498,27 | 16.192,78 | - | 23 | 3.872.592,47 | 17.070,39 | - |
| 12 | 3.689.691,05 | 16.264,16 | - | 24 | 3.889.662,86 | 17.145,63 | - |

La Tabla 4.6 muestra los resultados de simulación, según los cuales con la primera opción de ahorro, al cabo de 24 meses el saldo inicial de \$3'500.000 habrá crecido hasta \$3'889.662,86; el abono de intereses que al inicio era de \$15.428,00 mensuales, alcanzó al final los \$17.145,63.

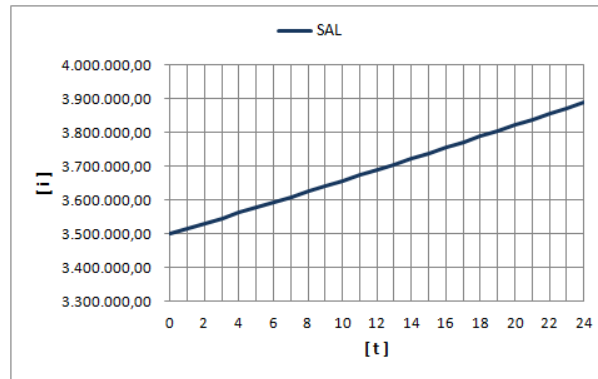


Figura 5.4 Diagrama de simulación de saldo en la primera opción

Los abonos de intereses fueron crecientes, y durante todo el tiempo las deducciones fueron nulas.

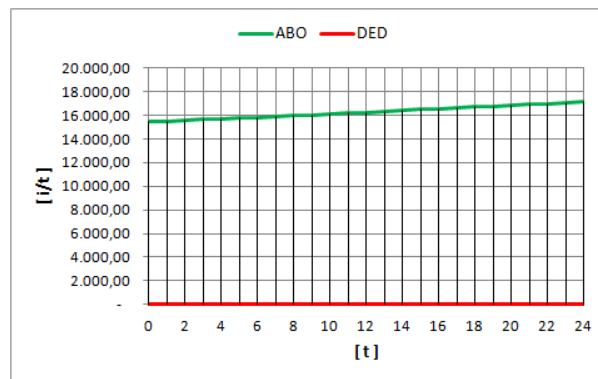


Figura 5.5 Diagrama de simulación de abono de intereses y deducciones en la primera opción

La segunda opción que se menciona en la formulación antes de la pregunta, consistía en dejar el dinero en una entidad con mejores servicios electrónicos por los cuales cobra cuota de manejo de \$8.950 mensuales, y que reconoce una tasa de captación de 0,2952% mensual.

Tabla 5.7 Condiciones iniciales de simulación de la segunda opción

| Elemento | Valor inicial |
|-----------------------|----------------------|
| Condiciones iniciales | |
| Saldo [\$] | $SAL(0) = 3'500.000$ |
| Parámetros | |
| Tasa de interés [1/t] | $TI(t) = 0,002952$ |
| Cuota de manejo [t] | $TPV(t) = 8.950$ |

La Tabla 5.8 muestra los resultados de simulación, según los cuales con la segunda opción de ahorro, al cabo de 24 meses el saldo inicial de \$3'500.000 habrá crecido hasta \$3'534.318,74; el

abono de intereses que al inicio era de \$10.332,00 mensuales, alcanzó al final los \$10.433,31; durante todo el tiempo las deducciones fueron de \$8.950,00 mensuales.

Tabla 5.8 Resultado de la simulación de la segunda opción

| t | SAL | ABO | DED | t | SAL | ABO | DED |
|----|--------------|-----------|----------|----|--------------|-----------|----------|
| 0 | 3.500.000,00 | 10.332,00 | 8.950,00 | 13 | 3.518.287,68 | 10.385,99 | 8.950,00 |
| 1 | 3.501.382,00 | 10.336,08 | 8.950,00 | 14 | 3.519.723,67 | 10.390,22 | 8.950,00 |
| 2 | 3.502.768,08 | 10.340,17 | 8.950,00 | 15 | 3.521.163,89 | 10.394,48 | 8.950,00 |
| 3 | 3.504.158,25 | 10.344,28 | 8.950,00 | 16 | 3.522.608,37 | 10.398,74 | 8.950,00 |
| 4 | 3.505.552,53 | 10.348,39 | 8.950,00 | 17 | 3.524.057,11 | 10.403,02 | 8.950,00 |
| 5 | 3.506.950,92 | 10.352,52 | 8.950,00 | 18 | 3.525.510,13 | 10.407,31 | 8.950,00 |
| 6 | 3.508.353,44 | 10.356,66 | 8.950,00 | 19 | 3.526.967,43 | 10.411,61 | 8.950,00 |
| 7 | 3.509.760,10 | 10.360,81 | 8.950,00 | 20 | 3.528.429,04 | 10.415,92 | 8.950,00 |
| 8 | 3.511.170,91 | 10.364,98 | 8.950,00 | 21 | 3.529.894,96 | 10.420,25 | 8.950,00 |
| 9 | 3.512.585,88 | 10.369,15 | 8.950,00 | 22 | 3.531.365,21 | 10.424,59 | 8.950,00 |
| 10 | 3.514.005,04 | 10.373,34 | 8.950,00 | 23 | 3.532.839,80 | 10.428,94 | 8.950,00 |
| 11 | 3.515.428,38 | 10.377,54 | 8.950,00 | 24 | 3.534.318,74 | 10.433,31 | 8.950,00 |
| 12 | 3.516.855,93 | 10.381,76 | 8.950,00 | | | | |

La Figura 5.6 muestra el comportamiento simulado del saldo en la segunda opción de inversión. La Figura 5.7 muestra la evolución del abono de intereses y las deducciones.

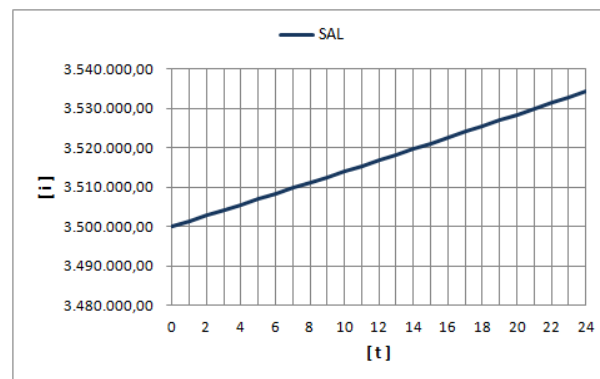


Figura 5.6 Diagrama de simulación de saldo en la segunda opción

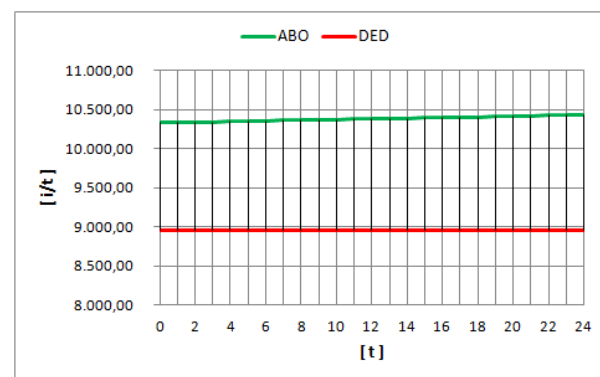


Figura 5.7 Diagrama de simulación de abono de intereses y deducciones en la segunda opción

De acuerdo a los datos de las dos simulaciones, la mejor opción si se quiere depositar una cantidad de dinero y dejarlo en la cuenta durante 24 meses es la opción 1. A partir de un saldo inicial de \$3'500.000,00 la diferencia final será de \$355.344,12 a favor de la primera opción.

5.3 Transformación del modelo de Dinámica de Sistemas

La base para la propuesta de desarrollo de software es el modelo enriquecido del sistema que se muestra en la Figura 4.3, que se transforma en diagrama de diseño mediante un conjunto de reglas básicas.

El proceso de transformación comienza con la identificación de subsistemas en la estructura básica; cada subsistema está conformado por sustantivos con la misma unidad de medida y sus correspondientes verbos. Dada la simplicidad de este modelo, que solo contiene un subsistema según la Figura 5.8, no se hará diagrama de dominio sino que se procederá directamente al diagrama de clases.

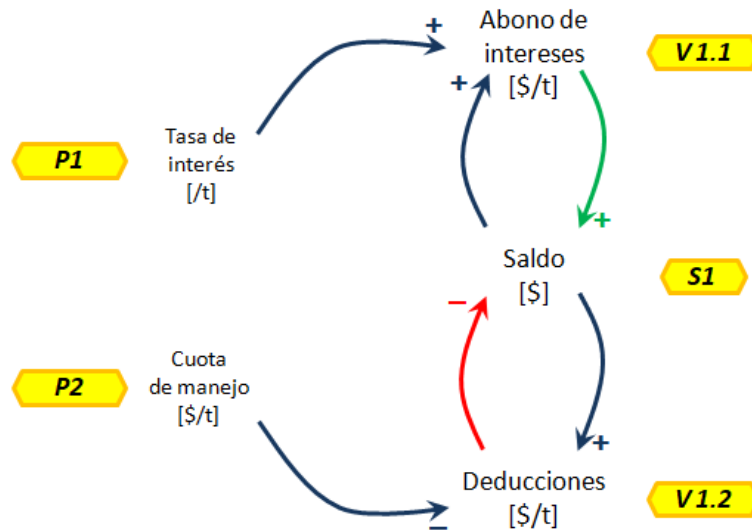


Figura 5.8 Subsistemas, sustantivos y verbos de la estructura básica del sistema

5.3.1 Diagrama de clases

Los sustantivos y verbos del único subsistema se incorporarán como los primeros atributos y los métodos en el diagrama de clases. En el diagrama de la Figura 5.8 han sido señalados todos los sustantivos, verbos y parámetros con rótulos para permitir su posterior ubicación en el diagrama de clases. Los atributos **codigo** y **nombre** no provienen del modelamiento matemático, sino de la necesidad de identificar y denominar instancias de cada clase.

A la única clase se le da el nombre de **Saldo** coincidiendo con el único sustantivo del diagrama de influencias, que también se constituye en un atributo numérico de acumulación denominado de forma genérica **cantidad**. Los verbos que influyen a cada sustantivo se incorporan a la respectiva clase como métodos. Los restantes atributos se incorporan

coincidiendo con los parámetros. El resultado de esta transformación es el diagrama de clases mostrado en la Figura 5.9.

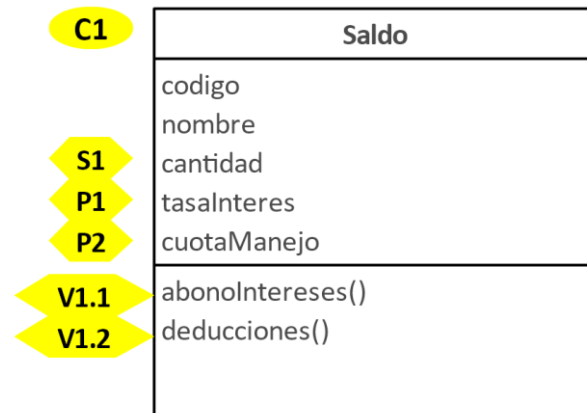


Figura 5.9 Diagrama de clases del sistema

5.3.2 Diagrama Entidad Relación

El último diagrama que se propone obtener mediante esta metodología como transformación del modelo con Dinámica de Sistemas es el diagrama entidad relación. La Figura 5.10 muestra el que se obtuvo para el presente caso, incluyendo los mismos rótulos con que se puede ubicar el elemento del diagrama de influencias de donde proviene cada entidad, relación o atributo.

El único subsistema da lugar a una entidad, a la cual se dan inicialmente los atributos **codigo** y **nombre**, que no provienen del modelo sino que se requieren para la identificación de instancias de cada entidad, como en su momento se propuso con cada clase. Con base en el sustantivo correspondiente se incluye también un atributo **cantidad**. Los verbos se incorporan como relaciones y como un atributo cantidad en sí mismas.

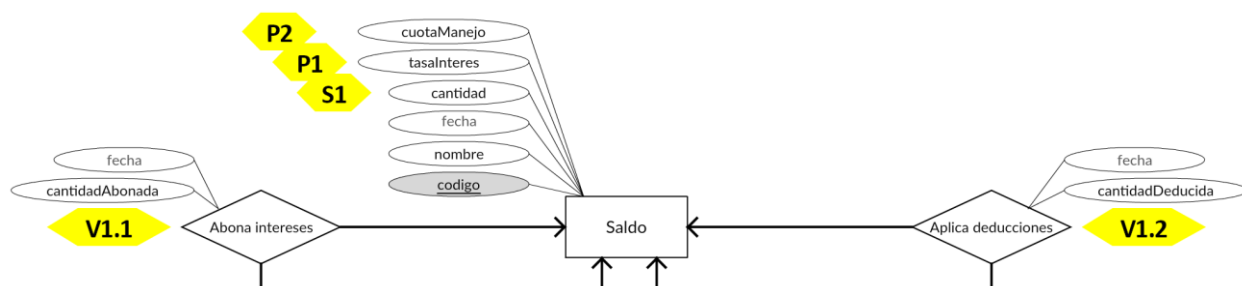


Figura 5.10 Diagrama entidad relación de la base de datos del sistema

5.4 Implementación de prueba

El diagrama entidad relación se transforma en el diagrama relacional de la Figura 4.10. El diccionario de datos simplificado en la Tabla 4.7, describe la base de datos propuesta.

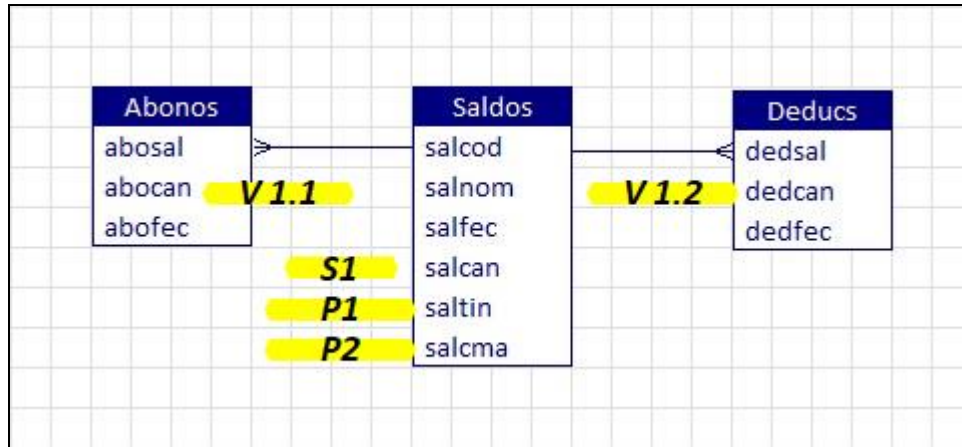


Figura 5.11 Diagrama relacional de la base de datos del sistema

Tabla 5.9 Diccionario de datos de la base de datos del sistema

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|---------------|---|---------------|--|----------|---------------|----------------------|
| Saldos | Relación de saldos de productos financieros | salcod | Código del saldo de producto financiero | Primaria | | Autoincremental |
| | | salnom | Nombre del producto financiero al que corresponde el saldo | | | Cadena de caracteres |
| | | salfec | Fecha en que se registra el saldo | | | Fecha |
| | | salcan | Cantidad en el saldo del producto financiero [\$] | | | Número real |
| | | saltin | Tasa de interés que se aplica al saldo [1/mes] | | | Número real |
| | | salcma | Cuota de manejo que se aplica al saldo [\$/mes] | | | Número real |
| Abonos | Relación de abonos de intereses | abosal | Referencia al producto a cuyo saldo se registra abono de intereses | Foránea | Saldos.salcod | Número entero |
| | | abocan | Cantidad abonada como interés | | | Número real |
| | | abofec | Fecha de abono de intereses | | | Fecha |
| Deducs | Relación de deducciones | dedsal | Referencia al producto a cuyo saldo se registra deducción | Foránea | Saldos.salcod | Número entero |
| | | dedcan | Cantidad deducida como cuota de manejo | | | Número real |
| | | dedfec | Fecha de registro de deducción | | | Fecha |

La interfaz generada de forma automática por la herramienta MBD 3.0 permite la captura de datos de las poblaciones invasoras como se muestra en las Figura 4.11 a Figura 5.14.

| Saldos | |
|--|-----------------------|
| Código : | 1 |
| Producto : | Producto financiero B |
| Fecha (dd/mm/aaaa) : | 01/01/2018 |
| Cantidad [\$] : | 3500000 |
| Tasa de interés [1/mes] : | 0,002952 |
| Cuota de manejo [\$ /mes] : | 8950 |
| <input type="button" value="Agregar"/> <input type="button" value="Editar"/> <input type="button" value="Grabar"/> <input type="button" value="Cancelar"/> <input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/> <input type="button" value="Salir"/> <input type="button" value="Tabla"/> | |

Figura 5.12 Registro de saldo del producto financiero

| Abonos Registro 1 / 1 Tamaño de registro 16 bytes Tamaño total 16 bytes | |
|--|-----------------------|
| Saldo : | Producto financiero B |
| Cantidad : | 10332 |
| Fecha (dd/mm/aaaa) : | 30/06/2018 |
| <input type="button" value="Agregar"/> <input type="button" value="Editar"/> <input type="button" value="Grabar"/> <input type="button" value="Cancelar"/> <input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/> <input type="button" value="Salir"/> <input type="button" value="Tabla"/> | |

Figura 5.13 Registro de abono de intereses al producto financiero

| Deducs Registro 1 / 1 Tamaño de registro 16 bytes Tamaño total 16 bytes | |
|--|-----------------------|
| Saldo : | Producto financiero B |
| Cantidad : | 8950 |
| Fecha (dd/mm/aaaa) : | 30/06/2018 |
| <input type="button" value="Agregar"/> <input type="button" value="Editar"/> <input type="button" value="Grabar"/> <input type="button" value="Cancelar"/> <input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/> <input type="button" value="Salir"/> <input type="button" value="Tabla"/> | |

Figura 5.14 Registro de deducciones en el producto financiero

5.5 Ampliación de la solución de referencia

5.5.1 Modelamiento cualitativo de la estructura básica del sistema

Dado que el modelo en Dinámica de Sistemas es esencialmente el mismo del capítulo anterior, se consideró útil presentar una ampliación de la solución de referencia, incluyendo la interacción con otro subsistema: los ahorradores.

Para este efecto ya no se modela el saldo de una sola cuenta con un saldo inicial, sino el conjunto de cuentas de un grupo de ahorradores, cuyos saldos se incrementan por los depósitos que realizan dichos ahorradores. La cantidad de ahorradores a su vez se incrementa con el

registro de nuevos, lo que a su vez ocurre en proporción directa al número de ahorradores, suponiendo que estos ejercen influencia sobre otras personas para que se registren. La Figura 5.15 muestra el nuevo diagrama de influencias.

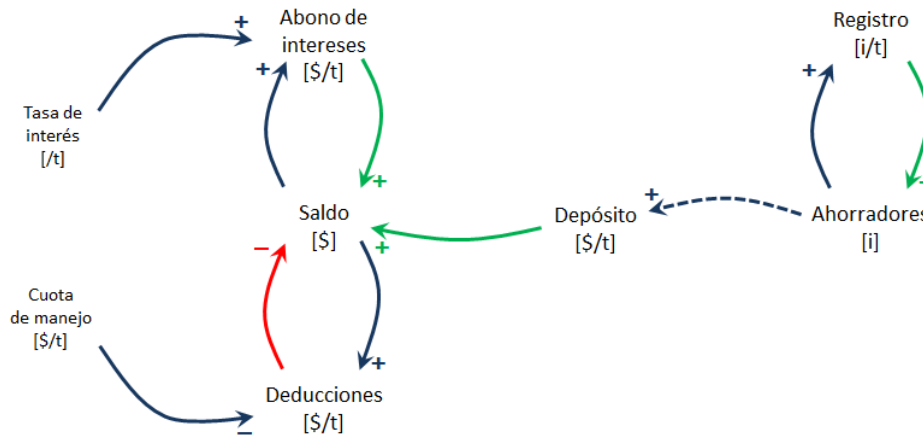


Figura 5.15 Diagrama de influencias de la estructura básica del sistema

5.5.2 Modelamiento cuantitativo

Los elementos del nuevo diagrama de influencias de la estructura básica del sistema se clasifican como muestra la Tabla 5.10

Tabla 5.10 Elementos de la estructura básica del sistema

| Nombre | Abreviatura | Tipo | Unidad |
|--------------------|-------------|------------|-----------------|
| Saldo | SAL | Sustantivo | Monetaria [/\$] |
| Abono de intereses | ABO | Verbo | [\$/t] |
| Deducciones | DED | Verbo | [\$/t] |
| Depósito | DEP | Verbo | [\$/t] |
| Ahorradores | AHO | Sustantivo | Individuo [i] |
| Registro | REG | Verbo | [i/t] |

La ecuación diferencial para el **Saldo** al inicio de cada periodo ahora incluye el incremento por los depósitos efectuados durante el periodo anterior. Los ahorradores se incrementan por los registros de nuevos ahorradores sucedidos en cada periodo. Las dos ecuaciones diferenciales se presentan en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11 Ecuaciones diferenciales del sistema

| Elemento | Ecuación diferencial | Ecuación diferencial en forma de Euler |
|-------------|-------------------------------------|--|
| Saldo | $\frac{dSAL}{dt} = DEP + ABO - DED$ | $SAL(t + \Delta t) = SAL(t) + DEP(t) * \Delta t + ABO(t) * \Delta t - DED(t) * \Delta t$ |
| Ahorradores | $\frac{dAHO}{dt} = REG$ | $AHO(t + \Delta t) = AHO(t) + REG(t) * \Delta t$ |

Para los depósitos el diagrama influencias indica que la fórmula debe plantearse en función de la cantidad de ahorradores.

$$DEP(t) = f(AHO(t))$$

Se requiere obtener las unidades de depósito a partir de las unidades del sustantivo **Ahorradores**.

$$[\$/t] = f([i])$$

La unidad complementaria para que $[\$/t]$ sea igual a $[i]$, debe tener i en el numerador y t en el denominador.

$$\begin{aligned} [\$/t] &= [i] * [\$(i * t)] \\ [\$/t] &= [\$/t] \end{aligned}$$

Esta unidad complementaria sugiere una cantidad de dinero periódico por individuo, para lo cual podría utilizarse una especie de tasa de depósito. Sin embargo resulta más familiar hablar del **ingreso fijo**, que se abreviará como **IF**, variable además bastante frecuente en análisis socioeconómico. Considerando además que no todo el ingreso fijo de una persona se destina al ahorro, se incluirá en el modelo otro parámetro adimensional denominado **tasa de ahorro**, cuya abreviatura será **TA**. La expresión quedaría así:

$$\begin{aligned} DEP(t) &= AHO(t) * IF(t) * TA(t) \\ [\$/t] &= [i] * [\$(i * t)] * [] \\ [\$/t] &= [\$/t] \end{aligned}$$

A falta de mejores elementos para construir la expresión para el registro de ahorradores, se optará por un parámetro simple de tasa de crecimiento, abreviada como **TCA**:

$$\begin{aligned} REG(t) &= AHO(t) * TCA(t) \\ [i/t] &= [i] * [1/t] \\ [i/t] &= [i/t] \end{aligned}$$

Tabla 5.12 Ecuaciones auxiliares del sistema

| Elemento | Ecuación |
|--------------------|---|
| Abono de intereses | $ABO(t) = SAL(t) * TI(t)$ |
| Deducciones | $DED(t) = \text{Mínimo}(CM(t); SAL(t))$ |
| Depósito | $DEP(t) = AHO(t) * IF(t) * TA(t)$ |
| Registro | $REG(t) = AHO(t) * TCA(t)$ |

5.5.3 Modelamiento enriquecido del sistema

Agregando los parámetros hallados durante la construcción de las ecuaciones auxiliares, la lista completa de elementos del sistema queda como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 5.13 Elementos del sistema

| Nombre | Abreviatura | Tipo | Unidad |
|---------------------------------|-------------|------------|-----------------|
| Saldo | SAL | Sustantivo | Monetaria [\\$] |
| Abono de intereses | ABO | Verbo | [\$/t] |
| Deducciones | DED | Verbo | [\$/t] |
| Depósitos | DEP | Verbo | [\$/t] |
| Tasa de interés | TI | Parámetro | [1/t] |
| Cuota de manejo | CM | Parámetro | [\$/t] |
| Ahorradores | AHO | Sustantivo | [i] |
| Registro | REG | Verbo | [i/t] |
| Ingreso fijo | IF | Parámetro | [\$/i*t] |
| Tasa de ahorro | TA | Parámetro | [] |
| Tasa de crecimiento ahorradores | TCA | Parámetro | [1/t] |

El diagrama de influencias con la incorporación de los parámetros al modelo enriquecido del sistema queda como lo muestra la Figura 5.16.

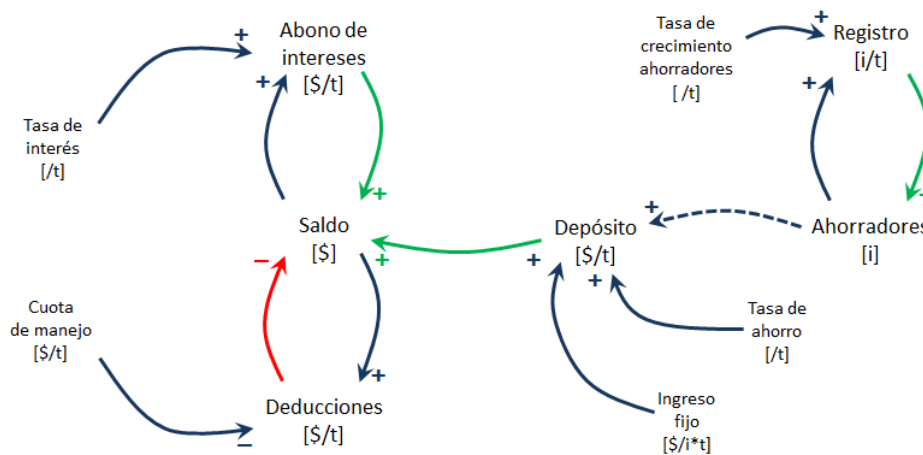


Figura 5.16 Diagrama de influencias del modelo enriquecido del sistema

5.5.4 Simulación

A diferencia del planteamiento original del caso, para la simulación de este modelo ampliado no se considera un saldo inicial dejado en crecimiento vegetativo. El saldo se inicializa entonces en cero, en tanto que el número de ahorradores empieza en 20.

Como se indica en la Tabla 5.14, se tomará la tasa de interés y la cuota de manejo iguales a la segunda simulación del modelo anterior. Los ahorradores tendrán un ingreso fijo equivalente a dos veces el salario mínimo mensual vigente para 2018 en Colombia, con una tasa de ahorro del 5% mensual, y un crecimiento de los ahorradores de un 2% mensual. Con estas condiciones la simulación genera los valores presentados en la

Tabla 5.15:

Tabla 5.14 Condiciones iniciales de simulación de la primera opción

| Elemento | Valor inicial |
|--|--------------------|
| Condiciones iniciales | |
| Saldo [\$] | $SAL(0) = 0$ |
| Ahorradores [\$] | $AHO(0) = 20$ |
| Parámetros | |
| Tasa de interés [1/t] | $TI(t) = 0,002952$ |
| Cuota de manejo [t] | $TPV(t) = 8.950$ |
| Ingreso fijo [\$/i*t] | $IF(t) = 781,242$ |
| Tasa da ahorro [1/t] | $TA(t) = 0,05$ |
| Tasa de crecimiento de ahorradores [1/t] | $TCA(t) = 0,02$ |

Tabla 5.15 Resultado de la simulación

| t | SAL | ABO | DED | DEP | AHO | REG |
|----|---------------|-----------|----------|--------------|------------|------------|
| 0 | - | - | - | 781.242,00 | 20 | 0,4 |
| 1 | 781.242,00 | 2.306,23 | 8.950,00 | 796.866,84 | 20,4 | 0,408 |
| 2 | 1.571.465,07 | 4.638,96 | 8.950,00 | 812.804,18 | 20,808 | 0,41616 |
| 3 | 2.379.958,21 | 7.025,64 | 8.950,00 | 829.060,26 | 21,22416 | 0,4244832 |
| 4 | 3.207.094,11 | 9.467,34 | 8.950,00 | 845.641,47 | 21,6486432 | 0,43297286 |
| 5 | 4.053.252,91 | 11.965,20 | 8.950,00 | 862.554,29 | 22,0816161 | 0,44163232 |
| 6 | 4.918.822,41 | 14.520,36 | 8.950,00 | 879.805,38 | 22,5232484 | 0,45046497 |
| 7 | 5.804.198,15 | 17.133,99 | 8.950,00 | 897.401,49 | 22,9737134 | 0,45947427 |
| 8 | 6.709.783,64 | 19.807,28 | 8.950,00 | 915.349,52 | 23,4331876 | 0,46866375 |
| 9 | 7.635.990,44 | 22.541,44 | 8.950,00 | 933.656,51 | 23,9018514 | 0,47803703 |
| 10 | 8.583.238,39 | 25.337,72 | 8.950,00 | 952.329,64 | 24,3798884 | 0,48759777 |
| 11 | 9.551.955,75 | 28.197,37 | 8.950,00 | 971.376,23 | 24,8674862 | 0,49734972 |
| 12 | 10.542.579,35 | 31.121,69 | 8.950,00 | 990.803,76 | 25,3648359 | 0,50729672 |
| 13 | 11.555.554,80 | 34.112,00 | 8.950,00 | 1.010.619,83 | 25,8721326 | 0,51744265 |
| 14 | 12.591.336,63 | 37.169,63 | 8.950,00 | 1.030.832,23 | 26,3895753 | 0,52779151 |
| 15 | 13.650.388,48 | 40.295,95 | 8.950,00 | 1.051.448,87 | 26,9173668 | 0,53834734 |
| 16 | 14.733.183,30 | 43.492,36 | 8.950,00 | 1.072.477,85 | 27,4557141 | 0,54911428 |
| 17 | 15.840.203,51 | 46.760,28 | 8.950,00 | 1.093.927,41 | 28,0048284 | 0,56009657 |
| 18 | 16.971.941,20 | 50.101,17 | 8.950,00 | 1.115.805,95 | 28,564925 | 0,5712985 |
| 19 | 18.128.898,32 | 53.516,51 | 8.950,00 | 1.138.122,07 | 29,1362235 | 0,58272447 |
| 20 | 19.311.586,90 | 57.007,80 | 8.950,00 | 1.160.884,52 | 29,7189479 | 0,59437896 |
| 21 | 20.520.529,22 | 60.576,60 | 8.950,00 | 1.184.102,21 | 30,3133269 | 0,60626654 |
| 22 | 21.756.258,03 | 64.224,47 | 8.950,00 | 1.207.784,25 | 30,9195934 | 0,61839187 |
| 23 | 23.019.316,76 | 67.953,02 | 8.950,00 | 1.231.939,93 | 31,5379853 | 0,63075971 |
| 24 | 24.310.259,71 | 71.763,89 | 8.950,00 | 1.256.578,73 | 32,168745 | 0,6433749 |

Según los datos de la Tabla 5.15, presentados en la Figura 5.17 muestra los resultados de simulación para el subsistema de saldo. Al cabo de 24 meses el saldo inicial de \$0 habrá crecido hasta \$24.310.259,71; los depósitos que al inicio eran de \$781.242,00 mensuales, alcanzó al final \$1.256.578,73.

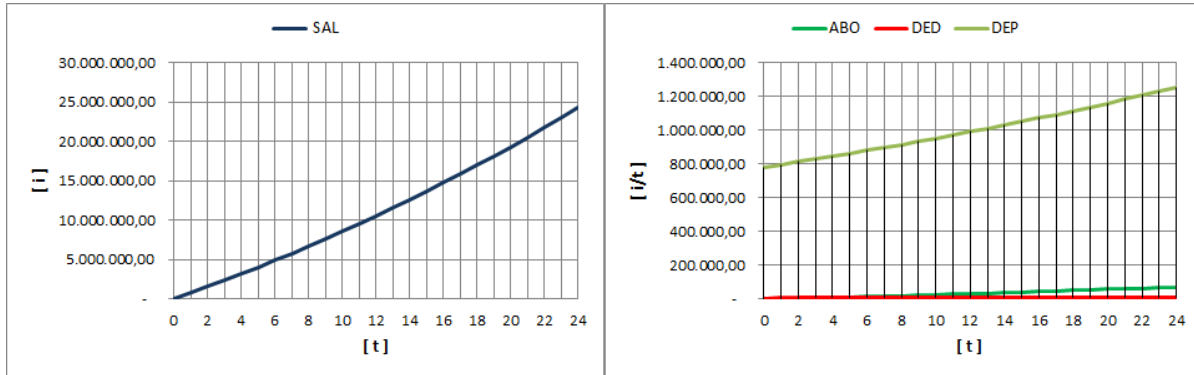


Figura 5.17 Diagrama de simulación de saldo

Los abonos de intereses fueron crecientes, y durante todo el tiempo las deducciones fueron nulas.

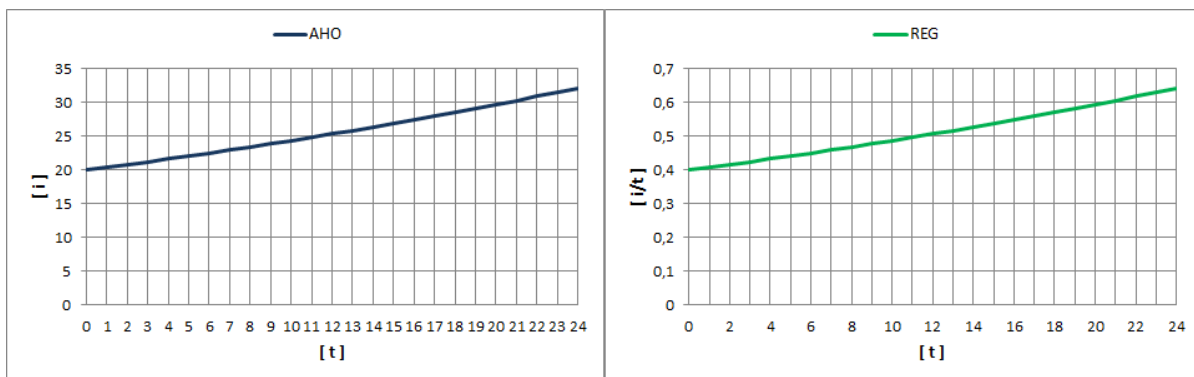


Figura 5.18 Diagrama de simulación de ahorradores

5.6 Transformación del modelo de Dinámica de Sistemas

La base para la propuesta de desarrollo de software es el modelo enriquecido del sistema que se muestra en la Figura 5.16, que se transforma en diagrama de diseño mediante un conjunto de reglas básicas.

Cada subsistema conformado por sustantivos con la misma unidad de medida y sus correspondientes verbos, conforman una clase. Desde el modelo anterior, del sustantivo **Saldo** se obtuvo una clase del mismo nombre y un primer atributo cantidad. Los parámetros **Tasa de interés** y **Cuota de manejo** se incorporaron a dicha clase como atributos. Los verbos **Abono de intereses** y **Deducciones** ya habían sido agregados como métodos. Ahora, el nuevo verbo **Depósito** debe incluirse como método de la clase **Saldo**.

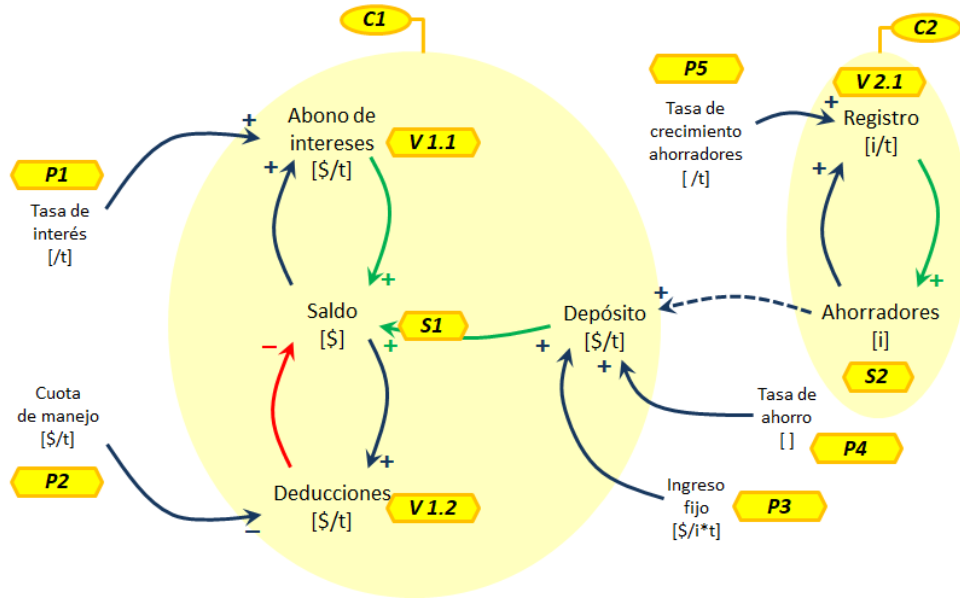


Figura 5.19 Subsistemas de la estructura básica del sistema para determinar clases

Con el sustantivo **Ahorradores** se constituye otra clase, también con un atributo inicial de **cantidad** proveniente del mismo sustantivo. Los parámetros restantes se agregan como parámetros a la misma clase y el verbo **Registro** como método. La influencia que parte de **Ahorradores** a **Deposito** y que en la Figura 5.19 está en línea discontinua, implica en el diagrama de clases que la clase **Saldo** es dependiente de **Ahorradores**. El resultado de esta transformación es el diagrama de la Figura 5.20.

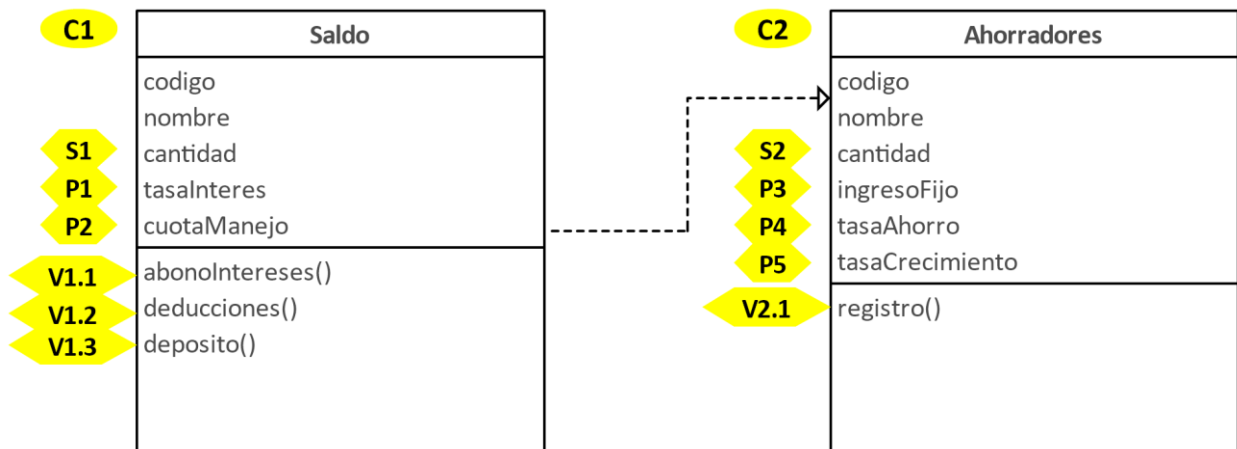


Figura 5.20 Diagrama de clases del sistema

En cuanto a la capa de datos para un eventual software, ahora se agrega una entidad correspondiente al sustantivo **Ahorradores**, con un atributo cantidad también por el sustantivo, más otros atributos sugeridos por los parámetros: **ingresoFijo**, **tasaAhorro** y **tasaCrecimiento**. El verbo Registro se incluye como una nueva relación de la entidad **Ahorradores** consigo misma.

El verbo Depósito se incorpora como la relación entre las entidades Ahorradores y Saldo, con un atributo cantidad para registrar cada depósito efectuado. El resultado de la transformación del diagrama de influencias del modelo enriquecido del sistema es el diagrama entidad relación de la Figura 5.21, que a su vez se transforma en el diagrama relacional de la Figura 5.22.

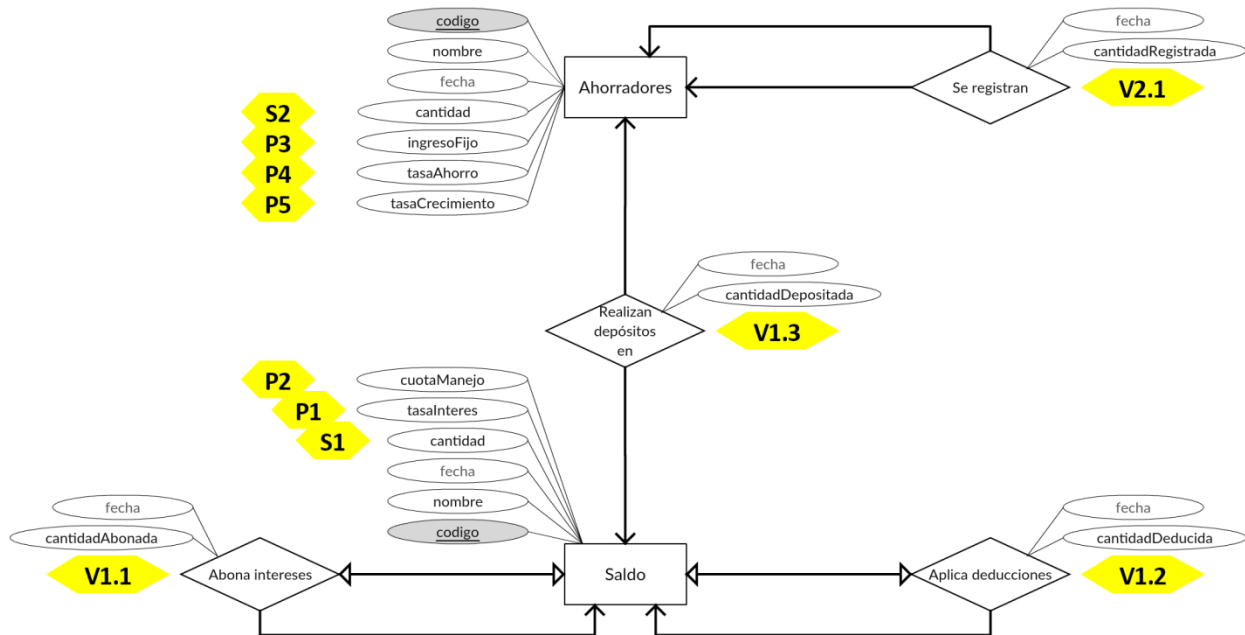


Figura 5.21 Diagrama entidad relación de la base de datos del sistema

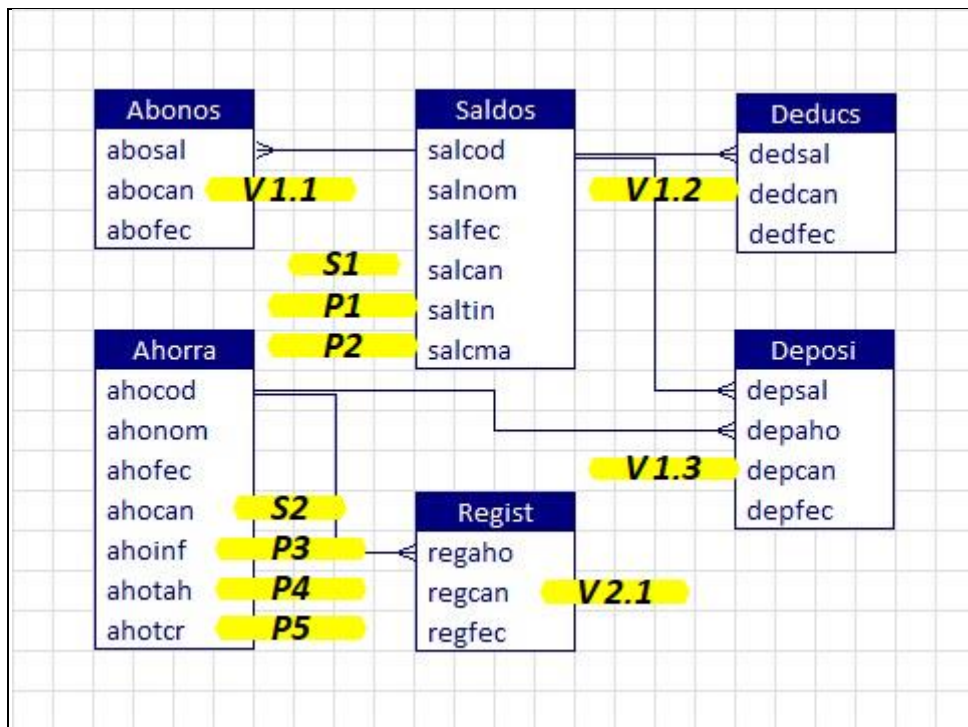


Figura 5.22 Diagrama relacional

5.7 Depuración y consideraciones finales

Por métodos de desagregación se separaron varios atributos de la clase **Saldo** a una nueva clase denominada **Producto**. Asimismo a la clase **Ahorradores**, que ahora se denomina **Ahorrador** para representar individuos y no grupos, se le separaron los aspectos del colectivo que conforman y se llevaron a otra clase denominada **Grupo**.

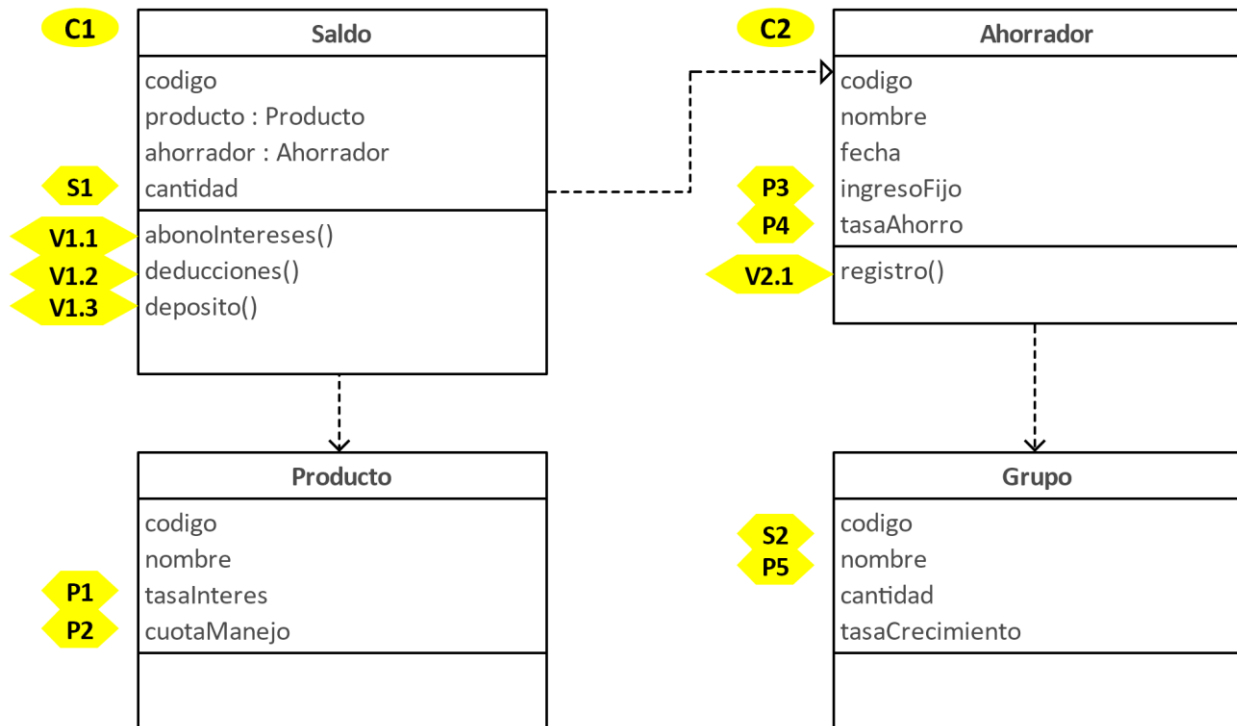


Figura 5.23 Diagrama de clases depurado del sistema

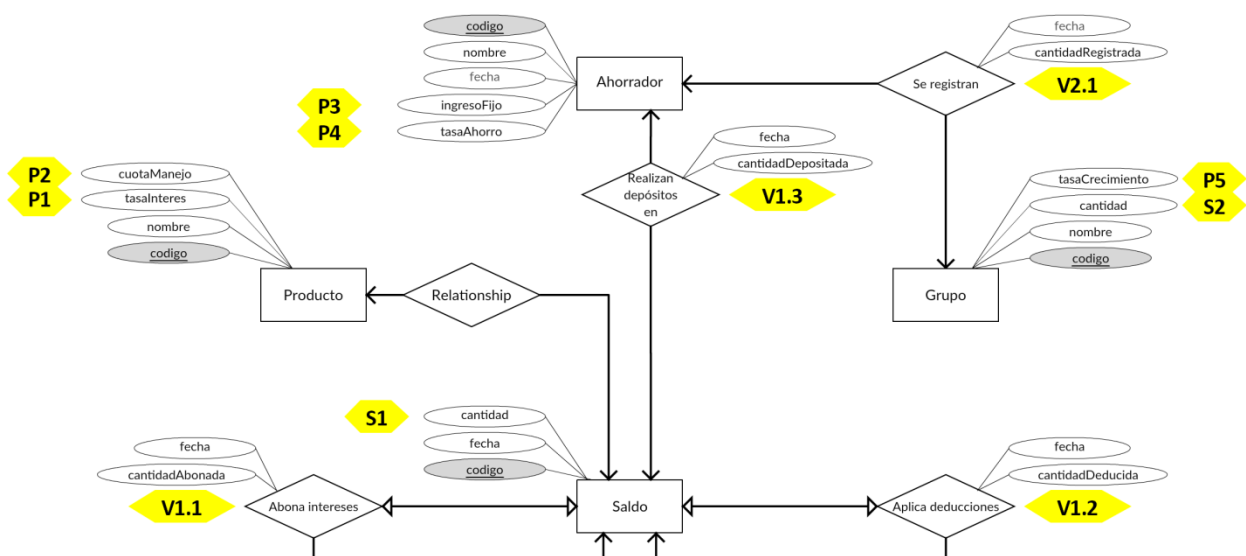


Figura 5.24 Diagrama entidad relación depurado del sistema

El diagrama entidad relación de la Figura 5.24 se transforma por el método usual en el diagrama relacional de la Figura 5.25, documentado por el diccionario de datos de la Tabla 4.8.

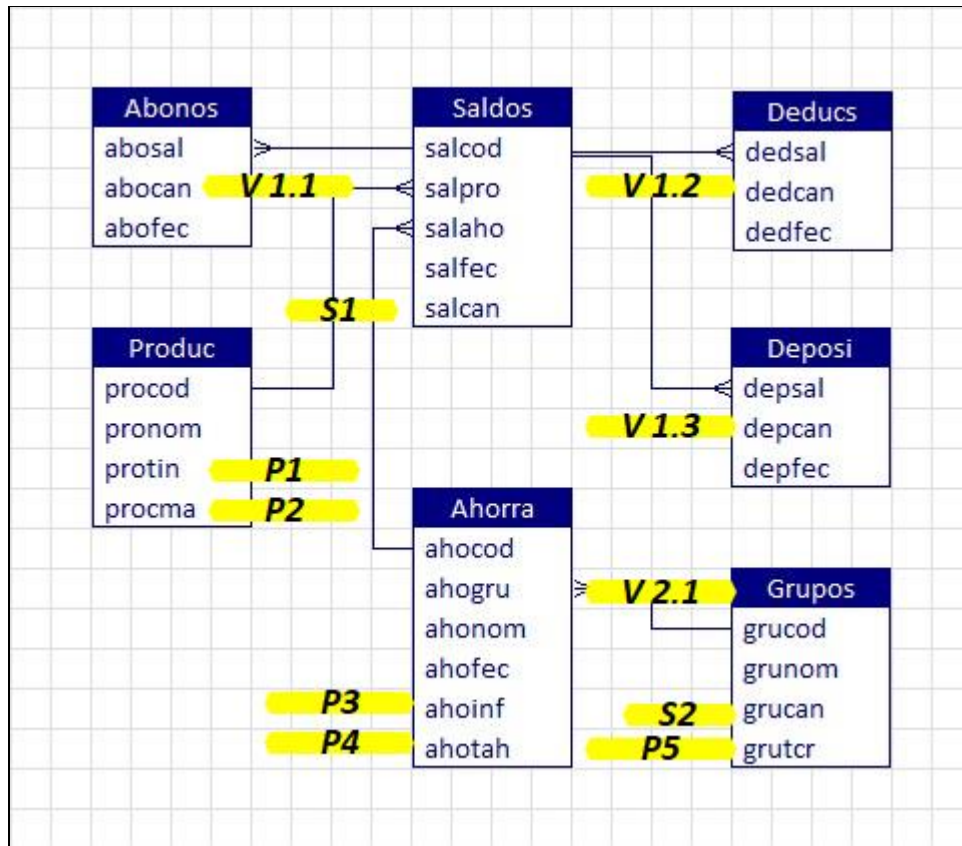


Figura 5.25 Diagrama relacional depurado del sistema

Tabla 5.16 Diccionario de datos de la base de datos del sistema

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|---------------|--|---------------|---|----------|---------------|----------------------|
| Grupos | Relación de grupos de ahorradores | grucod | Código del grupo | Primaria | | Autoincremental |
| | | grunom | Nombre del grupo | | | Cadena de caracteres |
| | | grucan | Cantidad de ahorradores | | | Número entero |
| | | Grutcr | Tasa de crecimiento [1/mes] | | | Número real |
| Ahorra | Relación de ahorradores titulares de productos financieros | ahocod | Código del ahorrador | Primaria | | Autoincremental |
| | | ahogru | Referencia al grupo al que pertenece el ahorrador | Foránea | Grupos.grucod | Número entero |
| | | ahonom | Nombre del ahorrador | | | Cadena de caracteres |
| | | ahofec | Fecha de registro del ahorrador | | | Fecha |

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|---------------|---|---------------|--|----------|---------------|----------------------|
| | | ahoinf | Ingreso fijo mensual del ahorrador | | | Número real |
| | | ahotah | Tasa de ahorro | | | Número real |
| Produc | Relación de productos financieros | procod | Código del producto financiero | Primaria | | Autoincremental |
| | | pronom | Nombre del producto financiero | | | Cadena de caracteres |
| | | protin | Tasa de interés [1/mes] | | | Número real |
| | | procma | Cuota de manejo [\$/mes] | | | Número real |
| Saldos | Relación de saldos de productos financieros | salcod | Código del saldo | Primaria | | Autoincremental |
| | | salpro | Referencia al producto financiero | Foránea | Produc.procod | Número entero |
| | | salaho | Referencia al ahorrador titular del producto | Foránea | Ahorra.ahocod | Número entero |
| | | salfec | Fecha de registro del saldo | | | Fecha |
| | | salcan | Cantidad de dinero en el saldo | | | Número real |
| Abonos | Relación de abonos de intereses | abosal | Referencia al saldo al que se realiza el abono | Foránea | Saldos.salcod | Número entero |
| | | abocan | Cantidad abonada como intereses | | | Número real |
| | | abofec | Fecha de abono de intereses | | | Fecha |
| Deducs | Relación de deducciones | dedsal | Referencia al saldo al que se realiza la deducción | Foránea | Saldos.salcod | Número entero |
| | | dedcan | Cantidad deducida como cuota de manejo | | | Número real |
| | | dedfec | Fecha de deducción | | | Fecha |
| Deposi | Relación de depósitos | depsal | Referencia al saldo al que se realiza el depósito | Foránea | Saldos.salcod | Número entero |
| | | depcan | Cantidad depositada | | | Número real |
| | | depfec | Fecha de depósito | | | Fecha |

Con la ayuda del software MBD 3.0 se obtiene la funcionalidad básica mostrada en las figuras de la Figura 5.26 a la Figura 5.29. En su orden permite registrar un grupo correspondiente a un perfil específico de ahorradores; registrar un ahorrador perteneciente a algún grupo y con parámetros de su capacidad de ahorro; crear un nuevo producto financiero; crear una cuenta (saldo) del producto financiero para un titular ahorrador. Asimismo permite el registro de abonos y deducciones del modelo inicial, y el registro de depósitos.

Grupos | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 51 bytes | Tamaño total 51 bytes

Código : 1

Grupo : Ahorradores de ingreso medio

Cantidad : 0

Tasa de crecimiento [1/mes] : 0,01

Figura 5.26 Registro de grupos de ahorradores

Ahorra | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 78 bytes | Tamaño total 78 bytes

Código : 1

Grupo : Ahorradores de ingreso medio

Ahorrador : Javier Gilberto Ramírez Ferreira

Fecha (dd/mm/aaaa) : 19/06/2018

Ingreso fijo [\$/i*t] : 1562484

Tasa de ahorro [1/mes] : 0,05

Figura 5.27 Ingreso de nuevos ahorradores

Produc | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 50 bytes | Tamaño total 50 bytes

Código : 1

Producto : Cuenta de ahorro preferencial

Tasa de interés [1/mes] : 0,002952

Cuota de manejo [\$/mes] : 8950

Figura 5.28 Registro de productos financieros

Saldos | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 24 bytes | Tamaño total 24 bytes

Código : 1

Producto : Cuenta de ahorro preferencial

Ahorrador : Javier Gilberto Ramírez Ferreira

Fecha (dd/mm/aaaa) : 19/06/2018

Cantidad [\$] : 0

Figura 5.29 Registro de titularidad y saldo de productos financieros

Probablemente este no sea un campo en el que modelar por las metodologías tradicionales de Ingeniería del Software resulte difícil. Por el contrario, quizás algunos lectores tengan elementos faltantes para proponer. Es importante resaltar que este ejercicio no busca ser exhaustivo en la determinación de requisitos, sino en mostrar que se puede partir de un proceso de conocimiento del problema, limitado aquí por propósito didáctico, y generar una primera versión de los diagramas UML derivados de un modelamiento en Dinámica de Sistemas. Como se puede verificar en el proceso de este capítulo, salvo los atributos de códigos, nombres y fechas, los demás provienen del modelo y varios de estos han surgido durante la validación matemática. Los capítulos siguientes abordarán procesos de modelamiento más complejos.

Referencias

- Banco de la República. (2005). Tasas de captación. Banco de la República (Banco central de Colombia). Retrieved July 23, 2012, from <http://www.banrep.gov.co/es/tasas-captacion>
- Finacialred Colombia. (2010). Que es CDT | Depósito a Término. Finacialred. Retrieved July 23, 2012, from <http://depositoatermino.com.co/que-es-cdt.html>
- Multibanca Colpatría. (2010). Cuenta de ahorros. Maneja tus finanzas.com. Retrieved December 01, 2010, from <http://www.manejatusfinanzas.com/Elahorro/CuentasBancarias/cuentadeahorros/tabid/114/language/es-CO/Default.aspx>
- Periodismoinvestigativo.com.co. (2014). Dinero [Fotografía]. ¿Cuáles son los 10 negocios más populares en Bogotá? Retrieved November 13, 2014, from <http://www.uniminuto.edu/radio/en-nuestro-top-empresarial-cuales-son-los-10-negocios-mas-populares-de-bogota/>
- Revista Dinero. (2012). Los mejores bancos para abrir una cuenta de ahorros. FinanzasPersonales.com.co. Retrieved July 23, 2012, from <http://www.finanzaspersonales.com.co/ahorro-e-inversion/articulo/los-mejores-bancos-para-abrir-cuenta-ahorros/44533>
-

6 Procesamiento de frutas – Caso de estudio

En la etapa intermedia de la fase de experimentación de este proyecto se utilizaron casos de mayor complejidad que los anteriores, cuya solución requiere la inclusión de más de un sustantivo, y que el proceso de modelamiento del nivel básico ya no sea secuencial sino iterativo entre ecuaciones, tablas de elementos y diagramas de influencias. Se buscaba proponer casos fácilmente asociables a entornos productivos, contexto en que podría resultar más familiar para los estudiantes de Ingeniería de Sistemas la comparación de los diseños que emergen de la metodología aquí propuesta, con los que propondrían a partir de una formulación inicial de requisitos para el desarrollo de software.

6.1 Formulación del caso

6.1.1 Planteamiento

En la alimentación humana las frutas aportan agua, que constituye hasta el 90% de su composición, y en proporciones menores fibra, vitaminas y minerales. Colombia cuenta con una amplia variedad de frutas nativas como guayaba, curuba, lulo, guanábana, tomate de árbol, granadilla, pitahaya, mango, uchuva, mora, que hacen parte de una lista de cerca de 400 especies; pero también es productor importante de frutas no nativas como banano, manzana, pera y uva, entre otras. Mensualmente se comercializan en promedio 95.000 toneladas de frutas en las principales centrales de abasto del país (DANE, 2014).



Figura 6.1 Comercialización tradicional de fruta fresca (Quirós, 2013)

Tradicionalmente las frutas se han comercializado frescas en las centrales de abastos, plazas de mercado, tiendas y almacenes de cadena. Pero por condiciones propias de la vida urbana

actual, como los horarios de trabajo y el transporte, se dispone de menos tiempo para la preparación casera de los alimentos. Se presenta ahora una tendencia creciente a adquirir las frutas con un nivel de procesamiento, como por ejemplo, en forma de pulpa.



Figura 6.2 Comercialización de fruta en forma de pulpa

Para los productores esto representa ventajas, por cuanto el procesamiento con algún grado de industrialización facilita la distribución (Bohórquez, 2005), evita los picos de disponibilidad que genera la estacionalidad de las cosechas, minimiza pérdidas por sobremaduración propias de la distribución al natural, y estabiliza los precios (Alimentos SAS, 2013).

Una consecuencia favorable es la posibilidad del aprovechamiento de los residuos del proceso, tales como cáscaras, semillas y materia seca, que antes eran desechados como residuos sólidos urbanos en el domicilio del consumidor final. Ahora estos desechos pueden ser recogidos por las empresas procesadoras de frutas y vendidos a otras que los convierten en materia orgánica para múltiples propósitos, como fabricación de abonos o alimento para animales, para mencionar solo dos ejemplos. Entonces, una empresa dedicada al procesamiento y comercialización de pulpa de frutas puede obtener ingresos tanto por la venta de la pulpa, como por la venta de los residuos.

Para iniciar un negocio semejante es necesario contar con dinero suficiente. Este capital sirve para emprender las acciones de montaje y sostenimiento: primero, es necesario instalar la maquinaria adecuada para la actividad; en segundo lugar, una vez se cuenta con la maquinaria, se debe asegurar el suministro permanente de frutas frescas; finalmente se debe garantizar la comercialización de la pulpa y de los residuos.

Por supuesto, cada fruta tiene unas características específicas y el precio de venta de la pulpa al público depende, entre otros factores, del rendimiento que se obtiene de ella al ser convertida en pulpa. Asimismo, diferentes tipos de residuos pueden tener usos posteriores diversos, por lo que su precio de venta también podría ser diferencial. La empresa calcula el precio de venta de ambos productos para hacer sostenible el negocio.

6.1.2 Pregunta

¿Cómo construiría con Dinámica de Sistemas un modelo de influencias del procesamiento de frutas y la comercialización de pulpas y residuos, y cómo lo transformaría en modelos del proceso de desarrollo de software?

6.2 Solución de referencia

6.2.1 Modelamiento cualitativo de la estructura básica del sistema

La estructura básica se modela con los sustantivos y verbos presentes en el sistema. En cuanto a sustantivos son identificables la **fruta**, la **pulpa**, los **residuos**, la **maquinaria** y el **dinero**. Los tres primeros se pueden medir en kilogramos [Kg]; a la maquinaria, dada su diversidad, se le medirá en una unidad genérica de maquinaria [u_m]; y el dinero se mide en unidades monetarias [\\$].

Sin embargo, este modelo ofrece un grado de dificultad que es pertinente aclarar antes de proponer la lista de sustantivos y verbos de la estructura básica del sistema. Normalmente se hace referencia al procesamiento como un verbo único que transformaría la fruta en pulpa y generaría residuos, como se muestra en la Figura 6.3.

Pero, considerando que los sustantivos en el modelo matemático con Dinámica de Sistemas se representan mediante ecuaciones diferenciales, en las cuales los verbos son las derivadas que se suman o se restan al valor del sustantivo, el verbo **procesamiento de fruta** restaría a la cantidad de fruta, pero sumaría a la cantidad de pulpa y de residuos; al restar el valor del verbo en una ecuación y sumarlo en dos, literalmente la cantidad de fruta se duplicaría en términos de pulpa y residuos.

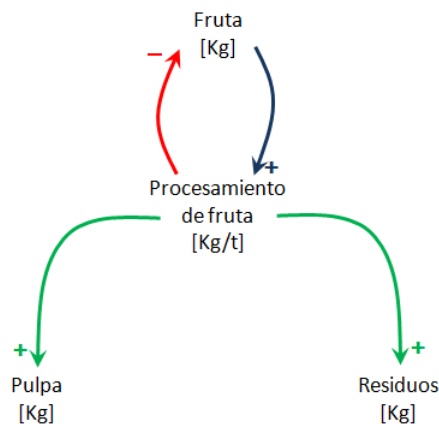


Figura 6.3 Un primer modelo no conveniente

Aunque desde la perspectiva gramatical es claro que la fruta al ser procesada se transforma en pulpa y residuos, desde la perspectiva matemática utilizada en esta propuesta metodológica, un verbo solo puede afectar a un máximo de dos sustantivos y debe hacerlo con signos contrarios.

Para superar esta dificultad resulta útil considerar que **fruta**, **pulpa** y **residuos**, aunque se miden en las mismas unidades, no son materiales idénticos en el contexto del problema. El verbo **procesamiento de fruta** actuaría disminuyendo la fruta, y aumentando simultáneamente la pulpa y los residuos, lo que implicaría sumar y/o restar elementos no homogéneos.

No hay objeciones con respecto a los sustantivos. Pero es preciso buscar verbos específicos para cada uno de ellos, mediante los cuales representar este proceso de separación.

Con respecto a la fruta, su cantidad aumenta cada vez que se realiza una **compra de fruta** y disminuye cuando se lleva a cabo el **procesamiento de fruta**. La pulpa aumenta en el momento de la **obtención de pulpa** y disminuye cuando se efectúa una **venta de pulpa**. Asimismo, los residuos almacenados aumentan con la **generación de residuos** y disminuyen cuando se da una **venta de residuos**.

Hasta ahora se han descrito solo las influencias de los verbos sobre los sustantivos, que aumentan o disminuyen su cantidad y se representan con el signo $+$ o con el signo $-$ respectivamente cerca de la parte final de la cada flecha. En cuanto a las influencias de los sustantivos sobre los verbos es pertinente recordar que en este caso los signos no representan aumento ni disminución sino proporcionalidad directa o inversa. La cantidad de **fruta** influye de forma inversamente proporcional en la **compra de fruta**, suponiendo que se evita la acumulación excesiva; en cambio influye de forma directamente proporcional en el **procesamiento de fruta**. Algo similar ocurre con las influencias de los sustantivos **pulpa** y **residuos** sobre sus respectivos verbos. Estos tres subsistemas se pueden representar como muestra la Figura 6.4.

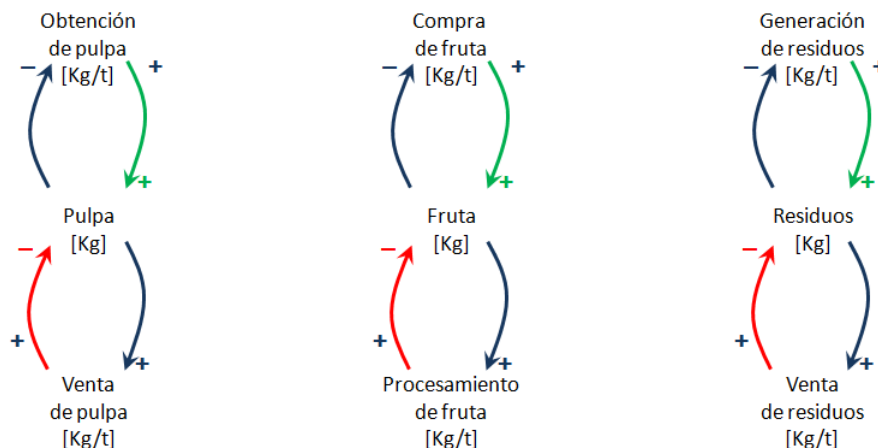


Figura 6.4 Modelos básicos a partir de los sustantivos del sistema

Teniendo en cuenta que tanto la obtención de pulpa como la generación de residuos son verbos más específicos, siendo ambos consecuencia del procesamiento de fruta, podría decirse que todo lo que inicialmente se entendió como procesamiento en realidad es un fraccionamiento que implica tres verbos que suceden simultáneamente. Quizás parezca artificialmente complicado, pero se debe tener presente que el interés de la metodología de modelamiento aquí planteada no es el diagrama de influencias sino la posibilidad de

transformarlo en modelos propios del desarrollo de software, de manera que probablemente esta aparente complicación permita formular métodos de clase más específicos.

Para mantener presente que este es un proceso de fraccionamiento, se agregó a la unidad de medida de cada sustantivo una letra indicadora del tipo de material a que aplica, es decir, que siendo todos kilogramos no son kilogramos de la misma materia. Las unidades en adelante serán kilogramos de fruta $[Kg_f]$, kilogramos de pulpa $[Kg_p]$ y kilogramos de residuos $[Kg_r]$. A modo de salvedad, con cada subíndice no se está creando ninguna unidad de medida nueva; aunque algunos matemáticos podrían tener objeciones con respecto a esta notación, vale la pena considerarlo como una licencia de ingeniería que, como se verá más adelante, otorga ventajas a la hora de construir el modelo matemático y transformar el diagrama de influencias en modelos del proceso de desarrollo de software.

El diagrama con las consideraciones anteriores sería como se muestra en la Figura 6.5. Las líneas punteadas representan influencias de un subsistema sobre otro, entendiendo por subsistema un sector del modelo con unidades de medida similares; la **obtención de pulpa** y la **generación de residuos** son representadas como consecuencias del **procesamiento de fruta**.

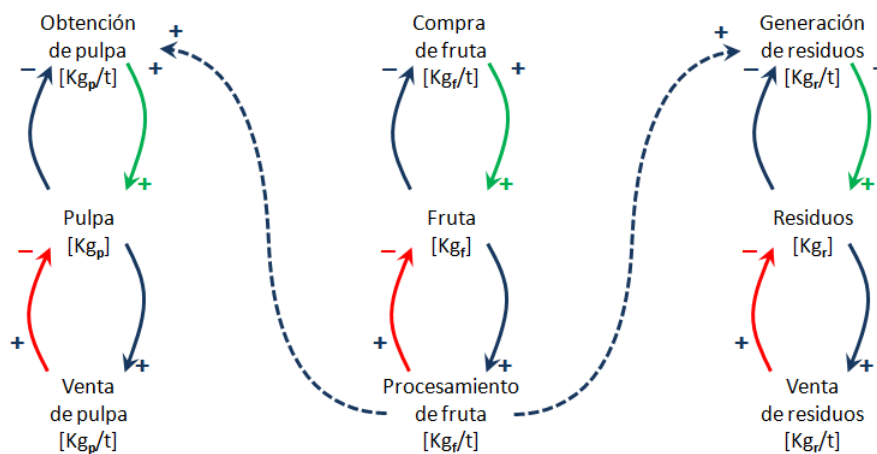


Figura 6.5 Diagrama de influencias del fraccionamiento de la fruta en pulpa y residuos

Aún falta tener en cuenta que el procesamiento de fruta se realiza con un fin económico, asociado al dinero que la empresa invierte y espera recuperar. Se requiere agregar los demás sustantivos mencionados antes: **dinero** $[\$]$, al que afectan los verbos **ingresos** y **egresos**, que lo incrementan y lo decrementan respectivamente, ambos medidos en $[\$/t]$.

También se tiene en cuenta la **maquinaria** $[u_m]$, que aumenta mediante un verbo que puede llamarse **instalación de maquinaria** y disminuye mediante otro que puede denominarse **deterioro de maquinaria**, medidos ambos en $[u_m/t]$. Todo subsistema incorporado al diagrama interactúa con otros, lo que se representa con las líneas punteadas en la Figura 6.6.

El **dinero** determina la posibilidad y la cantidad de compra de fruta e **instalación de maquinaria**, acciones que a su vez ocasionan egresos, configurando dos estructuras cíclicas entre el subsistema asociado al sustantivo **dinero** y los subsistemas de **fruta** y **maquinaria**.

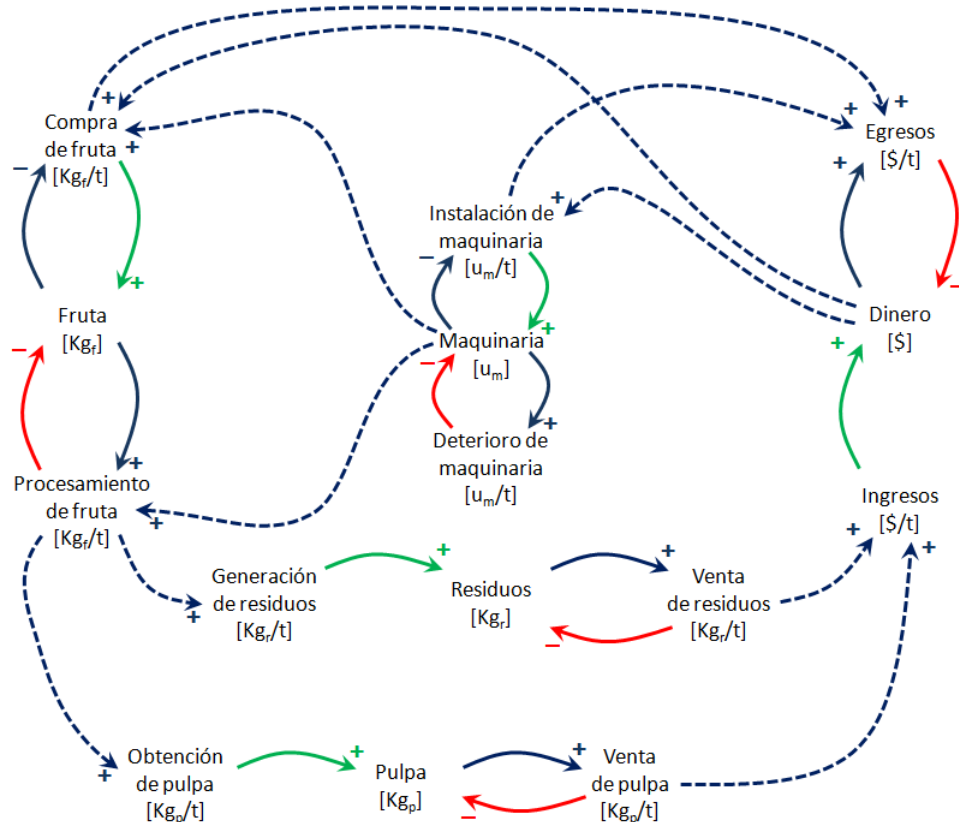


Figura 6.6 Diagrama de influencias de la estructura básica del sistema

La cantidad de **maquinaria** influye en la decisión de **compra de fruta**, y también determina el **procesamiento de fruta**. Por último, tanto la **venta de pulpa** como la **venta de residuos** generan los **ingresos** de la empresa. Con esto se termina la estructura básica del sistema.

6.2.2 Modelamiento cuantitativo

Un modelo matemático en Dinámica de Sistemas está conformado por ecuaciones diferenciales ordinarias y ecuaciones auxiliares, que representan a los sustantivos y a los verbos respectivamente. Para efectos de simulación se requieren también las condiciones iniciales del modelo.

En la Tabla 4.1 se presenta una lista de los sustantivos y verbos de la estructura básica del sistema modelado hasta ahora, y las abreviaturas de cada elemento que se utilizan en la construcción del modelo matemático a continuación.

6.2.2.1 Ecuaciones diferenciales

A cada sustantivo le corresponde una ecuación diferencial ordinaria, en la que la derivada del sustantivo es igual a la suma de los verbos con el signo dado por su influencia sobre aquel. Estas ecuaciones escritas utilizando el método de Euler de integración numérica, pueden interpretarse como que el valor de un sustantivo en cualquier instante dado ($t+\Delta t$) equivale a su valor en el instante previo (t), sumando o restando los valores de los verbos para dicho instante

(t). La Tabla 6.2 muestra las ecuaciones diferenciales para la estructura básica del sistema, escritas también en forma de Euler.

Tabla 6.1 Elementos de la estructura básica del sistema

| Nombre | Abreviatura | Tipo | Unidad |
|---------------------------|-------------|------------|----------------------|
| Fruta | FRU | Sustantivo | [Kg _f] |
| Compra de fruta | COM | Verbo | [Kg _f /t] |
| Procesamiento de fruta | PRO | Verbo | [Kg _f /t] |
| Pulpa | PUL | Sustantivo | [Kg _p] |
| Obtención de pulpa | OBT | Verbo | [Kg _p /t] |
| Venta de pulpa | VEP | Verbo | [Kg _p /t] |
| Residuos | RES | Sustantivo | [Kg _r] |
| Generación de residuos | GEN | Verbo | [Kg _r /t] |
| Venta de residuos | VER | Verbo | [Kg _r /t] |
| Maquinaria | MAQ | Sustantivo | [u _m] |
| Instalación de maquinaria | INS | Verbo | [u _m /t] |
| Deterioro de maquinaria | DET | Verbo | [u _m /t] |
| Dinero | DIN | Sustantivo | [\$] |
| Ingresos | ING | Verbo | [\$/t] |
| Egresos | EGR | Verbo | [\$/t] |

Tabla 6.2 Ecuaciones diferenciales del sistema

| Elemento | Ecuación diferencial | Ecuación diferencial en forma de Euler |
|----------|-------------------------------|--|
| FRU | $\frac{dFRU}{dt} = COM - PRO$ | $FRU(t + \Delta t) = FRU(t) + COM(t) * \Delta t - PRO(t) * \Delta t$ |
| PUL | $\frac{dPUL}{dt} = OBT - VEP$ | $PUL(t + \Delta t) = PUL(t) + OBT(t) * \Delta t - VEP(t) * \Delta t$ |
| RES | $\frac{dRES}{dt} = GEN - VER$ | $RES(t + \Delta t) = RES(t) + GEN(t) * \Delta t - VER(t) * \Delta t$ |
| MAQ | $\frac{dMAQ}{dt} = INS - DET$ | $MAQ(t + \Delta t) = MAQ(t) + INS(t) * \Delta t - DET(t) * \Delta t$ |
| DIN | $\frac{dDIN}{dt} = ING - EGR$ | $DIN(t + \Delta t) = DIN(t) + ING(t) * \Delta t - EGR(t) * \Delta t$ |

6.2.2.2 Ecuaciones auxiliares

Según el diagrama de influencias de la estructura básica del sistema mostrado en la Figura 6.6, para construir la ecuación del verbo **compra de fruta** deben tenerse en cuenta las influencias directas que llegan desde **maquinaria** y **dinero**, así como la influencia inversa que llega desde **fruta**. Se muestran las unidades de medida para efectos de validación de la consistencia durante la construcción de las ecuaciones.

$$COM(t) = f(FRU(t); MAQ(t); DIN(t))$$

$$[Kg_f/t] = f([Kg_f]; [u_i]; [\$])$$

Hay varias estrategias para construir una ecuación como esta. Aquí se utiliza una relativamente sencilla en el contexto de las limitaciones frecuentes en el desempeño matemático de los estudiantes de Ingeniería de Sistemas; no obstante, mejores competencias matemáticas hacen posible la construcción de mejores modelos. Aunque al final la expresión deberá contener todos estos elementos, su incorporación a la ecuación depende de establecer prioridades entre ellas para una construcción gradual, a partir de la siguiente pregunta: ¿cuál de estos tres sustantivos es determinante de la cantidad de fruta a comprar en condiciones ideales, entendiendo por estas la inexistencia de restricciones en el procesamiento?

Podría afirmarse que el éxito económico de una empresa depende del máximo aprovechamiento de su **maquinaria**, por lo que este debería ser el criterio determinante para la compra de insumos, en este la **compra de fruta**.

En cuanto al **dinero**, salvo que la idea sea gastarlo todo, lo cual resulta bastante inusual, más bien parece que es algo que se necesita para poder comprar toda la fruta que se pueda procesar con la maquinaria disponible, salvo que no se tenga el dinero suficiente, lo que lo deja como elemento limitante, no determinante.

Con respecto a la **fruta**, como indica el signo “-” de su influencia sobre la **compra de fruta**, si se pretende limitar la compra de modo que no se supere la existencia que pueda ser procesada con la maquinaria disponible, la fruta existente en cualquier momento dado es un limitante de la siguiente compra.

De acuerdo a las anteriores consideraciones, la mayor prioridad la tiene el sustantivo **maquinaria** como determinante de la **compra de fruta** en condiciones ideales.

$$\begin{aligned} COM(t) &= f(MAQ(t)) \\ [Kg_f/t] &= f([u_m]) \end{aligned}$$

Para convertir la unidad $[u_m]$ en $[Kg_f/t]$ se debe multiplicar por una unidad complementaria.

$$\begin{aligned} [Kg_f/t] &= [u_m] * [Kg_f/(u_m * t)] \\ [Kg_f/t] &= [\cancel{u_m}] * [Kg_f/(\cancel{u_m} * t)] \\ [Kg_f/t] &= [Kg_f/t] \end{aligned}$$

La validación de unidades de la expresión matemática aporta pistas sobre posibles elementos faltantes. La unidad $[Kg_f/(u_m*t)]$, leída como kilogramos de fruta por unidad de maquinaria por tiempo, sugiere un parámetro acerca de cuánta fruta se puede procesar con cada unidad de maquinaria en un periodo de tiempo, parámetro al que se denominará **capacidad de procesamiento de fruta**, abreviado como **CPF**.

Es factible considerar que la compra de fruta no se hace para el procesamiento inmediato, sino para tener en almacenamiento durante algunos periodos dentro del lapso en que la fruta misma se pueda mantener en buenas condiciones. Otro de los elementos a incorporar sería entonces el tiempo de almacenamiento considerado viable para la fruta, que se llamará **cantidad de periodos de almacenamiento**, abreviado como **CPA**. No altera las unidades de la ecuación porque es adimensional.

$$\begin{aligned} COM(t) &= MAQ(t) * CPF(t) * CPA(t) \\ [Kg_f/t] &= [u_m] * [Kg_f/(u_m * t)] * [] \\ [Kg_f/t] &= [Kg_f/t] \end{aligned}$$

La ecuación por ahora representa la compra de fruta en condiciones ideales, es decir, toda la que se necesite para mantener la maquinaria plenamente utilizada durante la cantidad máxima de días que la fruta pueda ser almacenada en condiciones apropiadas. Para incorporar los elementos limitantes, primero se debe descontar de la compra la cantidad de **fruta** que ya está almacenada. La ecuación quedaría:

$$COM(t) = (MAQ(t) * CPF(t) * CPA(t)) - FRU(t)$$

No hay inconsistencia con las unidades de medida, a pesar de que la parte entre paréntesis tiene como unidad $[Kg_f/t]$ mientras la cantidad de fruta se mide en $[Kg_f]$; son unidades compatibles si se considera que el segundo elemento actúa como limitante, al igual que, por ejemplo, una familia compra la cantidad de alimento semanal que consume, menos lo que eventualmente le haya sobrado de la semana anterior. Por ahora la ecuación representa la **compra de fruta** como la cantidad de fruta que se requiere comprar.

Finalmente, el **dinero** en caso de no ser suficiente restringe la compra; si el dinero fuera insuficiente la compra debe limitarse a la cantidad de fruta que se puede comprar, para lo cual se requiere conocer el **precio de compra de la fruta**, que se abreviará como **PCF**.

$$\begin{aligned} \text{cantidad de fruta que se puede comprar} &= DIN(t)/PCF(t) \\ &= [\$]/[\$ / Kg_f] \\ &= [\$]/[\$ / Kg_f] \\ &= [Kg_f] \end{aligned}$$

Utilizando la función matemática **mínimo()**, para escoger entre la cantidad de fruta que se requiere y la que se puede comprar, ahora la ecuación es:

$$COM(t) = \text{mínimo}((MAQ(t) * CPF(t) * CPA(t)) - FRU(t) ; DIN(t)/PCF(t))$$

La parte anterior al símbolo “;” sería la compra de fruta en condiciones normales; la parte siguiente sería la compra de fruta en caso de tener restricciones de dinero.

Pero aún falta considerar que la **compra de fruta** solo se puede efectuar cuando se tiene la **maquinaria** suficiente para que la empresa trabaje, es decir, que sin haber llegado a un mínimo necesario, la maquinaria también es limitante. Para eso se incluye un nuevo elemento denominado **maquinaria mínima para producción**, abreviada como **MMP** y con unidad de medida $[u_m]$, con el cual se construye una expresión condicional que da por concluida la construcción de la ecuación para la compra de fruta, la cual representa que si la maquinaria es superior a la mínima que se necesita para realizar el procesamiento, entonces se compra fruta; de lo contrario, no se compra.

$$\begin{aligned} & \text{Si } (MAQ(t) \geq MMP(t)) \text{ entonces} \\ COM(t) &= \text{mínimo}((MAQ(t) * CPF(t) * CPA(t)) - FRU(t) ; DIN(t)/PCF(t)) \\ & \text{de lo contrario } COM(t) = 0 \end{aligned}$$

Cada nuevo parámetro surgido para darle consistencia dimensional al modelo matemático debe ser incorporado al diagrama de influencias, que en la metodología aquí propuesta se ha denominado modelo enriquecido del sistema. La Figura 6.7 muestra el diagrama con los parámetros surgidos durante la construcción de la ecuación para compra de fruta.

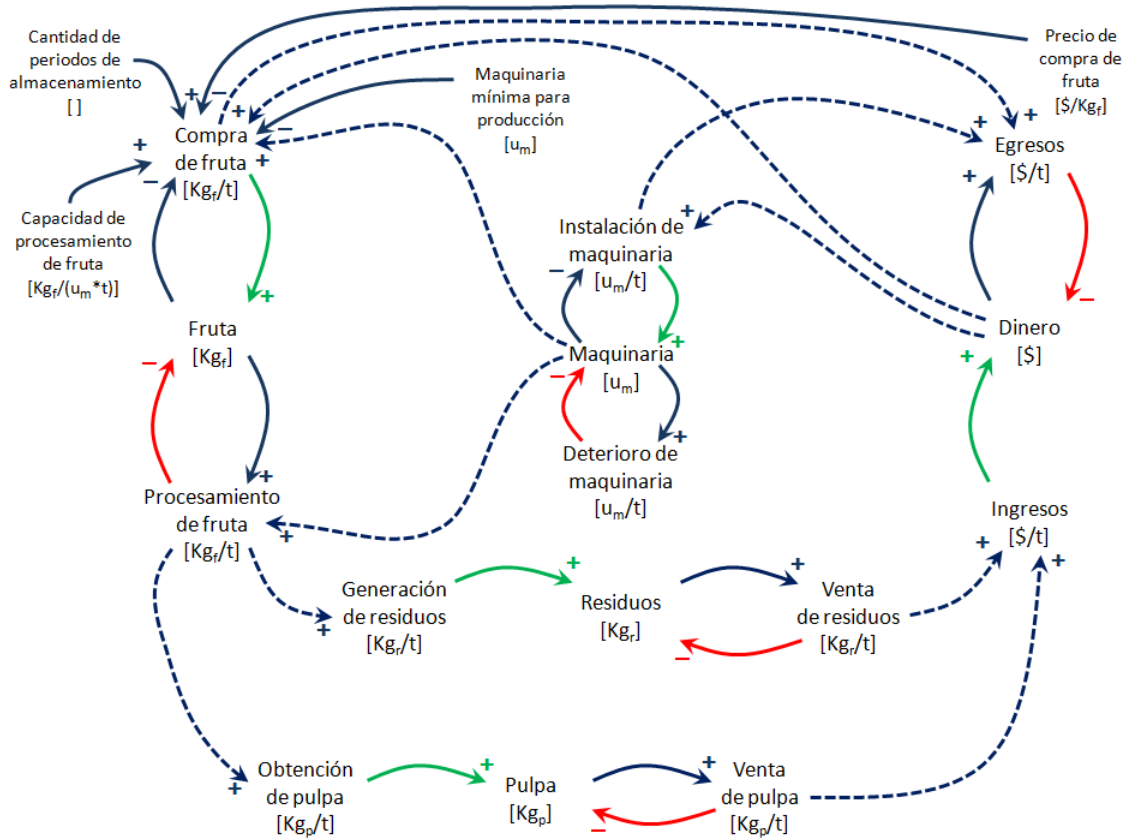


Figura 6.7 Diagrama con parámetros para definir la compra de fruta

Según el mismo diagrama, el procesamiento de fruta se debe definir por las influencias que llegan desde fruta y desde maquinaria; será la ecuación que se construya a partir de la siguiente expresión:

$$PRO(t) = f(FRU(t); MAQ(t))$$

$$[Kg_f/t] = f([Kg_f]; [u_i])$$

Dado que los elementos involucrados no tienen las mismas unidades, se utilizará la misma estrategia para establecer prioridades: la **maquinaria** es la que efectivamente realiza el procesamiento, mientras que la fruta es el elemento que se deja procesar; de manera que la primera se tomará como determinante y la segunda como limitante.

$$PRO(t) = f(MAQ(t))$$

$$[Kg_f/t] = f([u_m])$$

Para convertir las unidades [u_m] en unidades [Kg_f/t] de compra de fruta y darle consistencia dimensional a la expresión, se debe multiplicar por una unidad complementaria.

$$\begin{aligned} [Kg_f/t] &= [u_m] * [Kg_f/(u_m * t)] \\ [Kg_f/t] &= [\cancel{u_m}] * [Kg_f/(\cancel{u_m} * t)] \\ [Kg_f/t] &= [Kg_f/t] \end{aligned}$$

Esta unidad ya había surgido para la compra de fruta y había dado origen al parámetro **capacidad de procesamiento de fruta**, que también se incluye en esta nueva expresión:

$$\begin{aligned} PRO(t) &= MAQ(t) * CPF(t) \\ [Kg_f/t] &= [u_m] * [Kg_f/(u_m * t)] \\ [Kg_f/t] &= [Kg_f/t] \end{aligned}$$

Esta sería la expresión sin restricciones. Pero si no llegara a haber **fruta** suficiente para utilizar la **maquinaria** en toda su capacidad, habría que limitar el **procesamiento de fruta** a la cantidad de fruta disponible, lo cual ya se ha representado en otras expresiones con la función **mínimo()**.

$$PRO(t) = \text{mínimo}((MAQ(t) * CPF(t)); FRU(t))$$

La parte a la izquierda del signo “;” sería el procesamiento en condiciones normales; la parte derecha sería en caso de restricciones de fruta.

También hay que formular las ecuaciones para la **obtención de pulpa** y la **generación de residuos**. Ambas, según el diagrama de influencias de la Figura 6.7, se construyen con base en el procesamiento de fruta.

$$\begin{aligned} OBT(t) &= f(PRO(t)) \\ [Kg_p/t] &= f([Kg_f/t]) \end{aligned}$$

Al tener solo un elemento con el cual elaborar la expresión, basta buscar la unidad complementaria aplicable.

$$\begin{aligned} [Kg_p/t] &= [Kg_f/t] * [Kg_p/Kg_f] \\ [Kg_p/t] &= [\cancel{Kg_f}/t] * [Kg_p/\cancel{Kg_f}] \\ [Kg_p/t] &= [Kg_p/t] \end{aligned}$$

La unidad complementaria se refiere a una cantidad de kilogramos de pulpa por cada kilogramo de fruta, a lo cual se podría denominar **tasa de aprovechamiento de fruta**, abreviada para la ecuación como **TAF** y medida en [Kg_p/Kg_f]. Si bien es cierto que ambos son kilogramos, el haber diferenciado las unidades por corresponder a materiales distintos ayuda en el razonamiento, e incluso si se toma la tasa como un porcentaje, ayuda a entender que “%” no es una unidad de medida, como a veces se piensa equivocadamente, sino un símbolo que representa una comparación entre dos cantidades con la misma unidad: solo algunos kilogramos de pulpa se obtendrán del total de kilogramos de fruta originales.

$$\begin{aligned} OBT(t) &= PRO(t) * TAF(t) \\ [Kg_p/t] &= [Kg_f/t] * [Kg_p/Kg_f] \\ [Kg_p/t] &= [\cancel{Kg_f}/t] * [Kg_p/\cancel{Kg_f}] \\ [Kg_p/t] &= [Kg_p/t] \end{aligned}$$

Con respecto a la venta de pulpa, para mantener la simplicidad del ejercicio y no incorporar condiciones de mercado o cualquier otra consideración, se va a suponer que la pulpa se vende inmediatamente, por lo que la ecuación sería:

$$VEP(t) = PUL(t)$$

A partir de un razonamiento similar, en la ecuación de **generación de residuos** se precisa de un nuevo elemento denominado **tasa residual de fruta**, abreviada como **TRF** y medida en $[Kg_r/Kg_f]$, la cual representa la proporción de kilogramos de residuos que se generan a partir de cada kilogramo de fruta procesado.

$$GEN(t) = PRO(t) * TRF(t)$$

$$[Kg_r/t] = [Kg_f/t] * [Kg_r/Kg_f]$$

$$[Kg_r/t] = [Kg_f/t] * [Kg_r/Kg_f]$$

$$[Kg_r/t] = [Kg_r/t]$$

Al igual que con la venta de pulpa, para la venta de residuos se va a suponer que sucede tan pronto como los residuos se generan, por lo que la ecuación es:

$$VER(t) = RES(t)$$

La expresión para los **ingresos**, según la Figura 6.7, se debe construir con los elementos **venta de pulpa** y **venta de residuos**.

$$ING(t) = f(VEP(t); VER(t))$$

$$[$/t] = f([Kg_p/t]; [Kg_r/t])$$

A pesar de ser dos elementos con unidades diferentes, la situación es diferente a las anteriores, por cuanto no hay un elemento determinante y uno limitante, sino que ambos generan ingresos de forma independiente. Entonces, se construye la expresión para cada uno, y luego se suman. Primero, con base en la **venta de pulpa**:

$$ING(t) = f(VEP(t))$$

$$[$/t] = f([Kg_p/t])$$

$$[$/t] = [Kg_p/t] * [$/Kg_p]$$

$$[$/t] = [Kg_p/t] * [$/Kg_p]$$

$$[$/t] = [$/t]$$

La unidad nueva encontrada, $[\$/Kg_p]$, puede fácilmente identificarse como el **precio de venta de pulpa**, que se abreviará como **PVP**. La ecuación entonces es:

$$ING(t) = VEP(t) * PVP(t)$$

$$[$/t] = [Kg_p/t] * [$/Kg_p]$$

$$[$/t] = [Kg_p/t] * [$/Kg_p]$$

$$[$/t] = [$/t]$$

Del mismo modo es posible hallar la necesidad de incorporar el elemento **precio de venta de residuos**, cuya unidad de medida es $[\$/Kg_r]$, y que se abreviará como **PVR**.

$$\begin{aligned} ING(t) &= VER(t) * PVR(t) \\ [$/t] &= [Kg_r/t] * [$/Kg_r] \\ [$/t] &= [Kg_{\overline{r}}/t] * [$/Kg_{\overline{r}}] \\ [$/t] &= [$/t] \end{aligned}$$

Finalmente la ecuación para los **ingresos** es:

$$ING(t) = VEP(t) * PVP(t) + VER(t) * PVR(t)$$

De nuevo según el diagrama de la Figura 6.7, la **instalación de la maquinaria** depende del **dinero** y de la propia **maquinaria**.

$$\begin{aligned} INS(t) &= f(MAQ(t); DIN(t)) \\ [u_m/t] &= f([u_m]; [\$]) \end{aligned}$$

Esta situación ya ha sido resuelta antes mediante la identificación de un elemento determinante y uno limitante, en la construcción de la ecuación de **compra de fruta**. Pero en este caso ninguno de los elementos es determinante: la maquinaria no permite calcular cuánto se instala sino eventualmente cuánto hace falta instalar para alcanzar la cantidad requerida; y el dinero, como ya se vio antes, es limitante también. Entonces todavía se debe encontrar cuánta maquinaria de desarrollaría en condiciones ideales, sin restricciones.

Si la empresa tuviera que instalar maquinaria a toda marcha y sin mediar problemas de dinero, solo su propia capacidad determinaría la velocidad. Es interesante notar que en esta expresión el elemento faltante del modelo era precisamente el determinante. Se va a denominar **capacidad de instalación de maquinaria**, medida en $[u_m/t]$ y abreviada como **CIM**.

$$\begin{aligned} INS(t) &= f(CIM(t)) \\ [u_m/t] &= f([u_m/t]) \end{aligned}$$

Suponiendo que el dinero aún no impusiera restricciones, el desarrollo no sería permanente sino que llegado el momento solo se agregaría la cantidad de maquinaria faltante para alcanzar el nivel necesario para que la empresa funcione. Esto es, cuando la diferencia entre **maquinaria mínima para producir** y **maquinaria** fuera menor a la capacidad.

$$\begin{aligned} INS(t) &= \text{mínimo}(CIM(t); MMP(t) - MAQ(t)) \\ [u_m/t] &= \text{mínimo}([u_m/t]; ([u_m] - [u_m])) \\ [u_m/t] &= \text{mínimo}([u_m/t]; [u_m]) \end{aligned}$$

Como ya se mencionó antes, a pesar de no ser unidades idénticas, $[u_m]$ y $[u_m/t]$ son compatibles cuando se utilizan en una función como **mínimo()**.

Aún falta incluir la eventual restricción del **dinero**, que también debe expresarse en $[u_m]$ y que implicaría la cantidad de maquinaria que se podría desarrollar si el limitante fuera el dinero. Se puede hacer del mismo modo que para la restricción en la compra de fruta: incorporando al modelo un precio, que sería el **precio de instalación de maquinaria**, abreviado como **PIM** y medido en $[\$/u_m]$:

$$\begin{aligned} INS(t) &= \text{mínimo}(CIM(t); MMP(t) - MAQ(t); DIN(t)/PIM(t)) \\ [u_m/t] &= \text{mínimo}([u_m/t]; ([u_m] - [u_m]); ([\$/[\$/u_m])) \end{aligned}$$

$$[u_m/t] = \text{mínimo}([u_m/t]; [u_m]; ([\$/[\$/u_m]])$$

$$[u_m/t] = \text{mínimo}([u_m/t]; [u_m]; [u_m])$$

$$[u_m/t] = \text{mínimo}([u_m/t]; [u_m]; [u_m])$$

Para la ecuación de **deterioro de maquinaria** en este modelo se recurre a una solución bastante simple, con base en un parámetro que determina su **tiempo medio de vida útil**, abreviado como **TVU**, y medido en [t]. Con la salvedad de que existen métodos mucho mejores para calcularlo, aquí se supone un deterioro lineal de la maquinaria, que se representa en la siguiente ecuación:

$$DET(t) = MAQ(t)/TVU(t)$$

$$[u_m/t] = [u_m]/[t]$$

Reutilizando el razonamiento para los **ingresos**, los **egresos**, la única ecuación pendiente del modelo, se pueden formular a partir de la **compra de fruta** y de la **instalación de maquinaria**, con los precios de estas actividades que ya se emergieron en ecuaciones anteriores:

$$EGR(t) = \text{mínimo}(COM(t) * PCF(t) + INS(t) * PIM(t) ; DIN(t))$$

$$[\$/t] = [Kg_f/t] * [\$/Kg_f] + [u_m/t] * [\$/u_m]$$

$$[\$/t] = [\$/t]$$

6.2.3 Modelamiento enriquecido del sistema

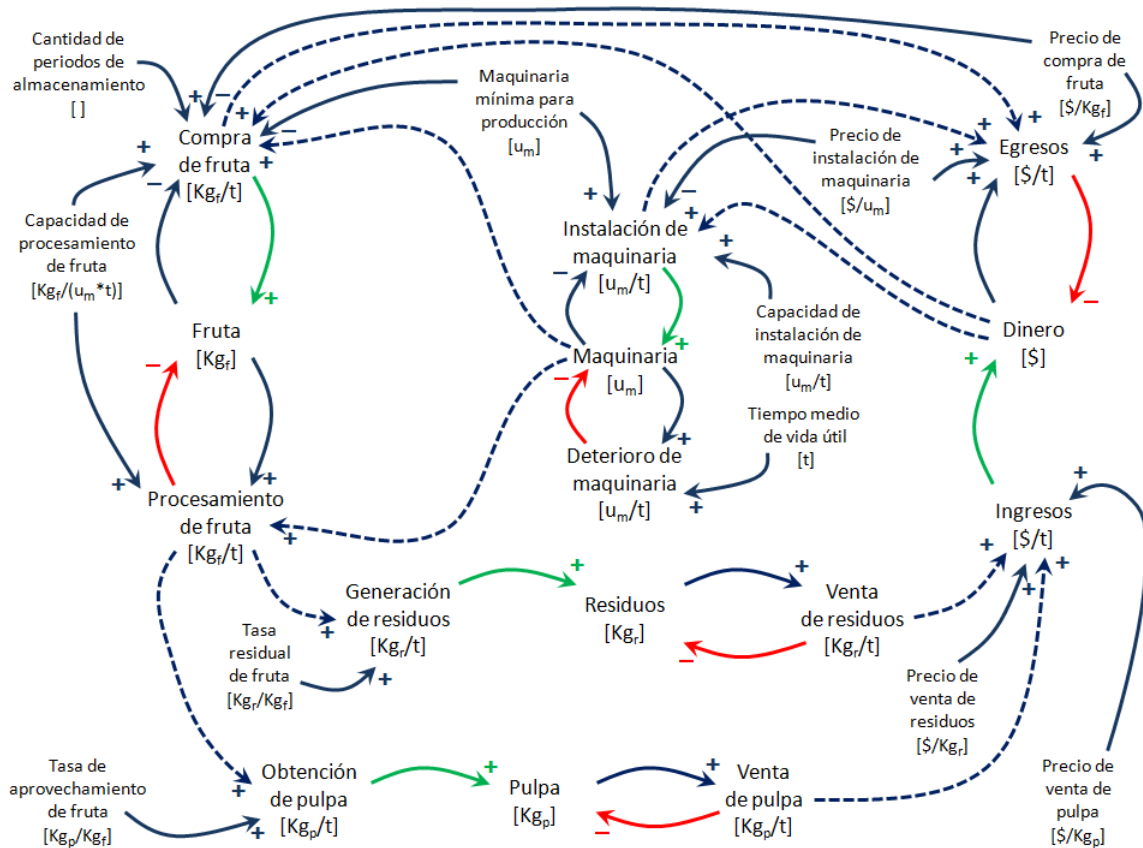


Figura 6.8 Diagrama de influencias del modelo enriquecido del sistema

Con todos los elementos surgidos durante el modelamiento cuantitativo, el diagrama de influencias del modelo enriquecido del sistema llega a ser como se muestra en la Figura 6.8.

La Modelamiento enriquecido del sistema.

Como ya se dijo antes, estos diagramas y ecuaciones han sido traídos a esta sección desde el capítulo 6 en donde se encontrarán las explicaciones concernientes; aquí solo cumplen la función de acompañar la descripción de la secuencia metodológica. A falta de tales explicaciones se requiere hacer notar que en las ecuaciones auxiliares presentadas en la Tabla 3.1 han aparecido algunos elementos adicionales, clasificados posteriormente como parámetros en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.**, dado que no hacen parte de la estructura básica del sistema sino que se constituyen en elementos que modifican el comportamiento derivado de la misma.

Tabla 3.2 contiene la relación de sustantivos, verbos y parámetros que conforman el modelo enriquecido del sistema. Con base en estos elementos se realizará en una sección posterior la transformación del diagrama de influencias en diagramas propios del proceso de desarrollo de software.

En la Tabla 3.1 se presenta el modelo matemático completo del sistema, conformado por las ecuaciones diferenciales que representan a los sustantivos, y las ecuaciones auxiliares que corresponden a los verbos. De nuevo cabe recordar la salvedad que cobija a todo este texto, y es su propósito didáctico, por lo que este modelo no debe ser considerado todavía como terminado, y que si se lo llevara a su máxima expresión perdería sentido en el aspecto metodológico de este libro. Se podrían incorporar recursos matemáticos más elaborados a este proceso de modelamiento, a lo cual se debería comprometer un equipo multidisciplinario y mayor documentación técnica en su elaboración.

Tabla 6.3 Elementos del modelo enriquecido del sistema

| Nombre | Abreviatura | Tipo | Unidad |
|---------------------------|-------------|------------|----------------------|
| Fruta | FRU | Sustantivo | [Kg _f] |
| Compra de fruta | COM | Verbo | [Kg _f /t] |
| Procesamiento de fruta | PRO | Verbo | [Kg _f /t] |
| Pulpa | PUL | Sustantivo | [Kg _p] |
| Obtención de pulpa | OBT | Verbo | [Kg _p /t] |
| Venta de pulpa | VEP | Verbo | [Kg _p /t] |
| Residuos | RES | Sustantivo | [Kg _r] |
| Generación de residuos | GEN | Verbo | [Kg _r /t] |
| Venta de residuos | VER | Verbo | [Kg _r /t] |
| Maquinaria | MAQ | Sustantivo | [u _m] |
| Instalación de maquinaria | INS | Verbo | [u _m /t] |
| Deterioro de maquinaria | DET | Verbo | [u _m /t] |
| Dinero | DIN | Sustantivo | [\$] |
| Ingresos | ING | Verbo | [\$/t] |
| Egresos | EGR | Verbo | [\$/t] |

| | | | |
|---|-----|-----------|--|
| Capacidad de procesamiento de fruta | CPF | Parámetro | [Kg _f /(u _m *t)] |
| Cantidad de periodos de almacenamiento | CPA | Parámetro | [] |
| Precio de compra de fruta | PCF | Parámetro | [\$/Kg _f] |
| Maquinaria mínima para producción | MMP | Parámetro | [u _m] |
| Tasa de aprovechamiento de fruta | TAF | Parámetro | [Kg _p /Kg _f] |
| Precio de venta de pulpa | PVP | Parámetro | [\$/Kg _p] |
| Tasa residual de fruta | TRF | Parámetro | [Kg _r /Kg _f] |
| Precio de venta de residuos | PVR | Parámetro | [\$/Kg _r] |
| Capacidad de instalación de maquinaria | CIM | Parámetro | [u _m /t] |
| Precio de instalación de maquinaria | PIM | Parámetro | [\$/u _m] |
| Tiempo medio de vida útil de maquinaria | TVU | Parámetro | [t] |

Tabla 6.4 Modelo matemático del sistema

| Elemento | Ecuación |
|--------------------------|--|
| Ecuaciones diferenciales | |
| FRU | $FRU(t + \Delta t) = FRU(t) + COM(t) * \Delta t - PRO(t) * \Delta t$ |
| PUL | $PUL(t + \Delta t) = PUL(t) + OBT(t) * \Delta t - VEP(t) * \Delta t$ |
| RES | $RES(t + \Delta t) = RES(t) + GEN(t) * \Delta t - VEP(t) * \Delta t$ |
| MAQ | $MAQ(t + \Delta t) = MAQ(t) + INS(t) * \Delta t - DET(t) * \Delta t$ |
| DIN | $DIN(t + \Delta t) = DIN(t) + ING(t) * \Delta t - EGR(t) * \Delta t$ |
| Ecuaciones auxiliares | |
| COM | $Si (MAQ(t) \geq IMP(t)) \text{ entonces}$ $COM(t) = \text{mínimo}((MAQ(t) * CPF(t) * CPA(t)) - FRU(t); DIN(t)/PCF(t))$ $\text{de lo contrario } COM(t) = 0$ |
| PRO | $PRO(t) = \text{mínimo}((MAQ(t) * CPF(t)); FRU(t))$ |
| OBT | $OBT(t) = PRO(t) * TAF(t)$ |
| VEP | $VEP(t) = PUL(t)$ |
| GEN | $GEN(t) = PRO(t) * TRF(t)$ |
| VER | $VER(t) = RES(t)$ |
| INS | $INS(t) = \text{mínimo}(CIM(t); MMP(t) - MAQ(t); DIN(t)/PIM(t))$ |
| DET | $DET(t) = MAQ(t)/TVU(t)$ |
| ING | $ING(t) = VEP(t) * PVP(t) + VER(t) * PVR(t)$ |
| EGR | $EGR(t) = \text{mínimo}(COM(t) * PCF(t) + INS(t) * PIM(t); DIN(t))$ |

6.2.4 Simulación

El modelamiento con Dinámica de Sistemas en este libro no tiene como propósito primordial la simulación del sistema, sino la provisión de un modelo base matemáticamente consistente, que mediante un método sistemático pueda ser transformado en varios de los modelos usuales

en el proceso de desarrollo de software. Sin embargo se incluye esta sección, por cuanto los resultados pueden ser analizados para verificar si el comportamiento simulado produce indicios de la consistencia del modelo. Para esta simulación se mantiene el carácter genérico de los sustantivos **maquinaria, fruta, pulpa y residuos**, es decir, se simula suponiendo que la empresa procesa un solo tipo de fruta con un solo tipo de maquinaria, que se obtiene una sola clase de pulpa y se genera una única clase de residuos. La Tabla 5.5 muestra los valores iniciales de los sustantivos y los valores permanentes de los parámetros utilizados en la simulación.

Durante los primeros periodos la maquinaria crece hasta alcanzar el nivel requerido para operar, momento en el cual la instalación decae hasta el mínimo suficiente para reemplazar la maquinaria a medida que se deteriora, como se muestra en la Figura 4.6.

Tabla 6.5 Condiciones iniciales de simulación

| Elemento | Valor inicial |
|--|-----------------------|
| Condiciones iniciales | |
| Fruta almacenada [Kg_f] | $FRU(0) = 0$ |
| Pulpa almacenada [Kg_p] | $PUL(0) = 0$ |
| Residuos almacenados [Kg_r] | $RES(0) = 0$ |
| Maquinaria [u_m] | $INF(0) = 0$ |
| Dinero [\\$] | $DIN(0) = 32'000.000$ |
| Parámetros | |
| Capacidad de procesamiento de fruta [$Kg_f/(u_i*t)$] | $CPF(t) = 100$ |
| Cantidad de periodos de almacenamiento [] | $CPA(t) = 5$ |
| Precio de compra de fruta [\$/ Kg_f] | $PCF(t) = 1.000$ |
| Maquinaria mínima para producción [u_m] | $MMP(t) = 20$ |
| Tasa de aprovechamiento de fruta [Kg_p/Kg_f] | $TAF(t) = 0,60$ |
| Precio de venta de pulpa [\$/ Kg_p] | $PVP(t) = 1.750$ |
| Tasa residual de fruta [Kg_r/Kg_f] | $TRF(t) = 0,40$ |
| Precio de venta de residuos [\$/ Kg_r] | $PVR(t) = 250$ |
| Capacidad de instalación de maquinaria [u_m/t] | $CIM(t) = 0,4$ |
| Precio de instalación de maquinaria [\$/ u_i] | $PIM(t) = 1'000.000$ |
| Tiempo medio de vida útil de maquinaria [t] | $TVU(t) = 720$ |

El comportamiento de la maquinaria en la Figura 4.6 parece normal. Sin embargo, la Figura 6.10 muestra que nunca ocurre una compra de fruta, y por tanto no hay procesamiento que finalmente genere ingresos. El dinero no se incrementa a lo largo de la simulación, por el contrario, se sigue manteniendo un egreso bajo pero continuo, como muestra la Figura 6.11.

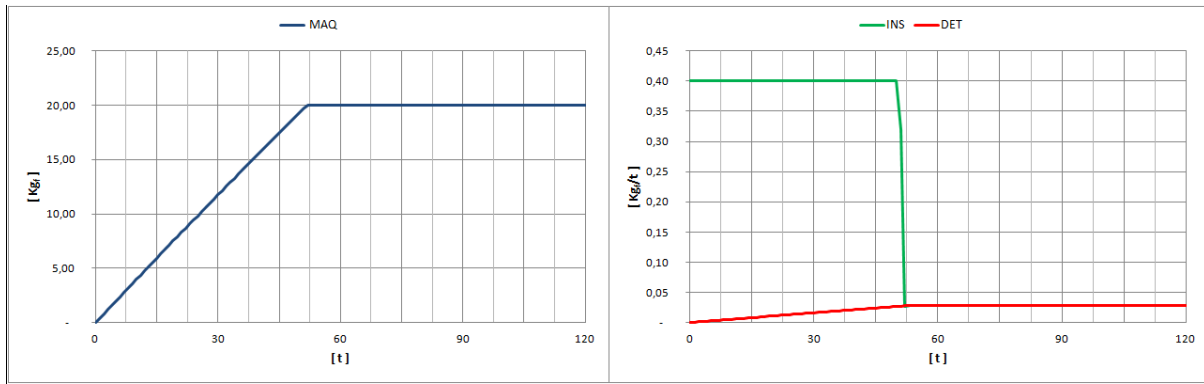


Figura 6.9 Comportamiento simulado de la maquinaria

En la construcción de este modelo el análisis del comportamiento anómalo del dinero condujo a la revisión de los datos de simulación, para explicar dos cosas: ¿por qué se mantienen los egresos?; ¿y por qué nunca se compra fruta para iniciar el proceso de producción?

Al revisar los datos se encontró que por el deterioro lineal de la **maquinaria**, esta nunca alcanzaba a permanecer en la cantidad de **maquinaria mínima para producir**. En efecto el valor máximo y que se vuelve constante para **MAQ** en la Figura 4.6 es de 19,97 y según la Tabla 5.5 el valor de **MMP** es 20.

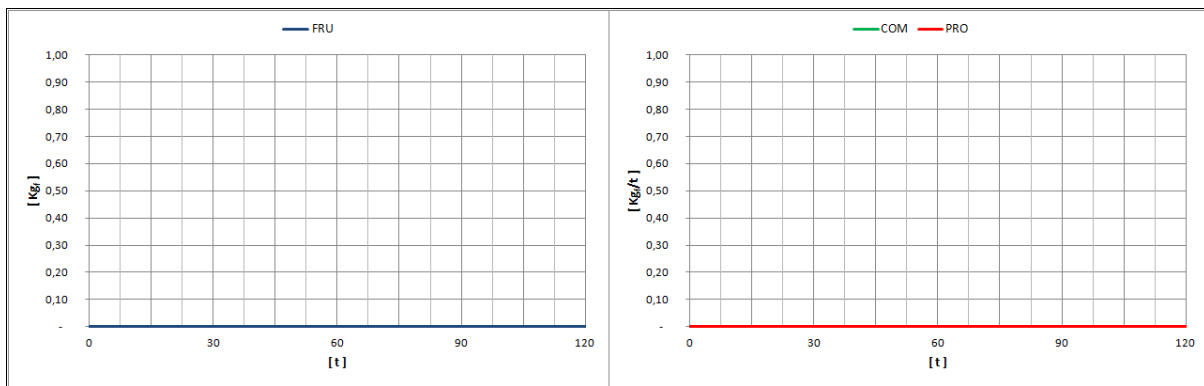


Figura 6.10 Comportamiento anómalo de la fruta

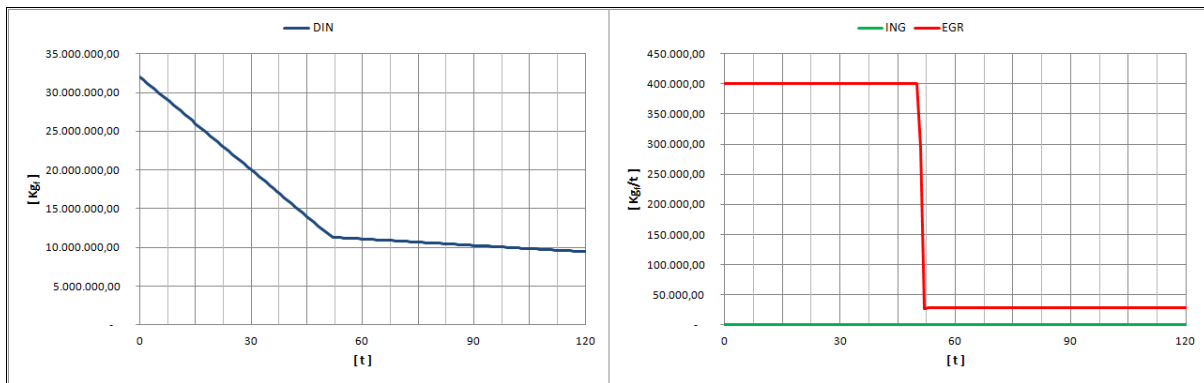


Figura 6.11 Comportamiento anómalo del dinero

Como se puede ver en la ecuación

$$Si (MAQ(t) \geq MMP(t)) \text{ entonces}$$

$$COM(t) = \text{mínimo}((MAQ(t) * CPF(t) * CPA(t)) - FRU(t); DIN(t)/PCF(t))$$

$$\text{de lo contrario } COM(t) = 0$$

si la **MAQ(t)** al menos no iguala a **MMP(t)** la compra permanece en cero (0). El déficit de maquinaria ejerce la acción limitante ya explicada durante la construcción de la ecuación.

El por qué de esta situación se debe a una imprecisión en la ecuación de **instalación de maquinaria**.

$$INS(t) = \text{mínimo}(CIM(t); MMP(t) - MAQ(t); DIN(t)/PIM(t))$$

En su versión actual, el segundo argumento en la función **mínimo()** limita la instalación de maquinaria a la que haga falta para alcanzar la cantidad necesaria para entrar en producción, dada por **MMP(t)-MAQ(t)**. Esto resulta matemáticamente insuficiente, ya que se requiere instalar maquinaria suficiente para compensar al menos el deterioro que ocurrirá en cada periodo.

$$INS(t) = \text{mínimo}(CIM(t); (1 + 1/TVU(t)) * MMP(t) - MAQ(t); DIN(t)/PIM(t))$$

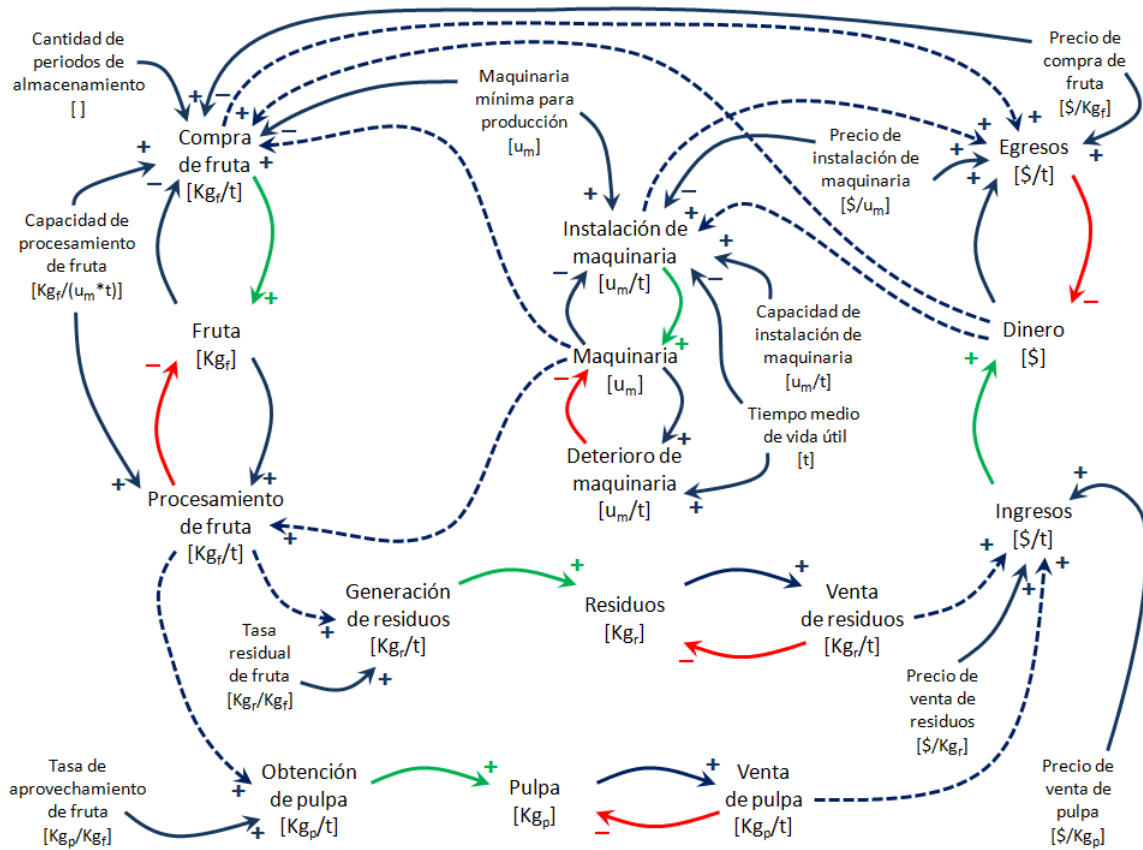


Figura 6.12 Diagrama de influencias modificado a partir de resultados de simulación

La corrección consiste en multiplicar el elemento $MMP(t)$ por un factor igual a uno (1) más la fracción de deterioro esperado para un periodo, dada por $1/TVU(t)$, siendo TVU el tiempo medio de vida útil de la maquinaria, parámetro que ya había sido incorporado al modelo desde la construcción de la ecuación de **deterioro de maquinaria**. Esta mejora en la ecuación conlleva una actualización, mínima pero necesaria, en el diagrama de influencias del modelo enriquecido del sistema, que se presenta en la Figura 6.12.

Se incluyó una nueva influencia en el diagrama, que va desde el parámetro **tiempo medio de vida útil** hasta **instalación de maquinaria**, con signo “-” puesto que de acuerdo a la ecuación mejorada de **INS**, a mayor tiempo de vida útil es menor el deterioro que se debe compensar en la **instalación de maquinaria** cada periodo.

Implementada la ecuación corregida en la simulación, los resultados obtenidos con los mismos datos de la Tabla 5.5 ya no tienen anomalías. Una vez la maquinaria llega a su nivel mínimo para operar, que ahora sí se estabiliza en 20, ocurre la compra de fruta que alcanza un primer pico alto, perturbación que luego se equilibra con el procesamiento manteniendo una existencia de fruta estable, como se presenta en la Figura 6.13.

Los inventarios de pulpa y residuos se mantienen estables, como era de esperar dado que según los supuestos del modelo estos dos productos se venden tan pronto como son obtenidos o generados, como muestran la Figura 6.14 y la Figura 6.15 respectivamente.

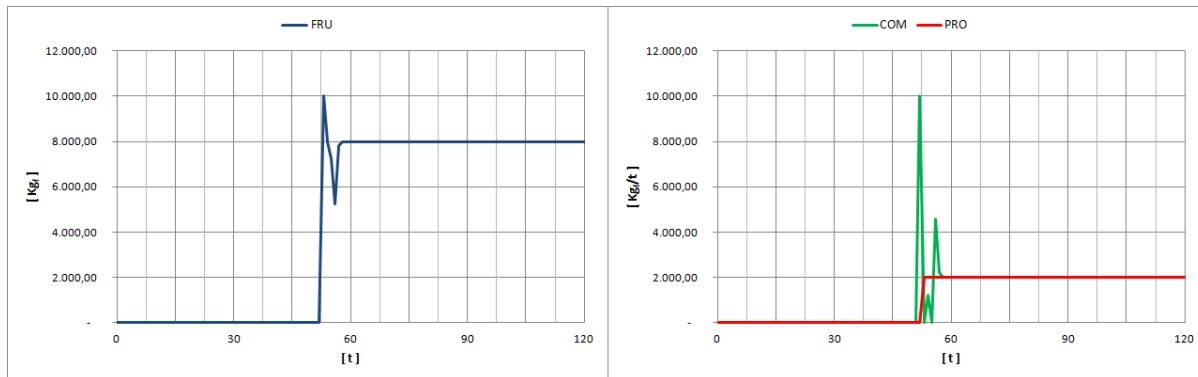


Figura 6.13 Comportamiento simulado de la fruta

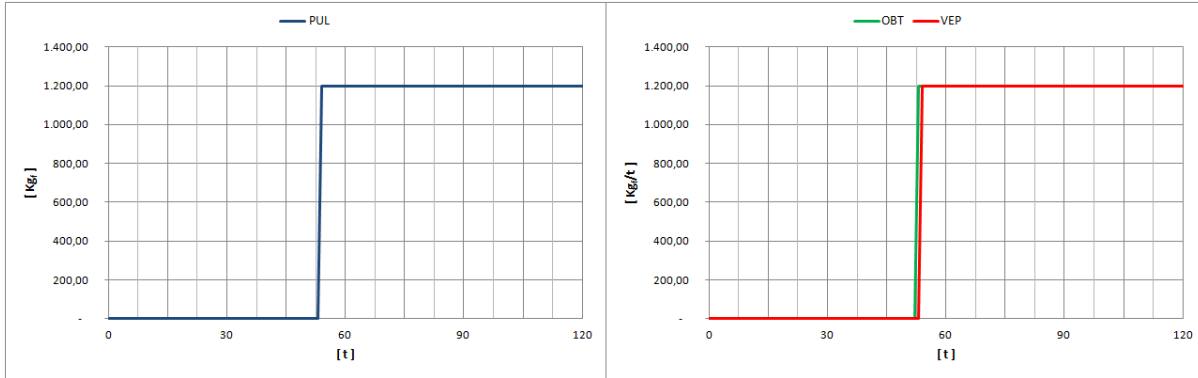


Figura 6.14 Comportamiento simulado de la pulpa

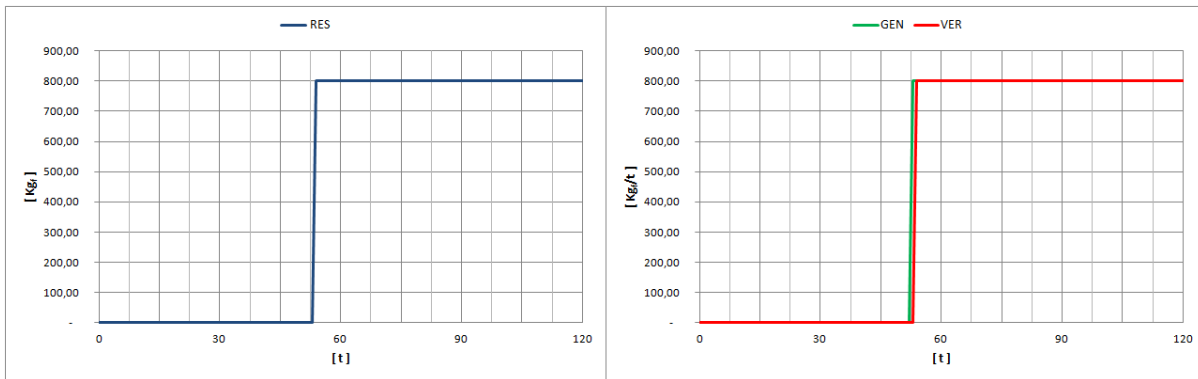


Figura 6.15 Comportamiento simulado de los residuos

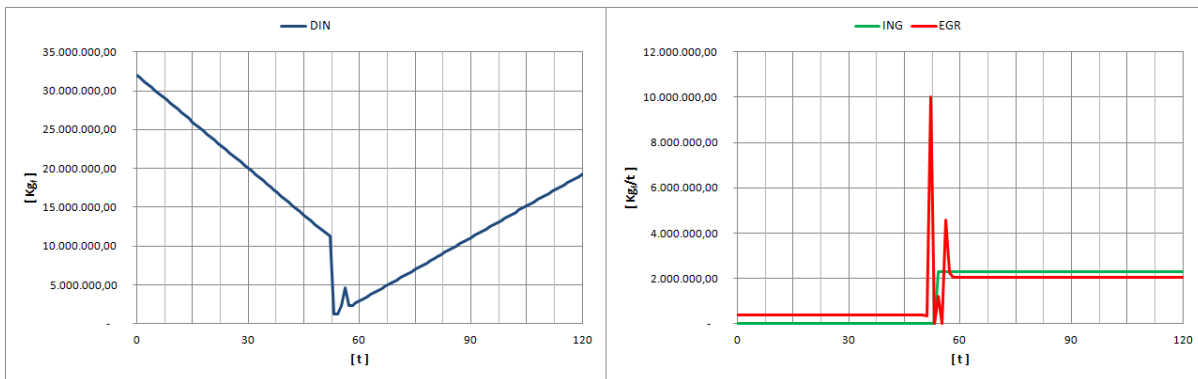


Figura 6.16 Comportamiento simulado del dinero

Finalmente, la Figura 6.16 muestra el diagrama de simulación del dinero, que disminuye linealmente durante los periodos que tarda la instalación de la maquinaria, cuando solo se ocasionan egresos. A continuación hay un pico de egresos debidos a la compra inicial de fruta que produce una caída abrupta del dinero. En la última fase, los ingresos por ventas de pulpa y residuos se sitúan por encima de los egresos por compra de fruta e instalación de maquinaria, razón por la cual la cantidad de dinero toma una tendencia de crecimiento.

Probar con escenarios distintos puede proveer una oportunidad de aprendizaje sobre el sistema y eventualmente genera mejoras en el modelo como ya se ha visto. Dado que aún falta

aplicar la metodología para la transformación del diagrama de influencias en modelos del proceso de desarrollo de software, y que no es propósito del capítulo conseguir un software completamente terminado, solo se incluye una última prueba de simulación para analizar la consistencia del modelo: ¿qué ocurriría si los precios de venta de pulpa y de residuos fueran más bajos?

Como muestra la Figura 6.17, con precios insuficientes, $PVP(t)=\$1.450$ y $PVR(t)=\$250$, las existencias de fruta descienden constantemente luego del inicio de la producción, ya que los ingresos se mantienen levemente por debajo de los ingresos y limitan la compra. Dicha baja de existencias hacia el periodo 90 de la simulación conduce a una disminución de los productos pulpa y residuos, con lo que poco después del periodo 90 el dinero comienza una fase de disminución hasta el final de la simulación.

Tabla 6.6 Condiciones iniciales de simulación con precios de venta insuficientes

| Elemento | Valor inicial |
|--|-----------------------|
| Condiciones iniciales | |
| Fruta almacenada [Kg _f] | $FRU(0) = 0$ |
| Pulpa almacenada [Kg _p] | $PUL(0) = 0$ |
| Residuos almacenados [Kg _r] | $RES(0) = 0$ |
| Maquinaria [u _m] | $INF(0) = 0$ |
| Dinero [\$] | $DIN(0) = 32'000.000$ |
| Parámetros | |
| Capacidad de procesamiento de fruta [Kg _f /(u _i *t)] | $CPF(t) = 100$ |
| Cantidad de periodos de almacenamiento [] | $CPA(t) = 5$ |
| Precio de compra de fruta [\$/Kg _f] | $PCF(t) = 1.000$ |
| Maquinaria mínima para producción [u _m] | $MMP(t) = 20$ |
| Tasa de aprovechamiento de fruta [Kg _p /Kg _f] | $TAF(t) = 0,60$ |
| Precio de venta de pulpa [\$/Kg _p] | $PVP(t) = 1.450$ |
| Tasa residual de fruta [Kg _r /Kg _f] | $TRF(t) = 0,40$ |
| Precio de venta de residuos [\$/Kg _r] | $PVR(t) = 150$ |
| Capacidad de instalación de maquinaria [u _m /t] | $CIM(t) = 0,4$ |
| Precio de instalación de maquinaria [\$/u _i] | $PIM(t) = 1'000.000$ |
| Tiempo medio de vida útil de maquinaria [t] | $TVU(t) = 720$ |

Al igual que la argumentación para la construcción del modelo matemático, la interpretación de los resultados de simulación ya no con fines con los fines didácticos y metodológicos de este capítulo, sino como trabajo de un grupo interdisciplinario, contribuyen a la ampliación del diagrama de influencias que a partir de la siguiente sección y en el estado de avance actual será transformado en modelos del proceso de desarrollo de software.

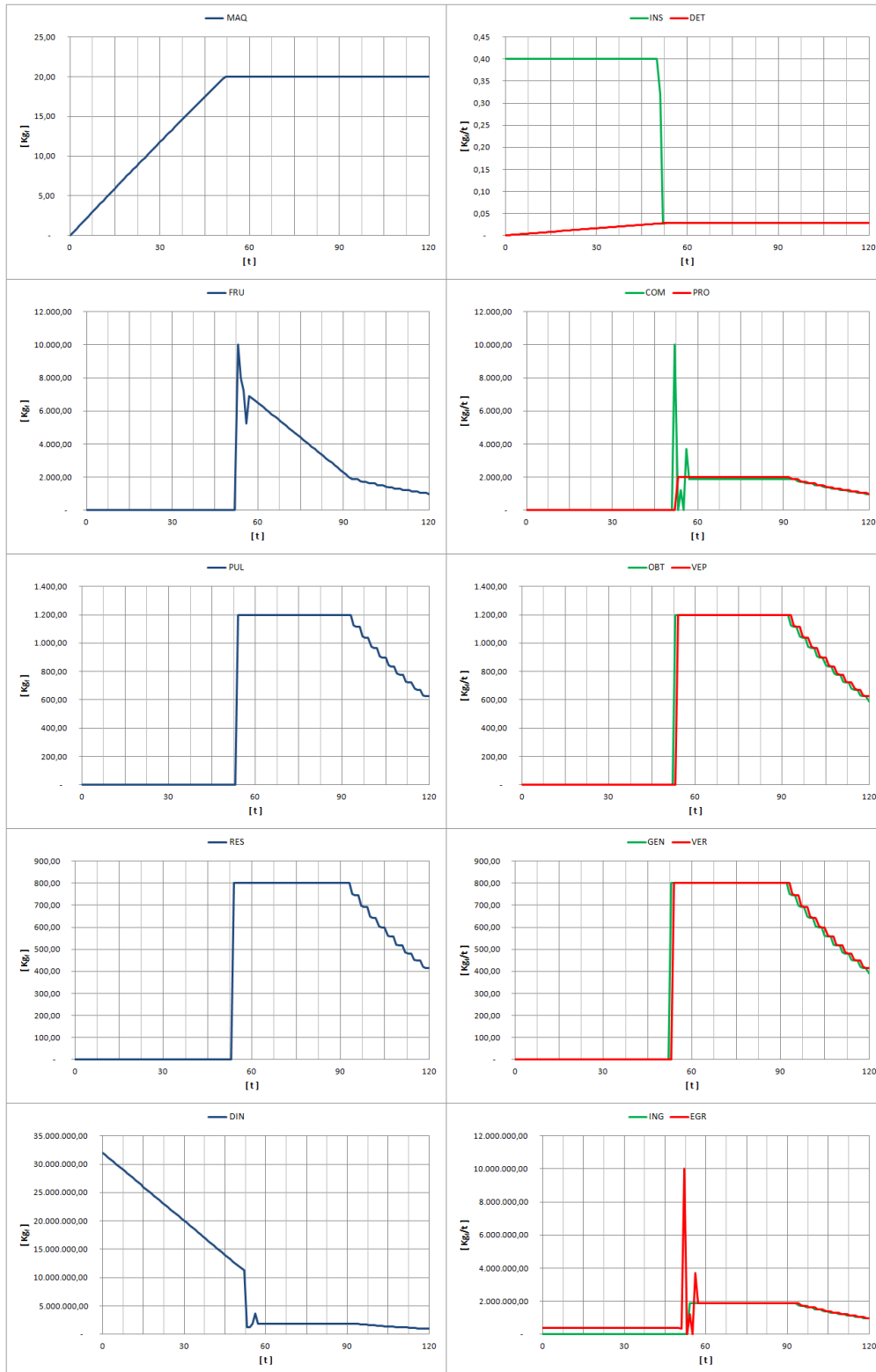


Figura 6.17 Simulación con precio de venta de pulpa y de residuos insuficiente

6.3 Transformación del modelo de Dinámica de Sistemas

El primer paso para transformar el modelo es identificar los subsistemas en el diagrama de influencias de la estructura básica del sistema, es decir, las áreas del modelo conformadas por sustantivos y verbos con unidades compatibles.

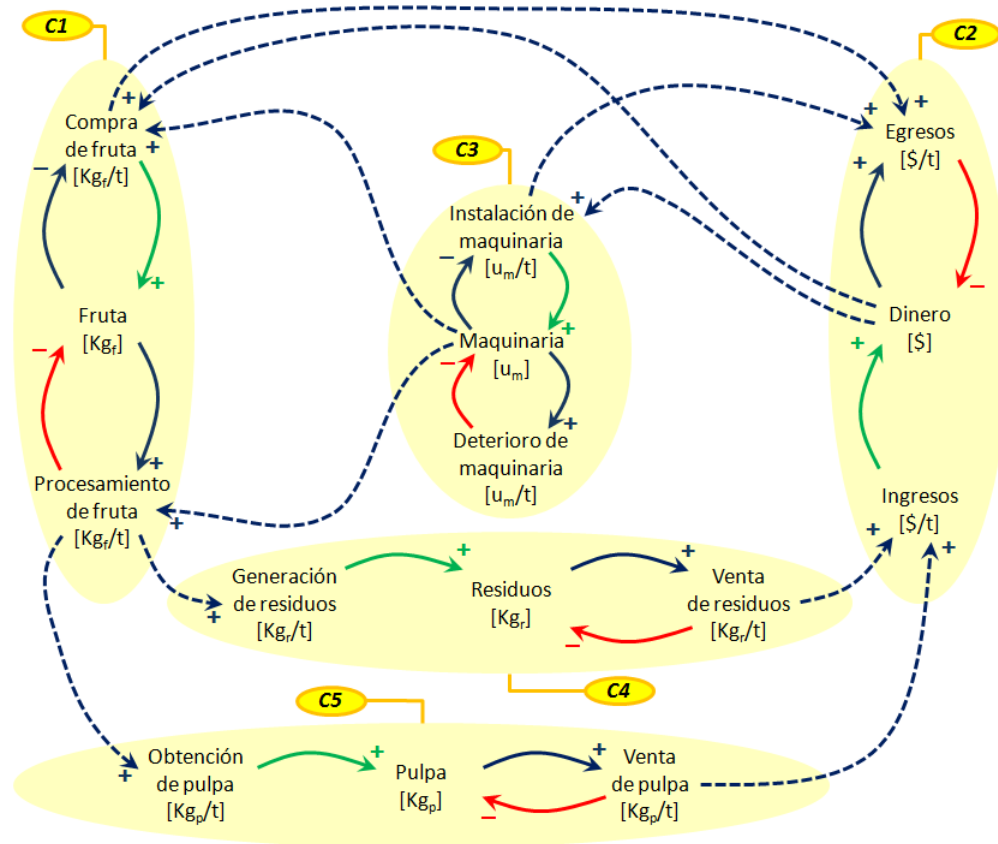


Figura 6.18 Subsistemas de la estructura básica del sistema para determinar clases

6.3.1 Diagrama de dominio

Cada subsistema se ha constituido en una clase, tomando el sustantivo como nombre. Aún sin haber realizado una determinación formal de requerimientos, se puede proponer un sistema de información para una empresa dedicada al procesamiento de fruta - desde luego, con las limitaciones que por ahora tiene este modelo cuyo fin es didáctico - basado en las cinco clases del diagrama de dominio de la Figura 6.19: **Fruta** (1), **Fondo** (2), **Maquinaria** (3), **Pulpa** (4) y **Residuo** (5). En el caso del sustantivo **dinero** del diagrama de influencias, para el diagrama de dominio se decidió cambiar el nombre por el de **Fondo**, pensando en que al referirse a las instancias de esta clase parece más apropiado hablar de los distintos fondos o rubros en que se gestiona el dinero.

Una vez establecidas las clases hay que determinar las dependencias entre estas, a partir de las relaciones existentes entre los subsistemas en el diagrama de influencias. Las influencias que llegan a los verbos de un subsistema B desde un subsistema A, prioritariamente las que

proviene de un sustantivo, indican una dependencia de A hacia B, es decir, que A depende de B, ya que uno o varios objetos de la clase B son utilizados como parámetros de uno o varios métodos de la clase A.

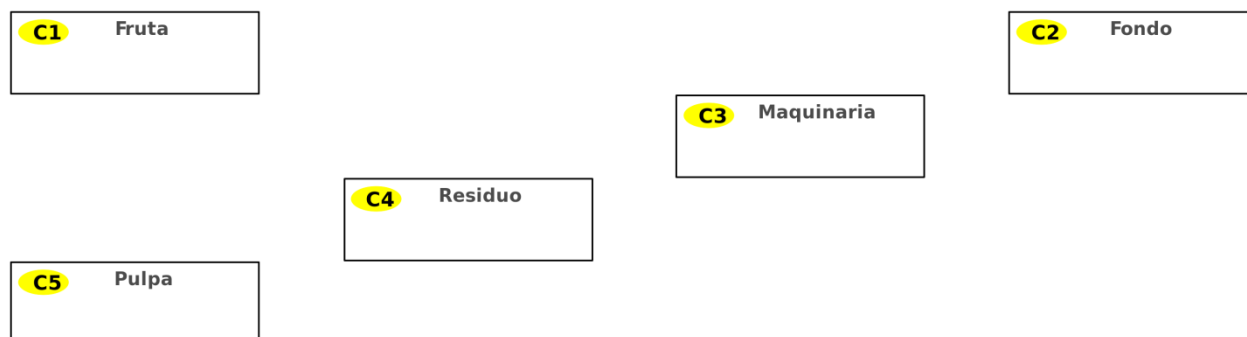


Figura 6.19 Diagrama de dominio – Clases del sistema

Con las relaciones indicadas en la Figura 6.20 mediante rectángulos numerados de acuerdo a los subsistemas involucrados en la relación, se determinan las dependencias entre clases correspondientes en el diagrama de dominio de la Figura 6.21.

La clase **Fruta** depende de la clase **Fondo** (1-2), ya que el verbo **compra de fruta** recibe influencia del sustantivo **dinero**, como quedó también expresado en la ecuación auxiliar del verbo. A su vez el verbo **egresos** recibe influencia del verbo **compra de fruta**, pero para la determinación de la dependencia entre clases se da prioridad a la influencia anterior por provenir de un sustantivo.

El mismo argumento se aplica para establecer la dependencia entre las clases **Maquinaria** y **Fondo** (2-3), a partir de la influencia que recibe el verbo **instalación de maquinaria** desde el sustantivo **Dinero**.

Los verbos **compra de fruta** y **procesamiento de fruta** reciben influencia del sustantivo **maquinaria**, con lo cual se configura la dependencia entre las clases **Fruta** y **Maquinaria** (1-3). Los verbos **obtención de pulpa** y **generación de residuos** reciben influencia del verbo **procesamiento de fruta**. A partir de esto se determina la dependencia entre las clases **Fruta** y **Residuo** (1-4), y entre las clases **Fruta** y **Pulpa** (1-5) respectivamente. Por último el verbo **egresos** recibe influencia de los verbos **venta de residuos** y **venta de pulpa**, que definen en ese orden las dependencias entre las clases **Fondo** y **Residuos** (2-4), y entre las clases **Fondo** y **Pulpa** (2-5).

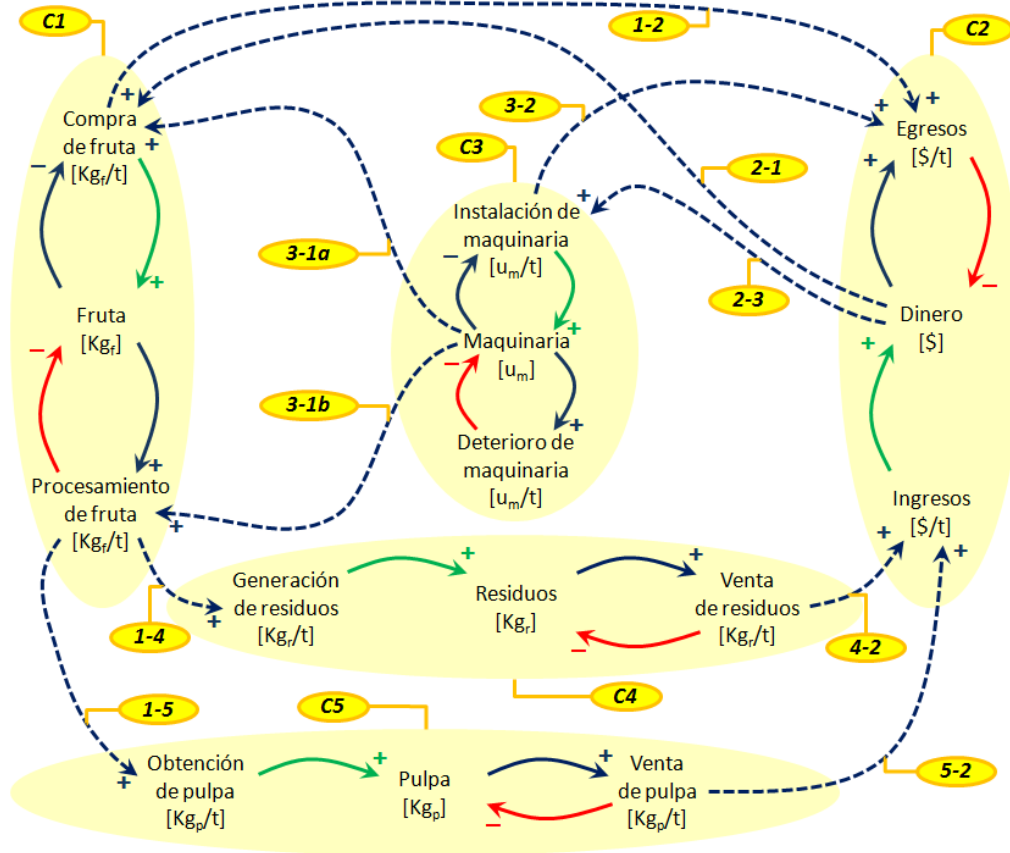


Figura 6.20 Relaciones entre subsistemas para determinar dependencias

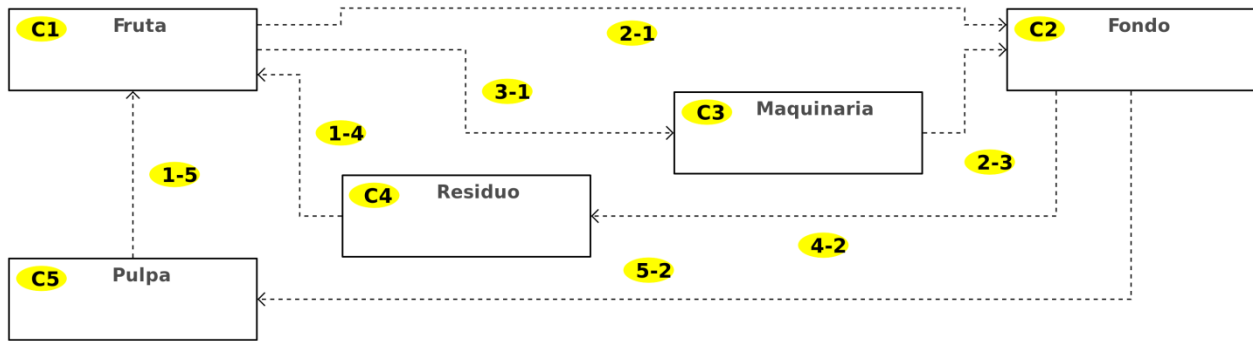


Figura 6.21 Diagrama de dominio – Dependencias entre clases

6.3.2 Diagrama de clases

Los sustantivos y verbos de cada uno de los subsistemas se incorporarán como los primeros atributos y los métodos en el diagrama de clases. En el diagrama de la Figura 6.22 han sido señalados todos los verbos y sustantivos con rótulos para permitir su posterior ubicación en el diagrama de clases. Los atributos *codigo* y *nombre* no provienen del modelamiento matemático, sino de la necesidad de identificar y denominar instancias de cada clase.

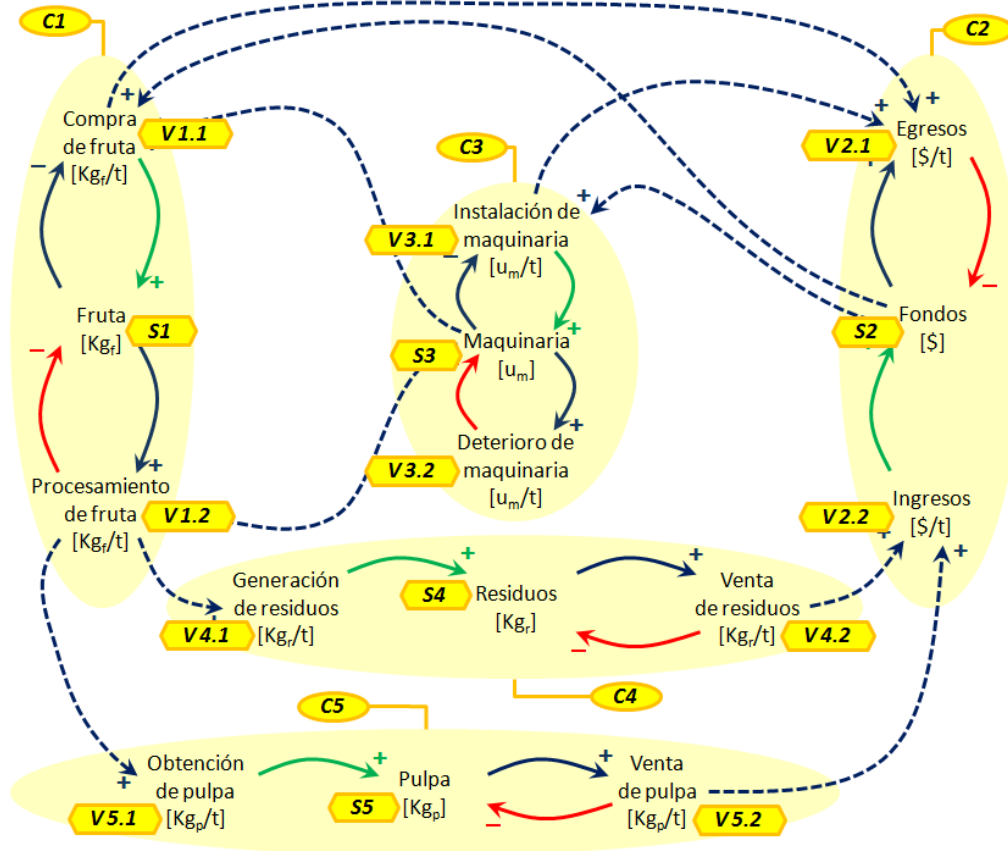


Figura 6.22 Sustantivos y verbos de la estructura básica del sistema

El sustantivo del diagrama de influencias que le da nombre a cada clase también se constituye en un atributo numérico de acumulación en la misma, denominado de forma genérica **cantidad**. Los verbos que influyen a cada sustantivo se incorporan a la respectiva clase como métodos. El resultado de este paso de la transformación se muestra en la Figura 6.23.

Para los restantes atributos se recurre al diagrama de influencias enriquecido del sistema, del cual se toman todos los parámetros, que se incorporan como atributos a las clases de acuerdo a sus unidades de medida. Los parámetros adimensionales, o aquellos que se miden en la unidad de tiempo directa o inversamente, se asignan a la misma clase a que pertenece el verbo al cual afectan.

En caso de unidades complejas, se toma la decisión a partir de la cardinalidad de la relación entre clases. En la Figura 6.24 han sido señalados los parámetros para facilitar su ubicación en el diagrama de la Figura 6.25.

El parámetro **cantidad de periodos de almacenamiento** (1), que es adimensional, se incorpora como atributo **periodosAlmacenamiento** a la clase **Fruta** por cuanto influye en el verbo **compra de fruta**.

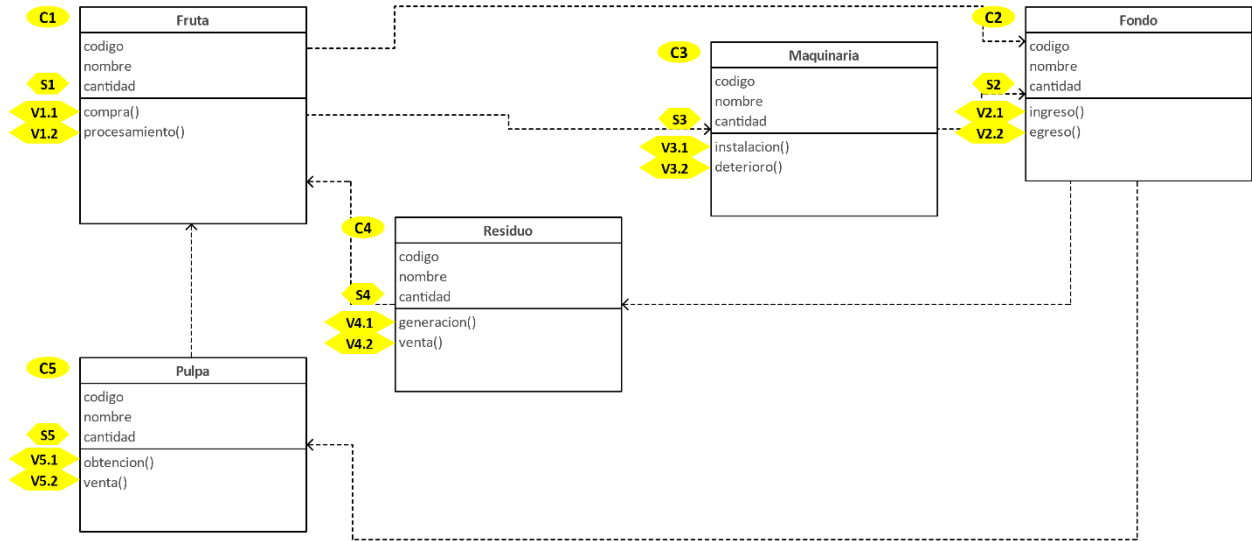


Figura 6.23 Diagrama de clases – Primera aproximación

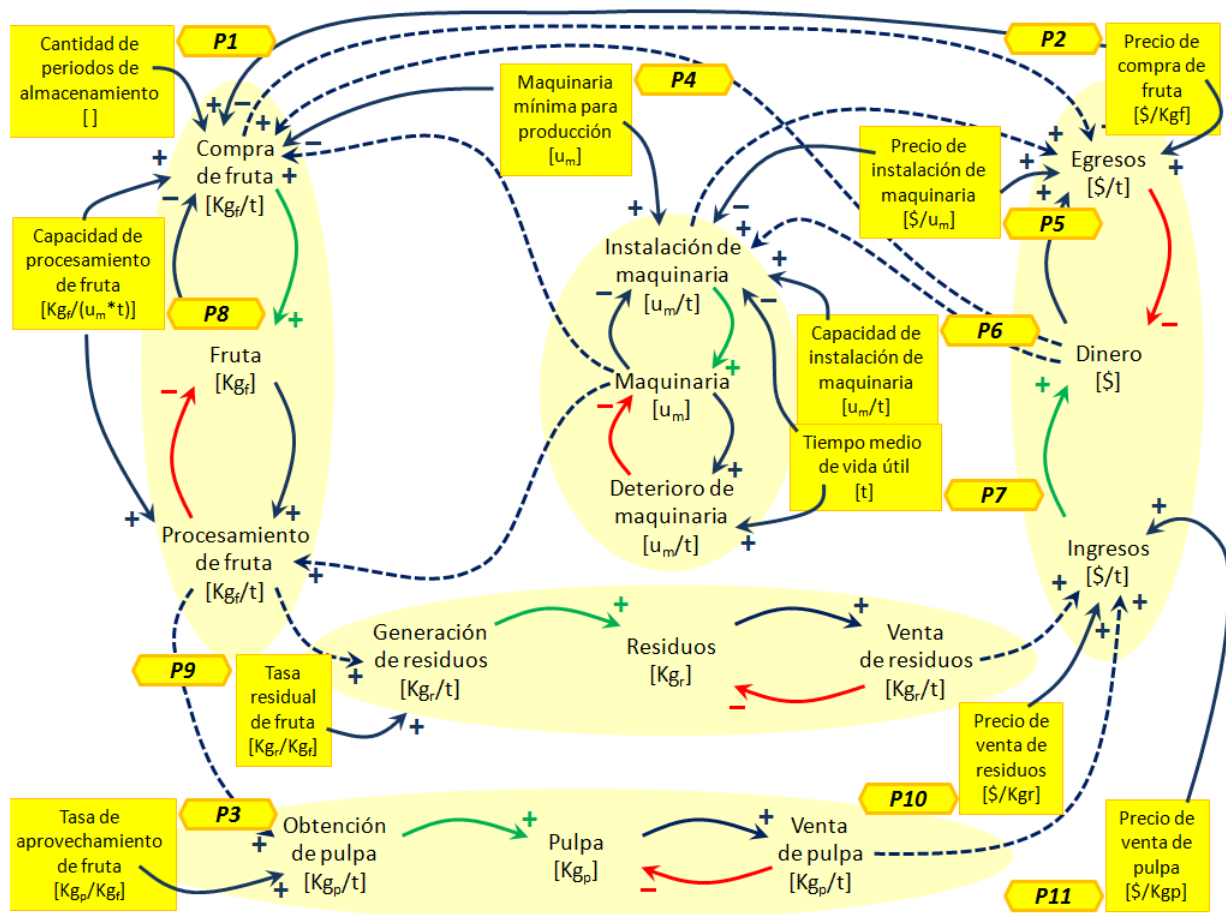


Figura 6.24 Parámetros de la estructura enriquecida del sistema

El **precio de compra de fruta** (2) se mide en $[\$/Kg_f]$. La unidad monetaria podría ser asociada a la clase **Fondo**; sin embargo, considerando que probablemente haya una sola instancia de dicha clase vinculada con todas las instancias de la clase **Fruta**, es más factible que se trate de una característica de cada instancia de dicha clase, por lo que este parámetro se incorpora a la clase **Fruta** como el atributo **precioCompra**.

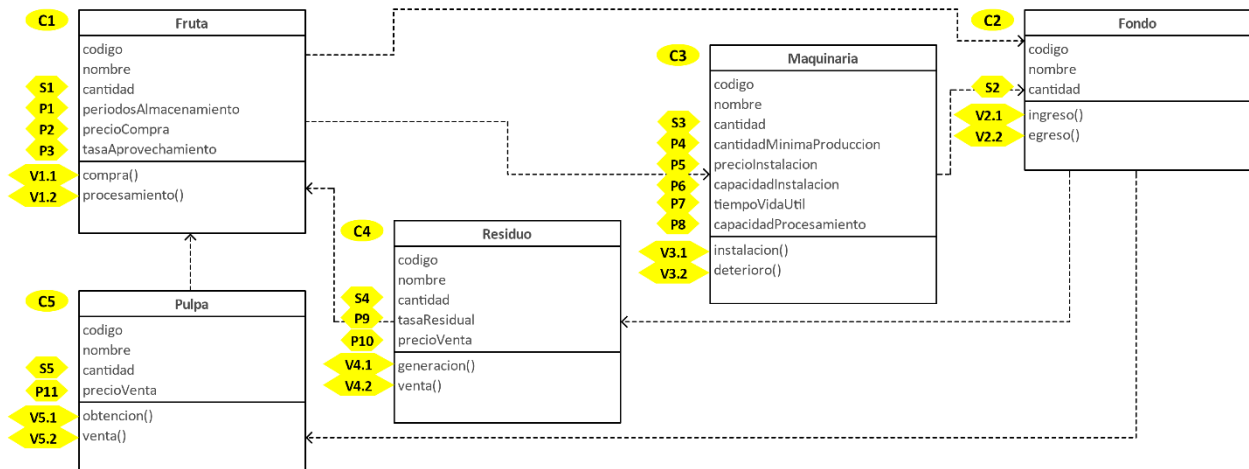


Figura 6.25 Diagrama de clases

La **tasa de aprovechamiento** (3) tiene como unidad de medida $[Kg_p/Kg_f]$. Aunque $[Kg_p]$ es la unidad propia de la clase **Pulpa**, a cada instancia de la clase **Fruta** le corresponde una sola de la clase **Pulpa**, y se puede asumir entonces como una característica propia de cada objeto de la clase **Fruta**. Por esta razón dicha tasa se incluye como el atributo **tasaAprovechamiento** en esta clase.

En la clase **Maquinaria**, el parámetro **maquinaria mínima para producción** (4) se constituye en el atributo **cantidadMinimaProduccion** por afinidad de la unidad de medida $[U_m]$. Acerca del **precio de instalación de maquinaria** (5), la argumentación es similar a la del **precio de compra de fruta** descrita anteriormente, y se incluye como el atributo **precioInstalacion**. La **capacidad de instalación de maquinaria** (6) y el **tiempo medio de vida útil** (7) también se incorporan a esta clase, el primero por afinidad de unidad de medida y el segundo por estar expresado en la unidad de tiempo, constituyéndose en los atributos **capacidadInstalacion** y **tiempoVidaUtil** respectivamente.

El parámetro **capacidad de procesamiento de fruta** (8), que se expresa en $[Kg_f/U_m]$, requiere la consideración de las instancias de las clases. Resulta válido suponer que para el procesamiento completo de cada fruta se requieren diferentes máquinas, y que cada una de estas se utiliza para el procesamiento de varias de aquellas. Entonces, el mencionado parámetro corresponde a una característica aplicable para cada máquina en función de la fruta que se procesa, por lo que se agrega como el atributo **capacidadProcesamiento** en la clase **Maquinaria**.

Una argumentación similar a la anterior justifica que el parámetro **tasa residual de fruta** (9), medido en $[Kg_r/Kg_f]$, haya sido incorporado a la clase **Residuo** como el atributo **tasaResidual**. En

efecto, diferentes instancias de la clase **Residuo**, como por ejemplo cáscara, semilla o bagazo, constituyen diferentes fracciones de cada instancia de la clase **Fruta**.

Por último, el **precio de venta de residuos** (10) y el **precio de venta de pulpa** (11), se constituyen en el atributo **precioVenta** para las clases **Pulpa** y **Residuos**, por una explicación similar a la que se presentó antes con respecto al precio de compra de la fruta.

No está de más hacer de nuevo una salvedad. Muchos aspectos del sistema real han sido omitidos en este modelo; no se ha tenido en cuenta que aparte de la fruta se requieren otros insumos; que la fruta podría disminuir por pérdidas y no solo por el procesamiento; estas y otras omisiones se hacen para mantener el caso dentro de su alcance didáctico.

También es pertinente recordar que no se pretende que este diseño sea visto como una versión final, sino como un insumo al que se le deben hacer todavía las mejoras que permitan las diferentes técnicas de optimización propias de la Ingeniería del Software, y que se salen del propósito de este capítulo y del libro.

6.3.3 Diagrama Entidad Relación

El último diagrama que se propone obtener mediante esta metodología como transformación del modelo con Dinámica de Sistemas es el diagrama Entidad Relación. La Figura 6.26 muestra el que se obtuvo para el presente caso, incluyendo los mismos rótulos con que se puede ubicar el elemento del diagrama de influencias de donde proviene cada entidad, relación o atributo.

Cada subsistema del diagrama de influencias de la estructura básica del sistema (ver Figura 6.18) da lugar a una entidad, a la cual se dan inicialmente los atributos **codigo** y **nombre**, que no provienen del modelo sino que se requieren para la identificación de instancias de cada entidad, como en su momento se propuso con cada clase. Con base en el sustantivo correspondiente se incluye también un atributo **cantidad**. Los verbos se incorporan como relaciones y como un atributo cantidad en sí mismas.

Es necesario resaltar en la estructura básica del sistema de la Figura 6.18 algunos verbos que ejercen influencia sobre otros en subsistemas diferentes. Por ejemplo, la **compra de fruta**, que depende de los sustantivos **fruta** y **maquinaria**, a su vez influye sobre el subsistema de dinero pero a través del verbo **egresos**. En el diagrama entidad relación corresponden a la relación **Compra**, pero tiene asociados los rótulos V1.1 y V2.1*, indicando que en esta relación confluyen los dos verbos ya mencionados, por lo que se le han incluido los atributos **cantidadComprada** y **valorEgreso**.

Lo mismo sucede con la relación **Procesamiento**, que aparece acompañada de los rótulos V1.2, V4.1* y V5.1*, dado que aquí confluyen los verbos **procesamiento de fruta**, **obtención de pulpa** y **generación de residuos**, de los cuales el primero ejerce influencia sobre los otros dos en la estructura básica del sistema. A esto obedece que la relación tenga tres atributos de cantidad: **cantidadProcesada**, **cantidadObtenida** y **cantidadGenerada**, que corresponden a kilogramos de fruta, pulpa y residuos respectivamente.

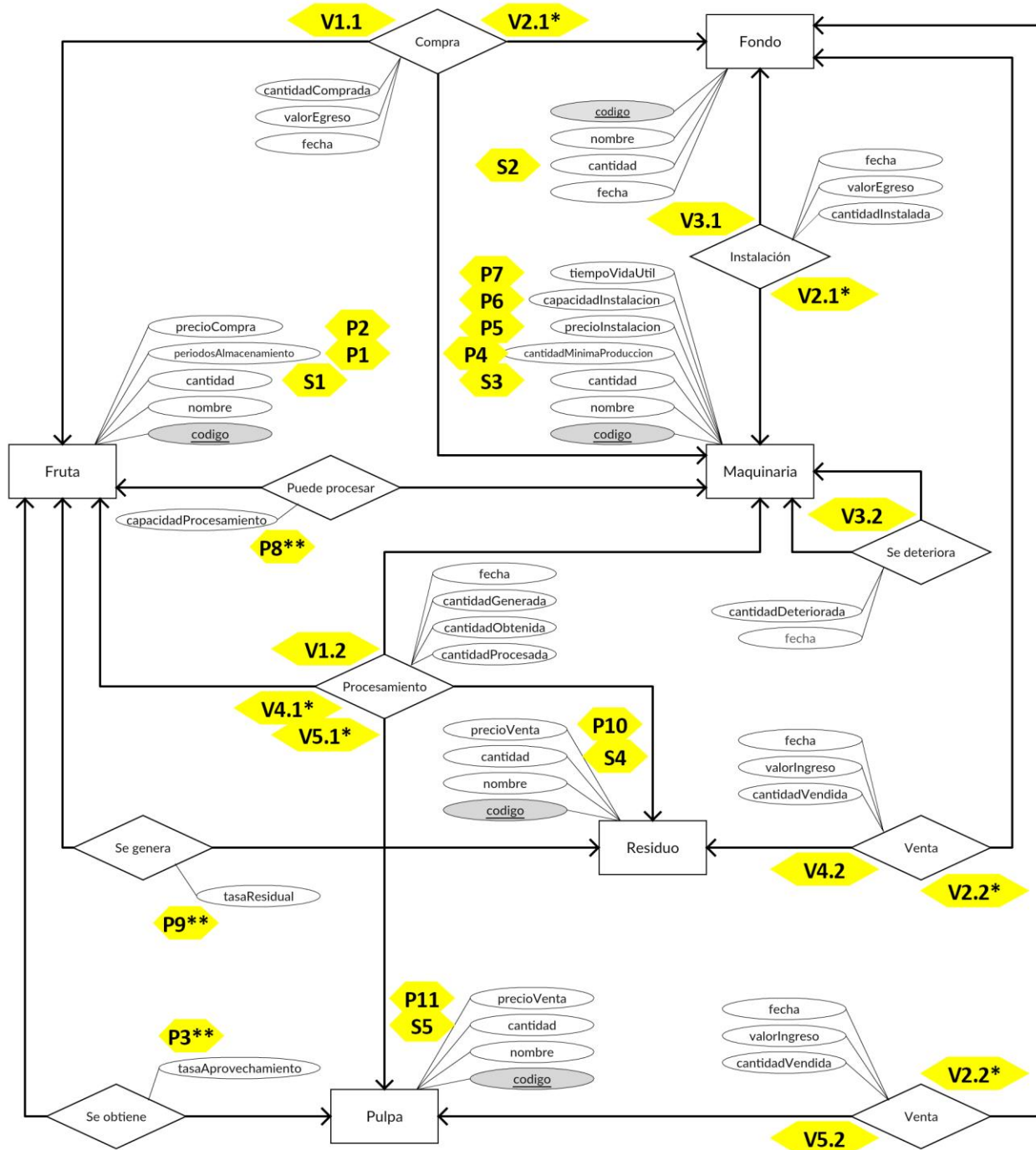


Figura 6.26 Diagrama entidad relación de la base de datos del sistema

6.4 Depuración y consideraciones finales

Solo se pretende llegar con Dinámica de Sistemas a una versión inicial robusta, que luego sea objeto de depuración por técnicas de Ingeniería del Software. Para el caso del diagrama entidad relación de la Figura 6.26, las relaciones de orden mayor que dos como **Compra** y **Procesamiento**, pueden ser modeladas de forma más conveniente con entidades nuevas, que

brindan un mejor manejo de la cardinalidad. Luego de este proceso se llegó al nuevo diagrama de la Figura 6.27.

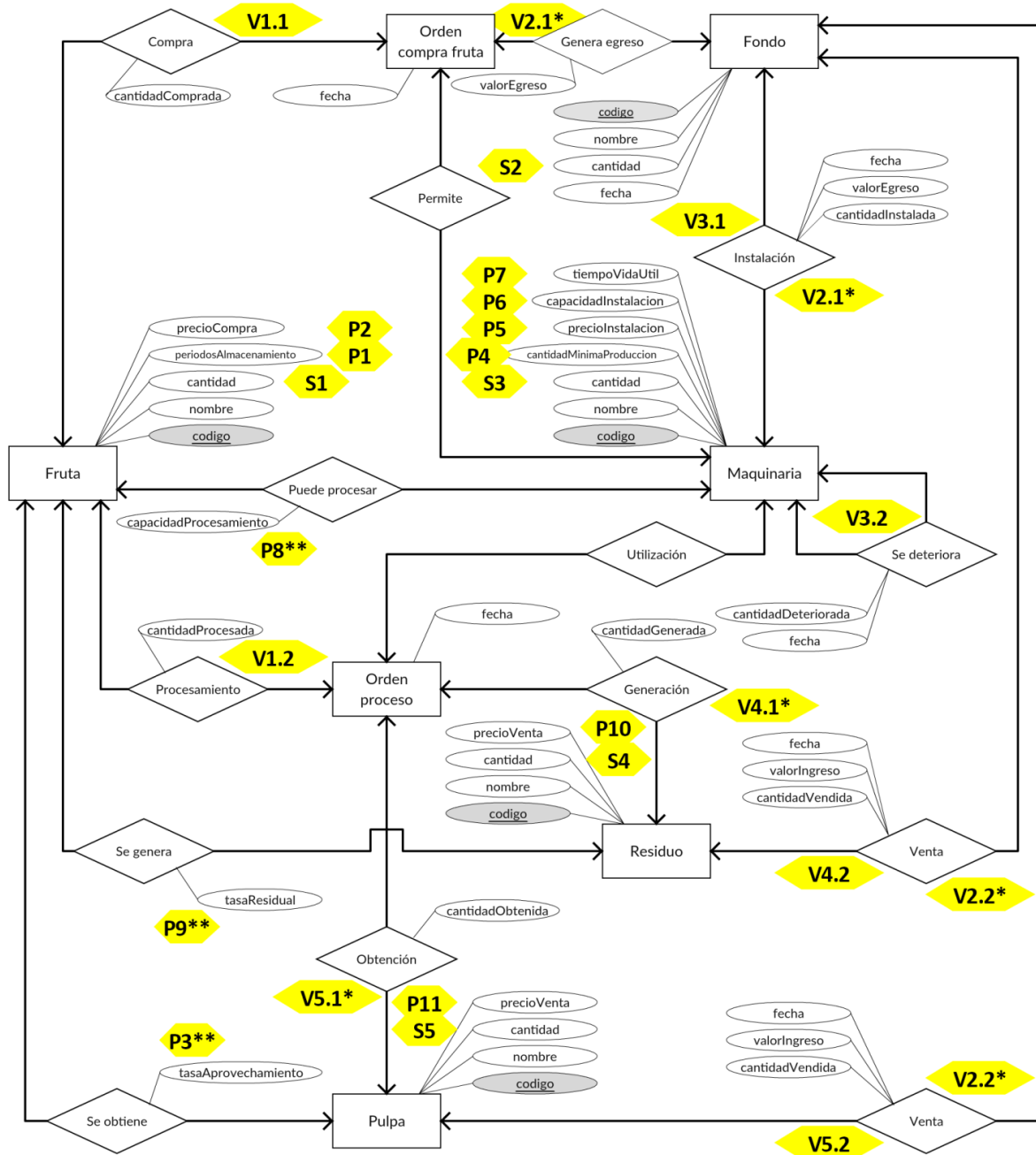


Figura 6.27 Diagrama entidad relación depurado del sistema

6.5 Implementación de prueba

El diagrama entidad relación depurado se transforma a su vez en el diagrama relacional de la Figura 6.28. El diccionario de datos simplificado en la Tabla 6.7, describe la base de datos propuesta.

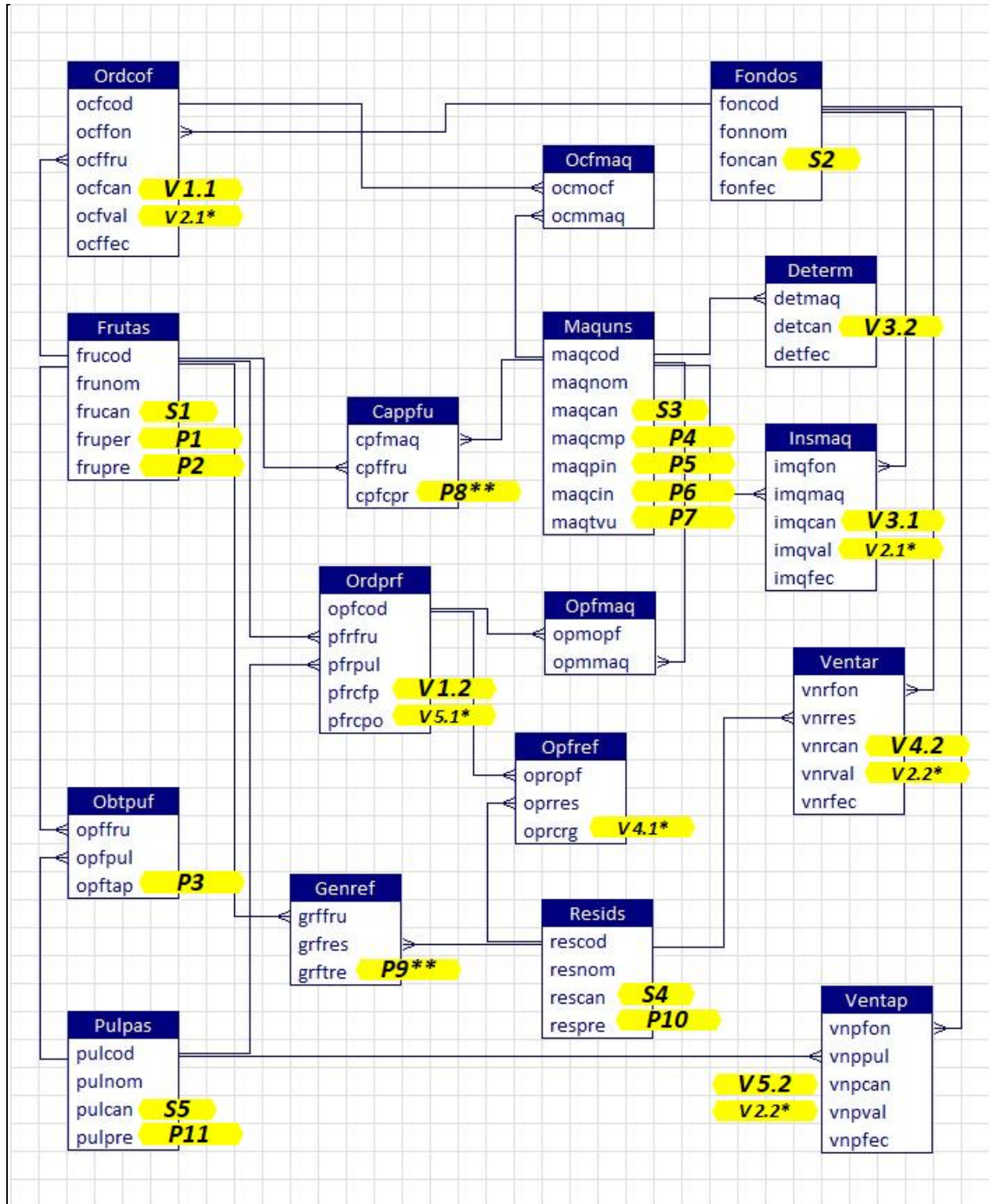


Figura 6.28 Diagrama relacional depurado del sistema

Tabla 6.7 Diccionario de datos de la base de datos del sistema

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|--------|--|----------|---|----------|------------|----------------------|
| Frutas | Relación de frutas | frucod | Código de la fruta | Primaria | | Autoincremental |
| | | frunom | Nombre de la fruta | | | Cadena de caracteres |
| | | frucan | Cantidad de fruta en existencia [Kg] | | | Número real |
| | | fruper | Cantidad de periodos de almacenamiento que soporta la fruta [día] | | | Número entero |
| | | frupre | Precio de compra de la fruta [\$/Kg] | | | Número real |
| Fondos | Relación de fondos o rubros con que se maneja el dinero | foncod | Código del fondo | Primaria | | Autoincremental |
| | | fonom | Nombre del fondo | | | Cadena de caracteres |
| | | foncan | Cantidad o saldo del fondo [\$] | | | Número real |
| | | fonfec | Fecha de registro del saldo | | | Fecha |
| Maquns | Relación de maquinaria para el procesamiento de fruta | maqcod | Código de la maquinaria | Primaria | | Autoincremental |
| | | maqnom | Nombre de la maquinaria | | | Cadena de caracteres |
| | | maqcan | Cantidad existente de la maquinaria | | | Número entero |
| | | maqcmp | Cantidad mínima de maquinaria para producción | | | Número entero |
| | | maqpin | Precio unitario de instalación [\$/Um] | | | Número real |
| | | maqcin | Capacidad de instalación de maquinaria [Um/día] | | | Número real |
| | | maqtvu | Tiempo promedio de vida útil [día] | | | Número entero |
| Resids | Relación de residuos generados por el procesamiento de fruta | rescod | Código del residuo | Primaria | | Autoincremental |
| | | resnom | Nombre del residuo | | | Cadena de caracteres |
| | | rescan | Cantidad existente del residuo [Kg] | | | Número real |
| | | respre | Precio de venta del residuo [\$/Kg] | | | Número real |
| Pulpas | Relación de pulpas producidas | pulcod | Código de la pulpa | Primaria | | Autoincremental |
| | | pulnom | Nombre de la pulpa | | | Cadena de caracteres |
| | | pulcan | Cantidad existente de la pulpa [Kg] | | | Número real |

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|---------------|--|---------------|--|----------|---------------|-----------------|
| | | pulpre | Precio de venta de la pulpa [\$/Kg] | | | Número real |
| Ordcof | Relación de órdenes de compra de fruta | ocfcod | Código de la orden de compra de fruta | Primaria | | Autoincremental |
| | | odffon | Referencia al fondo en que se registra el egreso | Foránea | Fondos.foncod | Número entero |
| | | ocffru | Referencia a la fruta comprada | Foránea | Frutas.frucod | Número entero |
| | | ocfcan | Cantidad de fruta comprada [Kg] | | | Número real |
| | | ocfval | Valor el egreso por la compra de fruta [\$/] | | | Número real |
| | | ocffec | Fecha de compra de la fruta | | | Fecha |
| Determ | Relación de deterioro de la maquinaria | detmaq | Referencia a la maquinaria deteriorada | Foránea | Maquns.maqcod | Número entero |
| | | detcan | Cantidad de maquinaria deteriorada [Um] | | | Número entero |
| | | detfec | Fecha de registro del deterioro | | | Fecha |
| Ocfmaq | Relación de maquinaria que permite la orden de compra | ocmocf | Referencia a la orden de compra de fruta | Foránea | Ordcof.ocfcod | Número entero |
| | | ocmmaq | Referencia a la maquinaria | Foránea | Maquns.maqcod | Número entero |
| Cappfu | Relación de capacidades de la maquinaria para procesamiento de fruta | cpfmaq | Referencia a la maquinaria | Foránea | Maquns.maqcod | Número entero |
| | | cpffru | Referencia a la fruta | Foránea | Frutas.frucod | Número entero |
| | | cpfcpr | Capacidad de procesamiento de fruta [Kg/día] | | | Número real |
| Ordprf | Relación de órdenes de procesamiento de fruta | opfcod | Código de la orden de procesamiento de fruta | Primaria | | Autoincremental |
| | | opffru | Referencia a la fruta procesada | Foránea | Frutas.frucod | Número entero |
| | | opfpul | Referencia a la pulpa obtenida | Foránea | Pulpas.pulcod | Número entero |
| | | opfcan | Cantidad de fruta procesada [Kg] | | | Número real |
| | | opfcpo | Cantidad de pulpa obtenida | | | Número real |
| | | opffec | Fecha de procesamiento de la fruta | | | Fecha |

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|---------------|---|----------------|---|---------|---------------|---------------|
| Opfmaq | Relación de maquinaria utilizada en la orden de procesamiento | opmocf | Referencia a la orden de procesamiento de fruta | Foránea | Ordprf.opfcod | Número entero |
| | | opmmaq | Referencia a la maquinaria | Foránea | Maquns.maqcod | Número entero |
| Opfreg | Relación de residuos generados en una orden de procesamiento | opropf | Referencia a la orden de procesamiento de fruta | Foránea | Ordprf.opfcod | Número entero |
| | | Oprres | Referencia al residuo | Foránea | Resids.rescod | Número entero |
| | | Oprcrg | Cantidad de residuo generada | | | Número real |
| Genref | Relación de residuos que se generan con la fruta | grffru | Referencia a la fruta procesada | Foránea | Frutas.frucod | Número entero |
| | | grfres | Referencia al residuo generado | Foránea | Resids.rescod | Número entero |
| | | Grftre | Tasa residual de la fruta [residuo/fruta] | | | Número real |
| Ventap | Relación de venta de pulpa | vnpfon | Referencia al fondo en que se registra el ingreso | Foránea | Fondos.foncod | Número entero |
| | | vnppul | Referencia a la pulpa vendida | Foránea | Pulpas.pulcod | Número entero |
| | | vnpcan | Cantidad de pulpa vendida | | | Número real |
| | | vnppal | Valor ingreso por venta de pulpa [€] | | | Número real |
| | | vnppfec | Fecha de la venta de pulpa | | | Fecha |
| Ventar | Relación de venta de residuos | vnrfon | Referencia al fondo en que se registra el ingreso | Foránea | Fondos.foncod | Número entero |
| | | vnrrres | Referencia al residuo vendido | Foránea | Resids.rescod | Número entero |
| | | vnrcan | Cantidad de residuo vendido | | | Número real |
| | | vnrrval | Valor ingreso por venta de residuo [€] | | | Número real |
| | | vnrrfec | Fecha de la venta de residuo | | | Fecha |
| Insmaq | Relación de instalación de maquinaria | imqfon | Referencia al fondo en que se registra el egreso | Foránea | Fondos.foncod | Número entero |
| | | imqmaq | Referencia a la maquinaria instalada | Foránea | Maquns.maqcod | Número entero |

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|---------------|---|---------------|---|---------|---------------|---------------|
| | | imqcan | Cantidad de maquinaria instalada | | | Número real |
| | | imqval | Valor egreso por instalación de maquinaria [\$] | | | Número real |
| | | imqfec | Fecha de la instalación de la maquinaria | | | Fecha |
| Obtpuf | Relación de obtención de pulpa a partir de la fruta | opffru | Referencia a la fruta procesada | Foránea | Frutas.frucod | Número entero |
| | | opfpul | Referencia a la pulpa obtenida | Foránea | Pulpas.pulcod | Número entero |
| | | opftap | Tasa de aprovechamiento de la fruta [pulpa/fruta] | | | Número real |

La interfaz automática generada por el software MBD 3.0 da una idea de la funcionalidad que podría alcanzarse con este diseño. A continuación se comentan algunos ejemplos. La Figura 6.29 muestra la pantalla de captura de datos básicos de la fruta que se procesaría en la empresa.

Frutas | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 44 bytes | Tamaño total 44 bytes

Código : 1

Fruta :

Cantidad [Kg] :

Periodos de almacenamiento [día] :

Precio compra [\$ / Kg] :

Figura 6.29 Registro de datos básicos de frutas

En la Figura 6.30 se puede ver un ejemplo de registro de una cuenta o rubro para el manejo contable del proceso de producción.

Fondos | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 46 bytes | Tamaño total 46 bytes

Código : 1

Fondo :

Cantidad [\$] :

Fecha (dd/mm/aaaa) :

Figura 6.30 Registro de fondos o rubros contables de manejo de la operación

Mediante una pantalla como la de la Figura 6.31 se pueden registrar las diversas máquinas que intervienen en el procesamiento de la fruta, determinando datos sobre la cantidad mínima que se requiere para entrar en producción, el precio y la capacidad de la empresa para su instalación y el tiempo de vida útil, elementos surgidos del modelamiento matemático.

Maquins | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 62 bytes | Tamaño total 62 bytes

| | |
|------------------------------|------------------|
| Código : | 1 |
| Maquinaria : | Máquina peladora |
| Cantidad : | 5 |
| Cantidad mínima : | 5 |
| Precio instalación [\$/Um] : | 2500000 |
| Capacidad instalación : | 0,3 |
| Tiempo de vida útil [día] : | 720 |

Figura 6.31 Registro de datos básicos de maquinaria

Un sistema informático desarrollado a partir del diseño obtenido mediante la metodología propuesta, permitiría definir diversos tipos de residuos de procesamiento, según características que afecten su uso y aprovechamiento posterior, como se muestra en la Figura 6.32, así como los distintos productos obtenidos durante el procesamiento, como se indica en la Figura 6.33.

Resids

| | |
|---------------------------|--------------------------------|
| Código : | 1 |
| Residuo : | Semillas duras de tamaño mayor |
| Cantidad [Kg] : | 0 |
| Precio de venta [\$/Kg] : | 125 |

Figura 6.32 Registro de tipos de residuos generados en la operación

Pulpas | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 50 bytes | Tamaño total 50 bytes

| | |
|---------------------------|----------------|
| Código : | 1 |
| Pulpa : | Pulpa de mango |
| Cantidad [Kg] : | 0 |
| Precio de venta [\$/Kg] : | 1200 |

Figura 6.33 Registro de datos básicos de pulpas a producir

El software permite hacer seguimiento y registro del proceso de instalación de la maquinaria. La pantalla de la Figura 6.34 hace posible determinar el rubro contable al cual es carga el costo de la instalación de una máquina.

The screenshot shows a software window titled 'Insmaq'. It contains several input fields: 'Fondo' with a dropdown menu showing 'Centro de costo producción'; 'Maquinaria' with a dropdown menu showing 'Máquina peladora'; 'Cantidad' with a text input field containing '1'; 'Valor egreso [\$]' with a text input field containing '2500000'; and 'Fecha (dd/mm/aaaa)' with a text input field containing '30/06/2018'. At the bottom, there is a row of buttons: 'Agregar', 'Editar', 'Grabar', 'Cancelar', a set of navigation arrows, 'Salir', and 'Tabla'.

Figura 6.34 Registro de operación de instalación de maquinaria

Otro aspecto importante de la funcionalidad del software es la parametrización de máquinas con respecto a las frutas. En la pantalla de la Figura 6.35 se define la capacidad de una máquina para procesar una determinada fruta.

The screenshot shows a software window titled 'Cappfu'. It contains three input fields: 'Maquinaria' with a dropdown menu showing 'Máquina peladora'; 'Fruta' with a dropdown menu showing 'Mango'; and 'Capacidad procesamiento [Kg/día]' with a text input field containing '2000'. At the bottom, there is a row of buttons: 'Agregar', 'Editar', 'Grabar', 'Cancelar', a set of navigation arrows, 'Salir', and 'Tabla'.

Figura 6.35 Parametrización de maquinaria

También es importante la caracterización de las frutas a procesar, con respecto a la producción como muestra la Figura 6.36 en que se define cuánta pulpa se puede obtener de una fruta, y en la Figura 6.37 en que se define la cantidad de diversos residuos que se generan en el procesamiento de cada fruta.

The screenshot shows a software window titled 'Obtpuf'. It contains three input fields: 'Fruta' with a dropdown menu showing 'Mango'; 'Pulpa' with a dropdown menu showing 'Pulpa de mango'; and 'Tasa aprovechamiento' with a text input field containing '0,6'. At the bottom, there is a row of buttons: 'Agregar', 'Editar', 'Grabar', 'Cancelar', a set of navigation arrows, 'Salir', and 'Tabla'.

Figura 6.36 Caracterización de la pulpa

| | |
|--|--------------------------------|
| Genref | |
| Fruta : | Mango |
| Residuo : | Semillas duras de tamaño mayor |
| Tasa residual [residuo/fruta] : | 0,35 |
| <input type="button" value="Agregar"/> <input type="button" value="Editar"/> <input type="button" value="Grabar"/> <input type="button" value="Cancelar"/> <input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="⏪"/> <input type="button" value="▶"/> <input type="button" value="⏩"/> <input type="button" value="Salir"/> <input type="button" value="Tabla"/> | |

Figura 6.37 Caracterización de residuos

Una vez se entra en fase de producción, el software permite el registro de operaciones, como la compra de fruta que se muestra en la Figura 6.38, el procesamiento como se presenta en la Figura 6.38 que incluye en la orden la cantidad de fruta procesada y la de pulpa obtenida, así como los residuos generados como aparece en la Figura 6.40.

| | |
|--|----------------------------|
| Ordcof | |
| Código : | 1 |
| Fondo : | Centro de costo producción |
| Fruta : | Mango |
| Cantidad comprada [Kg] : | 3500 |
| Valor egreso [\$] : | 2800000 |
| Fecha (dd/mm/aaaa) : | 01/07/2018 |
| <input type="button" value="Agregar"/> <input type="button" value="Editar"/> <input type="button" value="Grabar"/> <input type="button" value="Cancelar"/> <input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="⏪"/> <input type="button" value="▶"/> <input type="button" value="⏩"/> <input type="button" value="Salir"/> <input type="button" value="Tabla"/> | |

Figura 6.38 Registro de orden de compra de fruta

| | |
|--|----------------|
| Ordprf Registro 1 / 1 Tamaño de registro 32 bytes Tamaño total 32 bytes | |
| Código : | 1 |
| Fruta : | Mango |
| Pulpa : | Pulpa de mango |
| Cantidad de fruta procesada : | 3000 |
| Cantidad de pulpa obtenida : | 1750 |
| Fecha (dd/mm/aaaa) : | 01/06/2018 |
| <input type="button" value="Agregar"/> <input type="button" value="Editar"/> <input type="button" value="Grabar"/> <input type="button" value="Cancelar"/> <input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="⏪"/> <input type="button" value="▶"/> <input type="button" value="⏩"/> <input type="button" value="Salir"/> <input type="button" value="Tabla"/> | |

Figura 6.39 Registro de orden de procesamiento de fruta

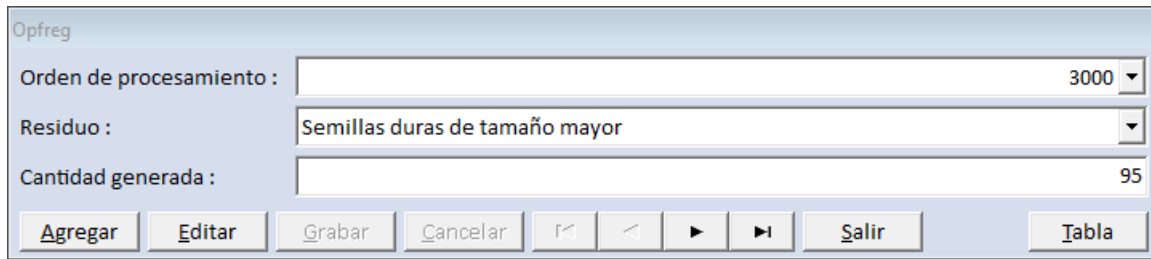


Figura 6.40 Registro de generación de residuos

Por último, el software implementado aquí a modo de prueba también provee la funcionalidad del registro de ventas, como se puede apreciar en la Figura 6.41.

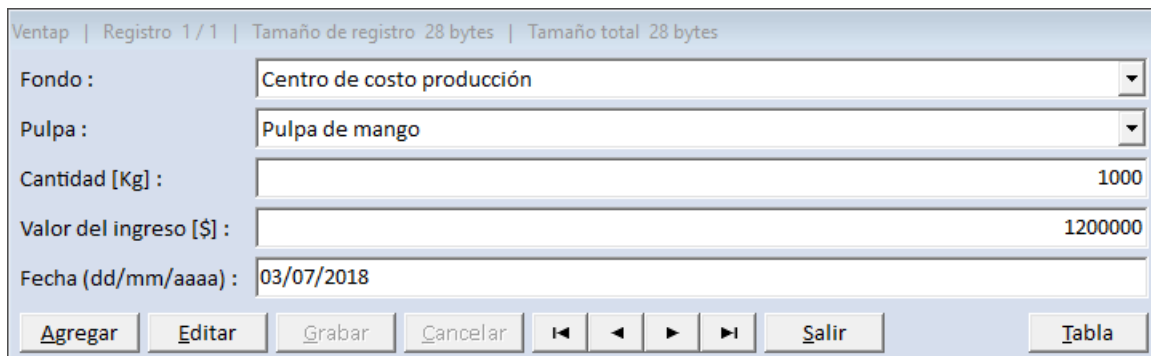


Figura 6.41 Registro de venta de pulpa

La interfaz generada por el software MBD 3.0 permitiría presentar otros aspectos de la eventual funcionalidad de un software para una empresa procesadora de frutas. Pero no es el propósito del capítulo agotar la determinación de requisitos, y es claro que para un proyecto real haría falta una mayor documentación y trabajo interdisciplinario entre desarrolladores de software y expertos en el campo de producción.

Con este caso, relativo a un sistema de producción con el que los estudiantes podrían familiarizarse fácilmente, se aportan indicios de cómo el modelamiento matemático con Dinámica de Sistemas puede ser incorporado a las técnicas de desarrollo de software, para la generación de diseños base y para la determinación de requerimientos. Se espera que habiendo superado los casos de nivel básico, cuyo propósito era familiarizar al estudiante con los fundamentos de modelamiento con Dinámica de Sistemas, pueda empezar gradualmente a buscar cómo aplicarlos en otros contextos, como la gestión de procesos productivos con apoyo de sistemas informáticos.

Referencias

Alimentos SAS. (2013). El proceso. *Las mejores frutas de Colombia*. Retrieved November 01, 2014, from <http://www.pulpas-de-frutas.com/elproceso-fresa-granadilla-guanabana-guayaba-limon-lulo-mango-manzana-maracuya.htm>

Bohórquez, O. (2005). *Guía para post cosecha y mercadeo de productos agrícolas* (1st ed., p. 36). Bogotá D.C.: Convenio Andrés Bello.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE. (2014). Comportamiento del abastecimiento en el grupo de las frutas durante el periodo de enero a septiembre de 2014. *Boletín mensual Abastecimiento de Alimentos*. Bogotá D.C. Retrieved November 13, 2014, from https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/bol_abast_sep14.pdf

Quirós, E. (2013). Frutas colombianas [Fotografía]. *Tour de desayunos típicos en Bogotá*. Retrieved November 14, 2014, from <http://www.colombia.travel/es/official-bloggers/entry/eloy-quiros/tour-de-desayunos-tipicos-en-bogota>

7 Derivados lácteos – Caso de estudio

Casos relacionados con ambientes de producción facilitan que el estudiante que ya conoce los fundamentos básicos valore el modelamiento con Dinámica de Sistemas como base para el diseño de software. Ese sentido que adquiere la matemática se aprovechó para introducir nuevos elementos de modelamiento. Para centrar la atención de los estudiantes, se omitieron aspectos de infraestructura y comercialización.

7.1 Formulación del caso

7.1.1 Planteamiento

El yogur, la leche acidófila, el kefir y el kumis son derivados obtenidos a partir de la fermentación de la leche mediante la acción de bacterias inocuas.



Figura 7.1 Derivados lácteos (Fesalimentos, 2013)

La denominación de cada producto corresponde al tipo de bacteria utilizada en el proceso: para el yogur se incorporan cultivos simbióticos de *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus delbrueckii*; para el kumis se utilizan cultivos de *Lactobacillus delbrueckii* y *Kluyveromyces marxianus* (Organización Mundial de la Salud OMS & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, 2011). En el proceso de producción se obtienen aproximadamente 150 gramos de yogur por cada 1000 gramos de leche. La mayor parte de la reducción se debe a extracción de cerca del 80% del agua inicialmente contenida en la leche en forma de suero.

El proceso del yogur comienza con la pasteurización de la leche cruda. Luego se le incorporan las bacterias inocuas ya mencionadas, a razón de 7 colonias por cada 1000 gramos de leche (Iyer, Tomar, Uma Maheswari, & Singh, 2010). La leche cruda contiene aproximadamente 48 gramos de lactosa por litro (Ruiz Moreno, 2001) la cual es consumida por las bacterias que a su vez generan ácido láctico. La proporción creciente de ácido láctico inhibe la capacidad de las bacterias para seguir consumiendo lactosa. Durante la primera hora del proceso, las 7 colonias iniciales de bacterias transforman el 30% de la lactosa. Al cabo de 6 horas, las bacterias habrán transformado el 86% de la lactosa en ácido láctico (Rhimi et al., 2010), y su población es de aproximadamente 54 colonias por cada 1000 gramos de yogur. El proceso se interrumpe mediante una nueva pasteurización, para eliminar las bacterias incorporadas y evitar que sigan procesando la lactosa. A nivel industrial y comercial esto permite ofrecer yogures con diferentes contenidos de lactosa o de ácido láctico, para atender las necesidades de consumidores diversos.

7.1.2 Pregunta

¿Cómo modelaría con Dinámica de Sistemas el proceso de obtención de derivados lácteos, para formular un diseño preliminar de software que apoye la gestión del proceso?

7.2 Solución de referencia

7.2.1 Modelamiento cualitativo de la estructura básica del sistema

Inicialmente hay que identificar los sustantivos y verbos que conforman la estructura básica del sistema, asumiendo que sustantivos son aquellos componentes del sistema que se pueden expresar como una cantidad de elementos asociada a una unidad de medida y factibles de ser contados o medidos en cualquier instante, mientras que los verbos son las acciones o eventos cuyo resultado es el cambio en el número de dichos sustantivos.

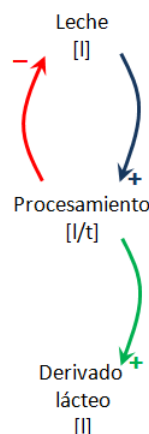


Figura 7.2 Un primer modelo no conveniente

Quizás la manera más intuitiva de modelar este sistema es tomar como sustantivos la *leche* y el yogur, o de forma más genérica el *derivado lácteo*, medidos en litros. Y como verbo asociado

a estos sustantivos se podría incluir el **procesamiento**, medido en litros por unidad de tiempo, que disminuye la cantidad de leche a la vez que aumenta la cantidad de derivado lácteo, como se representa en la Figura 7.2.

Sin embargo, leche y derivado lácteo no son materiales separables en el contexto del problema. Si se introduce una cantidad determinada de leche en un contenedor para su procesamiento, y luego en un instante cualquiera se interrumpe la operación, al interior del contenedor no se encontrará una cantidad de leche aún sin procesar y una cantidad de derivado lácteo ya terminado, sino un material homogéneo, que no es ni la leche en su estado inicial ni un derivado lácteo específico. La leche entonces podría verse no como un sustantivo sino como el escenario donde el proceso sucede: una cantidad de lactosa inicial se va descomponiendo, mientras se incrementa la cantidad de ácido láctico, y se va eliminando agua.

A partir de los argumentos anteriores, la leche, el yogur, el kumis y demás derivados, más que sustantivos son estados del sistema, caracterizados por un contenido específico de lactosa, ácido láctico y suero: cuando la cantidad de lactosa es alta y la de ácido láctico es nula, el sistema está en un estado en que se llama leche; a medida que la cantidad de lactosa disminuye, que aumenta la de ácido láctico y se va extrayendo el agua o suero, el sistema va pasando sucesivamente por otros estados, que corresponden a los diferentes derivados.

Todo lo anterior sucede por la acción de las bacterias que han sido introducidas al sistema para tal fin. Se tienen entonces cuatro sustantivos apropiados para el modelamiento del sistema: **lactosa**, **ácido láctico**, **suero** y **bacterias**. A partir de cada uno de estos, se requiere identificar sus correspondientes verbos.

El sustantivo **lactosa** se puede medir en gramos [g]. Durante el proceso se espera que la lactosa solo disminuya por acción de las bacterias, por lo que el verbo que causa su disminución es el **consumo de lactosa**, medido en gramos por unidad de tiempo [g/t]. A su vez el consumo de lactosa solo es posible mientras esta esté presente en el sistema, por lo que el sustantivo lactosa ejerce una influencia directamente proporcional hacia el verbo.

En cuanto al sustantivo **ácido láctico**, también se mide en gramos [g] y durante el proceso se espera que su cantidad vaya aumentando a medida que es producido en el proceso de fermentación. Por eso se incluye el verbo **producción de ácido láctico**, medido en gramos por unidad de tiempo [g/t]. No se establece una influencia desde el sustantivo hacia el verbo por cuanto la producción no depende de la cantidad de ácido láctico presente en el medio.

En el caso del capítulo anterior se estableció la conveniencia de distinguir las unidades de medida que siendo idénticas se aplican sobre sustantivos de naturaleza diferente. Con respecto al problema actual, la unidad de medida de la **lactosa** es gramos, pero se utilizará un subíndice y la notación será [g_i], para no confundirla con la unidad de medida del ácido láctico, para la cual se utilizará la notación [g_a].

Con respecto al sustantivo **suero** cuya unidad de medida es el litro [l], gradualmente se va separando de los demás componentes de la leche a medida que transcurre el proceso de fermentación, por lo que se incluye como verbo **separación de suero** medido en litros por

unidad de tiempo [l/t], y que implica su pérdida o disminución. Desde suero hacia separación de suero la influencia representa que solo puede ocurrir el verbo mientras el sustantivo tenga un valor positivo.

Entonces, la representación de la Figura 7.2 cuya inconveniencia ya fue argumentada, se cambia por la de la Figura 7.3, en lo concerniente a los componentes de la leche y los verbos que los modifican.

Falta incluir el sustantivo **bacterias**, cuya unidad de medida es colonias [c]. Para iniciar el proceso se introduce una cantidad de colonias de las bacterias inocuas; a partir de ese momento dichas bacterias se incrementan por su proceso de reproducción, y cuando se llega al estado de procesamiento deseado, mediante una nueva pasteurización son eliminadas. Se establecen entonces tres posibles verbos: **introducción de bacterias**, **crecimiento de bacterias** y **eliminación de bacterias**, con unidad de medida colonias por unidad de tiempo [c/t].

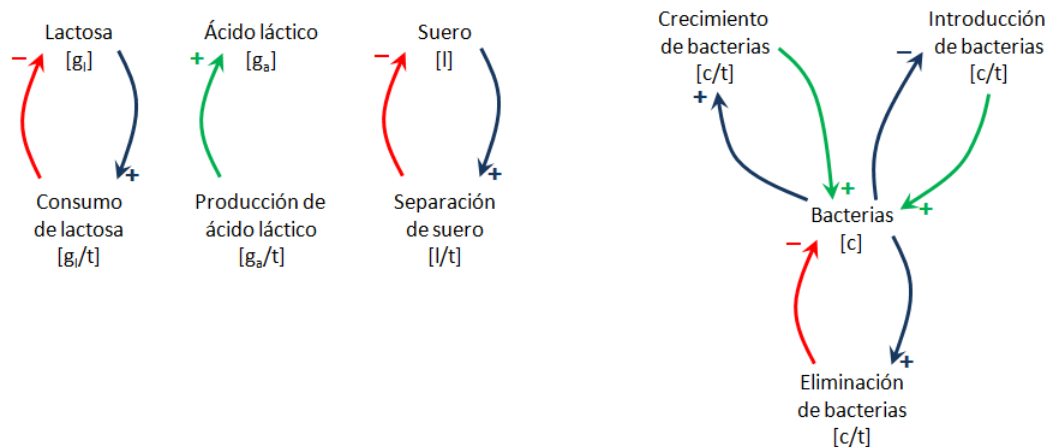


Figura 7.3 Modelos básicos con componentes de la leche y bacterias como sustantivos

A diferencia de como se representó la población en el caso de especies invasoras, en el caso de las bacterias no se suele determinar la cantidad nacimientos y de muertes, sino un crecimiento neto. El sustantivo bacterias influye de forma directamente proporcional sobre el crecimiento de bacterias, porque a mayor cantidad de colonias existentes se espera un crecimiento más rápido. Como todas deberán ser eliminadas al final del proceso, también hay una influencia directamente proporcional hacia eliminación de bacterias. Por el contrario, la influencia hacia introducción de bacterias es inversa, puesto que es necesaria solamente en el instante en que hay una menor presencia de colonias, para dar inicio al proceso.

Hay que establecer las relaciones de influencia entre las bacterias y los componentes del medio en que son introducidas. El papel de las bacterias es consumir la lactosa; son introducidas en un medio que les resulta totalmente favorable, en el que la lactosa facilita el crecimiento de su población. Estas influencias están representadas por las líneas punteadas en la Figura 7.4.

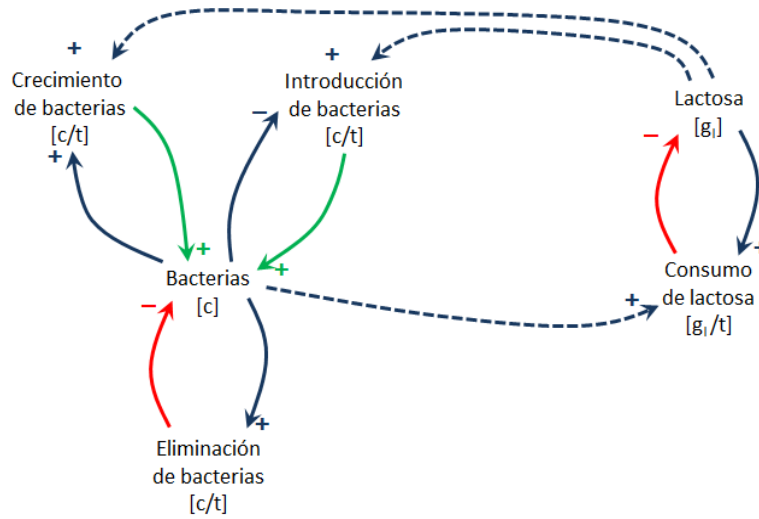


Figura 7.4 Interacción entre bacterias y lactosa

La acción de las *bacterias* que realizan el consumo de lactosa tiene como consecuencia la producción de ácido láctico. Se establece entre estos dos influencia directamente proporcional. A su vez, la presencia de ácido láctico eleva la acidez del sistema y facilita la separación del suero, por lo que entre estos elementos se establece otra relación directamente proporcional.

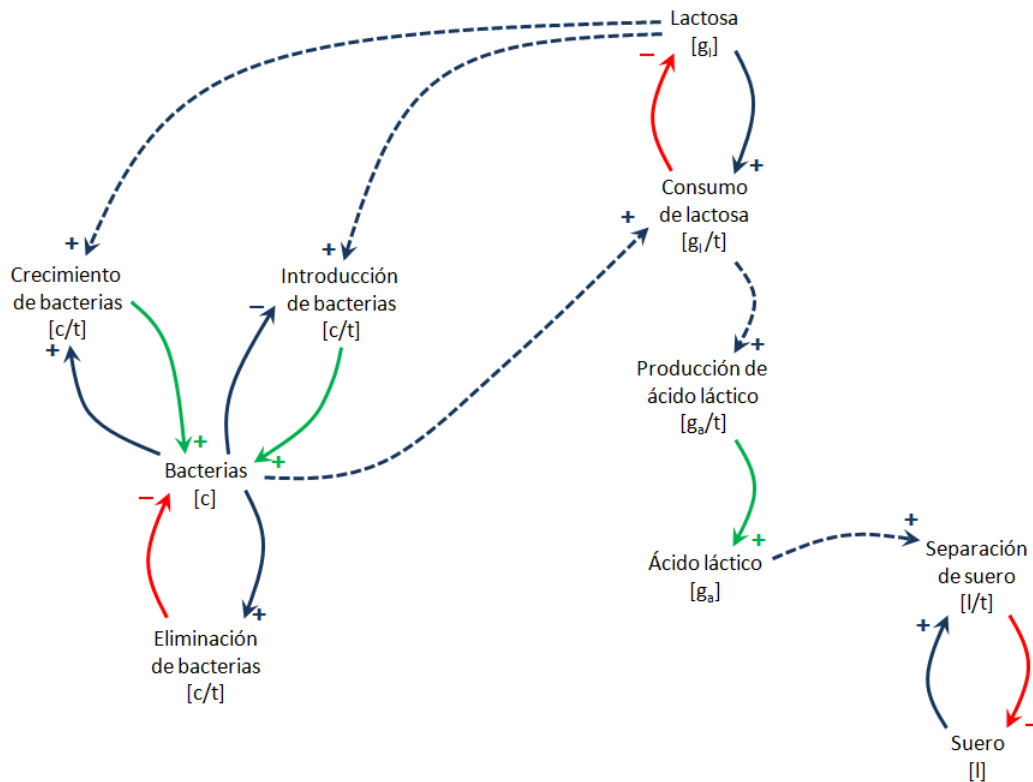


Figura 7.5 Diagrama con reacciones generadas por el consumo de lactosa

7.2.2 Modelamiento cuantitativo

En un modelo en Dinámica de Sistemas cada sustantivo se representa mediante una ecuación diferencial, en la que su valor se calcula a partir de su valor previo, más o menos los valores de los verbos según el tipo de influencia que reciba de estos. En Tabla 7.1 se presenta una lista de los sustantivos y verbos de la estructura básica del sistema modelado hasta ahora, y las abreviaturas de cada elemento que se utilizan en la construcción del modelo matemático a continuación.

Tabla 7.1 Elementos de la estructura básica del sistema

| Nombre | Abreviatura | Tipo | Unidad | |
|-----------------------------|-------------|------------|---------|---------------------|
| Bacterias | BAC | Sustantivo | Colonia | [c] |
| Crecimiento de bacterias | CRE | Verbo | | [c/t] |
| Introducción de bacterias | INT | Verbo | | [c/t] |
| Eliminación de bacterias | ELI | Verbo | | [c/t] |
| Lactosa | LAC | Sustantivo | Gramos | [g _l] |
| Consumo de lactosa | CON | Verbo | | [g _l /t] |
| Ácido láctico | ALC | Sustantivo | Gramos | [g _a] |
| Producción de ácido láctico | PRO | Verbo | | [g _a /t] |
| Suero | SUE | Sustantivo | Litros | [l] |
| Separación de suero | SEP | Verbo | | [l/t] |

1.1.1.1 Ecuaciones diferenciales

A cada sustantivo le corresponde una ecuación diferencial ordinaria, en la que la derivada del sustantivo es igual a la suma de los verbos con el signo dado por su influencia. Estas ecuaciones escritas utilizando el método de Euler de integración numérica, pueden interpretarse como que el valor de un sustantivo en cualquier instante dado **(t+Δt)** equivale a su valor en el instante previo **(t)**, sumando o restando los valores de los verbos para dicho instante **(t)**. La Tabla 7.2 muestra las ecuaciones diferenciales para la estructura básica del sistema, escritas también en forma de Euler.

Tabla 7.2 Ecuaciones diferenciales del sistema

| Elemento | Ecuación diferencial | Ecuación diferencial en forma de Euler |
|---------------|-------------------------------------|--|
| Bacterias | $\frac{dBAC}{dt} = INT + CRE - ELI$ | $BAC(t + \Delta t) = BAC(t) + INT(t) * \Delta t + CRE(t) * \Delta t - ELI(t) * \Delta t$ |
| Lactosa | $\frac{dLAC}{dt} = -CON$ | $LAC(t + \Delta t) = LAC(t) - CON(t) * \Delta t$ |
| Ácido láctico | $\frac{dALC}{dt} = PRO$ | $ALC(t + \Delta t) = ALC(t) + PRO(t) * \Delta t$ |
| Suero | $\frac{dSUE}{dt} = -SEP$ | $SUE(t + \Delta t) = SUE(t) - SEP(t) * \Delta t$ |

1.1.1.2 Ecuaciones auxiliares

Otra parte del modelo matemático está conformada por las ecuaciones de los verbos, y que se construyen en cada caso con los elementos desde donde provienen influencias.

En el diagrama de influencias de la Figura 7.6, al verbo consumo de lactosa llegan influencias desde los sustantivos lactosa, bacterias, ácido láctico y suero, es decir, desde todos los sustantivos del sistema, que por tanto deben hacer parte de la ecuación.

$$CON(t) = f(LAC(t); ALC(t); SUE(t); BAC(t))$$

$$[g_l/t] = f([g_l]; [g_a]; [l]; [c])$$

Como las unidades de medida de los elementos que hacen parte de la ecuación son incompatibles con las unidades de medida del elemento que se trata definir, resulta útil identificar si alguno de los elementos es determinante o dominante sobre los otros. Repasando el planteamiento del caso, se tiene que el consumo de lactosa es una acción ejercida por las bacterias; la lactosa es el elemento consumido y el ácido láctico y el suero son elementos inhibidores en función de la acidez del sistema. Entonces, se puede concluir que el elemento determinante es el sustantivo bacterias, y con este se comienza a construir la ecuación.

$$CON(t) = f(BAC(t))$$

$$[g_l/t] = f([c])$$

Ya identificado el elemento determinante, el siguiente paso es encontrar la unidad complementaria.

$$[g_l/t] = [c] * [g_l/(c * t)]$$

$$[g_l/t] = [\epsilon] * [g_l/(\epsilon * t)]$$

$$[g_l/t] = [g_l/t]$$

Algo que se expresa en gramos de lactosa por colonia por unidad de tiempo, y que determina el consumo, puede ser fácilmente definido como la **tasa de consumo de lactosa**, o sea, la cantidad de lactosa que cada colonia puede consumir en una unidad de tiempo. Se abreviará como **TCL** y la ecuación ahora sería:

$$CON(t) = BAC(t) * TCL(t)$$

Esta sería la ecuación sin restricciones, es decir, en condiciones normales. Ahora hay que representar matemáticamente cualquier circunstancia que implique un sesgo sobre esta normalidad, a partir de los elementos no determinantes de la ecuación: lactosa, ácido láctico y suero.

En el planteamiento del problema se menciona que el nivel creciente de ácido láctico en el medio inhibe el consumo de lactosa por parte de las bacterias. Para abordar este asunto se requiere una investigación complementaria al planteamiento.

La acidez del sistema, definida como la proporción de ácido láctico por cantidad de suero (agua) tendría la unidad de medida [mg_a/l], las cuales se conocen también como grados Dornic

[°D], siendo 1 grado Dornic equivalente a 0,01% de ácido láctico, también equivalente a la presencia de 1 miligramo de ácido láctico en 10 mililitros de líquido, en este caso suero (García & Ochoa, 1987). Dado que las unidades para el suero en este modelo han sido litros [l], la conversión sería:

$$1[°D] = 1[mg_a]/10[ml]$$

La proporción entre miligramos y mililitros es idéntica a la proporción entre gramos y litros. Entonces

$$1[°D] = 1[g_a]/10[l]$$

$$1[°D] = 0,1[g_a]/[l]$$

Esta proporción es importante en el proceso, no solo por su impacto sobre el consumo de lactosa, sino porque es un criterio para controlar el sistema, ya que al alcanzar el grado de acidez requerido según el producto, se procede a la eliminación de las bacterias por pasteurización. A manera de ejemplo: la acidez característica de la leche fermentada es 4 gramos de ácido láctico por litro; la del yogur 5; la del kefir 6 y la del kumis 7 (Organización Mundial de la Salud OMS & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, 2011).

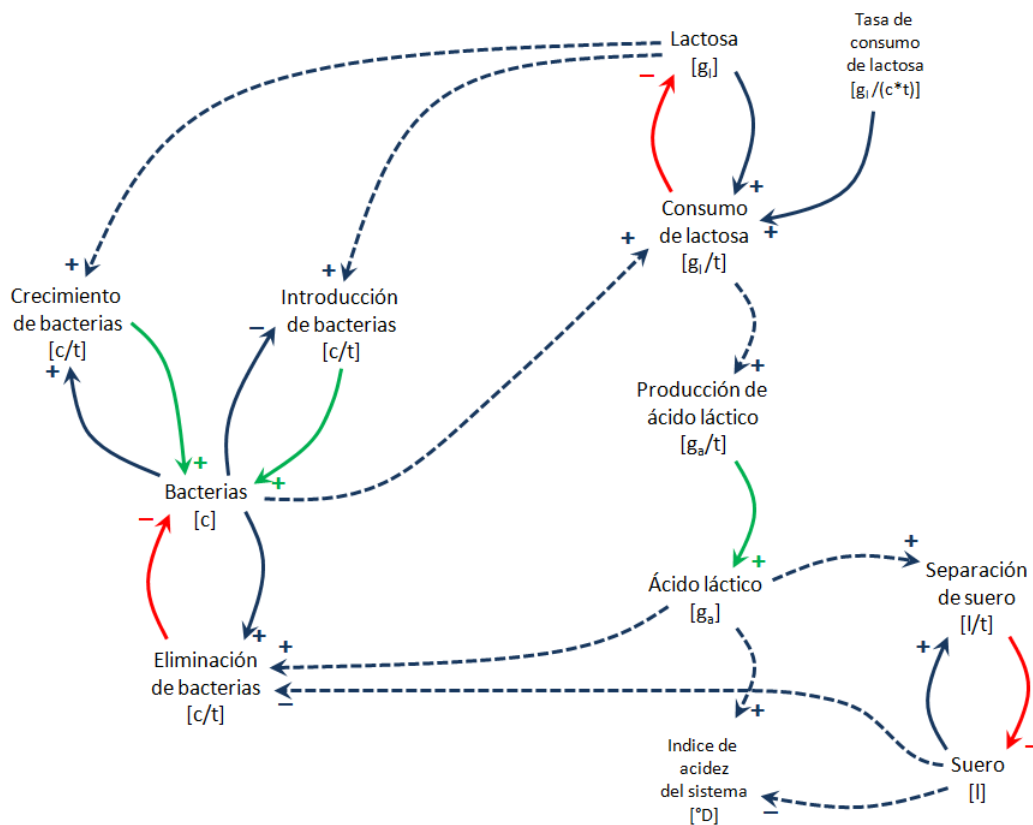


Figura 7.7 Incorporación de sustantivo auxiliar para acidez del sistema

Recapitulando lo anterior: se necesita incorporar ácido láctico y suero a la ecuación de consumo para representar el efecto inhibitor sobre el consumo de lactosa; pero la acidez es en sí misma un elemento representativo en la dinámica del sistema. En situaciones como esta resulta conveniente que el elemento sea incluido en el diagrama de influencias y tenga su propia expresión matemática.

En la Figura 7.7 se incorpora al diagrama de influencias el elemento **índice de acidez del sistema**, medido en grados Doric, cuya abreviatura será **IAS**, y que reúne las influencias del ácido láctico y el suero, y a su vez afecta al consumo de lactosa. Las influencias anteriores representadas en líneas punteadas más claras se cambian entonces por las que llegan y salen del elemento nuevo. También se incorpora al diagrama la tasa de consumo de lactosa por parte de las bacterias, hallada anteriormente.

Es de notar que este elemento es diferente a los surgidos en los modelos matemáticos de casos anteriores, que se catalogaron como parámetros. En este caso se trata de un elemento intermedio, que se puede tipificar como sustantivo auxiliar, y que en términos matemáticos es una operación intermedia. La ecuación de este sustantivo auxiliar es:

$$IAS(t) = f(ALC(t), SUE(t))$$

$$IAS(t) = ALC(t)/SUE(t)$$

$$[{}^{\circ}D] = [g_a]/[l]$$

$$[{}^{\circ}D] = [{}^{\circ}D]$$

Y ahora la ecuación de consumo de lactosa se construye con base en un nuevo conjunto de elementos:

$$CON(t) = f(BAC(t), IAS(t), LAC(t))$$

$$[g_l/t] = f([c], [{}^{\circ}D], [g_l])$$

De este conjunto ya se había identificado el elemento determinante, y se había establecido una ecuación con base en él:

$$CON(t) = BAC(t) * TCL(t)$$

$$[g_l/t] = [c] * [g_l/(c * t)]$$

$$[g_l/t] = [\epsilon] * [g_l/(\epsilon * t)]$$

$$[g_l/t] = [g_l/t]$$

Se ha repetido la ecuación, no solo para retomar su desarrollo, sino para llamar la atención en que ya se había logrado un balance de unidades de medida, que al incorporar la unidad [°D] irremediablemente se va a alterar.

Se había dicho de esta ecuación que era la que representaba el consumo sin restricciones, y que el papel de la acidez es afectar este consumo normal. Cuando se considera que el efecto de un nuevo elemento es desviar una expresión de su valor normal, se puede recurrir a un nuevo tipo de elemento llamado multiplicador.

Un multiplicador suele ser un elemento que toma el valor de otros, llamados elementos de entrada, y procesa sus valores mediante una función, generando un valor de salida que suele ser adimensional, es decir, carecer de unidades. De ahí su nombre de multiplicador: al no tener unidades, se puede multiplicar con otros sin afectar las unidades de medida.

Construir un multiplicador implica varias etapas: seleccionar una función cuya salida corresponda con el comportamiento esperado; organizar los elementos de entrada de manera apropiada.

En cuanto a la inhibición del consumo de lactosa por parte de las bacterias, el consumo es normal al comienzo del proceso, y se mantiene cercano al normal hasta alcanzar un valor crítico de acidez, a partir del cual el consumo va decreciendo cada vez más rápidamente.

Dentro de las habilidades del ingeniero no es estrictamente necesaria la memorización de todas las funciones matemáticas que ha estudiado; más bien se recomienda que tenga una capacidad para interpretar la trayectoria de una función y determinar si le resulta útil para representar lo que se propone; una breve asesoría de un profesor de matemáticas nunca sobra. En este caso se busca una función cuyos valores cambien de manera lenta al comienzo y acelerada al final, empezando en un valor máximo y descendiendo hasta cero.

La Figura 7.8 muestra diferentes trayectorias de la función exponencial $y=1-x^n$ siendo x un número entero entre 0 y 1. De derecha a izquierda aparecen las curvas correspondientes a n entre 1 y 10. Los valores de y empiezan en 1 y llegan hasta 0, de manera moderada al comienzo y acentuada al final. Este es el comportamiento que se quiere representar para el impacto de la acidez en el consumo de lactosa.

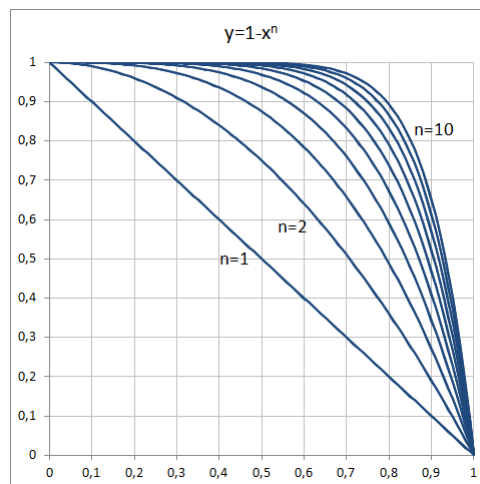


Figura 7.8 Trayectorias para $y=1-x^n$

Se puede observar que en la medida que x va tomando valores entre 0 y 1, y va tomando valores que al comienzo se mantienen cerca de 1, pero luego van decreciendo cada vez más rápido hasta llegar a 0. Una consulta con los expertos en el tema y una revisión de la documentación permitirían establecer con precisión la potencia n apropiada. De las que muestra la figura anterior, $n=1$ parece poco gradual y $n=10$ refleja un efecto demasiado tardío

que solo disminuye un 10% a partir de $x=0,8$. Para efectos de este capítulo se va a suponer un valor conveniente de $n=4$, que se describiría como que y se mantiene cerca de 1 y empieza a tomar valores gradualmente menores a partir de que x llega a 0,4 alcanzando una disminución del 20% cuando $x=0,7$ y del 50% cuando $x=0,85$. A y se le denominará **impacto de la acidez sobre el consumo de lactosa**, abreviado como **IAC**, que tendrá valores entre 0 y 1 y carecerá de unidades de medida. La ecuación para el consumo de lactosa sería:

$$CON(t) = BAC(t) * TCL(t) * IAC(t)$$

$$[g_l/t] = [c] * [g_l/(c * t)] * []$$

$$[g_l/t] = [\epsilon] * [g_l/(\epsilon * t)] * []$$

$$[g_l/t] = [g_l/t]$$

Con respecto al multiplicador anterior, se estableció que $y=1-x^4$, pero falta definir x , a partir del **indicador de acidez del sistema**, de manera que solo tenga valores entre 0 y 1. Si se considera que la acidez tiene valores entre 0 y 10, dividir la acidez medida en [°D] entre el factor 10 [°D] dará valores entre 0 y 1 sin unidades. Reemplazando de acuerdo a lo ya explicado, y restringiéndolo para que no llegue a tener valores negativos, se llega a la ecuación:

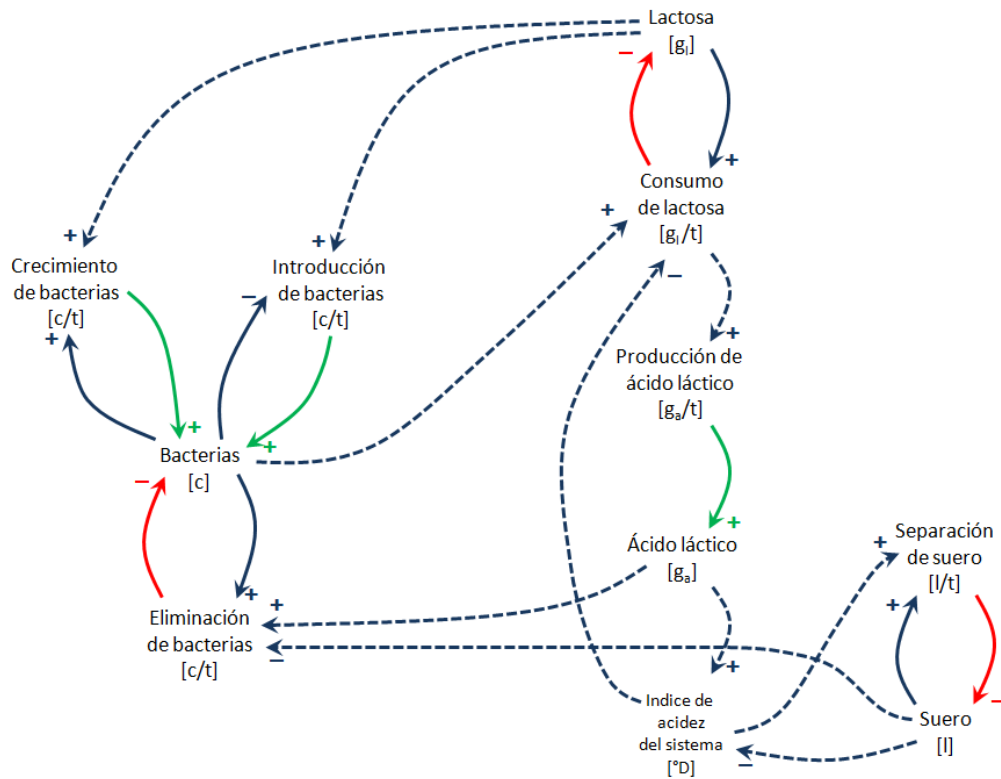


Figura 7.9 Incorporación de multiplicador para impacto de la acidez del sistema

$$IAC(t) = 1 - (IAS(t)/10)^4$$

$$[] = [] - ([°D]/[°D])^4$$

$$[] = [] - []$$

| |
|---|
| $IAC(t) = \text{Máximo}(1 - (IAS(t)/10)^4 ; 0)$ |
|---|

Al diagrama de influencias habría que incorporarle el nuevo elemento multiplicador, como se muestra en la Figura 7.9.

La construcción de la ecuación de consumo de lactosa ha debido interrumpirse en dos ocasiones, para introducir un sustantivo auxiliar y un multiplicador. Hasta la última interrupción se tenía:

$$\begin{aligned} CON(t) &= BAC(t) * TCL(t) * IAC(t) \\ [g_l/t] &= [c] * [g_l/(c * t)] * [] \\ [g_l/t] &= [e] * [g_l/(e * t)] * [] \\ [g_l/t] &= [g_l/t] \end{aligned}$$

Todavía está pendiente incluir en la ecuación el sustantivo lactosa, cuya intervención es solamente restrictiva: no se puede consumir una cantidad de lactosa mayor a la que todavía existe en el medio. Para esto se aplica la función mínimo del mismo modo que se hizo en la ecuación de deducciones del caso de productos financieros. La ecuación finalmente quedaría:

$$CON(t) = \text{Mínimo}(BAC(t) * TCL(t) * IAC(t); LAC(t))$$

La parte a la izquierda del signo “;” representa el consumo normal bajo el efecto inhibitor de la acidez; la parte a la derecha la cantidad de lactosa como limitante del consumo.

Pasando ya a un nuevo elemento, esta vez en el subsistema de bacterias, la ecuación del verbo introducción de bacterias según el diagrama de la Figura 7.9 se debe formular a partir de la influencia inversa del sustantivo bacterias y la directa del sustantivo lactosa.

$$\begin{aligned} INT(t) &= f(BAC(t); LAC(t)) \\ [c/t] &= f([c]; [g_l]) \end{aligned}$$

Al comienzo del proceso se supone que la cantidad de bacterias inocuas es cero, y la introducción de bacterias se efectúa porque existe una cantidad de lactosa que se requiere procesar.

Es decir, dependiendo de la cantidad de lactosa se decide cuántas bacterias deben ser introducidas. Entonces, entre lactosa y bacterias el primero es el elemento determinante de la cantidad de bacterias a introducir. En principio se intenta desarrollar una ecuación sólo con dicho elemento.

$$\begin{aligned} INT(t) &= f(LAC(t)) \\ [c/t] &= f([g_l]) \end{aligned}$$

Ahora se puede aplicar el criterio de la unidad complementaria, que consiste en identificar por qué unidad de medida se debería multiplicar $[g_l]$ para convertirla en $[c/t]$, siendo sencillo deducir que el complemento es $[c/(g_l * t)]$, o expresado de otra forma $[(c/t)/g_l]$.

$$\begin{aligned} [c/t] &= [g_l] * [(c/t)/g_l] \\ [c/t] &= [g_l] * [(c/t)/g_l] \\ [c/t] &= [c/t] \end{aligned}$$

Encontrar la unidad complementaria es la mitad del trabajo; luego hay que revisar la documentación sobre el tema obtenida en la investigación preliminar o en una indagación posterior o consultas con expertos, si hay algún sustento para enunciar un nuevo elemento del sistema, que se pueda medir en dicha unidad. Esto en principio puede parecer complicado, y evidentemente está fuera del objeto de conocimiento de un Ingeniero de Sistemas o de un desarrollador de software, pero es justamente la razón por la cual, para modelar sistemas incluso en el ámbito de desarrollo de software, el Ingeniero de Sistemas debe contar con una capacidad para el trabajo interdisciplinario. Volviendo al caso, las unidades de medida $[(c/t)/g_l]$ se leen como la cantidad de colonias de bacterias que se requiere introducir por período para procesar una cantidad de lactosa. A este nuevo elemento se le puede denominar **cantidad de bacterias de iniciación**, que se abreviará como **CBI**. La ecuación sería:

$$\begin{aligned} INT(t) &= LAC(t) * CBI(t) \\ [c/t] &= [g_l] * [(c/t)/g_l] \\ [c/t] &= [g_t] * [(c/t)/g_t] \\ [c/t] &= [c/t] \end{aligned}$$

Sin embargo, aún se requiere incorporar el sustantivo bacterias, cuyo papel en la expresión matemática es limitar la introducción de bacterias solamente al inicio del proceso, es decir, cuando la cantidad de colonias de bacterias es cero. La manera en que bacterias se incorpora a la ecuación es mediante una expresión lógica

$$\begin{aligned} &Si (BAC(t) = 0) \\ &entonces INT(t) = LAC(t) * CBI(t) \\ &de lo contrario INT(t) = 0 \end{aligned}$$

En cuanto al verbo crecimiento de bacterias, según el diagrama de la Figura 7.9, depende de los mismos elementos: lactosa y bacterias.

$$\begin{aligned} CRE(t) &= f(BAC(t); LAC(t)) \\ [c/t] &= f([c]; [g_l]) \end{aligned}$$

Pero a diferencia de lo que sucede con la introducción de bacterias que es un hecho artificial, el crecimiento es un evento natural de la población, en el que la lactosa solo juega un papel posibilitador como fuente de alimento. El elemento determinante entonces es bacterias y a partir de este se empieza la construcción de la ecuación:

$$\begin{aligned} CRE(t) &= f(BAC(t)) \\ [c/t] &= f([c]) \end{aligned}$$

La unidad complementaria que se requiere, solo debe aportar la unidad de tiempo en el denominador.

$$\begin{aligned} [c/t] &= [c] * [1/t] \\ [c/t] &= [c/t] \end{aligned}$$

A este nuevo elemento se le denominará **tasa de crecimiento de bacterias**, abreviado como **TCB**.

$$CRE(t) = BAC(t) * TCB(t)$$

Pero aún falta incluir la lactosa en la expresión. Como se dijo antes, su papel es el de facilitador de las condiciones de subsistencia de las bacterias, sin el cual su población no crecería. Entonces se puede incorporar la lactosa en una expresión condicional que determine que mientras exista lactosa habrá crecimiento de la población. Con respecto a lo que ocurriría una vez se agote la lactosa, para mantener la sencillez del modelo se va a suponer cesaría el crecimiento de la población. La ecuación entonces sería:

$$\text{Si } (LAC(t) = 0)$$

$$\text{entonces } CRE(t) = BAC(t) * TCB(t)$$

$$\text{de lo contrario } CRE(t) = 0$$

Cada elemento nuevo, surgido durante el modelo matemático, debe agregarse al diagrama de influencias. Con los hallados en las últimas ecuaciones, el diagrama se actualizaría como lo muestra la Figura 7.10:

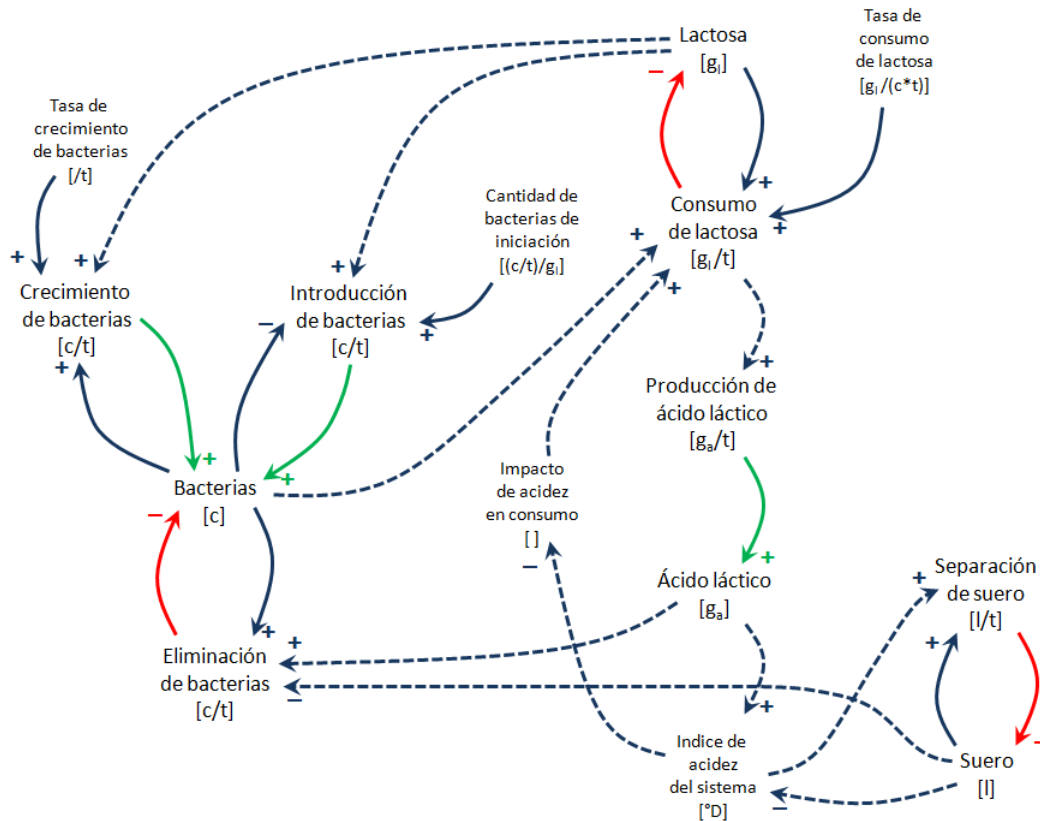


Figura 7.10 Incorporación de parámetros para crecimiento e introducción de bacterias

Aunque es reiterativo a lo largo del libro, es pertinente volver a destacar aquí la importancia del modelamiento matemático o cuantitativo: la validación de las unidades de medida permite

detectar elementos faltantes en el modelo cualitativo de la estructura básica del sistema; ciertos criterios permiten establecer las unidades de medida correspondientes a los elementos faltantes; y con esta pista se hace una revisión o ampliación de la investigación sobre el tema en cuestión, para identificar dichos elementos faltantes. De esta manera se han encontrado sustantivos auxiliares, multiplicadores y parámetros que luego harán más completo, y matemáticamente consistente, cualquier diseño de software.

El último verbo del subsistema de bacterias es eliminación de bacterias, al cual llega una influencia desde el sustantivo bacterias, y también desde los sustantivos ácido láctico y suero, que como ya se había explicado antes, indican que al llegar estos dos sustantivos a los valores finales requeridos, debe procederse a eliminar todas las bacterias para detener el proceso.

$$ELI(t) = f(BAC(t); ALC(t); SUE(t))$$

$$[c/t] = f([c]; [mgA]; [l])$$

Sin embargo, la cantidad de ácido láctico y de suero a partir de las cuales se procede a eliminar las bacterias no se miden directamente, sino mediante la acidez requerida del sistema según el producto a obtener. En el diagrama de influencias las influencias desde ácido láctico y suero hasta eliminación de bacterias se remplazan por una desde acidez del sistema.

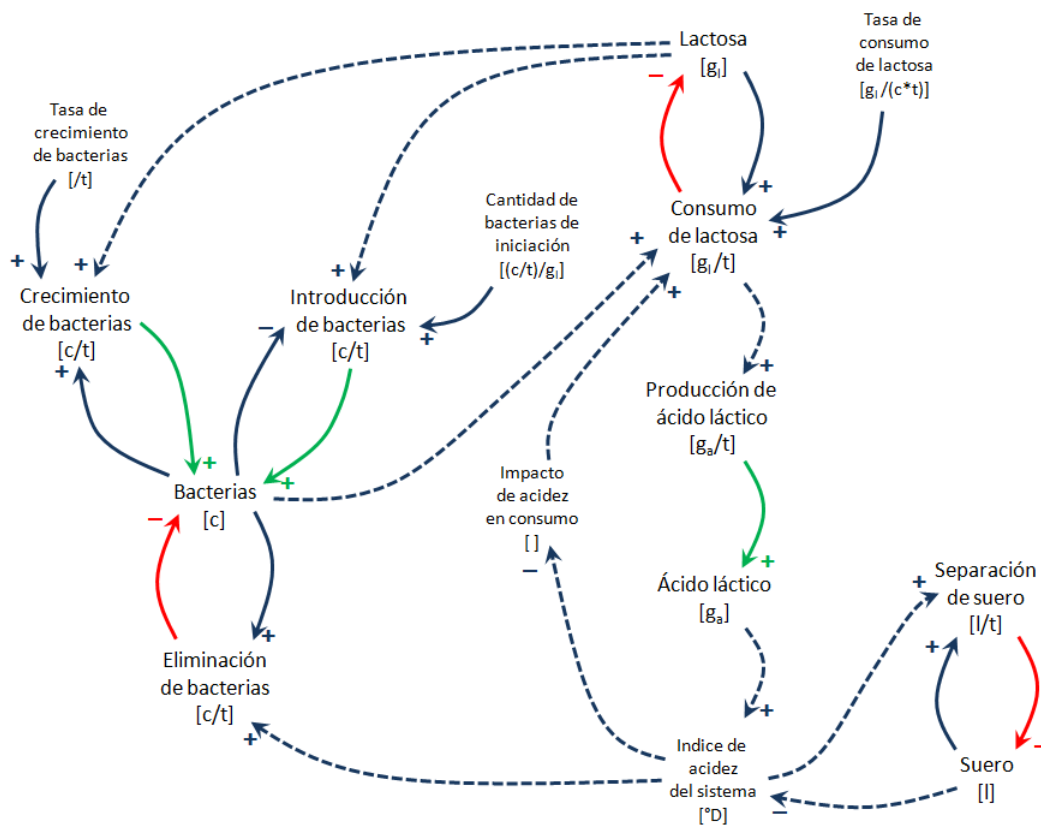


Figura 7.11 Incorporación del índice de acidez a la eliminación de bacterias

Si la acidez del sistema ha llegado al valor requerido de acuerdo al producto, entonces hay que eliminar a todas las bacterias existentes; de lo contrario, no hay que eliminar ninguna. Para

lograr esto hay que incorporar al modelo un nuevo parámetro que establezca el valor de referencia de la acidez, elemento que se denominará **acidez requerida del sistema**, abreviado como **ARS**, cuya inclusión permite construir la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} & \text{Si } (IAS(t) \geq ARS(t)) \\ & \text{entonces } ELI(t) = BAC(t) \\ & \text{de lo contrario } ELI(t) = 0 \end{aligned}$$

Y con este nuevo parámetro, el diagrama de influencias del sistema se actualizaría como lo muestra la .

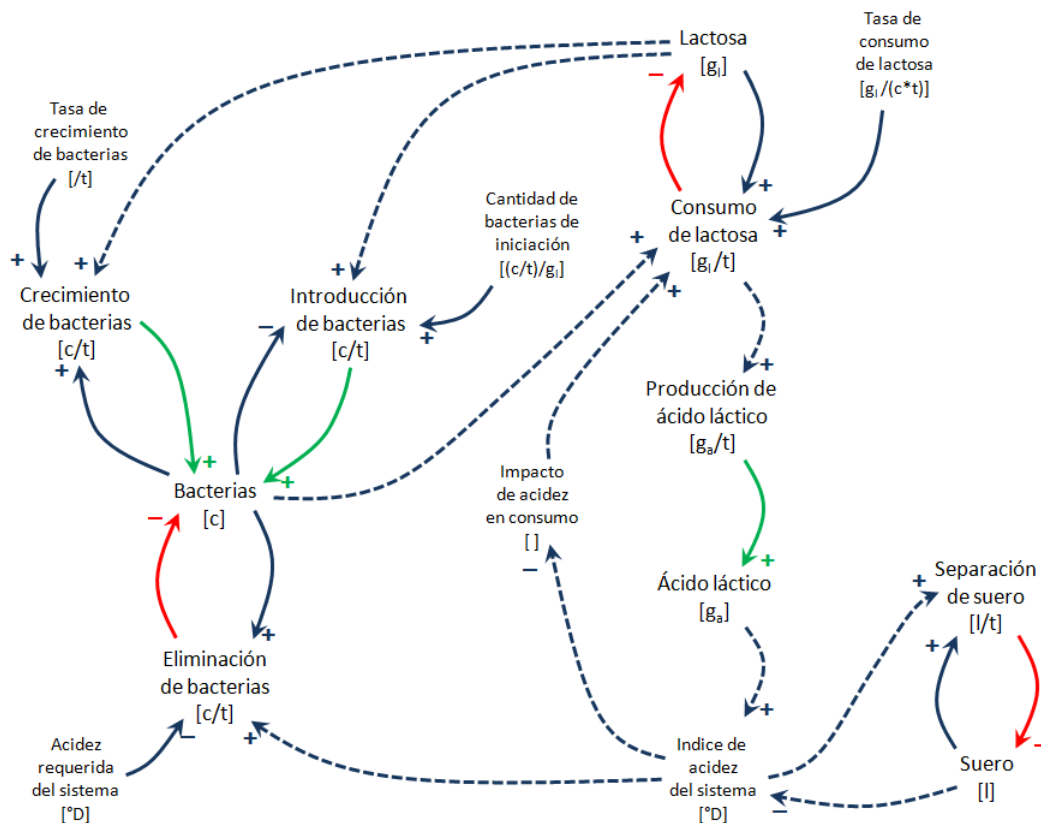


Figura 7.12 Incorporación de parámetro de acidez requerida para detener el proceso

De acuerdo a la figura anterior, solo quedan los verbos producción de ácido láctico y separación de suero para completar el modelo cuantitativo.

Con respecto a la producción de ácido láctico, esta es consecuencia del consumo de lactosa por parte de las bacterias, según se argumentó durante la construcción de la estructura básica del sistema. Entonces:

$$\begin{aligned} PRO(t) &= f(CON(t)) \\ [g_a/t] &= f([g_l/t]) \end{aligned}$$

Por criterio de complemento de unidades, para convertir gramos de lactosa por tiempo $[g_l/t]$ en gramos de ácido láctico por tiempo $[g_a/t]$, se requiere un nuevo elemento cuyas unidades sean $[g_a/g_l]$. Este nuevo parámetro puede denominarse **factor de conversión de lactosa**, que indica la cantidad de ácido láctico que las bacterias producen por cada unidad de lactosa que consumen. Para el modelo matemático el nuevo parámetro se abreviará como **FCL**.

$$PRO(t) = CON(t) * FCL(t)$$

$$[g_a/t] = [g_l/t] * [g_a/g_l]$$

$$[g_a/t] = [g_l/t] * [g_a/g_l]$$

$$[g_a/t] = [g_a/t]$$

Una consecuencia de la presencia de ácido láctico en el sistema es la separación de suero, es decir, la pérdida de agua durante el proceso. Pero la revisión de información del caso, y en especial lo argumentado con respecto al consumo de lactosa, permite afirmar que no es el ácido láctico en sí mismo el causante, sino que la separación del suero es una consecuencia de la acidez, es decir, no está relacionada directamente con la cantidad de ácido láctico, sino con la proporción entre este y el agua del medio, o sea la acidez, lo cual se ratifica en la literatura técnica, que menciona que el proceso de coagulación de la leche tiene su máximo alrededor del 65% de acidez (Jiménez & Sarmiento, 2007). Por esta razón, se implementa para esta expresión matemática un nuevo multiplicador, que se denominará **impacto de acidez en separación de suero**, nombre que se abreviará como **ISS**.

En la construcción de este multiplicador, se debe tener en cuenta que el impacto sobre la separación del suero debe ser nulo cuando la acidez es cero, incrementarse lentamente mientras la acidez se mantenga baja, tener un punto de inflexión importante cerca del valor de acidez del 65%, y finalmente incrementarse con mayor rapidez hasta llegar al valor 1 (separación total del suero) en acidez del 100%.

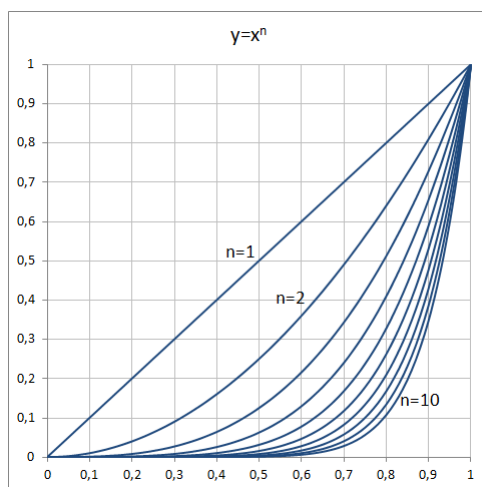


Figura 7.13 Trayectorias para $y=x^n$

Esta descripción es compatible con la familia de las funciones $y=x^n$ presentada en la Figura 7.13, de la cual se seleccionará la correspondiente a $y=x^2$. Al igual que con el multiplicador

anterior, considerando que los valores de x deben estar entre 0 y 1, x es igual al índice de acidez dividido por su máximo que es 10. Limitada a un valor máximo de 1 sería:

$$ISS(t) = \text{Mínimo}((IAS(t)/10)^2; 1)$$

La influencia del ácido láctico sobre la separación del suero es remplazada ahora por la que va desde el impacto de acidez en separación del suero, para finalmente afectar al verbo separación del suero. Dado que el multiplicador genera como valor un porcentaje por unidad de tiempo, para la expresión matemática del verbo separación de suero, se aplica dicho porcentaje a la cantidad existente de suero:

$$SEP(t) = SUE(t) * ISS(t)$$

7.2.3 Modelamiento enriquecido del sistema

La Figura 7.14 muestra la última versión del modelo enriquecido del sistema, con la totalidad de los elementos emergentes durante el modelamiento cuantitativo.

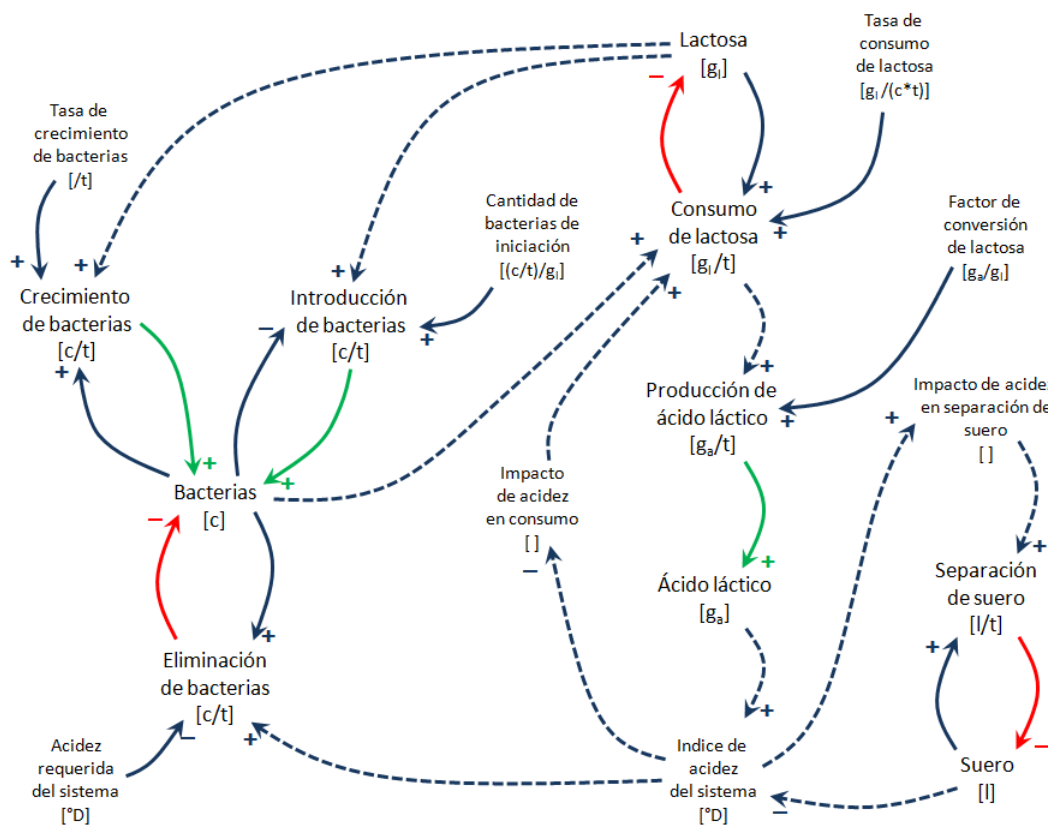


Figura 7.14 Diagrama de influencias del sistema

La siguiente tabla contiene los elementos que conforman la versión final del diagrama de influencias.

Tabla 7.3 Elementos del sistema

| Nombre | Abreviatura | Tipo | Unidad | |
|--|-------------|------------------------|---------|---------------------|
| Lactosa | LAC | Sustantivo | Gramo | [g] |
| Consumo de lactosa | CON | Verbo | | [g/t] |
| Ácido láctico | ALC | Sustantivo | Gramo | [g _a] |
| Producción de ácido láctico | PRO | Verbo | | [g _a /t] |
| Suero | SUE | Sustantivo | Litro | [l] |
| Separación de suero | SEP | Verbo | | [l/t] |
| Bacterias | BAC | Sustantivo | Colonia | [c] |
| Introducción de bacterias | INT | Verbo | | [c/t] |
| Crecimiento de bacterias | CRE | Verbo | | [c/t] |
| Eliminación de bacterias | ELI | Verbo | | [c/t] |
| Índice de acidez del sistema | IAS | Sustantivo auxiliar | | [°D] |
| Impacto de acidez en consumo | IAC | Multiplicador | | [] |
| Impacto de acidez en separación de suero | ISS | Multiplicador | | [] |
| Cantidad de bacterias de iniciación | CBI | Parámetro | | [(c/t)/g] |
| Tasa de crecimiento de bacterias | TCB | Parámetro | | [/t] |
| Tasa de consumo de lactosa | TCL | Parámetro | | [g/(c*t)] |
| Factor de conversión de lactosa | FCL | Parámetro | | [g _a /g] |
| Acidez requerida del sistema | ARS | Parámetro | | [°D] |

Tabla 7.4 Modelo matemático del sistema

| Elemento | Ecuación |
|--------------------------|--|
| Ecuaciones diferenciales | |
| BAC | $BAC(t + \Delta t) = BAC(t) + INT(t) * \Delta t + CRE(t) * \Delta t - ELI(t) * \Delta t$ |
| LAC | $LAC(t + \Delta t) = LAC(t) - CON(t) * \Delta t$ |
| ALC | $ALC(t + \Delta t) = ALC(t) + PRO(t) * \Delta t$ |
| SUE | $SUE(t + \Delta t) = SUE(t) - SEP(t) * \Delta t$ |
| Ecuaciones auxiliares | |
| CON | $CON(t) = \text{Mínimo}(BAC(t) * TCL(t) * IAC(t) ; LAC(t))$ |
| PRO | $PRO(t) = CON(t) * FCL(t)$ |
| SEP | $SEP(t) = SUE(t) * ISS(t)$ |
| INT | Si $(BAC(t) = 0)$ entonces $INT(t) = LAC(t) * CBI(t)$ de lo contrario $INT(t) = 0$ |
| CRE | Si $(LAC(t) = 0)$ entonces $CRE(t) = BAC(t) * TCB(t)$ |

| | |
|-----|--|
| | <i>de lo contrario</i> $CRE(t) = 0$ |
| ELI | <i>Si</i> $(IAS(t) \geq ARS(t))$ <i>entonces</i> $ELI(t) = BAC(t)$ <i>de lo contrario</i> $ELI(t) = 0$ |
| IAS | $IAS(t) = ALC(t)/SUE(t)$ |
| IAC | $IAC(t) = \text{Máximo}(1 - (IAS(t)/10)^4; 0)$ |
| ISS | $ISS(t) = \text{Mínimo}((IAS(t)/10)^2; 1)$ |

7.2.4 Simulación

Para probar el modelo matemático mediante simulación y percibir algunos detalles del comportamiento del sistema, se utilizarán los valores indicados en Tabla 4.5. La unidad de tiempo t es igual a 1 hora. Se simula la obtención de un derivado lácteo de 4°D a partir de 10 litros de leche.

Tabla 7.5 Condiciones iniciales de simulación

| Elemento | Valor inicial |
|---|--------------------|
| Condiciones iniciales | |
| Bacterias [c] | $BAC(0) = 0$ |
| Lactosa [g _l] | $LAC(0) = 480$ |
| Acido láctico [g _a] | $ALC(0) = 0$ |
| Suero [l] | $SUE(0) = 10$ |
| Parámetros | |
| Cantidad de bacterias de iniciación [(c/t)/g _l] | $CBI(t) = 0,14583$ |
| Tasa de crecimiento de bacterias [/t] | $TCB(t) = 2,08$ |
| Acidez requerida del sistema [°D] | $ARS(t) = 4$ |
| Tasa de consumo de lactosa [g _l /(c*t)] | $TCL(t) = 0,64$ |
| Factor de conversión de lactosa [g _a /g _l] | $FCL(t) = 0,65$ |

La simulación muestra que al cabo de poco más de 4 horas, el sistema ha alcanzado los 4°D requeridos para el producto.

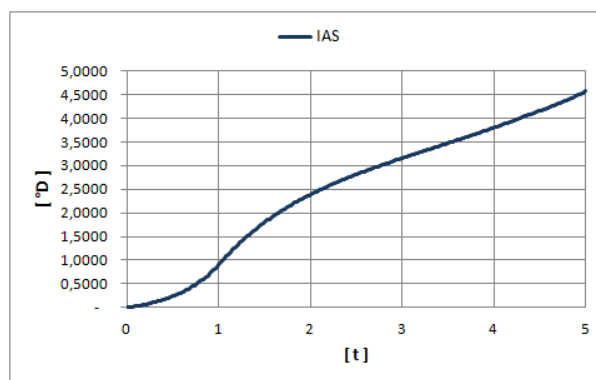


Figura 7.15 Comportamiento del índice de acidez del sistema

Durante el proceso, parte del suero se ha separado del medio, y cuando se alcanzan los 4°D de acidez, solo quedan aproximadamente 7 litros.

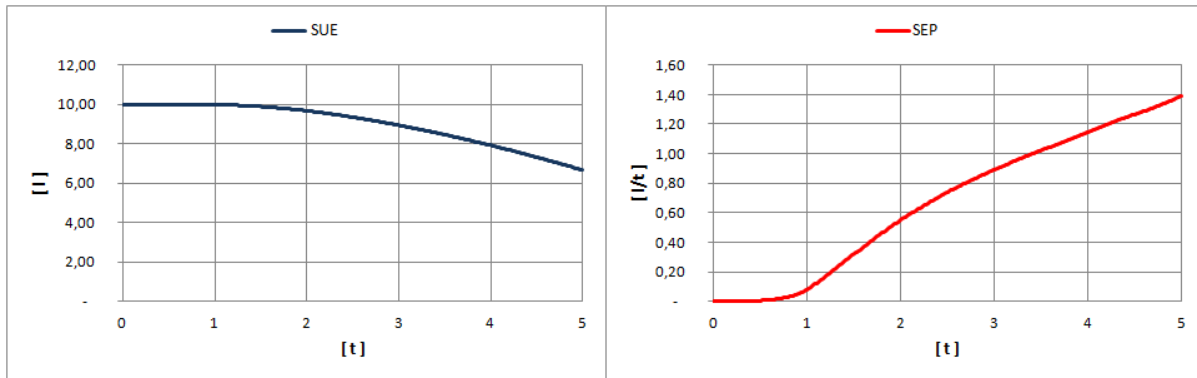


Figura 7.16 Comportamiento de la cantidad de suero en el sistema

El consumo de lactosa tuvo su pico máximo al cabo de 1 hora, cuando la lactosa había descendido hasta 340 gramos; a partir de ese momento, el consumo fue disminuyendo, según muestra la Figura 7.17.

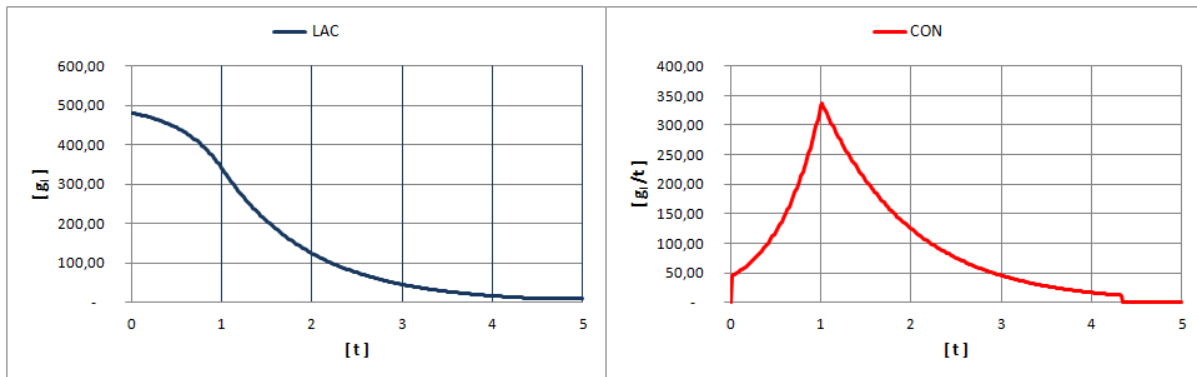


Figura 7.17 Comportamiento de la lactosa en el sistema

El ácido láctico se acumula como consecuencia del consumo de lactosa, hasta llegar a los 300 gramos en la cuarta hora de la simulación, como muestra la Figura 7.18.

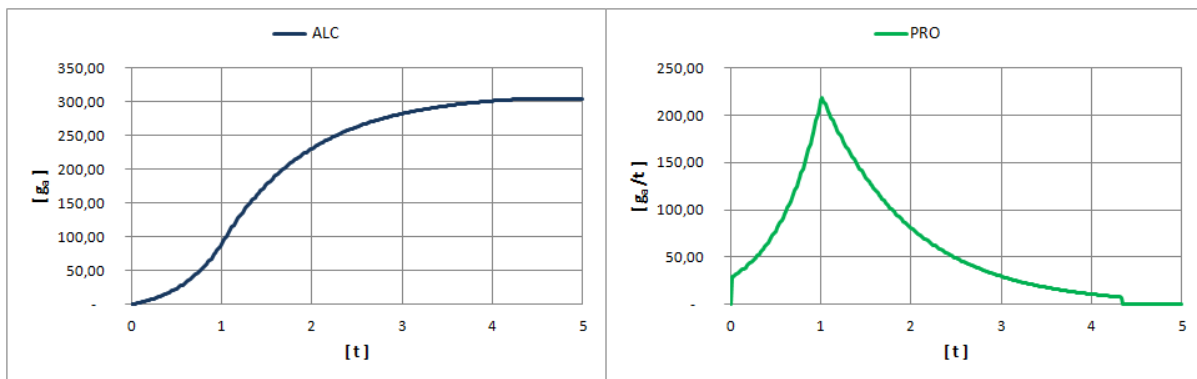


Figura 7.18 Comportamiento del ácido láctico en el sistema

Por último, las bacterias introducidas al inicio del proceso tuvieron un crecimiento exponencial, hasta que fueron eliminadas por completo cuando se alcanzó la acidez requerida.

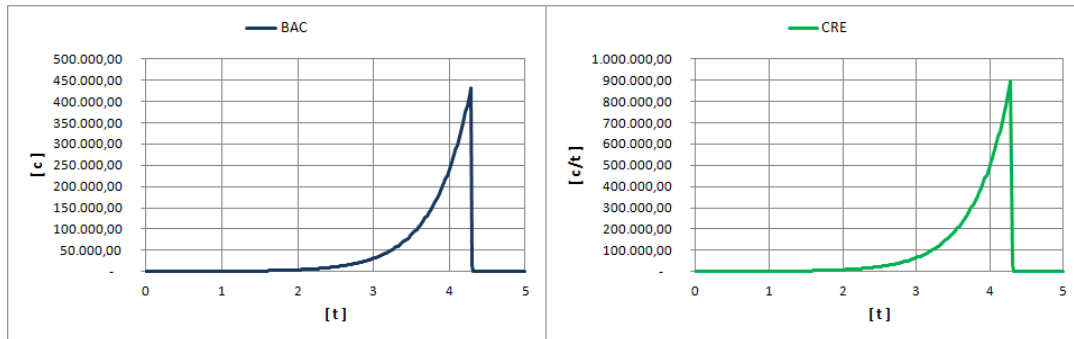


Figura 7.19 Comportamiento de las bacterias en el sistema

7.3 Transformación del modelo de Dinámica de Sistemas

La producción de leche en Colombia durante el año 2010 superó los 6.500 millones de litros (Bohórquez, Buitrago, Joya, Montaña, & Rivera, 2012), lo cual implica un crecimiento sostenido del 3,5% anual desde 1979, año en que se produjeron 2.000 millones de litros (Promoción de Turismo Inversión y Exportaciones Proexport Colombia, 2011).

En contraposición a los buenos indicadores de producción, un problema preocupante es la caída en el consumo interno de leche y la persistente informalidad del sector. Se estima que solo 3.089 millones de litros, equivalentes al 47% de la producción nacional de leche se producen y comercializan por canales formales, mientras que 621 millones de litros se utilizan para el autoconsumo en las fincas productoras, y 2.827 millones de litros, aproximadamente al 43% de la producción nacional, corresponde a la informalidad (Lafaurie, 2009), es decir, no cumplen con todos los estándares fitosanitarios y técnicos exigibles de acuerdo a la legislación nacional e internacional vigente en cuanto a producción de alimentos.

El gobierno nacional ha adelantado esfuerzos para la formalización del sector de lácteos (Ministerio de la Protección Social, 2006a, 2006b), tendientes a la implementación desde la producción primaria hasta la industria de alimentos, de los estándares internacionales que conforman el Codex Alimentarius (Organización Mundial de la Salud OMS & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, 2011).

A pesar de que la completa prohibición de la producción y comercialización informal de leche y sus derivados ha sido aplazada en varias oportunidades, es razonable afirmar que en el mediano plazo será obligatorio hacerlo, no solo por consideraciones sanitarias sino por compromisos de comercio exterior, enmarcados en los tratados de libre comercio.

A partir de lo anterior, se puede tomar como objetivo la formalización de un mercado de casi 3.000 millones de litros de leche anualmente, que deberían ser objeto de transformación en derivados (yogurt, quesos, kumis, entre otros), dado que el consumo de leche pasteurizada en sus diversas presentaciones (entera, descremada, deslactosada, entre otras) está disminuyendo

(Lafaurie, 2009). Y esta formalización probablemente vaya a requerir el apoyo técnico y organizacional para que algunas de las micro, pequeñas y medianas empresas del sector lácteo puedan cumplir con los estándares exigibles. En cuanto al apoyo técnico, es el ámbito de aplicación de profesionales en ciencias básicas y algunas ingenierías como industrial, de alimentos, química, entre otras. Con respecto al apoyo organizacional, uno de los objetivos podría ser la incorporación de las tecnologías de la información y la comunicación a los procesos productivos, lo cual implicaría la participación de los ingenieros de sistemas, en trabajo colaborativo con los expertos antes mencionados, para el desarrollo de sistemas computacionales que apoyaran las diferentes fases del proceso productivo.

Con las restricciones de un ejercicio didáctico, el diagrama de influencias y el modelo matemático permiten formular una propuesta de diseño de una eventual herramienta informática. Tomando cada subsistema como una clase, se logra un primer diagrama de clases.

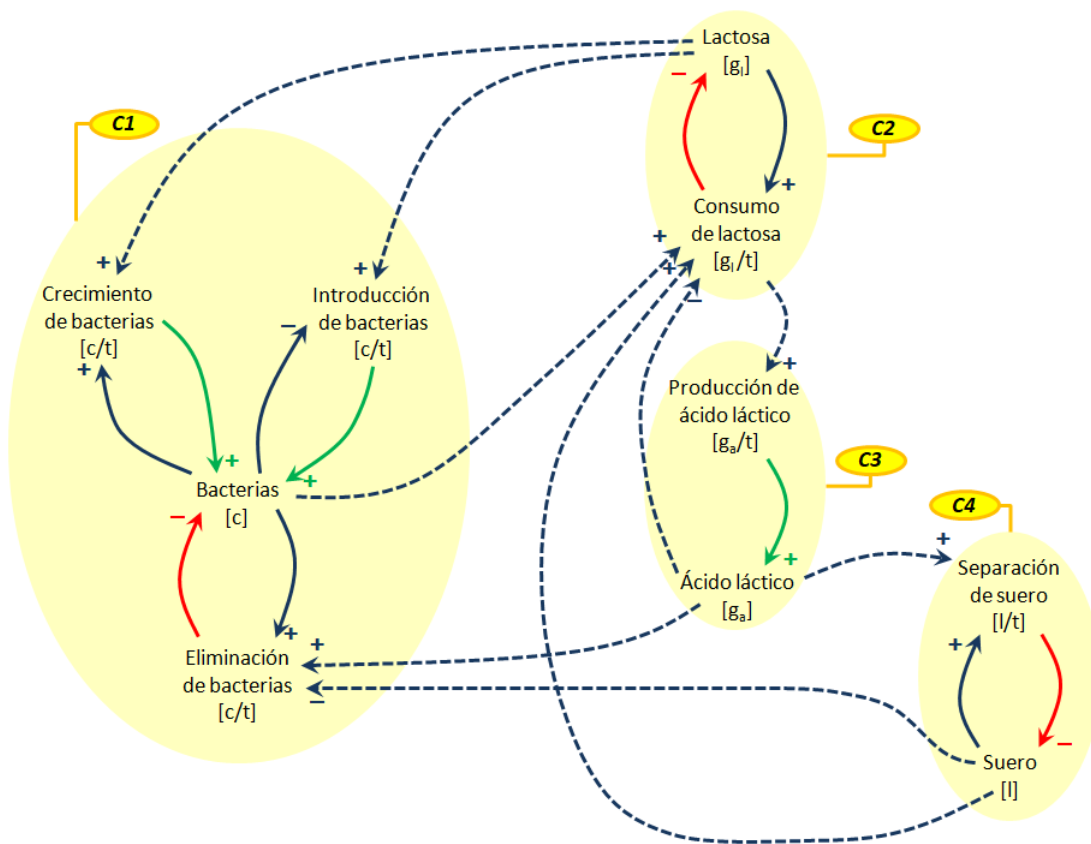


Figura 7.20 Subsistemas de la estructura básica del sistema para determinar clases

7.3.1 Diagrama de dominio

Cada subsistema de la estructura básica del sistema presentada en la Figura 7.20 se ha constituido en una clase, tomando el sustantivo como nombre. Se proponen las clases **Bacteria** (1), **Lactosa** (2), **AcidoLactico** (3) y **Suero** (6), como se observa en la Figura 7.21.

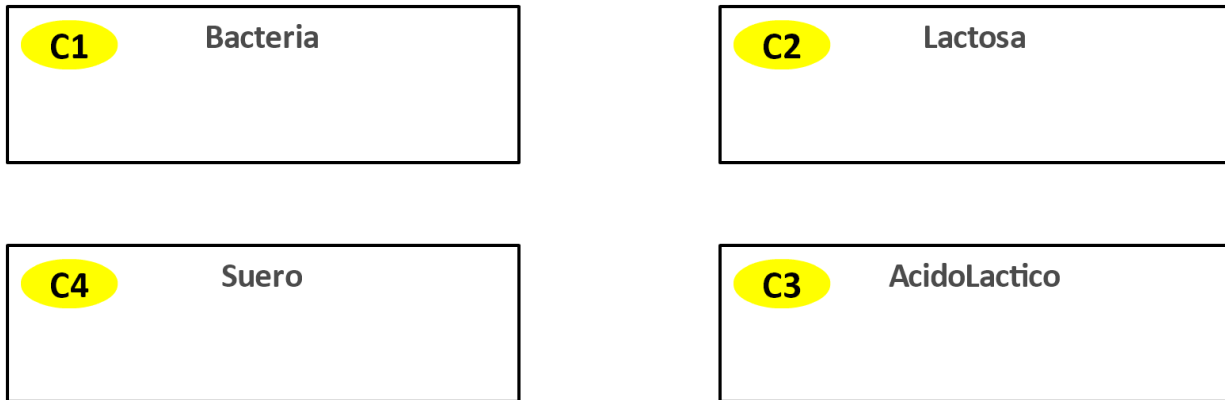


Figura 7.21 Diagrama de dominio – Clases del sistema

En la Figura 7.22 se señalan con rótulos las influencias entre subsistemas, que se utilizan para establecer las dependencias entre clases que se muestran en el diagrama de la Figura 7.23.

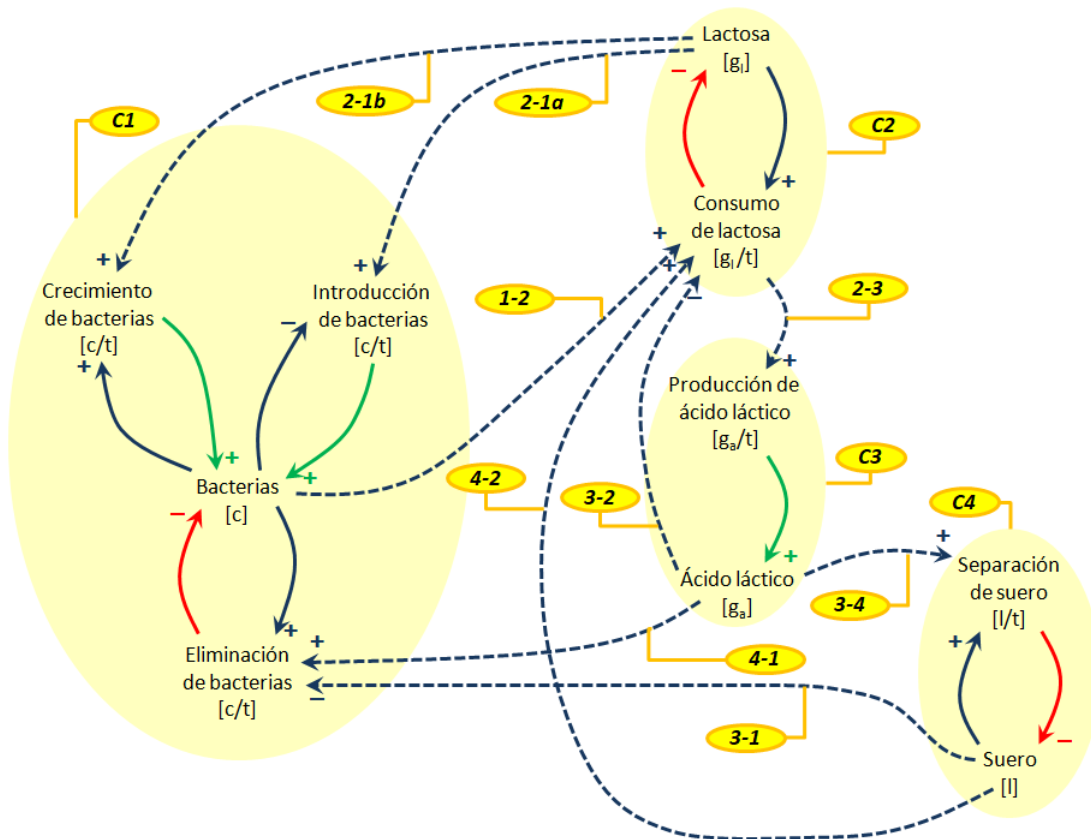


Figura 7.22 Influencias entre subsistemas para determinar dependencias entre clases

Las influencias de sustantivos sobre verbos se utilizan para definir las dependencias entre clases en el diagrama de dominio de la Figura 7.23: la dependencia 1-2 corresponde a la influencia de bacteria sobre lactosa; la 2-3 es la de lactosa sobre ácido láctico; la 3-4 es la influencia mutua entre lactosa y ácido láctico; las dependencias de la clase Bacteria con respecto a las clases del ácido láctico y suero, son las rotuladas como 3-1 y 4-1 respectivamente.

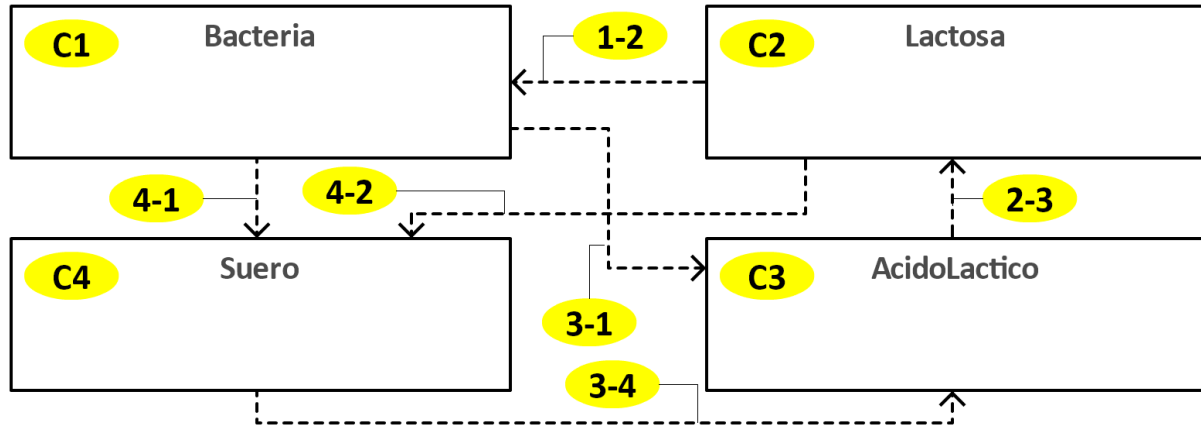


Figura 7.23 Diagrama de dominio – Dependencias entre clases

7.3.2 Diagrama de clases

En la Figura 7.24 se identifican mediante rótulos los sustantivos y verbos que conforman la estructura básica del sistema. Se incorporan como los primeros atributos y los métodos en el diagrama de clases, junto a los atributos *codigo* y *nombre* que no provienen del modelamiento matemático, sino de la necesidad de identificar y denominar las instancias de cada clase.

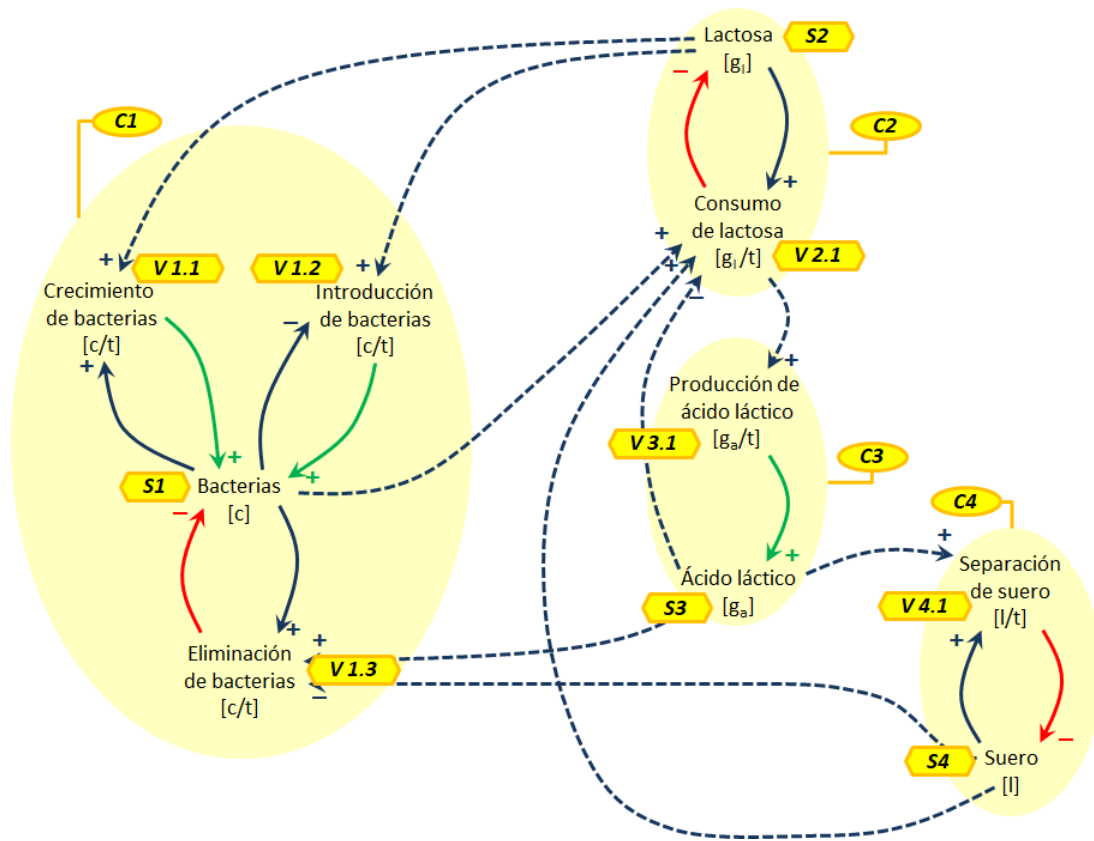


Figura 7.24 Sustantivos y verbos de la estructura básica del sistema

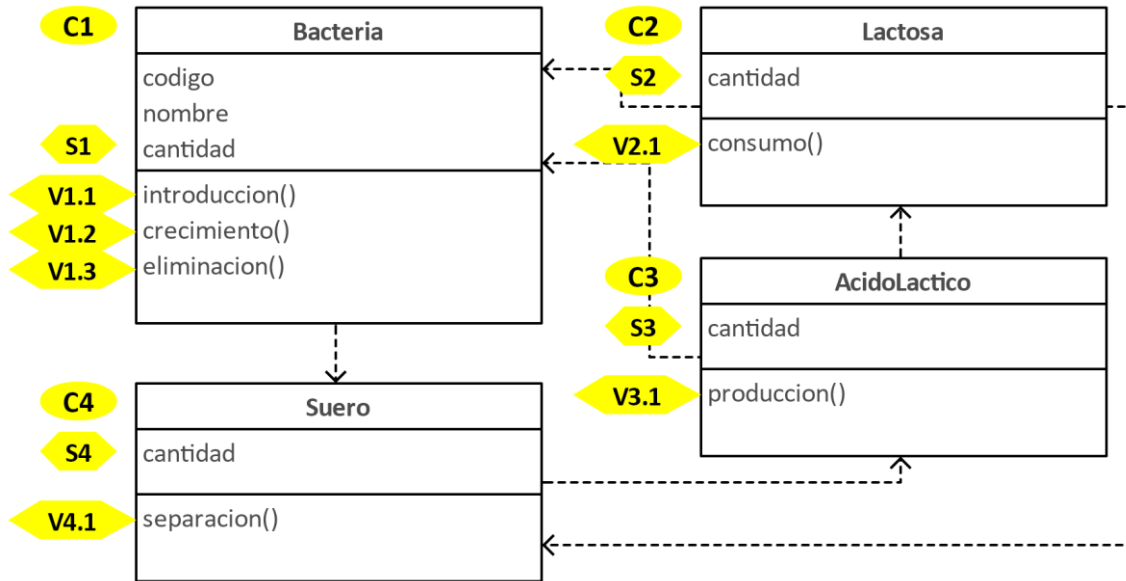


Figura 7.25 Diagrama de clases del sistema - Primera aproximación

En este caso, sin embargo, resulta extraño otorgarle atributos de código y nombre a instancias de las clases **Lactosa**, **AcidoLactico** y **Suero**, de modo que por ahora se omitieron dichos y la primera aproximación al diagrama de clases queda como muestra la Figura 7.25.

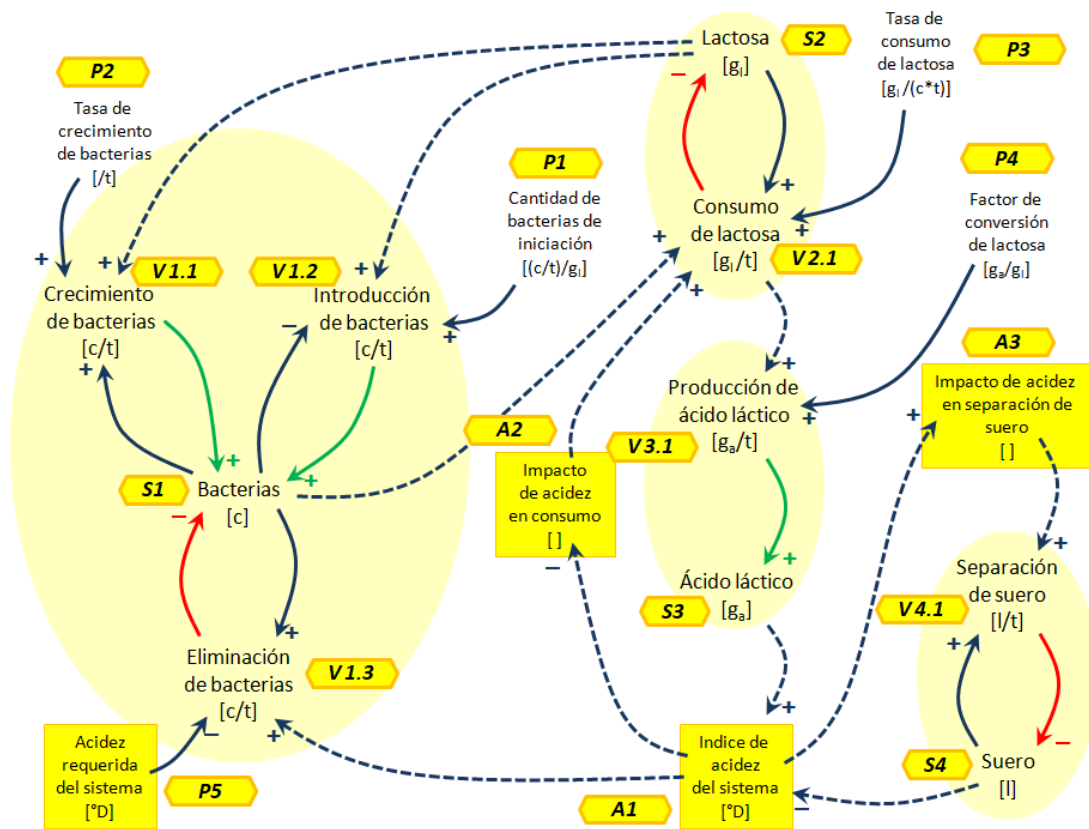


Figura 7.26 Parámetros y sustantivos auxiliares del modelo enriquecido del sistema

A partir de la Figura 7.26 hay que analizar a cual clase pertenecen los parámetros y los sustantivos auxiliares. Los parámetros que intervienen sobre un verbo pueden ubicarse fácilmente en la clase de donde proviene cada influencia. Por ejemplo la tasa de consumo de lactosa y el factor de conversión de lactosa parece apropiado asignarlos como atributos de la clase Bacteria.

No obstante otros resultan algo más complicados. Es el caso de la acidez requerida, ya que esta aunque influye sobre la eliminación de bacterias, no puede considerarse una característica de dichas bacterias, ni de las restantes clases del diagrama, sino una característica del derivado lácteo que se produce, y por tanto amerita la inclusión de una nueva clase, la que además resuelve la omisión anterior de asignarle código y nombre a instancias de las clases **Lactosa**, **AcidoLactico** y **Suero**, que claramente son componentes de la nueva clase a la que se denomina **DerivadoLacteo**, y a la que sí se le puede atribuir un código y un nombre, correspondientes a cada uno de los derivados lácteos, quedando el diagrama de clases como se presenta en la Figura 7.27

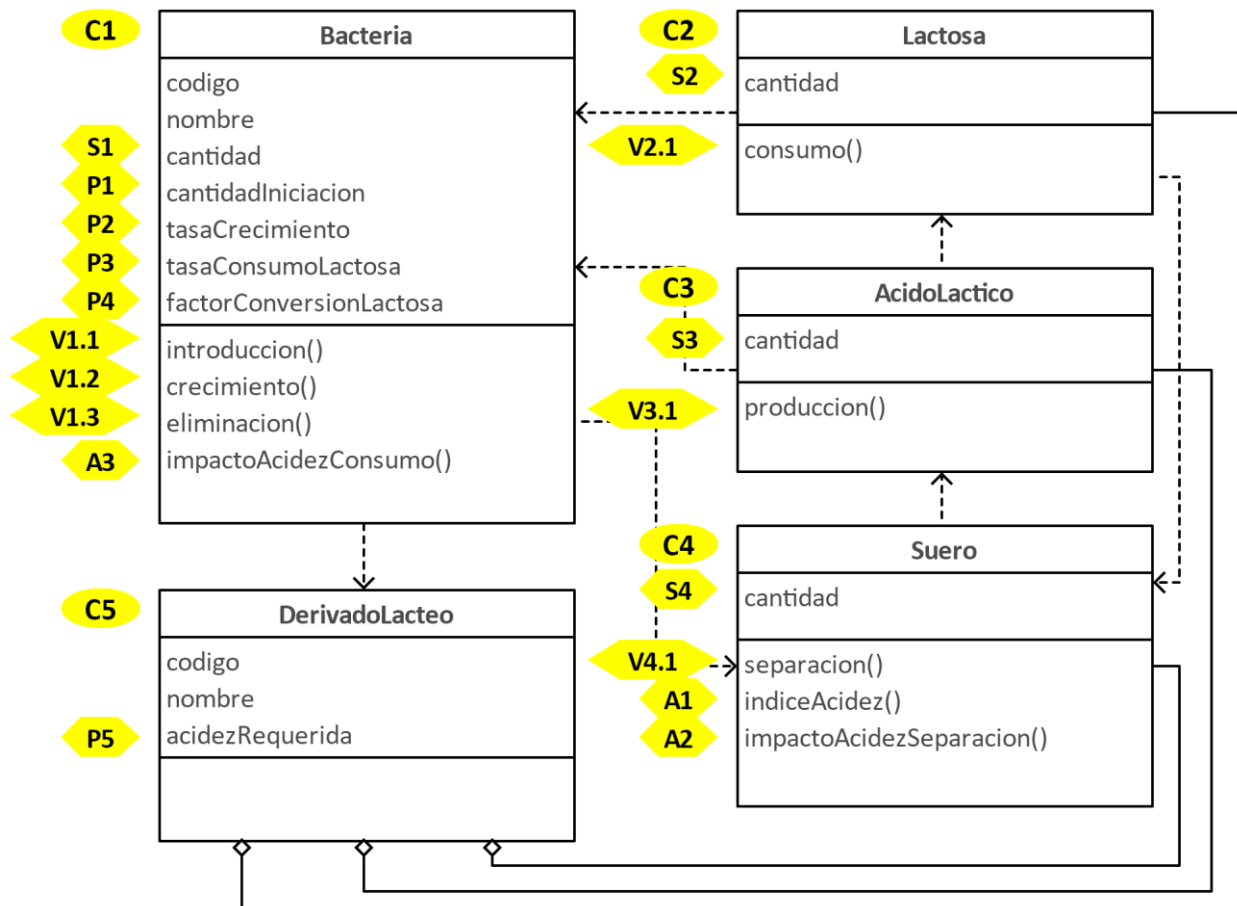


Figura 7.27 Diagrama de clases - Segunda aproximación

7.3.3 Diagrama Entidad Relación

El último diagrama que se propone obtener mediante transformación del modelo con Dinámica de Sistemas es el diagrama entidad relación. La Figura 7.28 muestra el que se obtuvo para el presente caso, incluyendo los mismos rótulos con que se puede ubicar el elemento del diagrama de influencias de donde proviene cada entidad, relación o atributo.

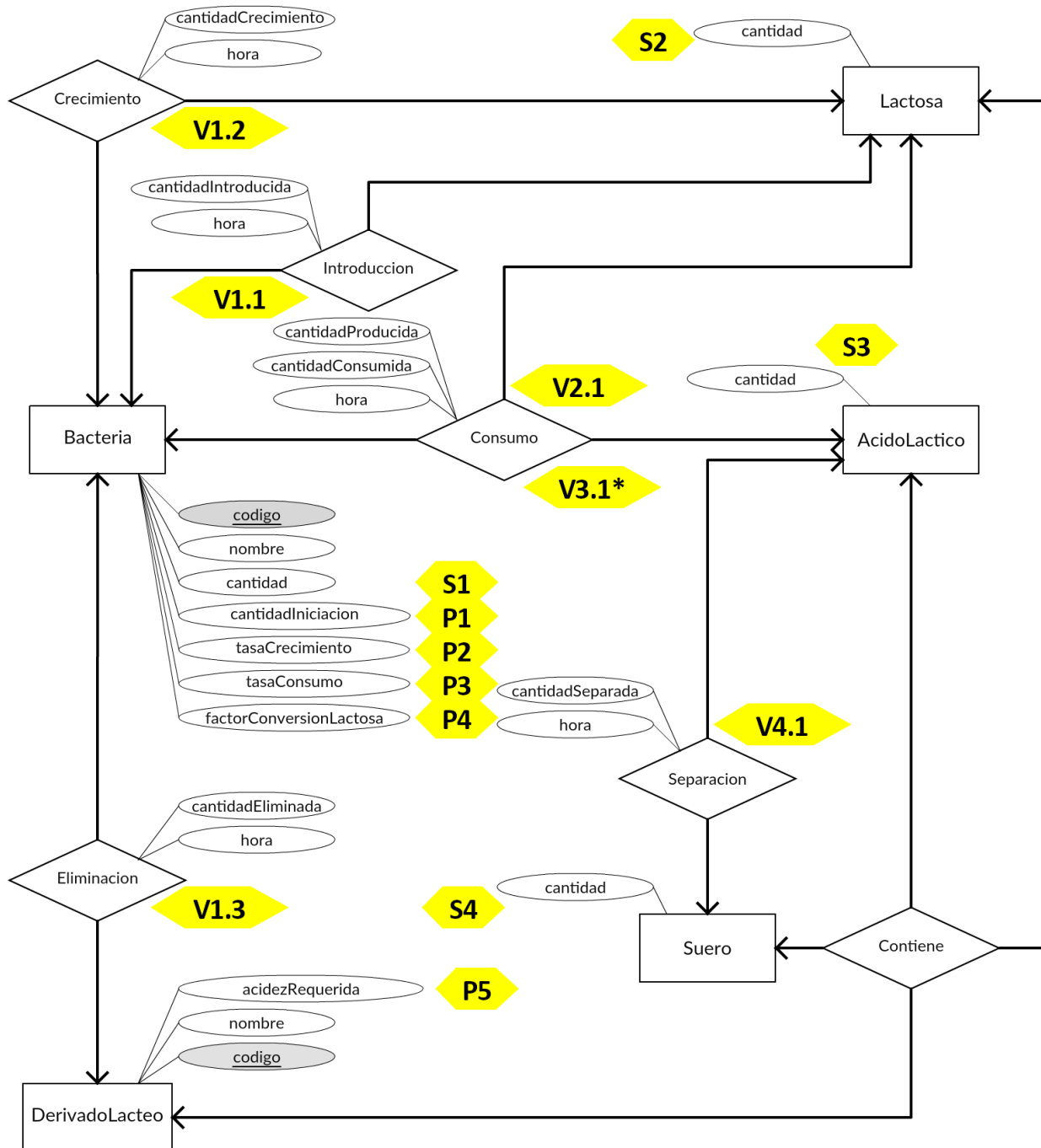


Figura 7.28 Diagrama entidad relación de la base de datos del sistema

Se tuvieron en cuenta los argumentos que acompañaron la segunda aproximación del diagrama de clases, por lo que se incluye la entidad **DerivadoLacteo** con el atributo **acidezRequerida**, y que mediante la relación Contiene se involucra con las entidades restantes provenientes del modelo con **Dinámica de Sistemas**, es decir, con **Lactosa**, **AcidoLactico** y Suero.

7.4 Depuración y consideraciones finales

Como se ha dicho antes, la pretensión de la metodología propuesta en este libro es proveer a la Ingeniería de Software de un insumo para perfeccionar, no suplantarla en todo el proceso de desarrollo de software.

Dadas las consideraciones sobre las clases **Lactosa**, **AcidoLactico** y **Suero**, que llevaron a la decisión de no darles atributos como **codigo** y **nombre**, para la depuración del presente diseño se tomaron los atributos de cantidad de dichas clases, provenientes del modelo con Dinámica de Sistemas, y se agruparon en una sola nueva clase denominada **Lote**, junto a los verbos y sustantivos auxiliares que los afectan.

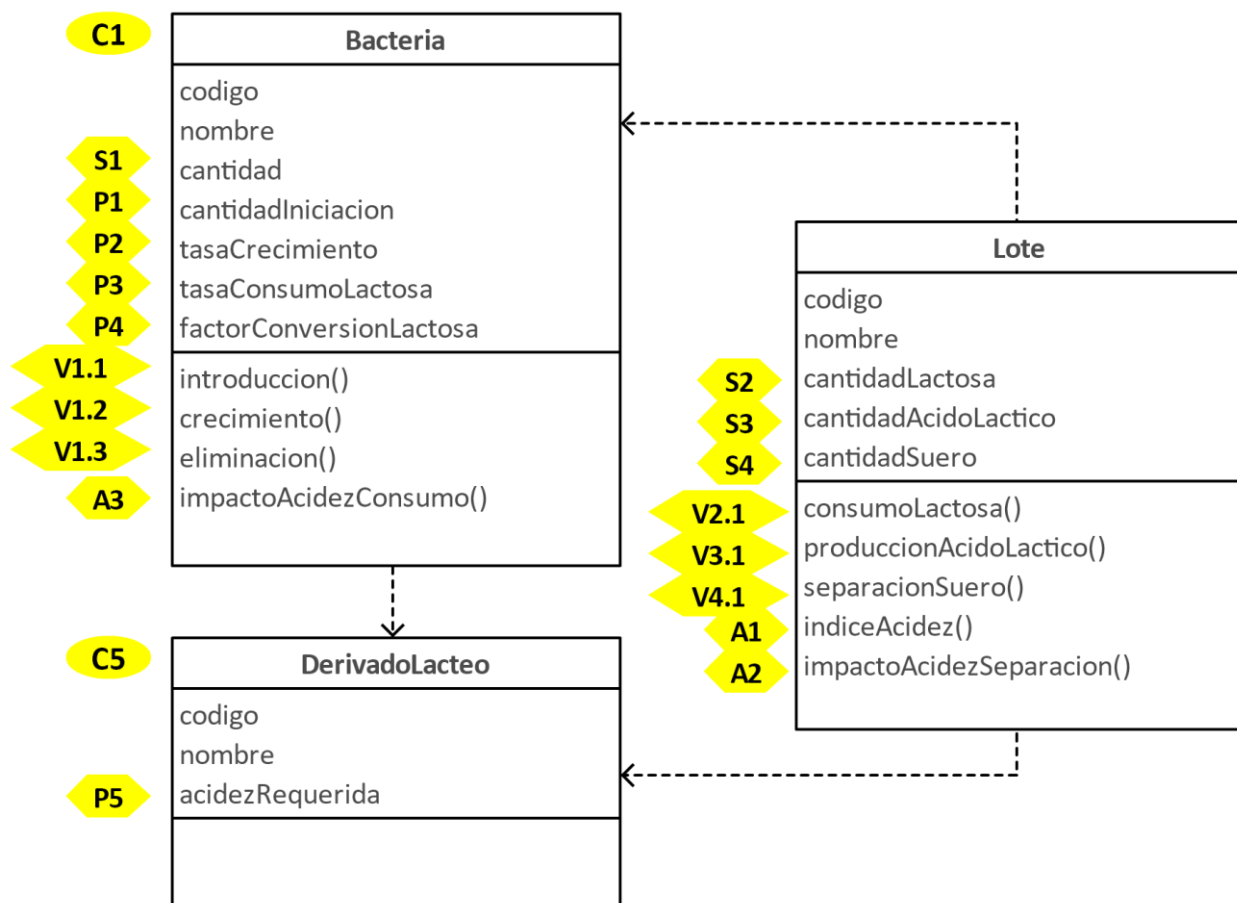


Figura 7.29 Diagrama de clases depurado del sistema

El resultado es el diagrama de clases depurado que se presenta en la Figura 7.29. En el mismo sentido fue depurado el diagrama entidad relación cuya nueva versión se muestra en la Figura 7.30.

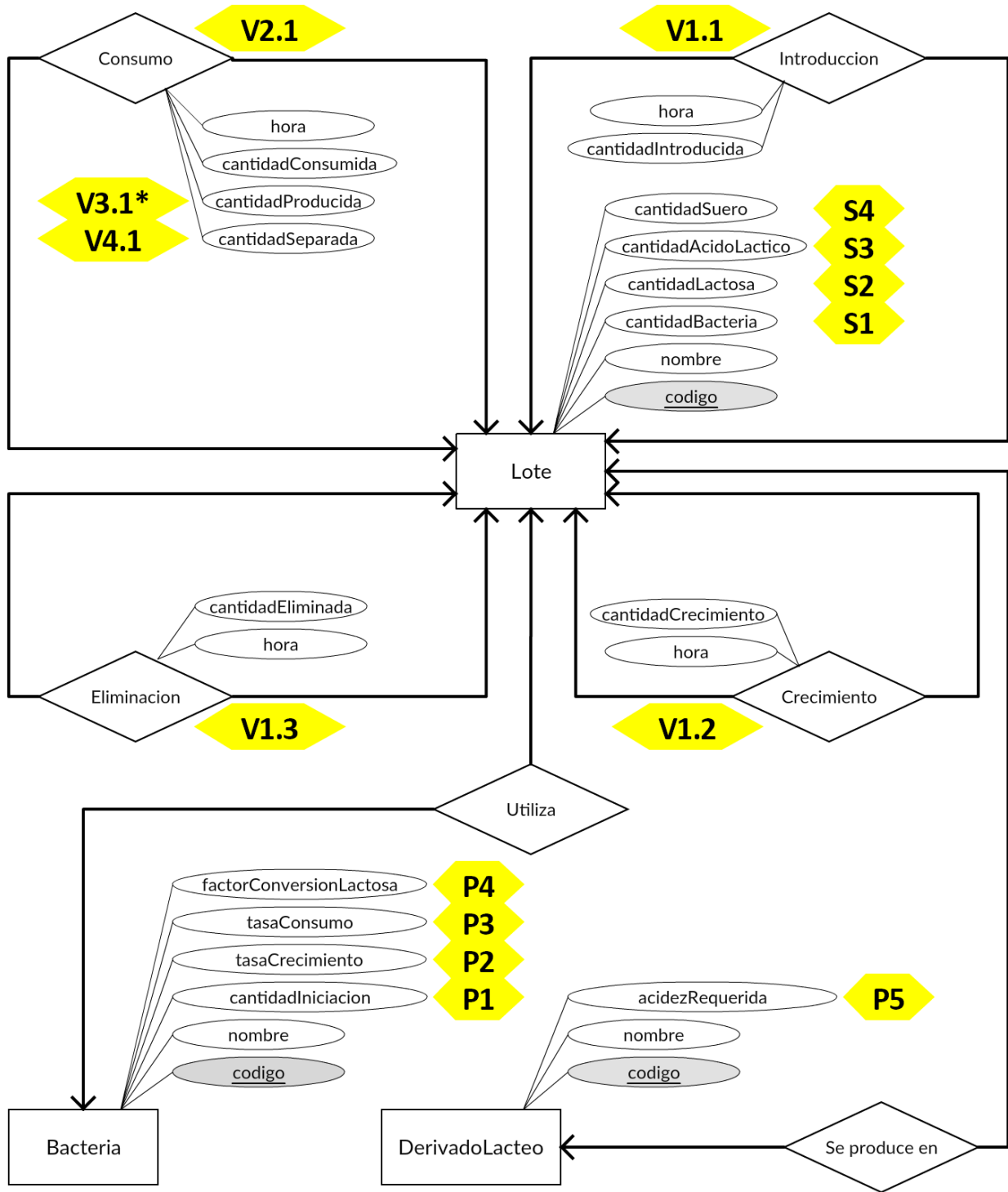


Figura 7.30 Diagrama entidad relación depurado del sistema

7.5 Implementación de prueba

Finalmente, mediante la técnica tradicional el diagrama entidad relación depurado ha sido transformado en el diagrama relacional de la Figura 7.31 documentado en el diccionario de datos de la Tabla 6.7, que luego fue implementado con propósitos didácticos y de verificación mediante la herramienta MBD 3.0.

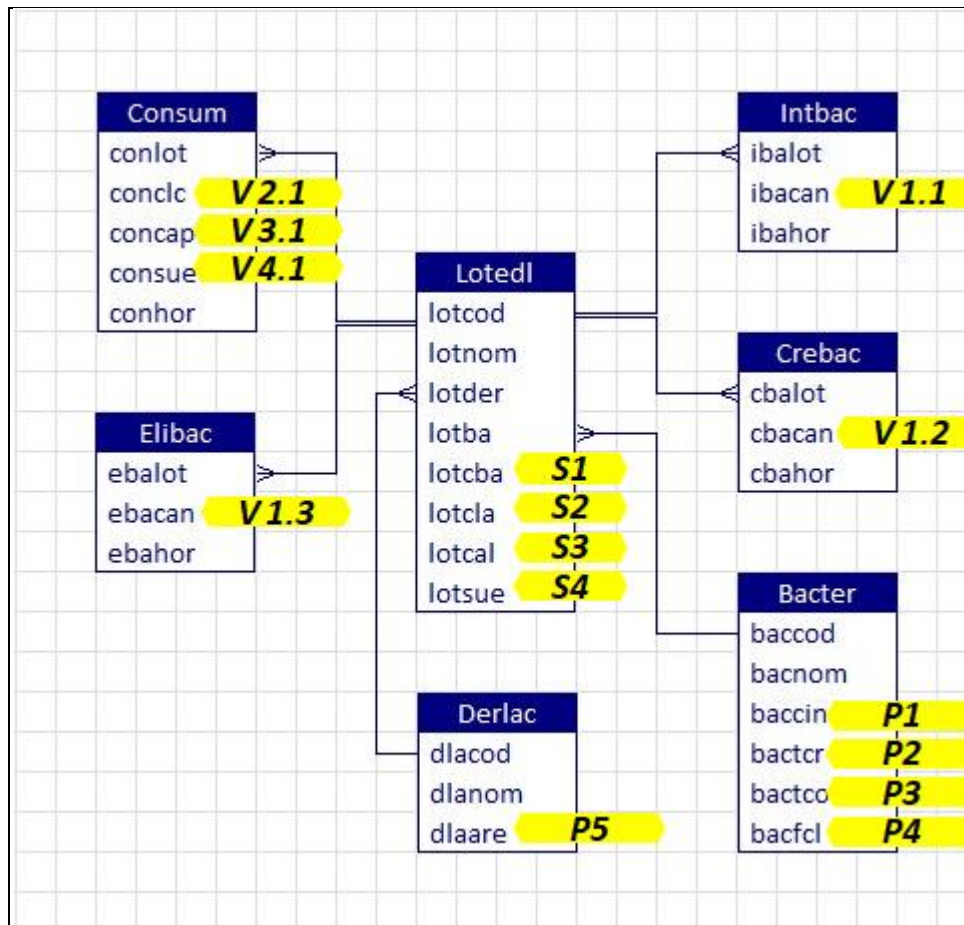


Figura 7.31 Diagrama relacional depurado de la base de datos del sistema

Tabla 7.6 Diccionario de datos de la base de datos del sistema

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|---------------|--|---------------|--|----------|------------|----------------------|
| Bacter | Relación de bacterias utilizadas en el proceso | baccod | Código de la bacteria | Primaria | | Autoincremental |
| | | bacnom | Nombre de la bacteria | | | Cadena de caracteres |
| | | baccin | Cantidad de colonias de inicialización | | | Número entero |
| | | bactcr | Tasa de crecimiento [1/hora] | | | Número real |

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|---------------|---|---------------|--|----------|---------------|-------------------------|
| | | bactco | Tasa de consumo [g/c*hora] | | | Número real |
| | | bacfl | Factor de conversión de lactosa | | | Número real |
| Derlac | Relación de derivados lácteos | dercod | Código del derivado | Primaria | | Autoincremental |
| | | dernom | Nombre del derivado | | | Cadena de caracteres |
| | | derare | Acidez requerida [°D] | | | Número real |
| Lotedi | Relación de lotes de producción de derivado lácteo | lotcod | Código del lote | Primaria | | Autoincremental |
| | | lotnom | Nombre del lote | | | Cadena de caracteres |
| | | lotder | Referencia al derivado lácteo | Foránea | Derlac.dlacod | Número entero |
| | | lotbac | Referencia a la bacteria utilizada | Foránea | Bacter.baccod | Número entero |
| | | lotcba | Cantidad de bacteria en el lote | | | Número real |
| | | lotcla | Cantidad de lactosa en el lote | | | Número real |
| | | Local | Cantidad de ácido láctico en el lote | | | Número real |
| | | lotsue | Cantidad de suero en el lote | | | Número real |
| Intbac | Relación de introducción de bacterias al proceso | ibalot | Referencia al lote | Foránea | Lotedi.lotcod | Número entero |
| | | ibacan | Cantidad de bacteria introducida | | | Número real |
| | | ibahor | Hora de introducción de la bacteria | | | Hora |
| Crebac | Relación de crecimiento de las bacterias | cbalot | Referencia al lote | Foránea | Lotedi.lotcod | Número entero |
| | | cbacan | Cantidad en que crece la bacteria | | | Número real |
| | | cbahor | Hora de registro de crecimiento de la bacteria | | | Hora |
| Consum | Relación de consumo de lactosa | conlot | Referencia al lote | Foránea | Lotedi.lotcod | Número entero |
| | | concl | Cantidad de lactosa consumida [g] | | | Número real |
| | | concap | Cantidad de ácido láctico producido [g] | | | Número real |
| | | consue | Cantidad de suero separado [l] | | | Número real |

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|---------------|--------------------------------------|---------------|---|---------|---------------|---------------|
| | | cbahor | Hora de registro del consumo de lactosa | | | Hora |
| | | imqmaq | Referencia a la maquinaria instalada | Foránea | Maquns.maqcod | Número entero |
| | | imqcan | Cantidad de maquinaria instalada | | | Número real |
| | | imqval | Valor egreso por instalación de maquinaria [\$] | | | Número real |
| | | imqfec | Fecha de la instalación de la maquinaria | | | Fecha |
| Elibac | Relación de eliminación de bacterias | ebalot | Referencia al lote | Foránea | Lotedl.lotcod | Número entero |
| | | ebacan | Cantidad de badcteria eliminada | | | Número real |
| | | ebahor | Hora de eliminación de la bacteria | | | Hora |

La interfaz automática generada por el software MBD 3.0 da una idea de la funcionalidad que podría proveer un sistema informático a partir del diseño logrado en las secciones anteriores.

Figura 7.32 Registro de derivados lácteos

Una de tales funcionalidades es el registro de los derivados lácteos a producir, que debe incluir el dato acerca del índice de acidez que lo caracteriza, como muestra la pantalla de ingreso de datos de la Figura 7.32.

También hace parte del conjunto de datos básicos del sistema lo relativo a las bacterias utilizadas en el proceso de producción. La Figura 7.33 muestra una pantalla de ingreso al respecto, que incluye la cantidad de iniciación que se requiere de una bacteria determinada como la *Streptococcus thermophilus*, y sus características pertinentes para el proceso, como la tasa de crecimiento, la tasa de consumo de lactosa y su factor de conversión, todos elementos provenientes del modelo matemático.

Bacter | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 76 bytes | Tamaño total 76 bytes

| | |
|--------------------------------|----------------------------|
| Código : | 1 |
| Bacteria : | Streptococcus thermophilus |
| Cantidad de iniciación [c/g] : | 0,14583 |
| Tasa de crecimiento [1/hora] : | 2,08 |
| Tasa de consumo [Kg/c*hora] : | 0,64 |
| Factor conversión lactosa : | 0,65 |

Figura 7.33 Registro de bacterias

A partir de los registros anteriores el sistema informático puede apoyar la inicialización de lotes de producción, como se muestra en la Figura 7.34, así como las operaciones que lo afectan como la introducción de las bacterias de iniciación del proceso que se muestra en la Figura 7.35.

Lotedl

| | |
|---------------------|----------------------------|
| Código : | 1 |
| Lote : | 20180701001 |
| Derivado : | Yogur |
| Bacteria : | Streptococcus thermophilus |
| Cantidad bacteria : | 0 |
| Lactosa [g] : | 7800 |
| Ácido láctico [g] : | 0 |
| Suero [l] : | 1000 |

Figura 7.34 Registro de un nuevo lote de producción

Intbac | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 12 bytes | Tamaño total 12 bytes

| | |
|----------------|-------------|
| Lote : | 20180701001 |
| Cantidad : | 70 |
| Hora (hh:mm) : | 16:00:00 |

Figura 7.35 Registro de introducción de bacterias

Como se mencionó en los casos anteriores, el diseño de software logrado no necesariamente corresponde a un simulador, sino a una herramienta que puede apoyar la gestión del proceso. Sin embargo, un registro permanente, contrastado con datos de simulación, ofrecería ventajas en la optimización del mismo. El grado de avance, desde luego, corresponde al nivel de una

propuesta metodológica, y el abordaje del fenómeno real implica todavía una gran complejidad pendiente en cuanto a los múltiples componentes de la leche, las diversas características de las bacterias que influyen en el proceso, entre otras consideraciones.

El presente caso incorporó elementos adicionales de complejidad para el estudiante. En lo concerniente a Dinámica de Sistemas, fue necesario recurrir a elementos nuevos como los sustantivos auxiliares y multiplicadores. En lo matemático, se requirió una investigación adicional para complementar los datos del planteamiento del caso. Para la transformación del diagrama de influencias en diagrama de clases, debieron introducirse las orientaciones metodológicas para los sustantivos auxiliares y los multiplicadores como métodos de clase. Y finalmente, la propuesta de desarrollo de software estuvo acompañada de un contexto organizacional y legal, dentro del cual el sistema informático no solo es posible sino necesario. Se espera que llegando a un caso de este nivel, el estudiante de Ingeniería de Sistemas no solo haya ganado competencia como modelador, tanto en Dinámica de Sistemas como en diseño de software, sino como trabajador eminentemente interdisciplinario, que requerirá en su desempeño profesional investigar y documentarse en múltiples campos de aplicación, más allá de sus conocimientos técnicos en desarrollo de software.

Referencias

Bohórquez, N., Buitrago, A., Joya, M., Montaña, X., & Rivera, H. A. (2012). Análisis estructural de sectores estratégicos : sector productos lácteos. *Documentos de Investigación*, (135).

Fesalimentos. (2013). Productos lácteos [Fotografía]. *Cursos intensivos de derivados lácteos*. Retrieved November 01, 2014, from <http://www.fesalimentos.com/food/item/julio-11-12-y-13-de-2013-cursos-intensivos-de-derivados-lacteos-quesos-frescos-y-madurados-yogurt-griego-teorico-practico/>

García, O., & Ochoa, I. (1987). *Acidez de la leche y determinación de adulteraciones* (1st ed., p. 41). Bogotá D.E.: Servicio Nacional de Aprendizaje SENA.

Iyer, R., Tomar, S. K., Uma Maheswari, T., & Singh, R. (2010). Streptococcus thermophilus strains: Multifunctional lactic acid bacteria. *International Dairy Journal*, 20(3), 133–141. doi:10.1016/j.idairyj.2009.10.005

Jiménez, S., & Sarmiento, P. (2007). *Leche: de la producción al consumo* (1st ed., p. 94). Madrid: Fundación Tomás Pascual - Real Academia de Ciencias Veterinarias de España RACVE.

Lafaurie, J. (2009). Sector Lácteo Colombiano Una propuesta para reconstruir el sector (pp. 1–48).

Ministerio de la Protección Social. Decreto 2838 de 2006 (2006).

Ministerio de la Protección Social. Decreto 616 de 2006 (2006).

Organización Mundial de la Salud OMS, & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO. (2011). *Codex Alimentarius - Leche y productos lácteos* (2nd ed., p. 267).

Promoción de Turismo Inversión y Exportaciones Proexport Colombia. (2011). *Sector Lácteo en Colombia* (Vol. 57, pp. 1–18).

Rhimi, M., Boisson, A., Dejob, M., Boudebouze, S., Maguin, E., Haser, R., & Aghajari, N. (2010). Efficient bioconversion of lactose in milk and whey: immobilization and biochemical characterization of a beta-galactosidase from the dairy *Streptococcus thermophilus* LMD9 strain. *Research in Microbiology*, 161(7), 515–25. doi:10.1016/j.resmic.2010.04.011

Ruiz Moreno, M. (2001). Intolerancia a la lactosa. In *Enfermedad celíaca* (1st ed., pp. 78–83). Madrid: Real Patronato sobre Discapacidad.

8 Manejo forestal urbano – Caso de estudio

Los dos casos anteriores pretendían aprovechar contextos de producción con los que el estudiante pudiera estar familiarizado, de manera que quedara a su alcance la comprensión de los requerimientos de un sistema informático, luego de haber obtenido un avance en el diseño del software como transformación de un modelo con Dinámica de Sistemas. También aprovechando esta cercanía con el contexto, este tipo de casos permitía introducir elementos nuevos de modelamiento, como los sustantivos auxiliares y los multiplicadores.

Un elemento que se consideró en la formulación de los casos finales fue la posibilidad de motivar al estudiante de Ingeniería de Sistemas a involucrarse en controversias, así sea solo a nivel de ejercicio académico, pero siempre manteniendo como objetivo la incorporación de desarrollos informáticos en la solución de problemas de la sociedad. En cuanto a elementos de Dinámica de Sistemas, se incluyen en este caso sustantivos que se distribuyen en varios niveles de estratificación o categorización.

8.1 Formulación del caso

8.1.1 Planteamiento

La tala de árboles en las ciudades es una actividad que genera controversias, y que periódicamente se convierte en materia de debate público, por lo general coincidiendo con la temporada de lluvias. Por razones de sensibilidad social “cuando se va a talar un árbol normalmente son los vecinos los que llaman a protestar, a quejarse del por qué es que se va a talar el árbol; si se cae el árbol y ocasiona un daño, entonces son ellos mismos los que llaman a decir por qué no habían talado el árbol... es una situación como engorrosa”, afirma un funcionario del Jardín Botánico de Bogotá, entidad encargada del “trabajo sucio” de talarlos (Caracol Radio, 2014).

La falta de manejo forestal en una ciudad puede tener consecuencias graves. Durante la primera temporada lluviosa del año 2011, el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias reportó 424 incidentes en Bogotá debidos a árboles en mal estado; en algunos de estos casos hubo pérdida de vidas humanas (Revista Semana, 2011).

A pesar de las cifras anteriores, en la conciencia popular el árbol es un ser al que se le dedica afecto, y que en términos prácticos es un aliado para combatir la contaminación. En términos técnicos y científicos, el asunto es más complejo.

Una de las principales fuentes de contaminación ambiental en las ciudades la constituyen los vehículos automotores, y su número se incrementa permanentemente, en concordancia con el

crecimiento de la población. En el año 2005 se vendieron 145.719 vehículos nuevos (Econometría S.A., 2011), cifra que pasó a 324.750 unidades en el año 2013 (Econometría S.A., 2012).

El parque automotor colombiano funciona con combustibles fósiles, como la gasolina y el gas natural. Durante su funcionamiento se consume oxígeno del aire, y se generan como desecho varias sustancias, entre ellas el dióxido de carbono (CO_2), uno de los causantes del efecto invernadero en el planeta.

Las plantas, y en especial los árboles en período de desarrollo, toman el dióxido de carbono del aire, y lo asimilan para su propio crecimiento, liberando nuevamente el oxígeno. Por tanto, las ciudades requieren de una población significativa de árboles, que mitiguen los efectos causados por las emisiones de los vehículos (Torres, 2012).



Figura 8.1 Flora urbana

Esta población de árboles requiere también políticas de manejo, pues los que alcanzan su madurez ya no son eficientes capturando dióxido de carbono, y es necesario renovarlos; las condiciones de cada ciudad determinan la especie de árbol más recomendable.

En los últimos años se ha implementado en las principales ciudades medidas para restringir el uso de vehículos. Cada ciudad, dependiendo de la magnitud de su problema de contaminación y de movilidad, determina la cantidad de automotores que diariamente tienen prohibida su circulación al menos en los sectores más concurridos. Por ejemplo, Bucaramanga restringe el 20% de su parque automotor durante 14 horas diarias, mientras que Bogotá lo hace con el 50% de los vehículos, pero durante 7 horas al día.

Un proceso de modelamiento dinámico sistémico podría permitir el desarrollo de sistemas de información, para hacer los cálculos necesarios para la política de actualización del parque automotor y de manejo forestal de cada ciudad, dependiendo de sus propios parámetros ambientales, de su población, y de las tecnologías disponibles en materia de vehículos.

8.1.2 Pregunta

¿Cómo modelaría con Dinámica de Sistemas los procesos de generación y control de la contaminación del aire urbano por la creciente cantidad de vehículos que utiliza la población?

8.2 Solución de referencia

8.2.1 Modelamiento cualitativo de la estructura básica del sistema

Inicialmente hay que identificar los sustantivos y verbos que conforman la estructura básica del sistema, asumiendo que sustantivos son aquellos componentes del sistema que se pueden expresar como una cantidad de elementos asociada a una unidad de medida y factibles de ser contados o medidos en cualquier instante, mientras que los verbos son las acciones o eventos cuyo resultado es el cambio en el número de dichos sustantivos.

En el planteamiento del caso se pueden identificar los sustantivos **población**, **vehículos**, **árboles**. Podría sugerirse otro sustantivo llamado contaminación, asumiendo que los vehículos contaminan y los árboles absorben la contaminación, que parecen verbos. Tendencias más conservadoras en Dinámica de Sistemas probablemente no tengan objeción en utilizar contaminación como sustantivo, pero para el propósito de llevar los modelos hasta su transformación sistemática en diseños de software, hay una restricción matemática de lo que puede ser sustantivo o verbo.

Siendo la contaminación un término no absoluto, sino que alude a una cierta proporción entre lo que contamina y lo que es contaminado, es preferible incluir como sustantivo no la contaminación en sentido general, sino un agente **contaminante en suspensión**.

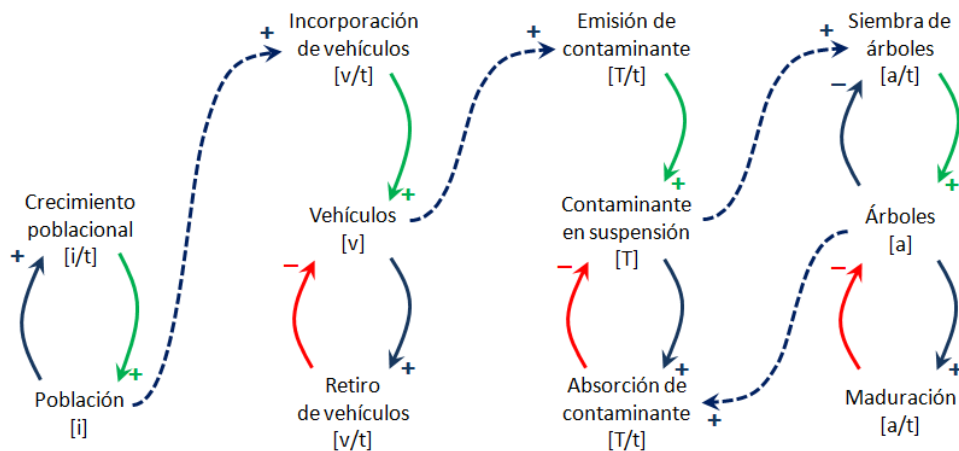


Figura 8.2 Diagrama de influencias de la estructura básica del sistema

Esta vez la dinámica de la población, sustantivo que se medirá en individuos [i], se va a reunir en un único verbo llamado **crecimiento poblacional**, expresado en [i/t], por cuanto no resulta de interés para los alcances del modelo evaluar por separado los nacimientos y las muertes.

Para el sustantivo **vehículos**, cuya unidad se expresará como [v], se establece el verbo **incorporación de vehículos**, que recibe la influencia de la población, con lo cual se representa

que una población mayor ocasionará un mayor ingreso de vehículos al sistema. El efecto inverso lo ejerce el verbo **retiro de vehículos**.

Con respecto a los **árboles**, para los que se utilizará la unidad de medida [a], su dinámica se basa en los verbos **siembra y tala**.

La unidad de medida para el sustantivo **contaminante en suspensión** será la tonelada [T], y es el subsistema con el que interactúan todos los demás: los vehículos influyen en la **emisión de contaminante**; los árboles a su vez realizan la **absorción**.

Este caso requiere una consideración adicional en cuanto a los sustantivos: no todos los árboles contribuyen con la absorción de contaminantes, solo los que están en etapa de desarrollo. En el modelo se deben incluir sustantivos que hagan alusión a estratos específicos o categorías aplicables a elementos de la misma naturaleza. Como lo muestra la Figura 8.3, para para árboles se hizo distinción entre **árboles en crecimiento** y **árboles en madurez**, conservando las mismas unidades de medida y agregando el verbo **maduración** para representar el paso de un elemento de una categoría a otra.

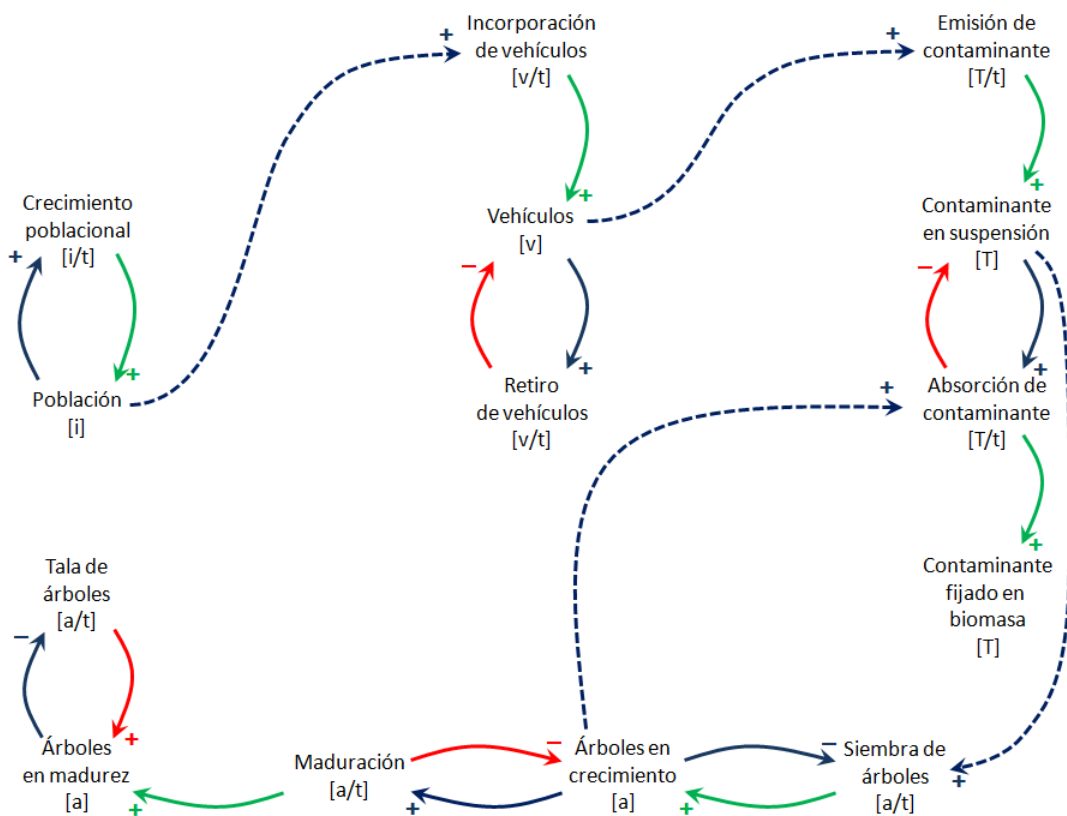


Figura 8.3 Estructura básica del sistema con sustantivos estratificados

Dependiendo de la posible movilidad de los elementos en sus respectivas categorías, deberían agregarse verbos adicionales. Los estratos en que se distribuyeron los árboles no tienen retorno pues corresponden a etapas de su ciclo vital. En cuanto a los contaminantes, se

agregó otro sustantivo que representa la fijación de dichos contaminantes en la biomasa de los árboles que los absorben.

8.2.2 Modelamiento cuantitativo

En un modelo en Dinámica de Sistemas cada sustantivo se representa mediante una ecuación diferencial, en la que su valor se calcula a partir de su valor previo, más o menos los valores de los verbos según el tipo de influencia que reciba de estos. En Tabla 7.1 se presenta una lista de los sustantivos y verbos de la estructura básica del sistema modelado hasta ahora, y las abreviaturas de cada elemento que se utilizan en la construcción del modelo matemático a continuación.

Tabla 8.1 Elementos de la estructura básica del sistema

| Nombre | Abreviatura | Tipo | Unidad | |
|--------------------------------|-------------|------------|-----------|-------|
| Población | POB | Sustantivo | Individuo | [i] |
| Crecimiento poblacional | CRE | Verbo | | [i/t] |
| Vehículos | VEH | Sustantivo | Vehículo | [v] |
| Incorporación de vehículos | INC | Verbo | | [v/t] |
| Retiro de vehículos | RET | Verbo | | [l/t] |
| Arboles en crecimiento | ARC | Sustantivo | Arbol | [a] |
| Arboles en madurez | ARM | Sustantivo | Arbol | [a] |
| Siembra de árboles | SIE | Verbo | | [a/t] |
| Maduración | MAD | Verbo | | [a/t] |
| Tala de árboles | TAL | Verbo | | [a/t] |
| Contaminante en suspensión | COS | Sustantivo | Tonelada | [T] |
| Contaminante fijado en biomasa | CFB | Sustantivo | Tonelada | [T] |
| Emisión de contaminante | EMI | Verbo | | [T/t] |
| Absorción de contaminante | ABS | Verbo | | [T/t] |

8.2.2.1 Ecuaciones diferenciales

A cada sustantivo le corresponde una ecuación diferencial ordinaria, en la que la derivada del sustantivo es igual a la suma de los verbos con el signo dado por su influencia. Estas ecuaciones escritas utilizando el método de Euler de integración numérica, pueden interpretarse como que el valor de un sustantivo en cualquier instante dado $(t+\Delta t)$ equivale a su valor en el instante previo (t) , sumando o restando los valores de los verbos para dicho instante (t) . La Tabla 8.2 muestra las ecuaciones diferenciales para la estructura básica del sistema, escritas también en forma de Euler.

Tabla 8.2 Ecuaciones diferenciales del sistema

| Elemento | Ecuación diferencial | Ecuación diferencial en forma de Euler |
|-----------|-------------------------|--|
| Población | $\frac{dPOB}{dt} = CRE$ | $POB(t + \Delta t) = POB(t) + CRE(t) * \Delta t$ |

| | | |
|--------------------------------|-------------------------------|--|
| Vehículos | $\frac{dVEH}{dt} = INC - RET$ | $VEH(t + \Delta t) = VEH(t) + INC(t) * \Delta t - RET(t) * \Delta t$ |
| Árboles en crecimiento | $\frac{dARC}{dt} = SIE - MAD$ | $ARC(t + \Delta t) = ARC(t) + SIE(t) * \Delta t - MAD(t) * \Delta t$ |
| Árboles en madurez | $\frac{dARM}{dt} = MAD - TAL$ | $ARM(t + \Delta t) = ARM(t) + MAD(t) * \Delta t - TAL(t) * \Delta t$ |
| Contaminante en suspensión | $\frac{dCOS}{dt} = EMI - ABS$ | $COS(t + \Delta t) = COS(t) + EMI(t) * \Delta t - ABS(t) * \Delta t$ |
| Contaminante fijado en biomasa | $\frac{dCFB}{dt} = ABS$ | $CFB(t + \Delta t) = CFB(t) + ABS(t) * \Delta t$ |

8.2.2.2 Ecuaciones auxiliares

Otra parte del modelo matemático está conformada por las ecuaciones de los verbos, y que se construyen en cada caso con los elementos desde donde provienen influencias. En el diagrama de influencias de la Figura 8.3, al verbo crecimiento poblacional solo llega influencia desde su propio sustantivo.

$$CRE(t) = f(POB(t))$$

$$[i/t] = f([i])$$

Como en otras ocasiones, cuando solo se tiene un elemento para constituir la ecuación, el método a seguir es el de búsqueda de la unidad complementaria.

$$[i/t] = [i] * [(1/t)]$$

$$[i/t] = [i/t]$$

Algo que se expresa como coeficiente por unidad de tiempo suele ser una tasa, en este caso, la **tasa de crecimiento poblacional**, que se abreviará como **TCP** y que conformaría la siguiente ecuación:

$$CRE(t) = POB(t) * TCP(t)$$

Para el cálculo de la incorporación de vehículos, este verbo recibe la influencia del sustantivo **población**. También aquí se utiliza el criterio de la unidad complementaria

$$INC(t) = f(POB(t))$$

$$[v/t] = f([i])$$

$$[v/t] = [i] * [v/(i * t)]$$

$$[v/t] = [i] * [v/(i * t)]$$

$$[v/t] = [v/t]$$

Dada la unidad hallada, que se puede leer como cantidad de vehículos por individuo por unidad tiempo, emerge un nuevo elemento que se llamará **tasa de incorporación de vehículos**, abreviado para las ecuaciones como **TIV**.

$$INC(t) = POB(t) * TIV(t)$$

El **retiro de vehículos** está definido por la influencia del mismo sustantivo **vehículos**, ambos siendo estratos del mismo subsistema. La unidad complementaria es la unidad de tiempo en el denominador, por lo que se decidió como en un caso anterior y con la salvedad de que no es la mejor aproximación posible, representar el retiro por cumplimiento del tiempo de vida útil.

$$\begin{aligned} RET(t) &= f(VEH(t)) \\ [v/t] &= f([v]) \\ [v/t] &= [v]/[t] \\ [v/t] &= [v/t] \end{aligned}$$

$$RET(t) = VEH(t)/TVU(t)$$

Según el diagrama de la Figura 8.3, la emisión de contaminante se calcula con base en la cantidad de vehículos en circulación. Dado que es de nuevo un solo elemento, se aplica la determinación de una unidad de medida complementaria.

$$\begin{aligned} EMI(t) &= f(VEH(t)) \\ [T/t] &= f([v]) \\ [T/t] &= [v] * [T/(v * t)] \\ [T/t] &= [v] * [T/(v * t)] \\ [T/t] &= [T/t] \end{aligned}$$

Corresponde a una característica técnica, que de hecho es un parámetro utilizado en la homologación de vehículos para su comercialización en Colombia, o para la revisión tecnicomecánica periódica, y que se denominará **promedio de emisión de contaminante**, abreviado como **PEC**, y medido en $[T/(v*t)]$.

$$EMI(t) = VEH(t) * PEC(t)$$

Una situación similar se da con la ecuación para la absorción de contaminante, que según el diagrama de influencias de la estructura básica del sistema depende de la cantidad de árboles en crecimiento.

$$\begin{aligned} ABS(t) &= f(ARC(t)) \\ [T/t] &= f([a]) \\ [T/t] &= [a] * [T/(a * t)] \\ [T/t] &= [a] * [T/(a * t)] \\ [T/t] &= [T/t] \end{aligned}$$

La unidad complementaria hallada es una característica fisiológica de cada especie vegetal, que se denominará **tasa de absorción de contaminante**, abreviado como **TAC**, medida en $[T/(a*t)]$. Se agrega una función de restricción porque la absorción está limitada al contaminante existente en suspensión.

$$ABS(t) = \text{Mínimo}(ARC(t) * TAC(t); COS(t))$$

Este caso de estudio corresponde a una tipología de casos pedagógicamente peligrosos, por la impresión que pueden dar al estudiante de que todo se puede resolver con tasas. Afortunadamente con la **siembra de árboles** no funciona la misma solución, a pesar de que el criterio de la unidad complementaria así lo sugiere.

$$\begin{aligned}SIE(t) &= f(ARB(t)) \\[a/t] &= f([a]) \\[a/t] &= [a] * [1/t] \\[a/t] &= [a/t]\end{aligned}$$

Una primera razón por la que no es válido el mismo razonamiento es porque según el diagrama de influencias, **árboles en crecimiento** influye sobre siembra pero de forma inversamente proporcional, es decir, mientras más árboles en crecimiento existan, menor será la necesidad de sembrar nuevos.

Por otra parte, si se llegara a optar por una tasa, numéricamente el resultado sería absurdo: se sembrarían muchos árboles si ya existieran muchos, mientras que si no hubiera ningún árbol tampoco se sembraría. En definitiva, la tasa no funciona, y es la ocasión propicia para mencionar que aunque el criterio de la unidad complementaria arroje un resultado, dicho resultado debe superar también una revisión lógica de su coherencia con el sistema.

Retomando la influencia inversamente proporcional de **árboles en crecimiento** sobre **siembra de árboles** y la explicación dada al respecto, lo que se obtiene es que en realidad es el elemento limitante, y por tanto hay que buscar el elemento determinante en otra parte del sistema.

Tratándose de manejo forestal urbano, no se trata de representar el nacimiento natural de árboles en un medio, para lo cual probablemente sí serviría una tasa, sino de representar la siembra de árboles en respuesta a un problema que los hace necesarios. Y ese problema en lo que concierne al caso son los vehículos y su potencial contaminante que resulta de multiplicar la cantidad de **vehículos** por su **promedio de emisión de contaminante**.

$$\begin{aligned}SIE(t) &= f(VEH(t) * PEC(t)) \\[a/t] &= f([v] * [T/(v * t)]) \\[a/t] &= f([v] * [T/(v * t)]) \\[a/t] &= f([T/t])\end{aligned}$$

Aunque este es un elemento compuesto, se trata del determinante de la siembra, y es la contaminación que emiten en un periodo los vehículos en circulación. A esta se le puede restar la contaminación que absorben en un periodo los árboles en desarrollo existentes.

$$\begin{aligned}SIE(t) &= f(VEH(t) * TEM(t) - ARB(t) * TAC(t)) \\[a/t] &= f([v] * [T/(v * t)] - [a] * [T/(a * t)]) \\[a/t] &= f([v] * [T/(v * t)] - [a] * [T/(a * t)]) \\[a/t] &= f([T/t] - [T/t]) \\[a/t] &= f([T/t])\end{aligned}$$

Aún se mantiene la misma unidad de medida, pero ahora la expresión representa al exceso de la emisión sobre la absorción, es decir, al remanente de contaminación que se acumularía, a partir del cual sería indicado calcular cuántos árboles se requerirían para su absorción, con base en su tasa de absorción. Entonces:

$$SIE(t) = (VEH(t) * TEM(t) - ARB(t) * TAB(t)) / TAB(t)$$

$$[a/t] = [T/t] / [T/(a * t)]$$

$$[a/t] = [F/t] / [F/(a * t)]$$

$$[a/t] = [1/t] / [1/(a * t)]$$

$$[a/t] = [a]$$

Ahora se sabe la cantidad total de árboles que se requieren, aunque todavía no hay correspondencia completa de unidades de medida. Pero de hecho, el número total de árboles requeridos no necesariamente es el número total de árboles sembrados, ya que puede ser excesivo para lo que se puede hacer en el sistema. Entonces, se va a incluir un elemento que limite la siembra, al cual se denominará **capacidad de siembra**, expresado en $[a/t]$, abreviado como **CSI**. En casos anteriores se utilizó la función mínimo para este mismo propósito:

$$SIE(t) = \text{Mínimo}(CSI(t); (VEH(t) * TEM(t) - ARB(t) * TAB(t)) / TAB(t))$$

Ciertamente esta ecuación resultó de un proceso muchos más complejo que todas las de los casos anteriores. Pero, a diferencia de aquellas que representaban procesos naturales, en esta ecuación se empiezan a incorporar elementos de política de manejo de un sistema, particularmente políticas de manejo ambiental que se podrían traducir en medidas: la ciudad debe sembrar árboles en función de equilibrar el efecto contaminante de los vehículos en circulación. O incluso para contrarrestar el efecto contaminante de todos los vehículos, con lo cual la ecuación sería:

$$SIE(t) = \text{Mínimo}(CSI(t); (VEH(t) * TEM(t) - ARB(t) * TAB(t)) / TAB(t))$$

Y aunque no se ha llegado a la sección de propuesta de software, lo llamativo en este punto es que se han introducido al modelamiento matemático elementos políticos de gestión, que luego enriquecerán los requisitos del software.

Para el verbo **tala de árboles** se definirá una política de eliminación de todos los árboles maduros, que quizás sería una exageración en la realidad, pero que por sencillez del modelo será la opción adoptada aquí, restringida por la **capacidad de tala**, abreviada como **CTA** y expresada en $[a/t]$, seguramente inferior a la capacidad de siembra por cuanto es una labor más dispendiosa.

$$TAL(t) = \text{Mínimo}(ARB(t); CTA(t))$$

$$[a/t] = [a/t]$$

Finalmente, también por sencillez, se calculará la maduración de los árboles con base en un **tiempo de maduración**, abreviado como **TMA**, de forma similar a como se utilizó el tiempo promedio de vida en el caso de especies invasoras.

$$MAD(t) = ARB(t)/TMA(t)$$

$$[a/t] = [a]/[t]$$

$$[a/t] = [a/t]$$

8.2.3 Modelamiento enriquecido del sistema

La Figura 8.4 muestra la última versión del modelo enriquecido del sistema, con todos los parámetros emergentes durante el modelamiento matemático.

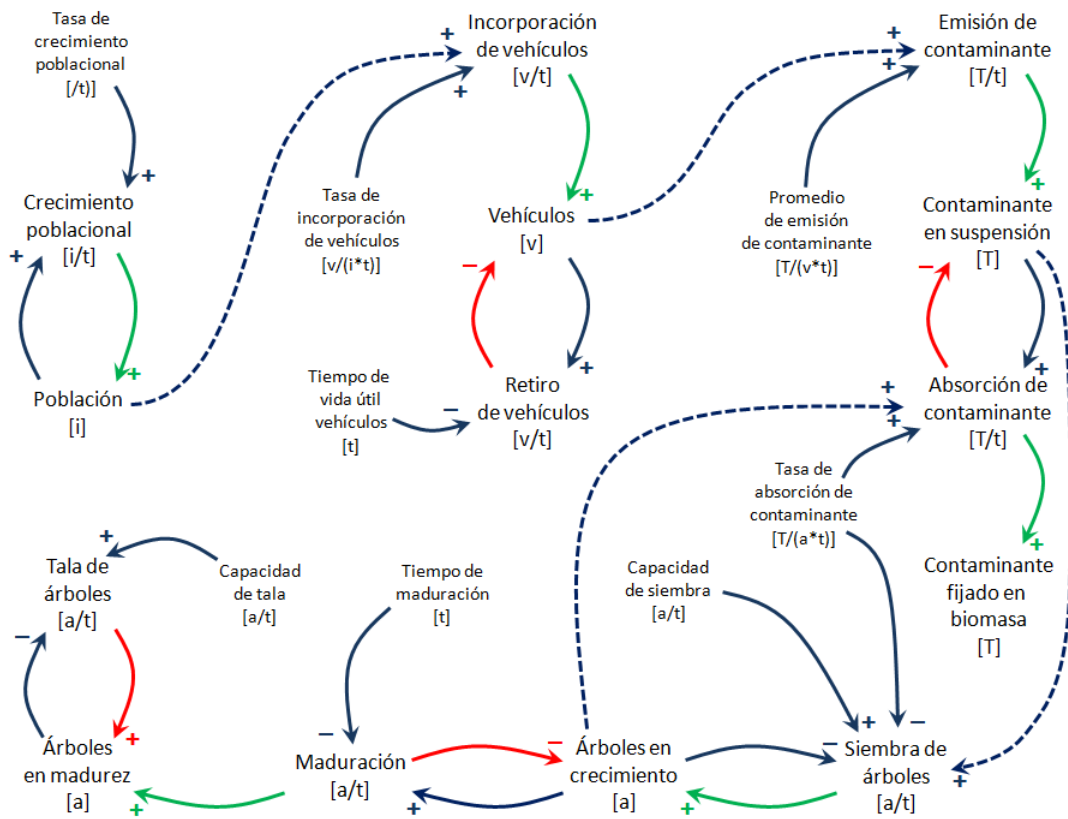


Figura 8.4 Diagrama de influencias del modelo enriquecido del sistema

La Tabla 8.3 contiene la relación de sustantivos, verbos y parámetros que conforman el modelo enriquecido del sistema. La Tabla 8.4 presenta la totalidad de las expresiones del modelo matemático del sistema.

Tabla 8.3 Elementos del modelo enriquecido del sistema

| Nombre | Abreviatura | Tipo | Unidad |
|----------------------------|-------------|------------|---------------|
| Población | POB | Sustantivo | Individuo [i] |
| Crecimiento poblacional | CRE | Verbo | [i/t] |
| Vehículos | VEH | Sustantivo | Vehículo [v] |
| Incorporación de vehículos | INC | Verbo | [v/t] |
| Retiro de vehículos | RET | Verbo | [l/t] |
| Arboles en crecimiento | ARC | Sustantivo | Arbol [a] |

| Nombre | Abreviatura | Tipo | Unidad | |
|-------------------------------------|-------------|------------|----------|---------|
| Arboles en madurez | ARM | Sustantivo | Arbol | [a] |
| Siembra de árboles | SIE | Verbo | | [a/t] |
| Maduración | MAD | Verbo | | [a/t] |
| Tala de árboles | TAL | Verbo | | [a/t] |
| Contaminante en suspensión | COS | Sustantivo | Tonelada | [T] |
| Contaminante fijado en biomasa | CFB | Sustantivo | Tonelada | [T] |
| Emisión de contaminante | EMI | Verbo | | [T/t] |
| Absorción de contaminante | ABS | Verbo | | [T/t] |
| Tasa de crecimiento poblacional | TCP | Parámetro | | [1/t] |
| Tasa de incorporación de vehículos | TIV | Parámetro | | [v/i*t] |
| Tiempo de vida útil de vehículos | TVU | Parámetro | | [t] |
| Promedio de emisión de contaminante | PEC | Parámetro | | [T/v*t] |
| Tasa de absorción de contaminante | TAC | Parámetro | | [T/a*t] |
| Tiempo de maduración | TMA | Parámetro | | [t] |
| Capacidad de siembra | CSI | Parámetro | | [a/t] |
| Capacidad de tala | CTA | Parámetro | | [a/t] |

Tabla 8.4 Modelo matemático del sistema

| Elemento | Ecuación |
|--------------------------|--|
| Ecuaciones diferenciales | |
| POB | $POB(t + \Delta t) = POB(t) + CRE(t) * \Delta t$ |
| VEH | $VEH(t + \Delta t) = VEH(t) + INC(t) * \Delta t - RET(t) * \Delta t$ |
| ARC | $ARC(t + \Delta t) = ARC(t) + SIE(t) * \Delta t - MAD(t) * \Delta t$ |
| ARM | $ARM(t + \Delta t) = ARM(t) + MAD(t) * \Delta t - TAL(t) * \Delta t$ |
| COS | $COS(t + \Delta t) = COS(t) + EMI(t) * \Delta t - ABS(t) * \Delta t$ |
| CFB | $CFB(t + \Delta t) = CFB(t) + ABS(t) * \Delta t$ |
| Ecuaciones auxiliares | |
| CRE | $CRE(t) = POB(t) * TCP(t)$ |
| INC | $INC(t) = POB(t) * TIV(t)$ |
| RET | $RET(t) = VEH(t)/TVU(t)$ |
| SIE | $SIE(t) = \text{Mínimo} \left(CSI(t); \frac{2 * (VEH(t) * TEM(t) - ARB(t) * TAB(t))}{TAB(t)} \right)$ |
| MAD | $MAD(t) = ARB(t)/TMA(t)$ |
| TAL | $TAL(t) = \text{Mínimo}(ARB(t); CTA(t))$ |
| EMI | $EMI(t) = VEH(t) * PEC(t)$ |
| ABS | $ABS(t) = \text{Mínimo}(ARC(t) * TAC(t); COS(t))$ |

8.2.4 Simulación

Para probar el modelo matemático mediante simulación y percibir algunos detalles del comportamiento del sistema, se utilizarán los valores indicados en Tabla 4.5. La unidad de tiempo t es igual a 1 mes y la simulación abarca 20 años. En el primer escenario se simula una población de 800.000 individuos, con un parque automotor de 30.000 vehículos y una reserva forestal compuesta por 8.000 árboles en crecimiento y 4.000 maduros. La tasa de incorporación de vehículos es la cuarta parte de la tasa de crecimiento de la población. Un árbol en crecimiento es capaz de absorber las emisiones de cuatro vehículos. No se considera siembra ni tala de árboles.

Tabla 8.5 Condiciones iniciales de simulación

| Elemento | Valor inicial |
|---|--------------------|
| Condiciones iniciales | |
| Población [i] | $POB(0) = 800.000$ |
| Vehículos [v] | $VEH(0) = 30.000$ |
| Contaminante en suspensión [T] | $COS(0) = 1.000$ |
| Contaminante fijado en biomasa [T] | $CFB(0) = 12.000$ |
| Árboles en crecimiento [a] | $ARC(0) = 8.000$ |
| Árboles en madurez [a] | $ARM(0) = 4.000$ |
| Parámetros | |
| Tasa de crecimiento poblacional [1/t] | $TCP(t) = 0,00083$ |
| Tasa de incorporación de vehículos [v/i*t] | $TIV(t) = 0,00021$ |
| Tiempo de vida útil de vehículos [t] | $TVU(t) = 360$ |
| Promedio de emisión de contaminante [T/v*t] | $PEC(t) = 0,0015$ |
| Tasa de absorción de contaminante [T/a*t] | $TAC(t) = 0,0060$ |
| Capacidad de siembra [a/t] | $CSI(t) = 0$ |
| Tiempo de maduración [t] | $TMA(t) = 120$ |
| Capacidad de tala [a/t] | $CTA(t) = 0$ |

En el modelo no se consideró la afectación de ningún factor sobre la dinámica poblacional; la simulación muestra un crecimiento permanente, al igual que para los vehículos, como muestran las Figura 8.5 y Figura 8.6.

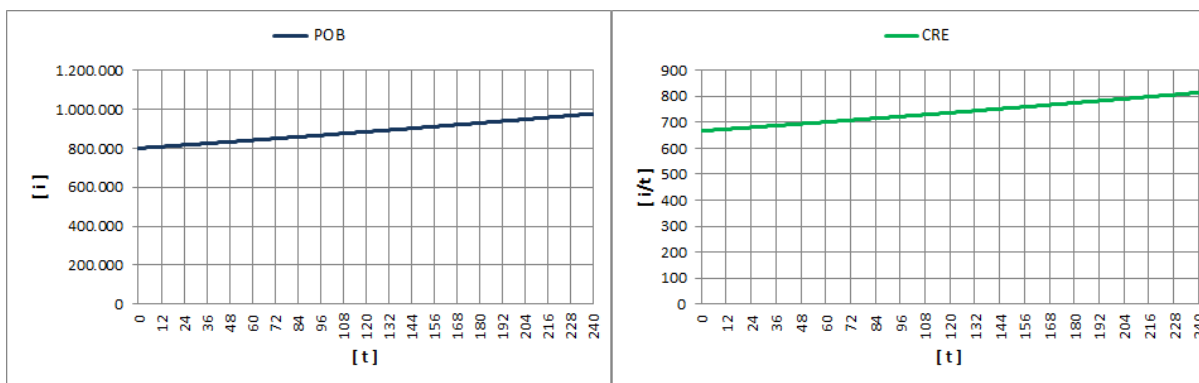


Figura 8.5 Diagrama de simulación de la población

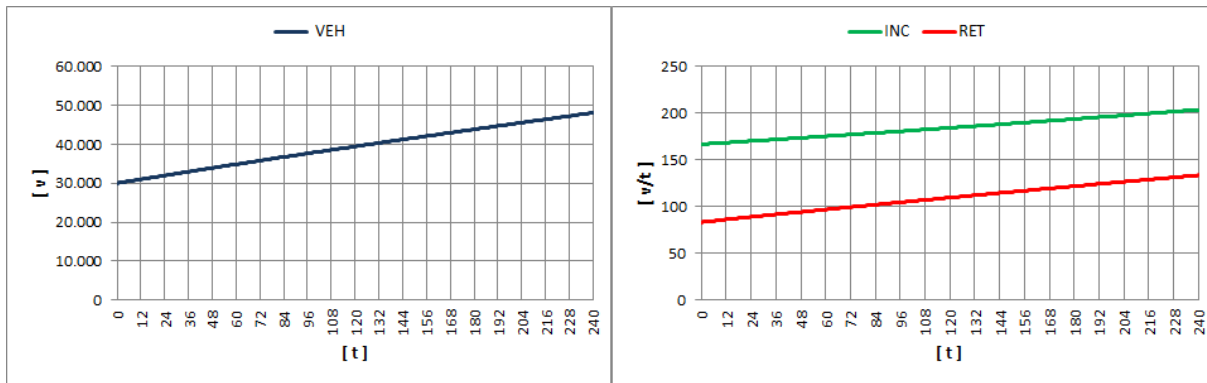


Figura 8.6 Comportamiento de los vehículos en circulación

Dado que no se consideran siembras ni talas de árboles, la reserva forestal no cambia en número, pero al cabo de los 20 años de simulación casi la totalidad de los árboles están maduros, y solo persisten cerca de 500 en crecimiento, como se ve en la Figura 7.17

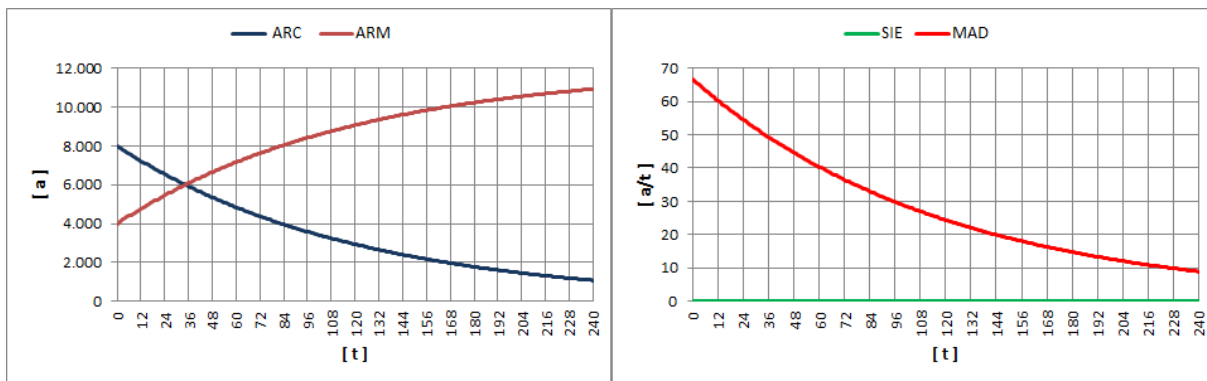


Figura 8.7 Diagrama de simulación de la reserva forestal

Por este declive en la cantidad de árboles en crecimiento, es decir, aquellos que están en capacidad de absorber y fijar el contaminante en su biomasa, durante los 20 años simulados la cantidad de contaminante en suspensión crece permanentemente hasta superar las 10.000 toneladas, con emisiones mensuales que alcanzan las 70 toneladas de contaminante y una absorción menor a 10 toneladas mensuales.

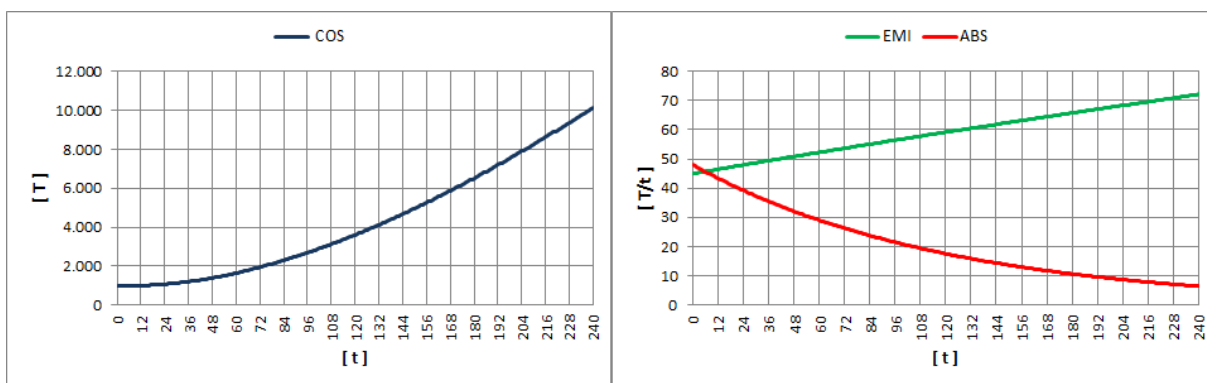


Figura 8.8 Diagrama de simulación de la contaminación

En un segundo escenario se consideran las mismas condiciones iniciales, salvo por la capacidad de siembra de árboles nuevos y de tala de árboles maduros, que se fijaron en 80 y 60 árboles mensuales respectivamente. El crecimiento de la población y del parque automotor no sufren ninguna variación, pero el estado de la reserva forestal transcurridos los 20 años es bastante diferente.

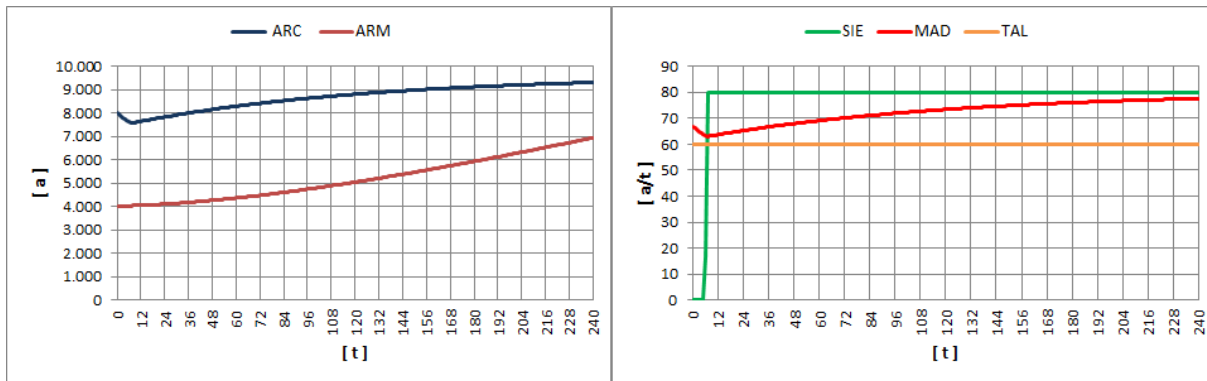


Figura 8.9 Diagrama de simulación de la reserva forestal con siembra y tala

Según la Figura 8.9 la reserva forestal al final consta de un poco más de 16.000 árboles, 7.000 maduros y más de 9.000 en crecimiento, a diferencia de los 12.000 que mostraba la Figura 7.17, la gran mayoría de los cuales eran árboles maduros. A pesar de que se ha establecido una tala permanente de árboles maduros, con una siembra en cantidad mayor, la población de árboles maduros no descende y al contrario sigue creciendo, con lo que se contrarrestan algunos efectos aún no considerados en este proceso de modelamiento, como que los árboles maduros a pesar de no absorber contaminante de forma eficiente, aportan otros elementos como sombrío y hábitat para aves.

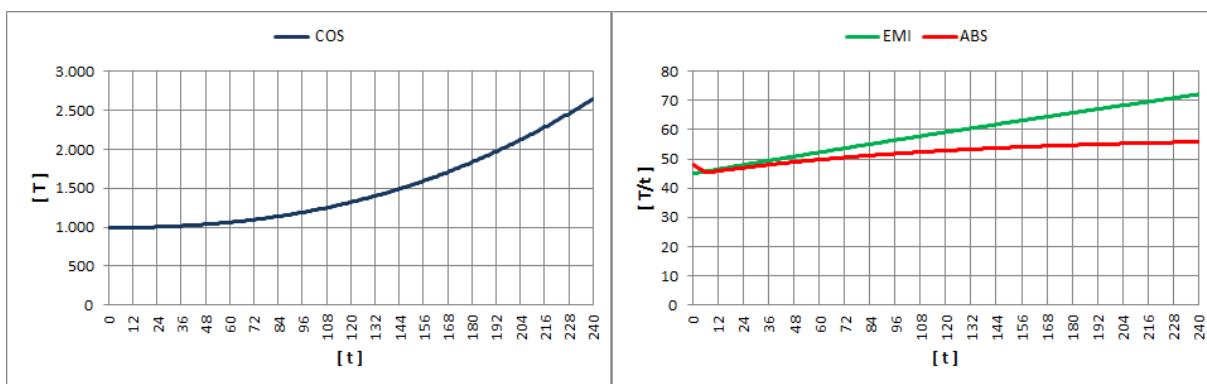


Figura 8.10 Diagrama de simulación de la contaminación con siembra y tala

Con respecto a la contaminación, a pesar de que sigue creciendo durante todo el periodo simulado, al cabo de los 20 años solo llega a 2.500 toneladas en suspensión, como indica la Figura 8.10, mucho menos que las 10.000 toneladas del escenario anterior. Las emisiones siguen superando a la absorción del contaminante, pero el diferencial es estrecho.

8.3 Transformación del modelo de Dinámica de Sistemas

El primer paso para transformar el modelo es identificar los subsistemas en el diagrama de influencias de la estructura básica del sistema, es decir, las áreas del modelo conformadas por sustantivos y verbos con unidades compatibles.

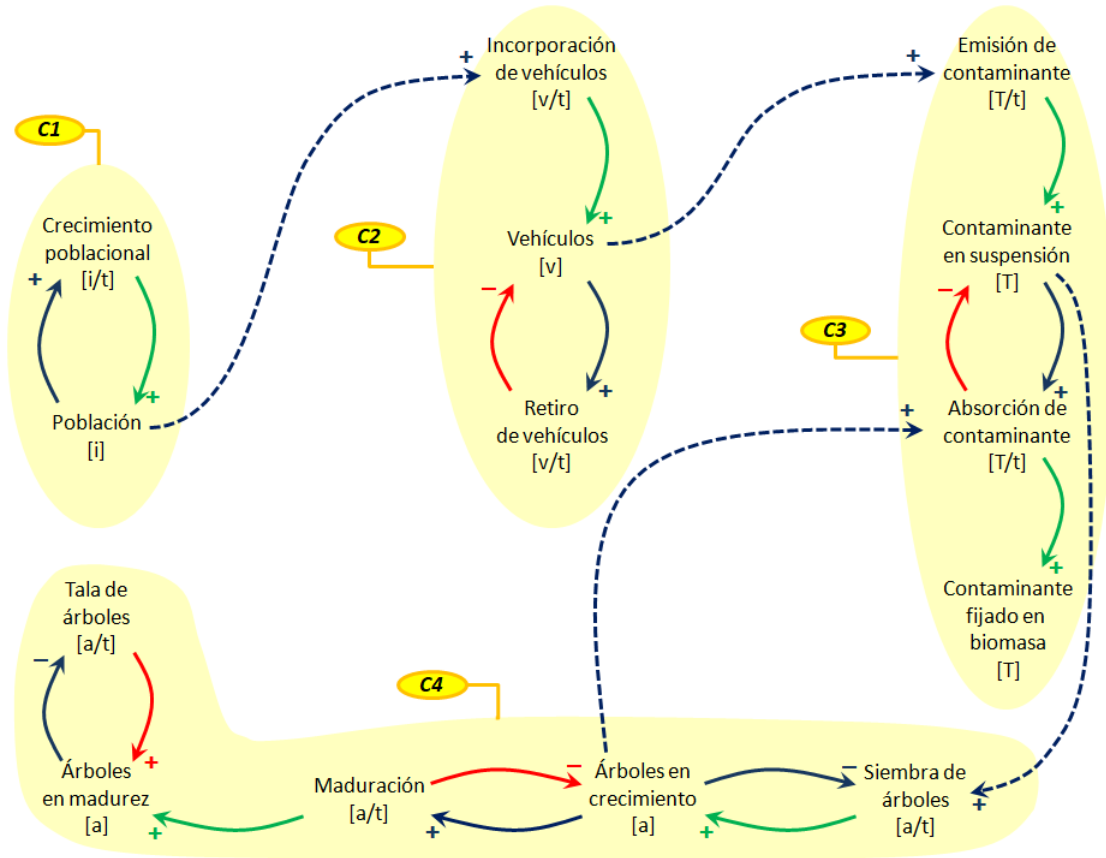


Figura 8.11 Subsistemas de la estructura básica del sistema para determinar clases

8.3.1 Diagrama de dominio

Cada subsistema de la estructura básica del sistema presentada en la Figura 6.18 se ha constituido en una clase, tomando el sustantivo como nombre. Se proponen las clases **Poblacion** (1), **Vehículo** (2), **Contaminante** (3) y **Arbol** (6), como se observa en la Figura 6.19.

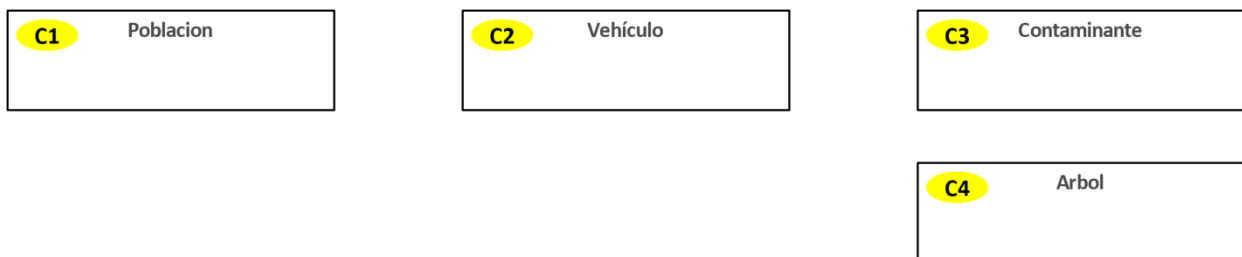


Figura 8.12 Diagrama de dominio – Clases del sistema

En la Figura 6.20 se señalan con rótulos las influencias entre subsistemas, que se utilizan para establecer las dependencias entre clases que se muestran en el diagrama de la Figura 6.21.

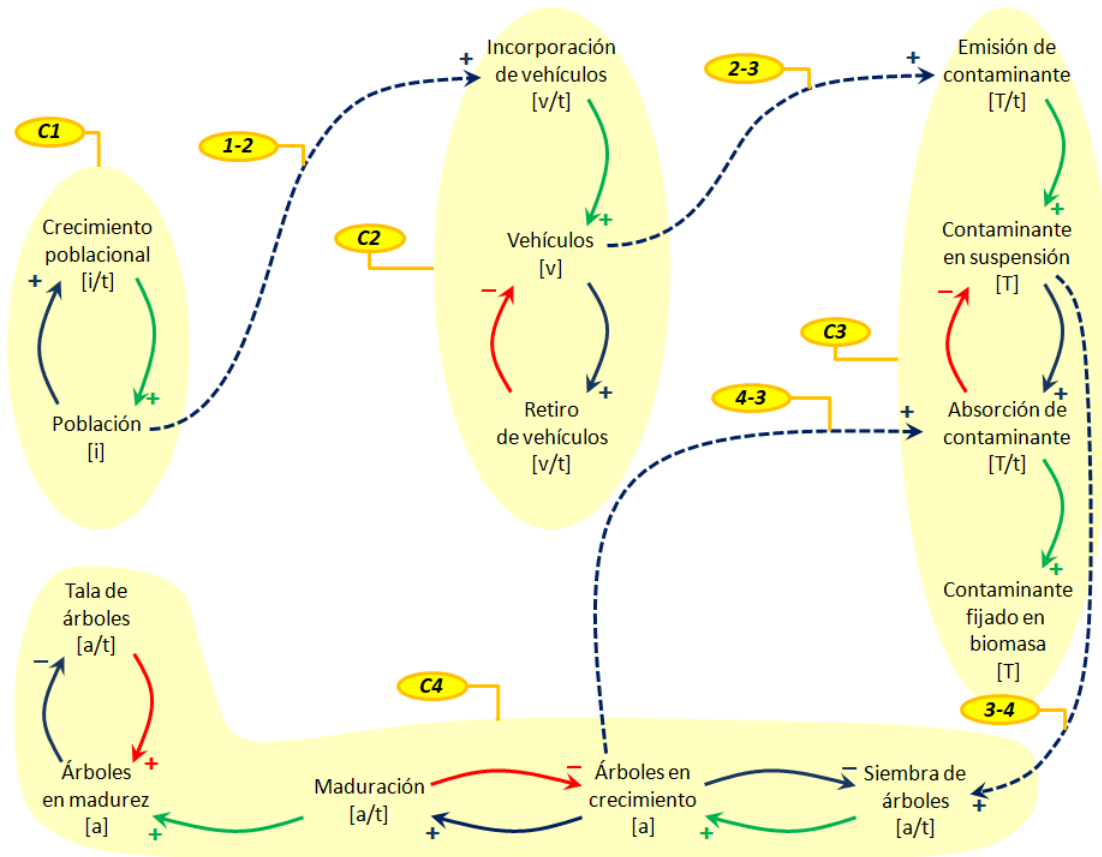


Figura 8.13 Relaciones entre subsistemas para determinar dependencias

Las influencias de sustantivos sobre verbos se utilizan para definir las dependencias entre clases en el diagrama de dominio de la Figura 6.21: la dependencia 1-2 corresponde a la influencia de población sobre vehículos; la 2-3 la de vehículos sobre contaminación; y la 3-4 la influencia de contaminación sobre árboles.

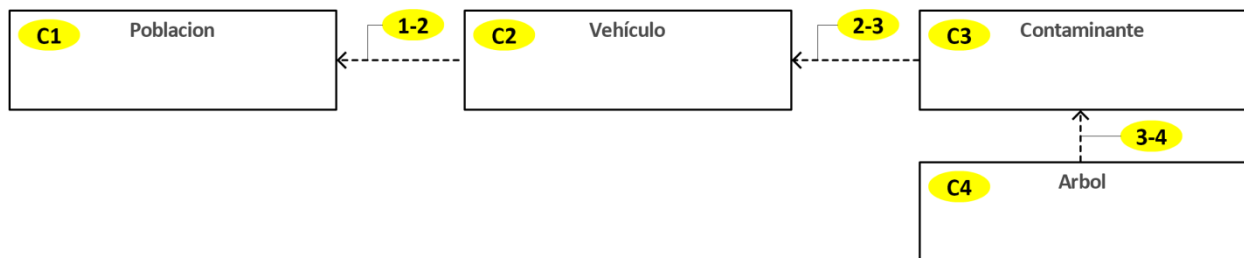


Figura 8.14 Diagrama de dominio – Dependencias entre clases

8.3.2 Diagrama de clases

En la Figura 6.22 se identifican mediante rótulos los sustantivos y verbos que conforman la estructura básica del sistema. Se incorporan como los primeros atributos y los métodos en el

La Figura 6.24 señala los parámetros y sustantivos auxiliares encontrados mediante el modelamiento matemático e incorporados a la estructura enriquecida del sistema.

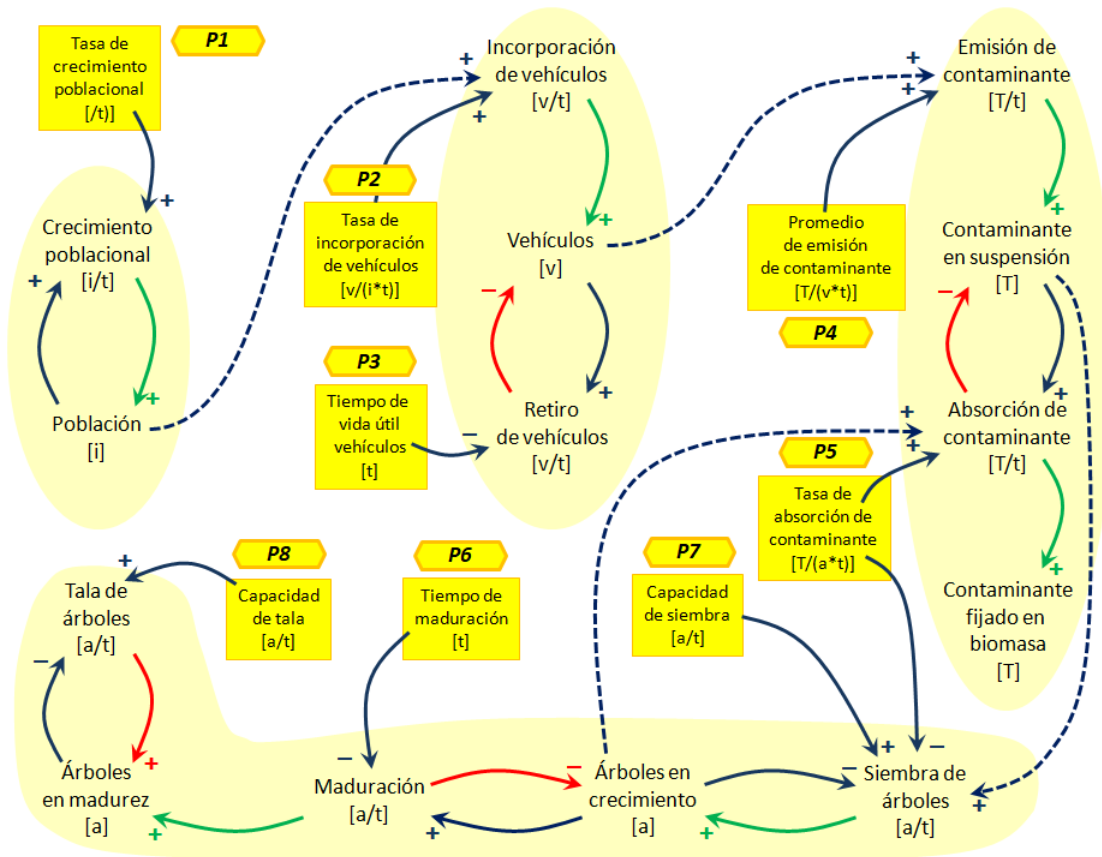


Figura 8.17 Parámetros de la estructura enriquecida del sistema

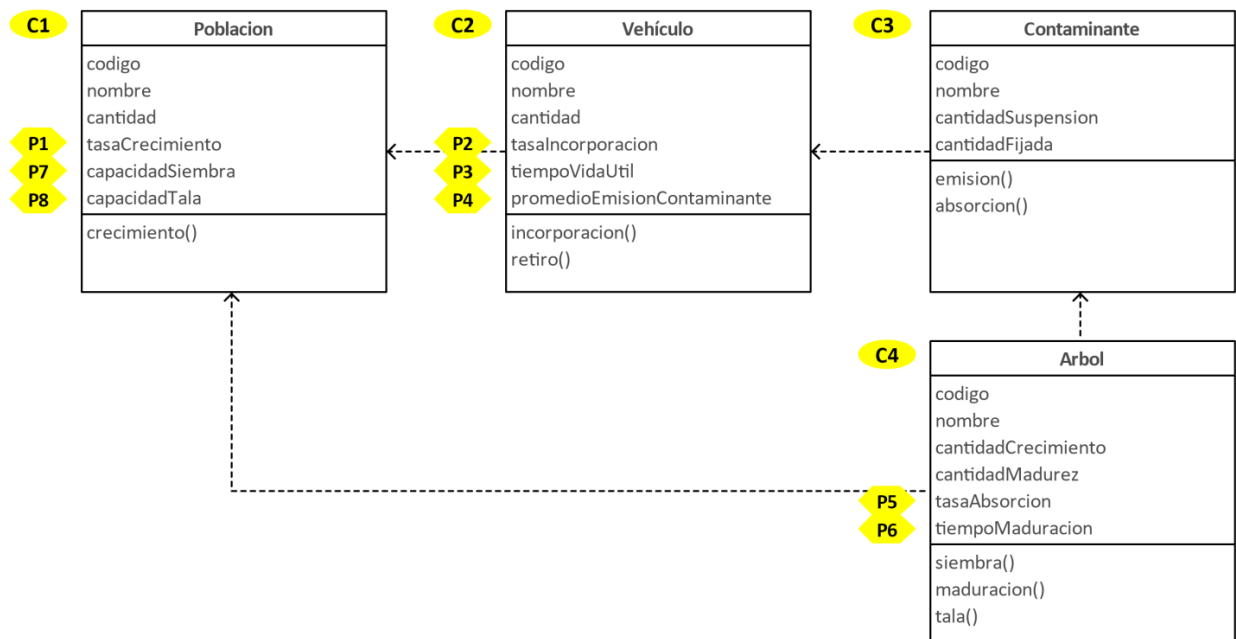


Figura 8.18 Diagrama de clases – Segunda aproximación

Cada parámetro ha sido incorporado como atributo a la clase con la que más afinidad se establece de acuerdo a las unidades de medida, como se muestra en la Figura 6.25.

8.3.3 Diagrama Entidad Relación

El último diagrama que se propone obtener mediante esta metodología como transformación del modelo con Dinámica de Sistemas es el diagrama entidad relación. La Figura 8.19 muestra el que se obtuvo para el presente caso, incluyendo los mismos rótulos con que se puede ubicar el elemento del diagrama de influencias de donde proviene cada entidad, relación o atributo.

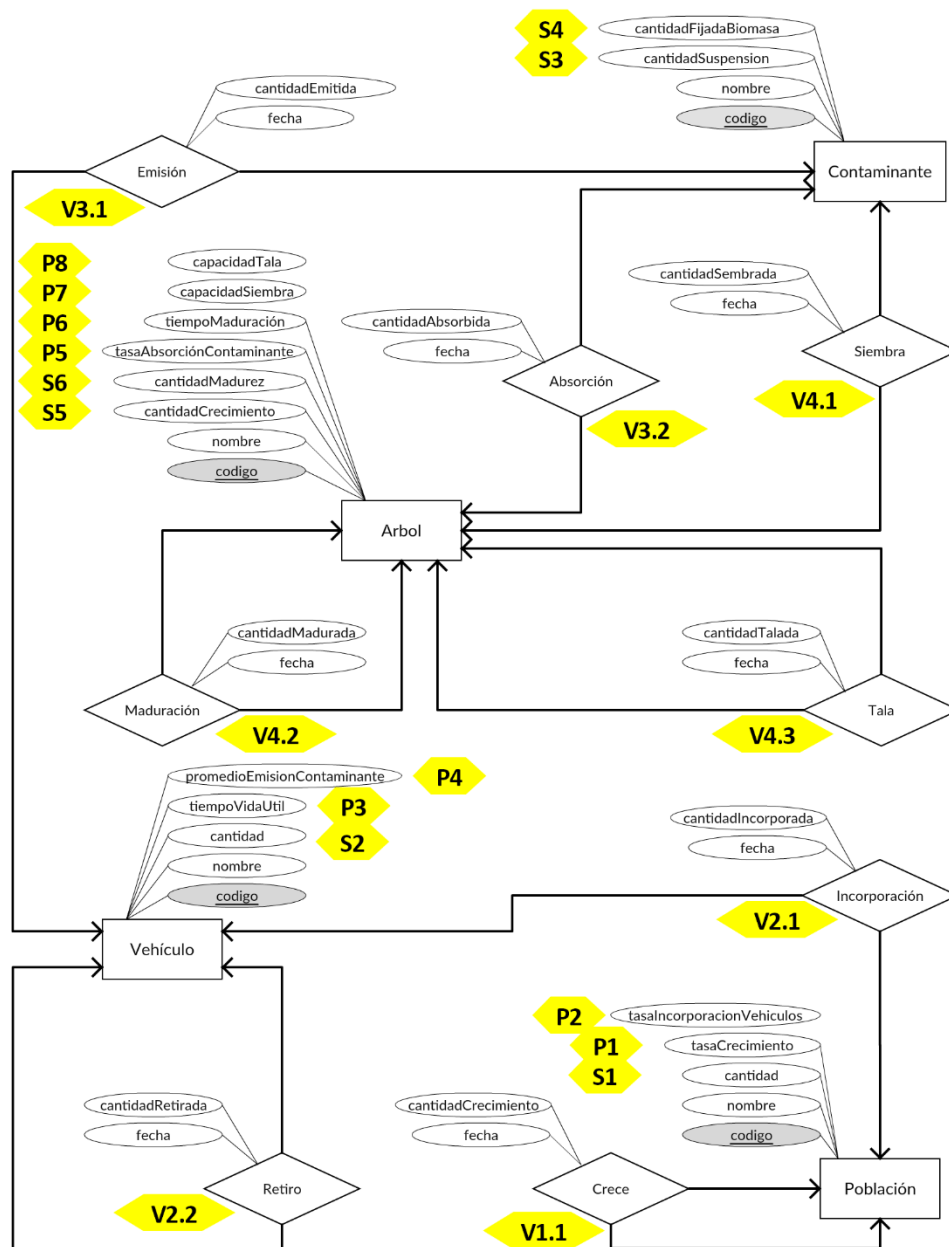


Figura 8.19 Diagrama entidad relación de la base de datos del sistema

En términos generales consiste en una entidad por cada subsistema, cuyos atributos son tomados de sus sustantivos y parámetros, además de los códigos y nombres para la identificación y denominación de registros, y de las fechas que pudieran requerirse para la trazabilidad de los mismos.

A su vez los verbos se transforman en entidades, con fecha para la trazabilidad del registro, y atributos de cantidad para la cuantificación del cambio generado por la relación en la entidad.

8.4 Depuración y consideraciones finales

Las relaciones en el diagrama de clases solo han sido analizadas como dependencias. Aún resta por analizarlas desde la perspectiva de asociación y composición, pero en este capítulo no se incluye dicho paso porque va más allá del interés del libro.

En cuanto al diagrama entidad relación depurado que se muestra en la Figura 9.26, algunos atributos de las entidades han sido trasladados a las relaciones por efecto del análisis de la cardinalidad de las mismas. Por ejemplo, el atributo **tasaGeneracionRO** pasó de la entidad **Población** a la relación **Aplica** que vincula también a la entidad **Residuo Orgánico**, dada la posibilidad de que se declare la existencia de distintos tipos de residuos orgánicos y que la población los genera a tasas diferentes.

Se incluyó una nueva entidad **Ciudad**, que si bien no trae consigo atributos numéricos nuevos sino los atributos usuales de cualquier nueva entidad como **código** y **nombre**, permite eludir redundancias de datos al servir como referencia geográfica para todas las demás entidades, es decir, como circunscripción para la población, los vehículos, los árboles y los contaminantes.

Es así como en la versión depurada entre las entidades **Vehículo** y **Ciudad** se establece la relación **Conforma**, que también incluye a la nueva entidad **ParqueAutomotor**, que hace posible registrar que el parque automotor de una determinada ciudad está conformado por cantidades de diferentes vehículos, cada una con características específicas.

Algo similar ocurre con respecto a la entidad **Arbol**, vinculada a la entidad **Ciudad** mediante otra relación también denominada **Conforma** que además incluye a la nueva entidad **ReservaForestal**, lo que permite registrar que la reserva forestal de una determinada ciudad está conformada por cantidades de diversas especies de árboles, con distintas características e impacto sobre la absorción de contaminantes, como queda representado en la relación **Absorbe**, cuyo atributo **tasaAbsorcionContaminante** hace posible registrar que cada especie de árbol puede tener capacidades distintas de absorción de diversos contaminantes, en una relación de cardinalidad muchos a muchos.

Para efectos didácticos se mantienen los rótulos que permiten comprobar uno a uno que todos los elementos como sustantivos, verbos y parámetros que conforman el modelo enriquecido del sistema presentado en la Figura 8.4, siguen estando presentes en el diagrama entidad relación depurado que se muestra en la Figura 8.20.

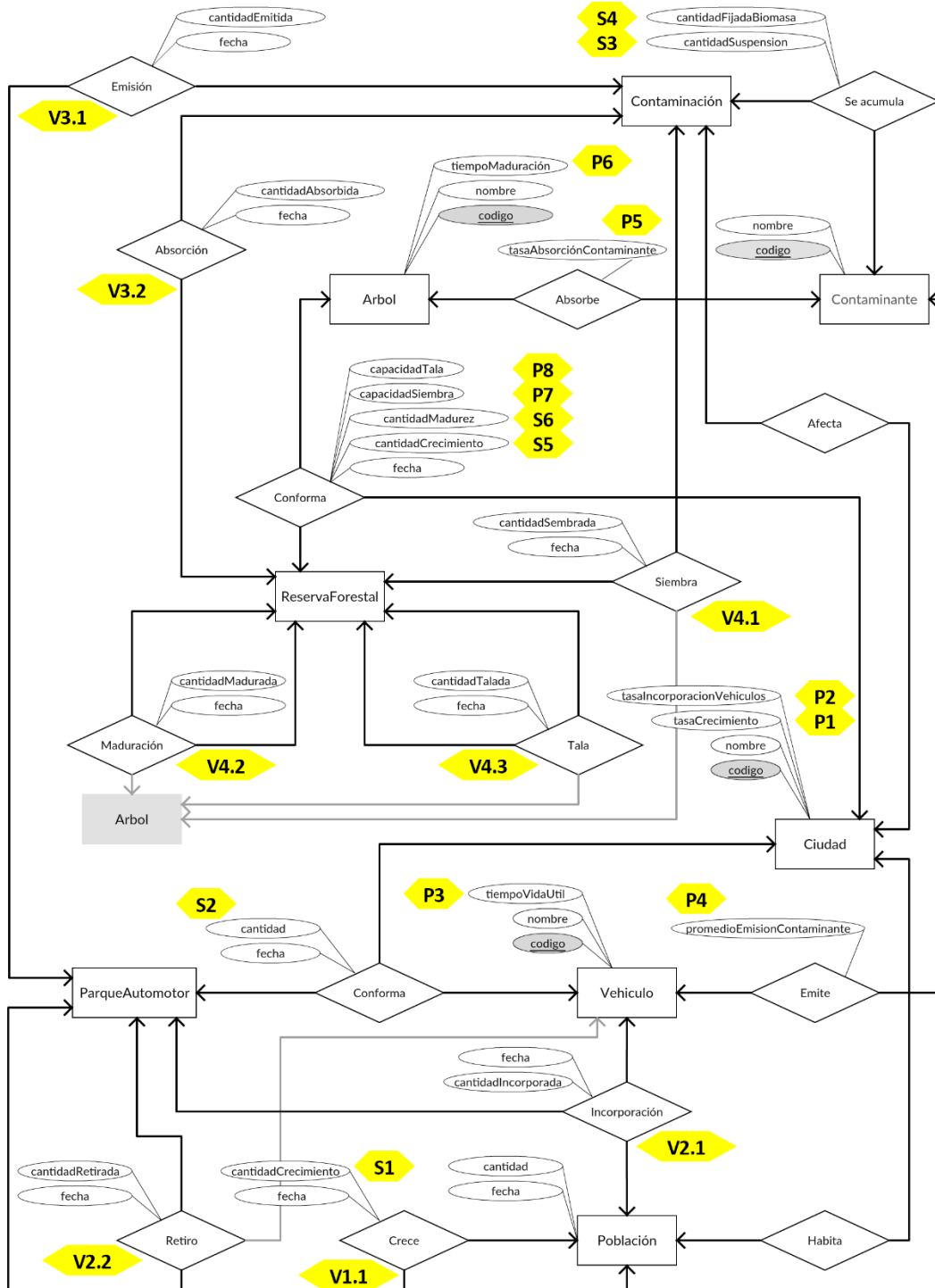


Figura 8.20 Diagrama entidad relación depurado de la base de datos del sistema

8.5 Implementación de prueba

Finalmente, mediante la técnica tradicional el diagrama entidad relación depurado ha sido transformado en el diagrama relacional de la Figura 8.21.

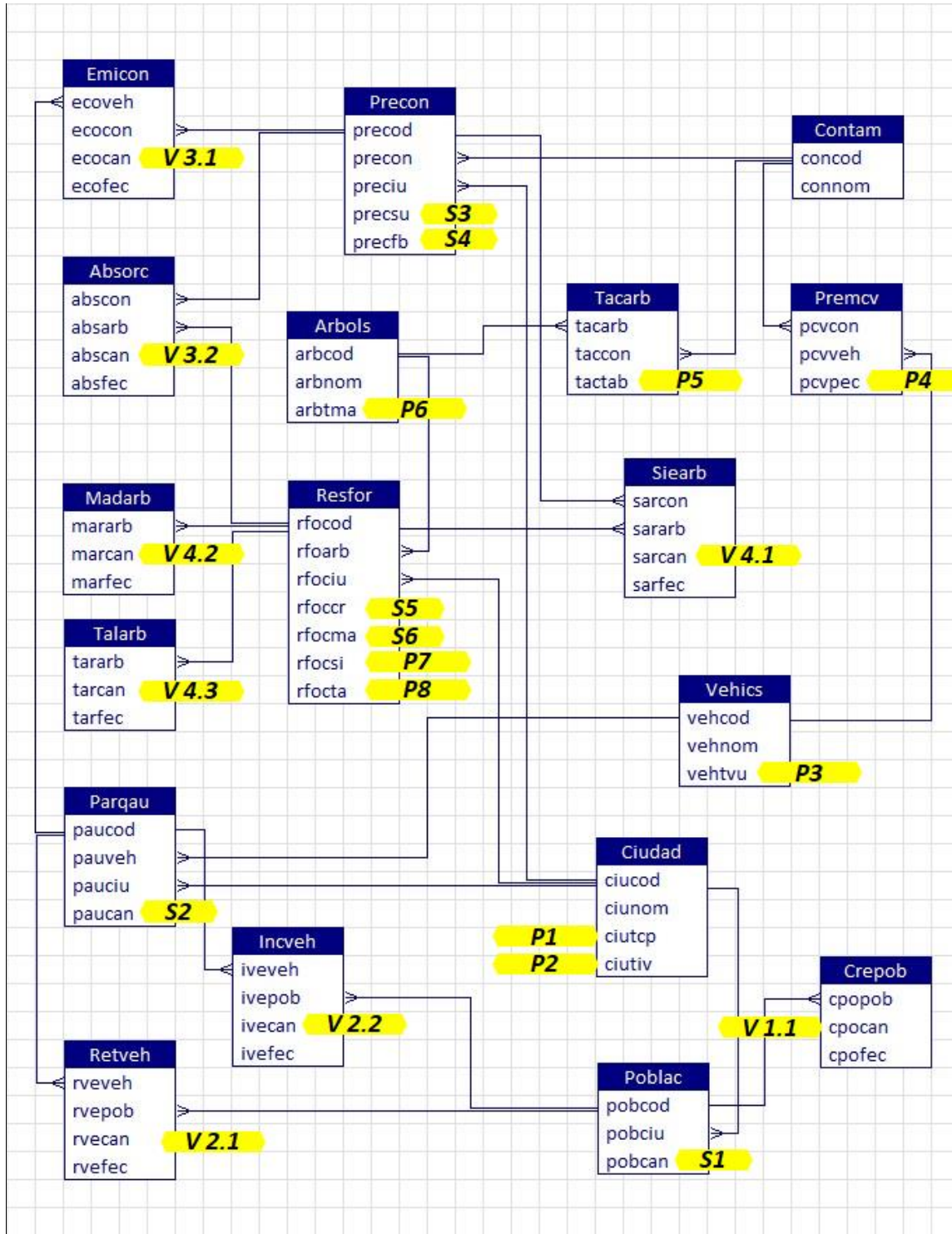


Figura 8.21 Diagrama relacional depurado de la base de datos del sistema

El diccionario de datos de la Tabla 8.6 documenta el anterior diagrama entidad relación, y fue la base para la implementación de prueba mediante la herramienta MBD 3.0.

Tabla 8.6 Diccionario de datos de la base de datos del sistema

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|---------------|--|---------------|---|----------|---------------|----------------------|
| Ciudad | Relación de ciudades | ciucod | Código de la ciudad | Primaria | | Autoincremental |
| | | ciunom | Nombre de la ciudad | | | Cadena de caracteres |
| | | ciutcp | Tasa de crecimiento poblacional [1/mes] | | | Número real |
| | | ciutiv | Tasa de incorporación vehículos [v/i*mes] | | | Número real |
| Vehics | Relación de vehículos | vehcod | Código del vehículo | Primaria | | Autoincremental |
| | | vehnom | Nombre del vehículo | | | Cadena de caracteres |
| | | vehtvu | Tiempo de vida útil [mes] | | | Número entero |
| Arbols | Relación de especies de árboles | arbcod | Código de la especie de árbol | Primaria | | Autoincremental |
| | | arbnom | Nombre de la especie de árbol | | | Cadena de caracteres |
| | | arbtma | Tiempo de maduración [mes] | | | Número entero |
| Contam | Relación de sustancias contaminantes | rescod | Código del contaminante | Primaria | | Autoincremental |
| | | resnom | Nombre del contaminante | | | Cadena de caracteres |
| Precon | Relación de presencia de contaminantes | precod | Código del registro de presencia de contaminantes | Primaria | | Autoincremental |
| | | precon | Referencia al contaminante | Foránea | Contam.concod | Número entero |
| | | preciu | Referencia a la ciudad | Foránea | Ciudad.ciucod | Número entero |
| | | precsu | Cantidad de contaminante en suspensión [T] | | | Número real |
| | | precfb | Cantidad de contaminante fijada en biomasa [T] | | | Número real |
| Tacarb | Relación de tasas de absorción de contaminante | tacarb | Referencia al árbol | Foránea | Arbols.arbcod | Número entero |
| | | taccon | Referencia al contaminante | Foránea | Contam.concod | Número entero |

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|---------------|--|---------------|---|----------|---------------|-----------------|
| | | tactab | Tasa de absorción [T/a*mes] | | | Número real |
| Resfor | Relación de composición de la reserva forestal | rfocod | Código del registro de reserva forestal | Primaria | | Autoincremental |
| | | rfoarb | Referencia al árbol | Foránea | Arbols.arbcod | Número entero |
| | | rfociu | Referencia a la ciudad | Foránea | Ciudad.ciucod | Número entero |
| | | rfoccr | Cantidad de árboles en crecimiento | | | Número entero |
| | | rfocma | Cantidad de árboles en estado de madurez | | | Número entero |
| | | rfocsi | Capacidad de siembra [a/mes] | | | Número entero |
| | | rfocta | Capacidad de tala [a/mes] | | | Número entero |
| Parqau | Relación de composición del parque automotor | paucod | Código del registro de parque automotor | Primaria | | Autoincremental |
| | | pauveh | Referencia al vehículo | Foránea | Vehics.vehcod | Número entero |
| | | pauciu | Referencia a la ciudad | Foránea | Ciudad.ciucod | Número entero |
| | | paucau | Cantidad de vehículos en el parque automotor | | | Número entero |
| Poblac | Relación de población | pobcod | Código de la población | Primaria | | Autoincremental |
| | | pobciu | Referencia a la ciudad | Foránea | Ciudad.ciucod | Número entero |
| | | pobcan | Cantidad de individuos en la población | | | Número entero |
| Crepob | Relación de crecimiento de población | cpopob | Referencia a la población | Foránea | Poblac.pobcod | Número entero |
| | | cpocan | Cantidad en que crece la población [i] | | | Número entero |
| | | cpofec | Fecha de registro del crecimiento poblacional | | | Fecha |
| Incveh | Relación de incorporación de vehículos | iveveh | Referencia al parque automotor | Foránea | Parqau.paucod | Número entero |
| | | ivepob | Referencia a la población | Foránea | Poblac.pobcod | Número entero |
| | | ivecan | Cantidad de vehículos incorporados | | | Número entero |

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|---------------|--|---------------|--|---------|---------------|---------------|
| | | ivefec | Fecha en que se registra la incorporación | | | Fecha |
| Emicon | Relación de emisión de contaminantes | ecoveh | Referencia al parque automotor | Foránea | Parqau.paucod | Número entero |
| | | ecocon | Referencia al contaminante | Foránea | Contam.concod | Número entero |
| | | ecocan | Cantidad de contaminante emitida [T] | | | Número real |
| | | ecofec | Fecha de registro de la emisión | | | Fecha |
| Absorc | Relación de absorción de contaminantes | abscon | Referencia al contaminante absorbido | Foránea | Contam.concod | Número entero |
| | | absarb | Referencia a la reserva forestal | Foránea | Resfor.rfocod | Número entero |
| | | abscon | Cantidad de contaminante absorbido | | | Número real |
| | | absfec | Fecha de registro del contaminante absorbido | | | Fecha |
| Retveh | Relación de retiro de vehículos | rveveh | Referencia al parque automotor | Foránea | Parqau.paucod | Número entero |
| | | rvepob | Referencia a la población | Foránea | Poblac.pobcod | Número entero |
| | | rvecan | Cantidad de vehículos retirados | | | Número entero |
| | | rvefec | Fecha de registro del retiro de vehículos | | | Fecha |
| Madarb | Relación de maduración de árboles | mararb | Referencia a la reserva forestal | Foránea | Resfor.rfocod | Número entero |
| | | marcan | Cantidad de árboles declarados maduros | | | Número entero |
| | | marfec | Fecha de declaración de madurez | | | Fecha |
| Siearb | Relación de siembra de árboles | abscon | Referencia al contaminante a contrarrestar | Foránea | Contam.concod | Número entero |
| | | sararb | Referencia a la reserva forestal | Foránea | Resfor.rfocod | Número entero |
| | | sarcán | Cantidad de árboles sembrados | | | Número entero |
| | | sarfec | Fecha de la siembra | | | Fecha |

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|---------------|---|---------------|----------------------------------|---------|---------------|---------------|
| Talarb | Relación de tala de árboles | tararb | Referencia a la reserva forestal | Foránea | Resfor.rfocod | Número entero |
| | | tarcan | Cantidad de árboles talados | | | Número entero |
| | | tarfec | Fecha de la tala | | | Fecha |
| Premcv | Relación de promedios de emisión de contaminante por vehículo | pcvcon | Referencia al contaminante | Foránea | Contam.concod | Número entero |
| | | pcvveh | Referencia al vehículo | Foránea | Vehics.vehcod | Número entero |
| | | pcvpec | Promedio de emisión [T/v*mes] | | | Número real |

La interfaz automática generada por el software MBD 3.0 da una idea de la funcionalidad que podría alcanzarse con este diseño. A continuación se comentan algunos ejemplos. El primero de ellos, quizás no tan significativo desde la perspectiva de modelamiento con Dinámica de Sistemas y surgido durante la depuración del diseño, es el registro de ciudades para las cuales se aplicaría el software, como indica la Figura 8.22.

Ciudad | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 60 bytes | Tamaño total 60 bytes

Código : 1

Ciudad : Bucaramanga

Crecimiento poblacional [1/mes] : 0,00083

Incorporación vehículos [v/i*mes] : 0,00021

Figura 8.22 Registro de una ciudad

Un desarrollo informático para la gestión forestal urbana a partir del diseño mostrado en las secciones anteriores, permitiría el registro de diversos tipos de contaminante, como elemento de referencia para otras funcionalidades que se observarán después. La Figura 8.23 da un ejemplo de esto.

Contam | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 34 bytes | Tamaño total 34 bytes

Código : 1

Contaminante : Dióxido de Carbono

Figura 8.23 Registro de un contaminante

Se hace posible el registro de diferentes tipos de vehículos para conformar el parque automotor, como indica la Figura 8.24. Los datos capturados por la pantalla de la Figura 8.25, con respecto a las especies presentes en la reserva forestal y su tiempo de maduración, completan las opciones de registro de datos básicos para las caracterizaciones posteriores a partir de la Figura 8.26.

Vehics

Código : 1

Vehículo : Camionetas hasta 1400 cc

Tiempo de vida útil [año] : 15

Agregar Editar Grabar Cancelar < << >> >

Salir Tabla

Figura 8.24 Registro de un tipo de vehículo

Árbols | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 38 bytes | Tamaño total 38 bytes

Código : 1

Árbol : Guayacán rosado

Tiempo de maduración [año] : 15

Agregar Editar Grabar Cancelar << < > >> Salir Tabla

Figura 8.25 Registro de una especie de árbol

Una de las caracterizaciones que este diseño admite es la de las emisiones de contaminante por tipo de vehículo. La Figura 8.26 muestra la correspondiente a las emisiones de Dióxido de Carbono por parte de las camionetas de hasta 1.400 centímetros cúbicos de cilindraje. El mismo esquema aplicaría para otros tipos de vehículos y para el resto de los contaminantes que emiten.

Premcv | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 16 bytes | Tamaño total 16 bytes

Contaminante : Dióxido de Carbono

Vehículo : Camionetas hasta 1400 cc

Promedio de emisión [T/v*mes] : 0,0015

Agregar Editar Grabar Cancelar << < > >> Salir Tabla

Figura 8.26 Caracterización de emisión de contaminante por vehículo

En cuanto a las especies de árboles que conforman la reserva forestal, la pantalla de la Figura 8.27 permite caracterizar la capacidad de un individuo de la especie denominada Guayacán rosado en estado de crecimiento para absorber Dióxido de Carbono.

Tacarb | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 16 bytes | Tamaño total 16 bytes

Árbol : Guayacán rosado

Contaminante : Dióxido de Carbono

Tasa de absorción [T/a*mes] : 0,006

Agregar Editar Grabar Cancelar << < > >> Salir Tabla

Figura 8.27 Caracterización de absorción de contaminante por árbol

El software, aun consistiendo en una interfaz genérica limitada como la de MBD 3.0, permite también una labor inicial de inventario para la composición tanto del parque automotor en la forma en que indica la Figura 8.28, como de la reserva forestal de la ciudad, que se muestra en la Figura 8.29, y que como es lógico debe ser ampliada a todos los tipos de vehículos y todas las especies de árboles respectivamente.

Parqau | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 16 bytes | Tamaño total 16 bytes

Código : 1

Vehículo : Camionetas hasta 1400 cc

Ciudad : Bucaramanga

Cantidad : 18432

Botones: Agregar, Editar, Grabar, Cancelar, navegación, Salir, Tabla

Figura 8.28 Registro de composición del parque automotor de la ciudad

Resfor | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 28 bytes | Tamaño total 28 bytes

Código : 1

Árbol : Guayacán rosado

Ciudad : Bucaramanga

Cantidad en crecimiento : 1725

Cantidad en madurez : 706

Capacidad de siembra [a/mes] : 30

Capacidad de tala [a/mes] : 25

Botones: Agregar, Editar, Grabar, Cancelar, navegación, Salir, Tabla

Figura 8.29 Registro de composición de la reserva forestal de la ciudad

Por último se muestra en la Figura 8.30 un ejemplo de funcionalidad de la implementación de prueba, para el registro de las operaciones de mantenimiento de la reserva forestal, como la tala de árboles maduros de la cual se indica la cantidad y la fecha. Lo mismo es posible para las operaciones de siembra y para la declaración de madurez de los árboles.

Talarb

Árboles : 1725

Cantidad talada : 17

Fecha (dd/mm/aaaa) : 30/06/2018

Botones: Agregar, Editar, Grabar, Cancelar, navegación, Salir, Tabla

Figura 8.30 Registro de tala de árboles

Como se deduce de las interfaces mostradas antes, el diseño conseguido como transformación del diagrama de influencias cuya consistencia ha sido matemáticamente validada, soportaría los requerimientos de un sistema de información para la gestión forestal de una ciudad. Y aunque la simulación no es el propósito del capítulo sino una forma de prever su comportamiento, no hay que descartar la idea de que las mediciones sean contrastadas contra datos generados por simulación, para hacer un control de la confiabilidad de los datos.

En cuanto a Dinámica de Sistemas, en este caso fue necesario estratificar elementos correspondientes a sustantivos de la misma naturaleza en diferentes etapas de su ciclo de utilidad. En lo matemático, algunas de las ecuaciones claramente fueron concebidas para representar políticas de manejo del sistema. Y finalmente, la propuesta de desarrollo de software estuvo acompañada de un contexto organizacional y legal, dentro del cual el sistema informático no solo es posible sino necesario. Se espera que llegando a un caso de este nivel, el estudiante de Ingeniería de Sistemas no solo haya mejorado como modelador, tanto en Dinámica de Sistemas como en diseño de software, sino que haya valorado el hallazgo de que participando en controversias, así solo sea como ejercicio académico, es posible hallar nuevos nichos de desarrollo de software para el abordaje de problemas sociales.

Referencias

Caracol Radio. (2014). Hay que talar 6.800 árboles enfermos en Bogotá. *Caracol.com*. Retrieved March 18, 2014, from <http://www.caracol.com.co/noticias/bogota/hay-que-talar-6800-arboles-enfermos-en-bogota-distrito/20140315/nota/2129337.aspx>

Econometría S.A. (2011). *Boletín de prensa del comité automotor colombiano* (pp. 1–4). Bogotá D.C. Retrieved from <http://www.andi.com.co/downloadfile.aspx?Id=ce5c8b31-7e61-4470-9341-41d5a38436ab>

Econometría S.A. (2012). *Boletín de prensa Comité Automotor Colombiano* (p. 3). Bogotá D.C. Retrieved from <http://www.andi.com.co/downloadfile.aspx?Id=55993333-774b-41df-b123-a24a1ca1bded>

Revista Semana. (2011, September). En Bogotá se van a talar 3.480 árboles. *Revista Semana*. Bogotá D.C. Retrieved March 18, 2014, from <http://www.semana.com/nacion/articulo/en-bogota-van-talar-3480-arboles/246401-3>

Torres, F. (2012). El Eucalipto es el árbol que más CO2 captura en Chile. *Veoverde*. Retrieved December 11, 2012, from <http://www.veoverde.com/2012/12/el-eucalipto-es-el-arbol-que-mas-co2-captura-en-chile/>

9 Residuos sólidos urbanos – Caso de estudio

La participación en controversias como ejercicio académico, especialmente en aquellas relacionadas con problemáticas sociales, no solo ofrece nuevos contextos para el modelamiento matemático y acceso a información diversa para realizarlo, sino que estimulan el interés por parte del estudiante en identificar la contribución que desde su profesión puede hacer en la superación de dichos problemas, y encontrar líneas de desarrollo diferentes a las tradicionales.

Con casos como el último de los recopilados en este libro se pretende que el estudiante explore la matemática como el lenguaje del abordaje del ingeniero en su rol principal, no como constructor de aplicaciones sino como diseñador de soluciones a problemas reales, en el marco de las cuales adquieren un nuevo sentido los desarrollos informáticos. En cuanto a las técnicas de modelamiento con Dinámica de Sistemas, este caso se presta para mostrar cómo a medida que se incrementa la complejidad del modelo, algunos de sus elementos pueden cambiar de categoría, siendo así como ciertos parámetros se convierten en sustantivos.

9.1 Formulación del caso

9.1.1 Planteamiento



Figura 9.1 Botadero de basura a cielo abierto (Hoyos, 2014)

Uno de los problemas asociados al crecimiento de los asentamientos urbanos es la disposición final de las basuras. Hasta la década de los años 1990 las basuras en Colombia eran conducidas hasta sitios alejados de las cabeceras municipales, donde eran arrojadas y dejadas a cielo abierto sin ningún tipo de tratamiento. Allí se convertían en el hábitat propicio para gran

variedad de plagas, como roedores y carroñeros, y en fuente de recursos para personas en extrema pobreza, que buscaban entre la basura material de construcción, textil e incluso comida para sí mismos y para sus animales domésticos.

En otros casos las basuras eran tiradas a los ríos, con lo que estas dejaban de ser un problema en el sitio de origen, pero se convertían en otro peor al acumularse en las partes bajas de las cuencas. La ley 99 de 1993 y la ley 142 de 1994 fueron promulgadas para implementar una nueva política de manejo de residuos sólidos, que prohíbe estas prácticas y obliga a todos los municipios a disponer sus residuos sólidos en rellenos sanitarios.

El proceso ha sido lento. En el año 2013, es decir diez años después de expedidas las leyes, todavía se estimaba en un 56% el número de municipios colombianos que no las cumplían. No obstante, actualmente la mayoría de las ciudades más grandes del país ya cuentan con rellenos sanitarios.

Un relleno sanitario es una estructura de ingeniería que, a grandes rasgos, consiste en implementar una capa aislante sobre el suelo, sobre la que se acumulan los residuos sólidos que luego son compactados para optimizar su almacenamiento. La vida útil de un relleno sanitario está determinada por el volumen de material que puede contener.

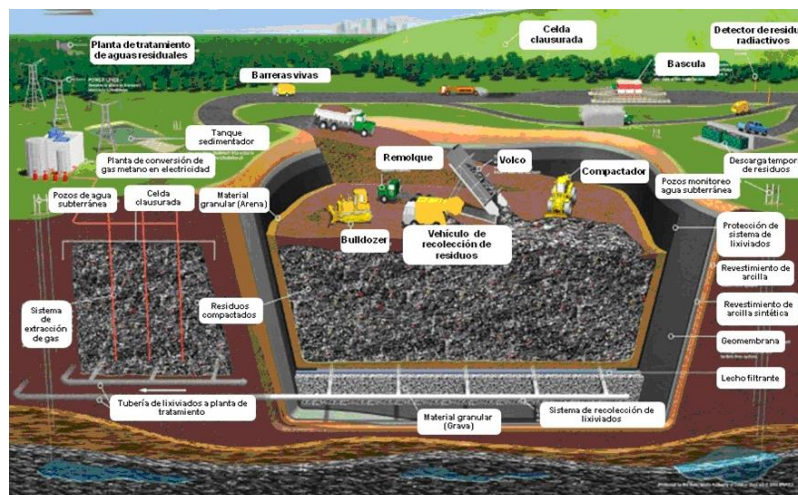


Figura 9.2 Relleno sanitario (UNAD, 2014)

En noviembre de 2010 la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga - CDMB señaló el 15 de marzo de 2011 como plazo para el cierre definitivo del relleno sanitario El Carrasco, que recibe los residuos de Bucaramanga, su área metropolitana y varios municipios cercanos. Se tuvo en cuenta que al sitio ingresaban diariamente 750 toneladas de basura, y que en aquel momento solo quedaba capacidad para almacenar 442.000 metros cúbicos de basura, tope que una vez alcanzado implicaría el cierre. Al completar la capacidad de almacenamiento, un relleno sanitario debe ser clausurado, lo que conlleva su sellamiento y la implementación de una cobertura vegetal definitiva que lo convierta en parte del paisaje rural.

A pesar de que el relleno sanitario es una obra de ingeniería, que en países desarrollados es ambientalmente favorable y económicamente rentable, en Colombia no se alcanza aún un nivel

de confianza suficiente en su implementación. En el año 2013 los alcaldes del área metropolitana de Bucaramanga no habían podido ni siquiera destinar un terreno para el futuro relleno sanitario, en parte por oposición de la comunidad. Dada esta circunstancia, se declararon emergencias sanitarias para mantener abierto El Carrasco, y se desarrollaron campañas para que las personas disminuyan la cantidad de residuos sólidos que se envían al relleno, y por el contrario, hagan la separación de residuos que permita que los materiales reutilizables sean incorporados a nuevos procesos productivos.

Si esta estrategia tuviera éxito se disminuiría la cantidad diaria de basura ingresada al relleno, pero además se mejoraría su grado de compactación que actualmente se estima en 0,9 metros cúbicos por tonelada. Si al relleno sanitario solo ingresaran residuos orgánicos, su compactación sería mayor, y por tanto, se prolongaría su vida útil. Sin embargo, la capacidad de almacenamiento no es el único factor de cierre de un relleno sanitario. El agua contenida en las basuras y la que proviene de las lluvias, mientras se filtra por los residuos acumulados, diluye sustancias altamente nocivas, que al llegar al suelo lo contaminan. Estos flujos son llamados lixiviados, y deben ser recolectados, para su posterior procesamiento, que consiste en recuperar las sustancias tóxicas y obtener nuevamente agua limpia, que si bien no llega a ser apta para el consumo humano, al menos deja de ser un factor contaminante. Una de las razones para que la CDMB ordenara el cierre de El Carrasco fue la detección de lixiviados en las aguas subterráneas en predios cercanos.

Un proceso de modelamiento dinámico sistémico podría permitir el desarrollo de sistemas de información, no solo para hacer los cálculos necesarios acerca del desempeño de un relleno sanitario, sino para proveer a las comunidades información que facilite el establecimiento de acuerdos sobre el uso del suelo para estos fines, y la proyección de resultados de uso y aprovechamiento de los mismos.

9.1.2 Pregunta

¿Cómo modelaría con Dinámica de Sistemas el proceso de manejo de residuos sólidos urbanos en un relleno sanitario?

9.2 Solución de referencia

9.2.1 Modelamiento cualitativo de la estructura básica del sistema

La estructura básica del sistema está conformada por un conjunto de sustantivos y verbos y sus influencias mutuas. Por sustantivo se entiende todo elemento del sistema que se puede expresar mediante una cantidad y una unidad de medida en cualquier instante; por verbo se asume cualquier evento que modifica la cantidad o medida de un sustantivo.

El problema de este caso se centra en el manejo o disposición de residuos sólidos desde que se generan en los domicilios de las personas hasta que son depositados en el relleno sanitario. El diagrama de influencias de la Figura 9.3 es una primera representación del sistema. El sustantivo *residuos sólidos* ha sido estratificado para distinguir la presencia de residuos en los

hogares o en el relleno; el verbo **generación** representa el origen de los residuos en los hogares, mientras el verbo **disposición** implica su traslado al relleno sanitario como sitio final.

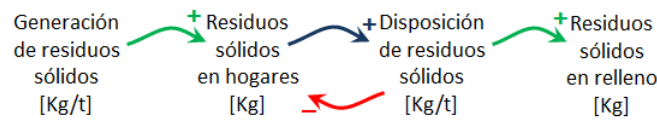


Figura 9.3 Diagrama de influencias del subsistema de residuos sólidos

Pero como parte de la mejora en el manejo del sistema consiste en darle un tratamiento distinto a los residuos orgánicos y a los reciclables, conviene tener sustantivos más específicos para representar la composición de los residuos sólidos. Podría considerarse un conjunto diverso de clasificaciones de los residuos sólidos; sin embargo, para mantener en lo posible la sencillez del modelo, solo se categorizarán los residuos sólidos como orgánicos y reciclables, según se muestra en el diagrama de la Figura 9.4.

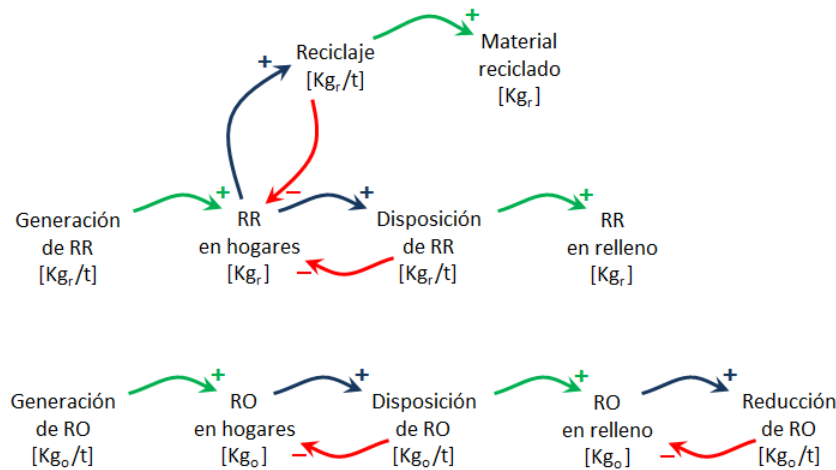


Figura 9.4 Diagrama de influencias para dos tipos de residuos sólidos

Para el sustantivo **residuos orgánicos** en el diagrama de influencias se utilizará la abreviatura **RO** y para **residuos reciclables** la abreviatura será **RR**. La unidad de medida en ambos casos es el kilogramo, pero para efectos de la validación matemática como ya se ha hecho en modelos anteriores, se utilizará un subíndice para diferenciarlas. La distinción entre residuos orgánicos y reciclables en el diagrama de influencias implica también representar que aunque ambos pueden eventualmente llegar al relleno sanitario, en el caso de los reciclables pueden tomar un curso alternativo, dado por el verbo **reciclaje** y el sustantivo **material reciclado**.

El problema de los residuos sólidos está asociado a la conformación de asentamientos humanos. Por esto se incluye el sustantivo **población**, a cuya evolución solo se asocia en este modelo el verbo **crecimiento poblacional**, al igual que como se hizo en el modelo del capítulo anterior. De acuerdo al diagrama de la Figura 9.5, la generación de ambos tipos de residuo está bajo la influencia de la cantidad de individuos que conforman la población.

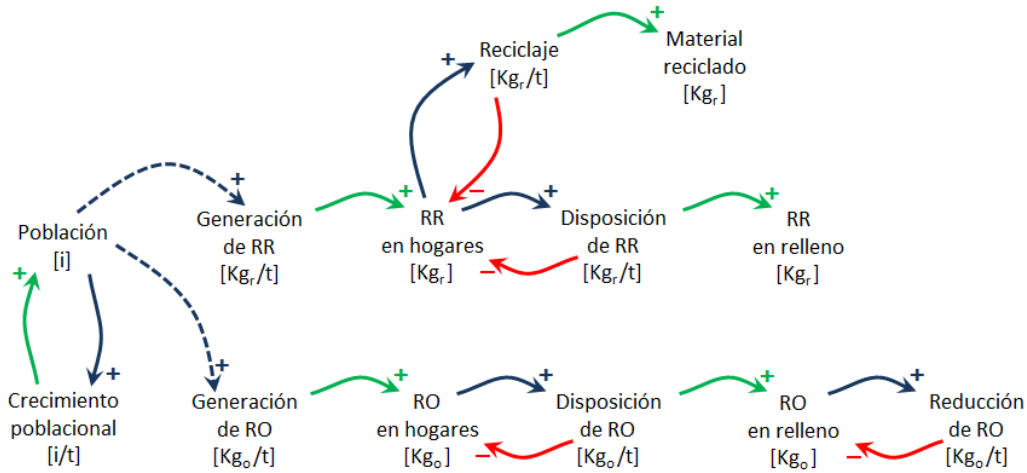


Figura 9.5 Subsistemas de población y residuos sólidos

Un aspecto de interés en este caso es que dependiendo de su composición, es decir, de la proporción entre orgánicos y reciclables, los residuos ocuparán un determinado volumen al ser depositados en el relleno; posteriormente, ya sea por el proceso de descomposición o por presión mecánica tendrán un proceso de compactación. Para incluir lo anterior en el modelamiento del caso, se consideran como sustantivos el **volumen disponible** y el **volumen ocupado** del relleno sanitario, ambos medidos en metros cúbicos [m³].

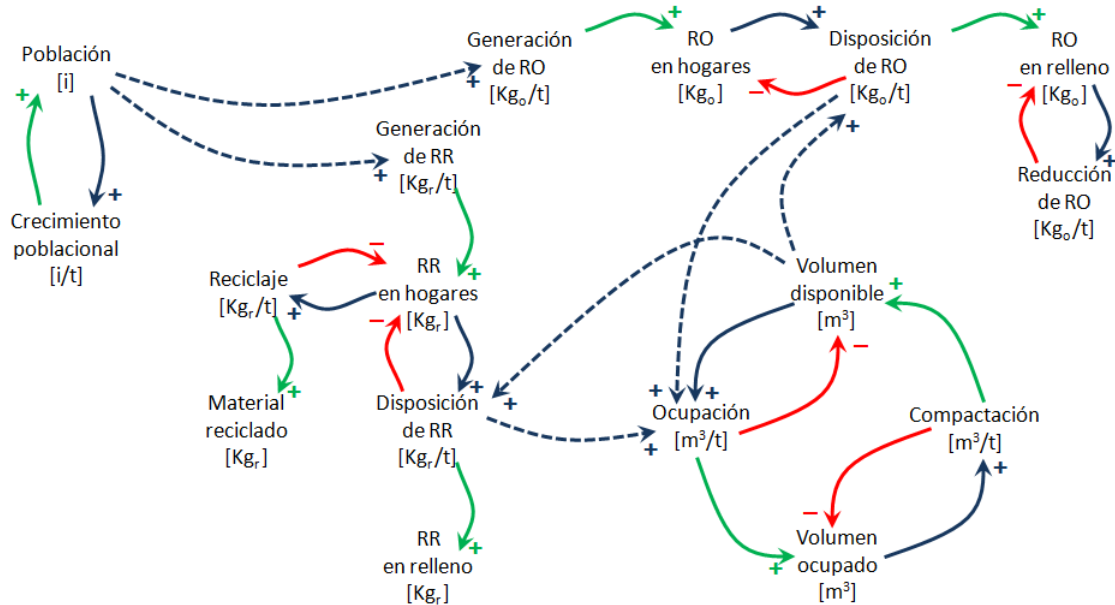


Figura 9.6 Diagrama de influencias de la estructura básica del sistema

El verbo **ocupación** es consecuencia de la llegada de residuos al relleno, con lo cual disminuye el volumen disponible y aumenta el ocupado; el verbo **compactación** sucede por el aumento de la densidad de los residuos debido a su descomposición y a la acción de la maquinaria, y tiene como consecuencia que parte del volumen ocupado vuelve a ser disponible.

Otra razón para incluir el volumen es que este es un aspecto medible directamente en el relleno sanitario y que de hecho determina la posibilidad de seguir recibiendo residuos o no.

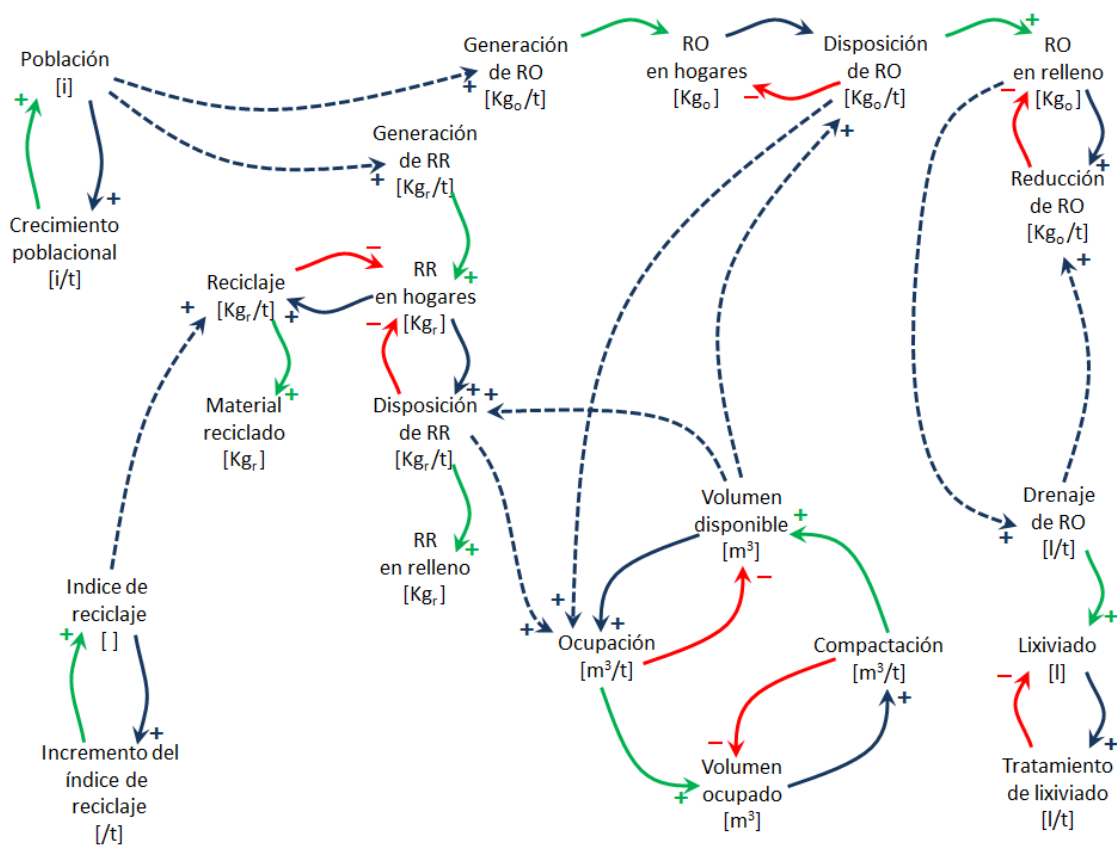


Figura 9.7 Diagrama de influencias de la estructura básica del sistema

Finalmente, el planteamiento menciona las aguas que se drenan de la descomposición de los residuos y que requieren tratamiento para no afectar la salubridad del entorno. Por eso se incluye en el modelo el sustantivo *lixiviado*, medido en litros [l], que se incrementa por el **drenaje de residuos orgánicos** y disminuye por el **tratamiento**. Como el agua drenada es parte de la composición de los residuos, se consideró que disminuye la masa de los residuos orgánicos, para lo cual se incluye el verbo **reducción de RO**, como se aprecia en el diagrama de influencias de la Figura 9.7.

9.2.2 Modelamiento cuantitativo

En un modelo en Dinámica de Sistemas cada sustantivo se representa mediante una ecuación diferencial, en la que su valor se calcula a partir de su valor previo, más o menos los valores de los verbos según el tipo de influencia que reciba de estos. En la Tabla 4.1 se presenta una lista de los sustantivos y verbos de la estructura básica del sistema modelado hasta ahora, y las abreviaturas de cada elemento que se utilizan en la construcción del modelo matemático a continuación.

Tabla 9.1 Elementos de la estructura básica del sistema

| Nombre | Abreviatura | Tipo | Unidad | |
|-------------------------------------|-------------|------------|--------------|----------------------|
| Población | POB | Sustantivo | Individuo | [i] |
| Crecimiento poblacional | CRE | Verbo | | [i/t] |
| Residuos orgánicos en hogares | ROH | Sustantivo | Kilogramo | [Kg _o] |
| Residuos orgánicos en relleno | ROR | Sustantivo | Kilogramo | [Kg _o] |
| Generación de residuos orgánicos | GRO | Verbo | | [Kg _o /t] |
| Disposición de residuos orgánicos | DRO | Verbo | | [Kg _o /t] |
| Reducción de residuos orgánicos | RRO | Verbo | | [Kg _o /t] |
| Residuos reciclables en hogares | RRH | Sustantivo | Kilogramo | [Kg _r] |
| Residuos reciclables en relleno | RRR | Sustantivo | Kilogramo | [Kg _r] |
| Material reciclado | MRC | Sustantivo | Kilogramo | [Kg _r] |
| Generación de residuos reciclables | GRR | Verbo | | [Kg _r /t] |
| Disposición de residuos reciclables | DRR | Verbo | | [Kg _r /t] |
| Reciclaje | REC | Verbo | | [Kg _r /t] |
| Volumen disponible | VOD | Sustantivo | Metro cúbico | [m ³] |
| Volumen ocupado | VOO | Sustantivo | Metro cúbico | [m ³] |
| Ocupación | OCU | Verbo | | [m ³ /t] |
| Compactación | COM | Verbo | | [m ³ /t] |
| Lixiviado | LIX | Sustantivo | Litro | [l] |
| Drenaje de residuos orgánicos | DRE | Verbo | | [l/t] |
| Tratamiento de lixiviado | TRA | Verbo | | [l/t] |
| Índice de reciclaje | IRE | Sustantivo | Adimensional | [] |
| Incremento del índice de reciclaje | IIR | Verbo | | [1/t] |

9.2.2.1 Ecuaciones diferenciales

A cada sustantivo le corresponde una ecuación diferencial ordinaria, en la que la derivada del sustantivo es igual a la suma de los verbos con el signo dado por su influencia. Estas ecuaciones escritas utilizando el método de Euler de integración numérica, pueden interpretarse como que el valor de un sustantivo en cualquier instante dado $(t+\Delta t)$ equivale a su valor en el instante previo (t) , sumando o restando los valores de los verbos para dicho instante (t) . La Tabla 9.2 muestra las ecuaciones diferenciales para la estructura básica del sistema, escritas también en forma de Euler.

Tabla 9.2 Ecuaciones diferenciales del sistema

| Elemento | Ecuación diferencial | Ecuación diferencial en forma de Euler |
|----------|-------------------------------|--|
| POB | $\frac{dPOB}{dt} = CRE$ | $POB(t + \Delta t) = POB(t) + CRE(t) * \Delta t$ |
| ROH | $\frac{dROH}{dt} = GRO - DRO$ | $ROH(t + \Delta t) = ROH(t) + GRO(t) * \Delta t - DRO(t) * \Delta t$ |
| ROR | $\frac{dROR}{dt} = DRO - RRO$ | $ROR(t + \Delta t) = ROR(t) + DRO(t) * \Delta t - RRO(t) * \Delta t$ |

| Elemento | Ecuación diferencial | Ecuación diferencial en forma de Euler |
|----------|-------------------------------------|--|
| RRH | $\frac{dRRH}{dt} = GRR - DRO - REC$ | $RRH(t + \Delta t) = RRH(t) + GRR(t) * \Delta t - DRO(t) * \Delta t - REC(t) * \Delta t$ |
| RRR | $\frac{dRRR}{dt} = DRO$ | $RRR(t + \Delta t) = RRR(t) + DRO(t)$ |
| MRC | $\frac{dMRC}{dt} = REC$ | $MRC(t + \Delta t) = MRC(t) + REC(t) * \Delta t$ |
| VOD | $\frac{dVOD}{dt} = COM - OCU$ | $VOD(t + \Delta t) = VOD(t) + COM(t) * \Delta t - OCU(t) * \Delta t$ |
| VOO | $\frac{dROR}{dt} = OCU - COM$ | $VOO(t + \Delta t) = ROR(t) + OCU(t) * \Delta t - COM(t) * \Delta t$ |
| LIX | $\frac{dLIX}{dt} = DRE - TRA$ | $LIX(t + \Delta t) = LIX(t) + DRE(t) * \Delta t - TRA(t) * \Delta t$ |
| IIR | $\frac{dIRE}{dt} = IIR$ | $IRE(t + \Delta t) = IRE(t) + IIR(t) * \Delta t$ |

9.2.2.2 Ecuaciones auxiliares

Los verbos son representados mediante ecuaciones auxiliares, construidas con los elementos desde donde llegan influencias. En el diagrama de la Figura 9.6, al verbo crecimiento poblacional solo llega influencia desde su propio sustantivo. Mediante el método de búsqueda de la unidad complementaria, es posible identificar algunos elementos faltantes en el modelo.

$$\begin{aligned}
 CRE(t) &= f(POB(t)) \\
 [i/t] &= f([i]) \\
 [i/t] &= [i] * [(1/t)] \\
 [i/t] &= [i/t]
 \end{aligned}$$

Algo que se expresa como coeficiente por unidad de tiempo suele ser una tasa, en este caso, la **tasa de crecimiento poblacional**, que se abreviará como **TCP** y que conformaría la siguiente ecuación:

$$CRE(t) = POB(t) * TCP(t)$$

Para el cálculo de la generación de residuos orgánicos, este verbo recibe la influencia de población. También aquí se utiliza el criterio de la unidad complementaria.

$$\begin{aligned}
 GRO(t) &= f(POB(t)) \\
 [Kg_o/t] &= f([i]) \\
 [Kg_o/t] &= [i] * [Kg_o/(i * t)] \\
 [Kg_o/t] &= [i] * [Kg_o/(i * t)] \\
 [Kg_o/t] &= [Kg_o/t]
 \end{aligned}$$

La unidad complementaria se puede leer como cantidad de residuos orgánicos por individuo tiempo, que podría corresponder a un nuevo elemento que se llamará **tasa de generación de residuos orgánicos**, abreviado para las ecuaciones como **TGO**.

$$GRO(t) = POB(t) * TGO(t)$$

Un abordaje similar permite el cálculo de la generación de residuos reciclables a partir de la influencia de población. Utilizando el criterio de la unidad complementaria se tiene:

$$\begin{aligned} GRR(t) &= f(POB(t)) \\ [Kg_r/t] &= f([i]) \\ [Kg_r/t] &= [i] * [Kg_r/(i * t)] \\ [Kg_r/t] &= [\dot{i}] * [Kg_r/(\dot{i} * t)] \\ [Kg_r/t] &= [Kg_r/t] \end{aligned}$$

La unidad complementaria propuesta, que puede ser leída como cantidad de residuos reciclables por individuo tiempo, corresponde a un nuevo elemento que podría llamarse **tasa de generación de residuos reciclables**, que para las ecuaciones se abreviará como **TGR**.

$$GRR(t) = POB(t) * TGR(t)$$

El siguiente verbo a modelar es la disposición de residuos orgánicos, que según el diagrama de la Figura 9.6 recibe influencia de residuos orgánicos en hogares y de volumen disponible en el relleno sanitario.

$$\begin{aligned} DRO(t) &= f(ROH(t), VOD(t)) \\ [Kg_o/t] &= f([Kg_o], [m^3]) \end{aligned}$$

En presencia de dos o más elementos para construir una ecuación, se ha utilizado antes el criterio de identificar el elemento determinante. La razón por la cual se disponen los residuos es su existencia misma, su acumulación en los hogares. Se va a suponer que existen los recursos necesarios para realizar una disposición total y permanente de los residuos orgánicos.

$$\begin{aligned} DRO(t) &= ROH(t) \\ [Kg_o/t] &= f([Kg_o]) \end{aligned}$$

La anterior sería la ecuación si no existieran restricciones. Pero la razón que se expuso para la influencia desde volumen disponible es que una vez el relleno ha sido utilizado hasta su límite, es decir, cuando no hay volumen disponible, no se puede seguir haciendo disposición de residuos orgánicos en él. Por tanto, a la ecuación anterior hay que agregar dicha condición:

$$\begin{aligned} &Si (VOD(t) > 0) \\ &entonces DRO(t) = ROH(t) \\ &de lo contrario DRO(t) = 0 \end{aligned}$$

Otro verbo a modelar es el reciclaje; de acuerdo al diagrama de la Figura 9.7 recibe influencia de residuos reciclables en hogares.

$$REC(t) = f(RRH(t))$$

$$[Kg_r/t] = f([Kg_r])$$

La diferencia entre reciclaje y disposición, según lo argumentado durante la construcción del diagrama de la estructura básica del sistema, es que la disposición implica su depósito en el relleno sanitario junto con los orgánicos, mientras que el reciclaje implica su aprovechamiento. Los residuos reciclables acumulados en los hogares toman estos dos rumbos, en una proporción que se constituye a la vez en una característica del sistema: qué fracción del total de residuos reciclables es enviada por la población al flujo de reciclaje? Al parámetro que contesta esta pregunta se le va a denominar **índice de reciclaje**, consistente en una fracción por unidad de tiempo $[/t]$ y abreviado para las ecuaciones como **IRE**. Con este nuevo elemento, se puede proponer la siguiente ecuación para reciclaje:

$$REC(t) = RRH(t) * IRE(t)$$

$$[Kg_r/t] = [Kg_r] * []$$

La expresión anterior representa que se recicla una fracción del total de los residuos reciclables acumulados en los hogares. Aunque falta el elemento $[/t]$ en la parte derecha, se justifica en cuanto no se considera ninguna restricción. Sería diferente si se hubiera incluido en el modelamiento algún elemento que implicara, por ejemplo, restricciones de capacidad de reciclaje; pero para mantener el caso en un nivel de dificultad apropiado como caso de estudio, se dará por aceptada esta ecuación con sus salvedades de complejidad matemática.

Según una ecuación anterior, si el volumen disponible en el relleno sanitario es mayor que cero se pueden disponer en él la totalidad de los residuos orgánicos acumulados en los hogares; en caso contrario no. Esta expresión todavía no tiene la complejidad requerida para el tipo de decisión que representa, pero se dará por válida en el contexto de este capítulo; es de entender que una ecuación más compleja, modelada con la asesoría de profesionales en el campo de la disposición de residuos sólidos, generaría nuevos parámetros que enriquecerían el diseño del software.

La disposición de residuos reciclables se modela de forma similar a como se hizo con la disposición de orgánicos, es decir, suponiendo la disposición total de los reciclables que no se enviaron a reciclaje, expresados mediante **(1-IRE(t))**, solo bajo la restricción del volumen disponible en el relleno.

$$\text{Si } (VOD(t) > 0)$$

$$\text{entonces } DRR(t) = ROH(t) * (1 - IRE(t))$$

$$\text{de lo contrario } DRR(t) = 0$$

Por la orientación de este caso de estudio se asumió que el **índice de reciclaje** no es una tasa constante sino un elemento de política pública susceptible de mejora, incluido como sustantivo bajo la influencia del verbo **incremento del índice de reciclaje**, para cuya expresión se utilizará ahora sí una tasa.

$$IIR(t) = IRE(t) * TMR(t)$$

$$[1/t] = [] * [1/t]$$

Pasando al modelamiento del verbo ocupación del relleno sanitario, según el diagrama anterior recibe influencias de disposición de residuos orgánicos y de disposición de residuos reciclables.

$$OCU(t) = f(DRO(t), DRR(t))$$

$$[m^3/t] = f([Kg_o], [Kg_r])$$

Entre estos dos elementos no se puede identificar uno determinante, puesto que los dos tienen la misma función, diferenciándose solo en el tipo de material, por lo que el resultado final debe sumar el efecto de ambos, y se requiere buscar la unidad complementaria de cada uno.

$$OCU(t) = f(DRO(t)) + f(DRR(t))$$

$$[m^3/t] = f([Kg_o/t]) + f([Kg_r/t])$$

$$[m^3/t] = ([Kg_o/t]/[Kg_o/m^3]) + ([Kg_r/t]/[Kg_r/m^3])$$

$$[m^3/t] = ([Kg_o/t]/[Kg_o/m^3]) + ([Kg_r/t]/[Kg_r/m^3])$$

$$[m^3/t] = ([m^3/t]) + ([m^3/t])$$

Las unidades complementarias resultan ser $[Kg_o / m^3]$ y $[Kg_r / m^3]$, que representan la masa de un metro cúbico de desechos orgánicos y reciclables respectivamente, o sea su densidad. Al modelo se agregan entonces los parámetros **densidad de residuos orgánicos** abreviada como DEO y **densidad de residuos reciclables**, abreviada como DER, y la ecuación sería:

$$OCU(t) = DRO(t) * DEO(t) + DRR(t) * DER(t)$$

$$[m^3/t] = [m^3/t]$$

Entre los verbos aún faltantes, el verbo drenaje de residuos orgánicos según el diagrama se debe definir con base en la cantidad de residuos orgánicos en el relleno sanitario, y se puede conformar mediante el criterio de la unidad complementaria.

$$DRE(t) = f(ROR(t))$$

$$[l/t] = f([Kg_o])$$

$$[l/t] = [Kg_o] * [l/(Kg_o * t)]$$

$$[l/t] = [Kg_o] * [l/(Kg_o * t)]$$

$$[l/t] = [l/t]$$

La unidad complementaria hallada sugiere por su lectura, litros por kilogramo en unidad de tiempo, que consiste en la cantidad de líquido, medida en litros, que se drena por cada unidad de residuo orgánico en un periodo. Dicho parámetro se denominará en adelante **tasa de drenaje**, abreviado para las ecuaciones como **TDR**. La ecuación sería:

$$DRE(t) = ROR(t) * TDR(t)$$

$$[l/t] = [Kg_o] * [l/(Kg_o * t)]$$

$$[l/t] = [l/t]$$

La problemática de los lixiviados es compleja. En este modelo solo se aborda de modo superficial, con la pretensión de mantener un nivel didáctico. Para el verbo tratamiento de lixiviado se recurrirá aquí a la suposición simple de que el relleno sanitario esté en capacidad de hacer dicho tratamiento sobre la totalidad de los lixiviados drenados.

$$TRA(t) = LIX(t)$$

Con base en el drenaje de residuos orgánicos, según el diagrama de la Figura 9.7, se debe obtener la expresión del verbo reducción de residuos orgánicos. Por incorporar sólo un elemento, se puede aplicar de nuevo el criterio de la unidad complementaria.

$$\begin{aligned} RED(t) &= f(DRE(t)) \\ [Kg_o/t] &= f([l/t]) \\ [Kg_o/t] &= [l/t] * [Kg_o/l] \\ [Kg_o/t] &= [l/t] * [Kg_o/l] \\ [Kg_o/t] &= [Kg_o/t] \end{aligned}$$

Para corresponder a la unidad complementaria obtenida, la cantidad en kilogramos correspondiente a una unidad en litros será denominada **densidad del lixiviado**, abreviada para las ecuaciones como **DLI**.

$$\begin{aligned} RED(t) &= DRE(t) * DLI(t) \\ [Kg_o/t] &= [l/t] * [Kg_o/l] \\ [Kg_o/t] &= [Kg_o/t] \end{aligned}$$

Con los nuevos parámetros obtenidos en desarrollo de estas últimas ecuaciones, el diagrama de influencias se actualiza como se muestra en la siguiente figura.

Todavía resta por definir la representación matemática del verbo **compactación**, que debe hacerse con base en la cantidad de residuos reciclables y de residuos orgánicos presentes en el relleno sanitario. Una manera sencilla de abordar esta expresión sería calcular la compactación de cada uno de los residuos y luego sumarlas, tal como se hizo para la ocupación del relleno, Pero en este caso según información adicional conseguida durante el modelamiento, el efecto no es aditivo por estar mezcladas en forma indiscriminada desde la recolección. Se optó por un sustantivo auxiliar denominado **índice de componente orgánico**, que luego se convierte en el multiplicador **factor de compactación**, que finalmente actúa a modo de tasa sobre el verbo compactación.

El índice de componente orgánico se calcula como una fracción, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} ICO(t) &= ROR(t)/(ROR(t) + RRR(t)) \\ [] &= [Kg_o]/([Kg_o] + [Kg_r]) \\ [] &= [Kg]/[Kg] \\ [] &= [] \end{aligned}$$

Se debe tener en cuenta que los sustantivos **residuos orgánicos en relleno** y **residuos reciclables en relleno** tienen la misma unidad de medida, y que los subíndices “o” y “r” solo tienen el propósito de resaltar la diferencia de materiales. Por eso para esta expresión se pueden ignorar dichos subíndices y hacer las operaciones en términos de kilogramos.

Antes de que el índice de componente orgánico influya sobre la compactación, se decidió desarrollar un multiplicador que determine un máximo de compactación supuesto en 0,01 semanal cuando la totalidad de los residuos sean orgánicos (ICO=1), con disminución acelerada a medida que la proporción orgánica de los residuos disminuye hasta llegar a cero (ICO=0).

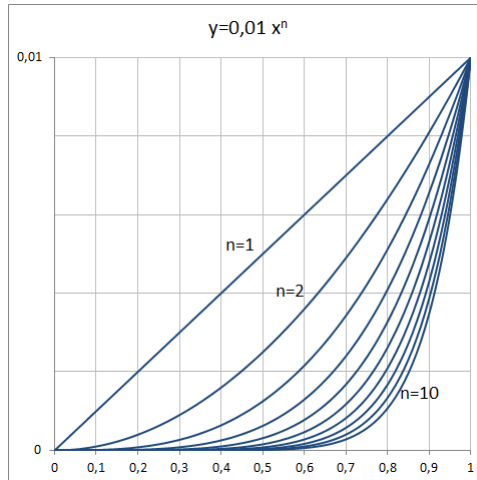


Figura 9.8 Trayectorias para $y=x^n$

De las trayectorias presentadas en la Figura 9.8, para el multiplicador o sustantivo auxiliar denominado **factor de compactación**, se asignó la curva correspondiente a $n=4$, según la siguiente expresión:

$$FCO(t) = 0,01 * ICO(T)^4$$

Con este multiplicador adimensional, la **compactación** del volumen ocupado se representa con la siguiente expresión:

$$COM(t) = VOO(t) * FCO(t)$$

9.2.3 Modelamiento enriquecido del sistema

La Figura 7.14 muestra la última versión del modelo enriquecido del sistema, con todos los parámetros emergentes durante el modelamiento matemático.

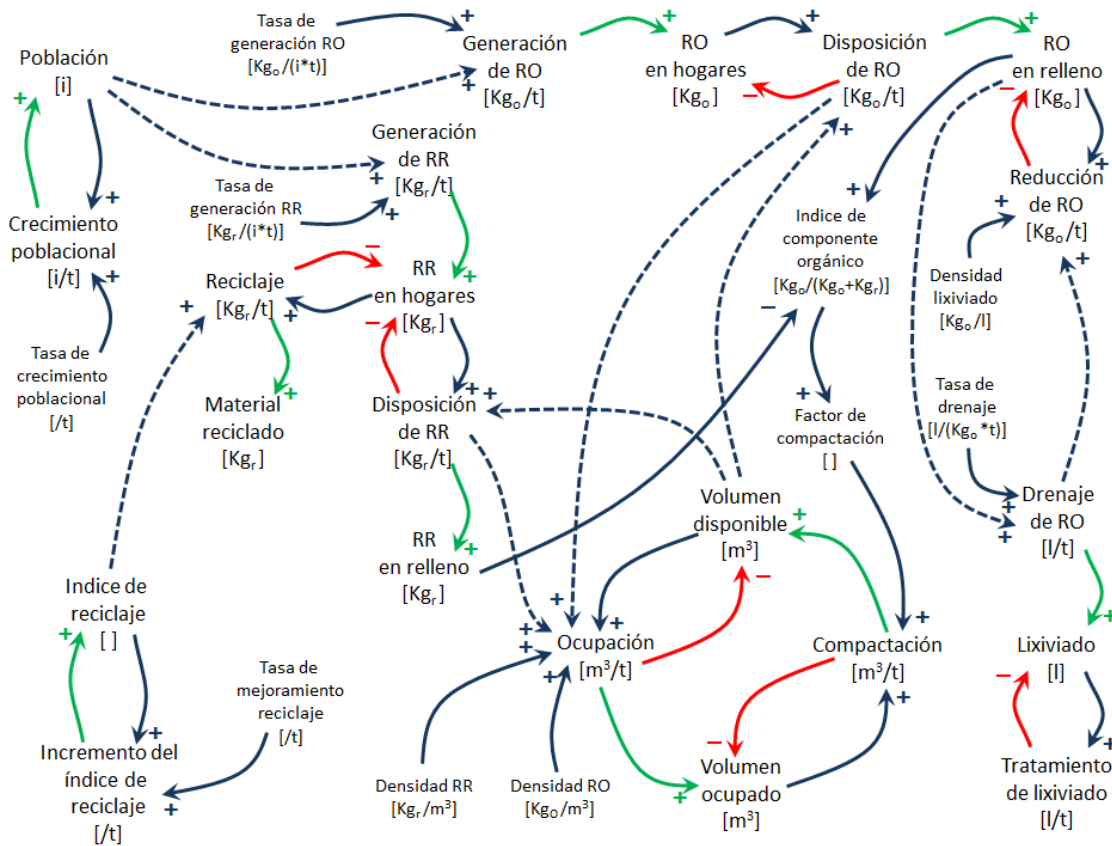


Figura 9.9 Diagrama de influencias del modelo enriquecido del sistema

La Tabla 9.3 contiene la relación de sustantivos, verbos y parámetros que conforman el modelo enriquecido del sistema. Con base en estos elementos se realizará en una sección posterior la transformación del diagrama de influencias en diagramas propios del proceso de desarrollo de software.

Tabla 9.3 Elementos del modelo enriquecido del sistema

| Nombre | Abreviatura | Tipo | Unidad |
|-------------------------------------|-------------|------------|----------------------|
| Población | POB | Sustantivo | [i] |
| Crecimiento poblacional | CRE | Verbo | [i/t] |
| Residuos orgánicos en hogares | ROH | Sustantivo | [Kg _o] |
| Residuos orgánicos en relleno | ROR | Sustantivo | [Kg _o] |
| Generación de residuos orgánicos | GRO | Verbo | [Kg _o /t] |
| Disposición de residuos orgánicos | DRO | Verbo | [Kg _o /t] |
| Reducción de residuos orgánicos | RED | Verbo | [Kg _o /t] |
| Residuos reciclables en hogares | RRH | Sustantivo | [Kg _r] |
| Residuos reciclables en relleno | RRR | Sustantivo | [Kg _r] |
| Material reciclado | MRC | Sustantivo | [Kg _r] |
| Generación de residuos reciclables | GRR | Verbo | [Kg _r /t] |
| Disposición de residuos reciclables | DRR | Verbo | [Kg _r /t] |

| Nombre | Abreviatura | Tipo | Unidad |
|--|-------------|------------|--|
| Reciclaje | REC | Verbo | [Kg _r /t] |
| Volumen disponible | VOD | Sustantivo | [m ³] |
| Volumen ocupado | VOO | Sustantivo | [m ³] |
| Ocupación | OCU | Verbo | [m ³ /t] |
| Compactación | COM | Verbo | [m ³ /t] |
| Lixiviado | LIX | Sustantivo | [l] |
| Drenaje de residuos orgánicos | DRE | Verbo | [l/t] |
| Tratamiento de lixiviado | TRA | Verbo | [l/t] |
| Índice de reciclaje | IRE | Sustantivo | [] |
| Incremento del índice de reciclaje | IIR | Verbo | [1/t] |
| Tasa de crecimiento poblacional | TCP | Parámetro | [1/t] |
| Tasa de generación de residuos orgánicos | TGO | Parámetro | [Kg _o /(i*t)] |
| Tasa de generación de residuos reciclables | TGR | Parámetro | [Kg _r /(i*t)] |
| Tasa de mejoramiento de reciclaje | TMR | Parámetro | [1/t] |
| Densidad de residuos orgánicos | DRO | Parámetro | [Kg _o / m ³] |
| Tasa de drenaje | TDR | Parámetro | [l/Kg _o *t] |
| Densidad de residuos reciclables | DRR | Parámetro | [Kg _o / m ³] |
| Densidad de lixiviado | DLI | Parámetro | [Kg _o / l] |
| Índice de componente orgánico | ICO | Auxiliar | [Kg _o /(Kg _o +Kg _r)] |
| Factor de compactación | FCO | Auxiliar | [] |

Tabla 9.4 Modelo matemático del sistema

| Elemento | Ecuación |
|--------------------------|--|
| Ecuaciones diferenciales | |
| POB | $POB(t + \Delta t) = POB(t) + CRE(t) * \Delta t$ |
| ROH | $ROH(t + \Delta t) = ROH(t) + GRO(t) * \Delta t - DRO(t) * \Delta t$ |
| ROR | $ROR(t + \Delta t) = ROR(t) + DRO(t) * \Delta t - RRO(t) * \Delta t$ |
| RRH | $RRH(t + \Delta t) = RRH(t) + GRR(t) * \Delta t - DRO(t) * \Delta t - REC(t) * \Delta t$ |
| RRR | $RRR(t + \Delta t) = RRR(t) + DRO(t)$ |
| MRC | $MRC(t + \Delta t) = MRC(t) + REC(t) * \Delta t$ |
| VOD | $VOD(t + \Delta t) = VOD(t) + COM(t) * \Delta t - OCU(t) * \Delta t$ |
| VOO | $VOO(t + \Delta t) = ROR(t) + OCU(t) * \Delta t - COM(t) * \Delta t$ |
| LIX | $LIX(t + \Delta t) = LIX(t) + DRE(t) * \Delta t - TRA(t) * \Delta t$ |
| IRE | $IRE(t + \Delta t) = IRE(t) + IIR(t) * \Delta t$ |
| Ecuaciones auxiliares | |
| CRE | $CRE(t) = POB(t) * TCP(t)$ |

| | |
|------------|--|
| GRO | $GRO(t) = POB(t) * TGO(t)$ |
| DRO | Si $(VOD(t) > 0)$ entonces $DRO(t) = ROH(t)$ de lo contrario $DRO(t) = 0$ |
| RED | $RED(t) = DRE(t) * DLI(t)$ |
| GRR | $GRR(t) = POB(t) * TGR(t)$ |
| DRR | Si $(VOD(t) > 0)$ entonces $DRR(t) = RRH(t) * (1 - IRE(t))$ de lo contrario $DRR(t) = 0$ |
| REC | $REC(t) = RRH(t) * IRE(t)$ |
| OCU | $OCU(t) = DRO(t)/DEO(t) + DRR(t)/DER(t)$ |
| DRE | $DRE(t) = ROR(t) * TDR(t)$ |
| TRA | $TRA(t) = LIX(t)$ |
| ICO | $ICO(t) = ROR(t)/(ROR(t) + RRR(t))$ |
| FCO | $FCO(t) = 0,01 * ICO(T)^4$ |
| COM | $COM(t) = VOO(t) * FCO(t)$ |
| IIR | $IIR(t) = IRE(t) * TMR(t)$ |

9.2.4 Simulación

Para probar el modelo matemático mediante simulación y percibir algunos detalles del comportamiento del sistema, se utilizarán los valores indicados en Tabla 4.5. La unidad de tiempo t es igual a 1 semana. En términos generales se simula una población de 800.000 individuos, cuyos residuos sólidos se disponen en un relleno sanitario cuyo volumen disponible inicial es de un millón de metros cúbicos. Dicha población tiene un índice de reciclaje de 20% de los residuos reciclables, sin ningún mejoramiento a lo largo del periodo simulado de 20 años, es decir, 1040 semanas.

Tabla 9.5 Condiciones iniciales de simulación

| Elemento | Valor inicial |
|---|----------------------|
| Condiciones iniciales | |
| Población [i] | $POB(0) = 800.000$ |
| Volumen disponible [m^3] | $VOD(0) = 1.000.000$ |
| Índice de reciclaje [] | $IRE(0) = 0,20$ |
| Parámetros | |
| Tasa de crecimiento poblacional [1/t] | $TCP(t) = 0,00021$ |
| Tasa de generación de residuos orgánicos [Kg/(i*t)] | $TGO(t) = 3,54$ |
| Tasa de generación de residuos reciclables [Kg/(i*t)] | $TGR(t) = 1,85$ |
| Tasa de mejoramiento de reciclaje [1/t] | $TMR(t) = 0$ |
| Densidad de residuos orgánicos [Kg/ m^3] | $DEO(t) = 3.200$ |
| Tasa de drenaje [l/(Kg*t)] | $TDR(t) = 0,001$ |
| Densidad de residuos reciclables [Kg/ m^3] | $DER(t) = 2.530$ |
| Densidad de lixiviado [Kg/l] | $DLI(t) = 1,05$ |

En el modelo no se consideró la afectación de ningún factor sobre la dinámica poblacional, por lo que la simulación resulta en un crecimiento permanente como muestra la Figura 9.10.

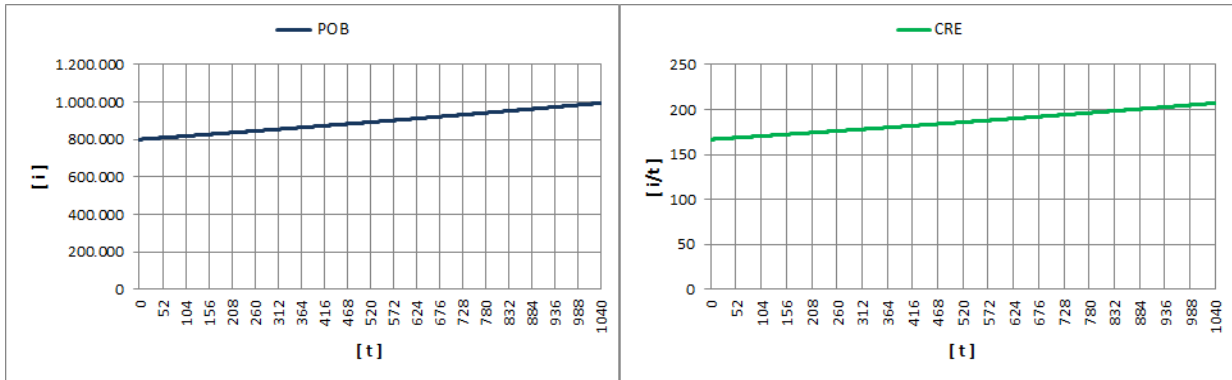


Figura 9.10 Diagrama de simulación de la población

La Figura 9.11 indica que al cabo de 20 años, del volumen inicial de 1.000.000 de metros cúbicos del relleno sanitario solo quedan disponibles 200.000.

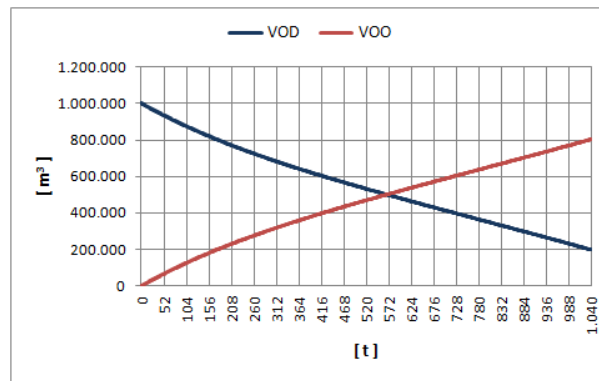


Figura 9.11 Diagrama de simulación de volumen disponible y ocupado en el relleno sanitario

Según la Figura 9.12 el relleno contiene 2 millones de toneladas de residuos orgánicos y casi 1.5 millones de toneladas de residuos que se hubieran podido reciclar. Con la baja tasa de reciclaje, al cabo de los 20 años solo se recuperan 400.000 toneladas de residuos reciclables.

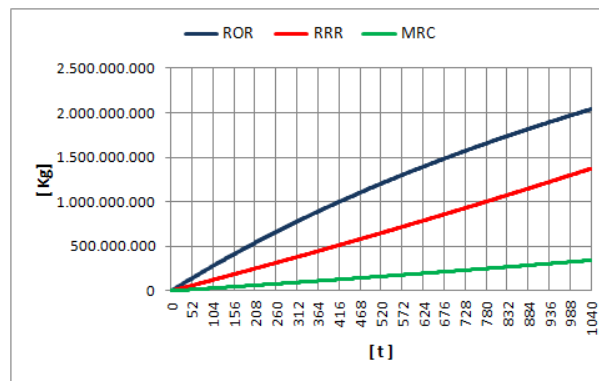


Figura 9.12 Diagrama de simulación de residuos en el relleno y recuperados

Un segundo escenario de simulación permite proyectar la situación partiendo de un volumen menor del relleno sanitario. Para esto se mantuvieron los mismos valores iniciales, salvo el del volumen disponible en el relleno que se cambió a 750.000 metros cúbicos, es decir, se simula la misma población pero disponiendo de un relleno sanitario de capacidad 25% inferior al caso anterior.

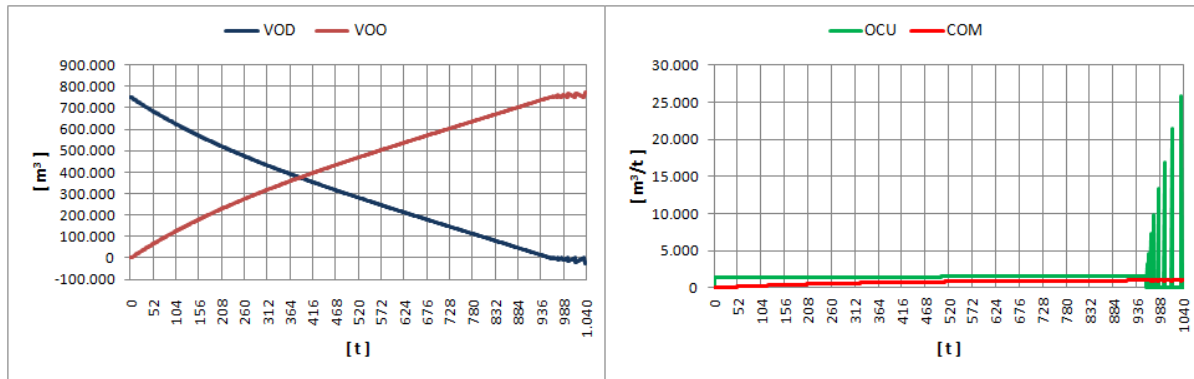


Figura 9.13 Diagrama de simulación del volumen de un relleno sanitario de menor capacidad inicial

De acuerdo a la Figura 7.17, con las nuevas condiciones iniciales la población simulada agota el relleno sanitario en 18 años, cuando su volumen disponible llega a cero, momento a partir del cual se presentan periodos breves de disponibilidad, posibles por procesos de compactación marginal que liberan pequeñas cantidades del volumen ocupado, ocupadas inmediatamente por disposición de residuos acumulados en los hogares.

Aún con esta limitación inicial de capacidad del relleno sanitario, su uso puede hacerse viable siempre y cuando se implementen políticas públicas para incrementar el índice de reciclaje. En el último escenario de este ejercicio se simuló con una tasa de mejoramiento del reciclaje de 0,0012 semanal.

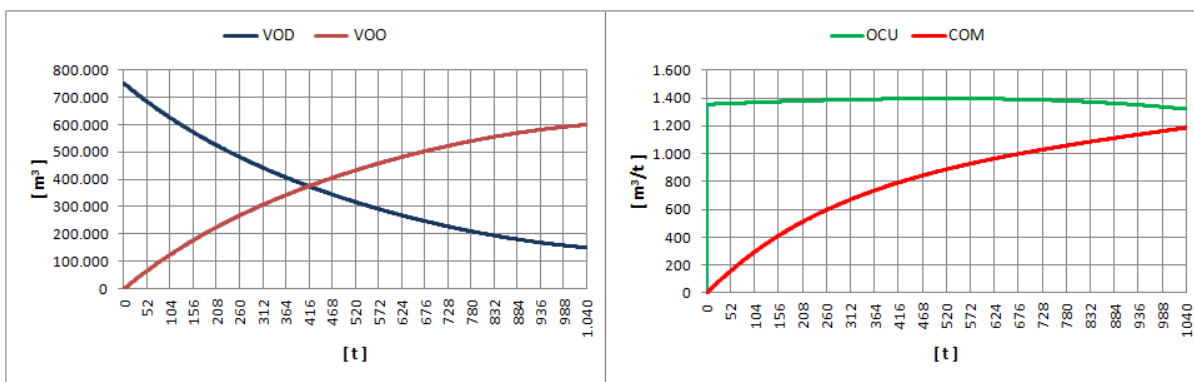


Figura 9.14 Diagrama de simulación del volumen del relleno sanitario de mejora en el reciclaje

Luego de 20 años todavía permanecen disponibles 150.000 metros cúbicos para la disposición de residuos, y la compactación del volumen ocupado es significativamente mayor por la presencia predominante de material orgánico.

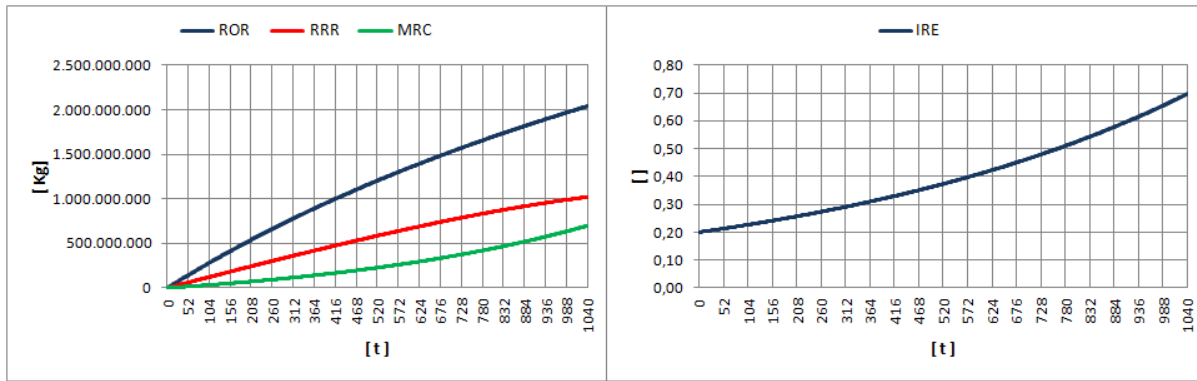


Figura 9.15 Diagrama de simulación de residuos en el relleno con mejoramiento del reciclaje

La cantidad de residuos reciclables dispuestos en el relleno sanitario disminuye en cerca de 280.000 toneladas con respecto al segundo escenario, con una tasa de reciclaje que crece desde 0,20 al inicio, hasta 0,70 al cabo de los 20 años simulados, de acuerdo a la Figura 9.15.

9.3 Transformación del modelo de Dinámica de Sistemas

El primer paso para transformar el modelo es identificar los subsistemas en el diagrama de influencias de la estructura básica del sistema.

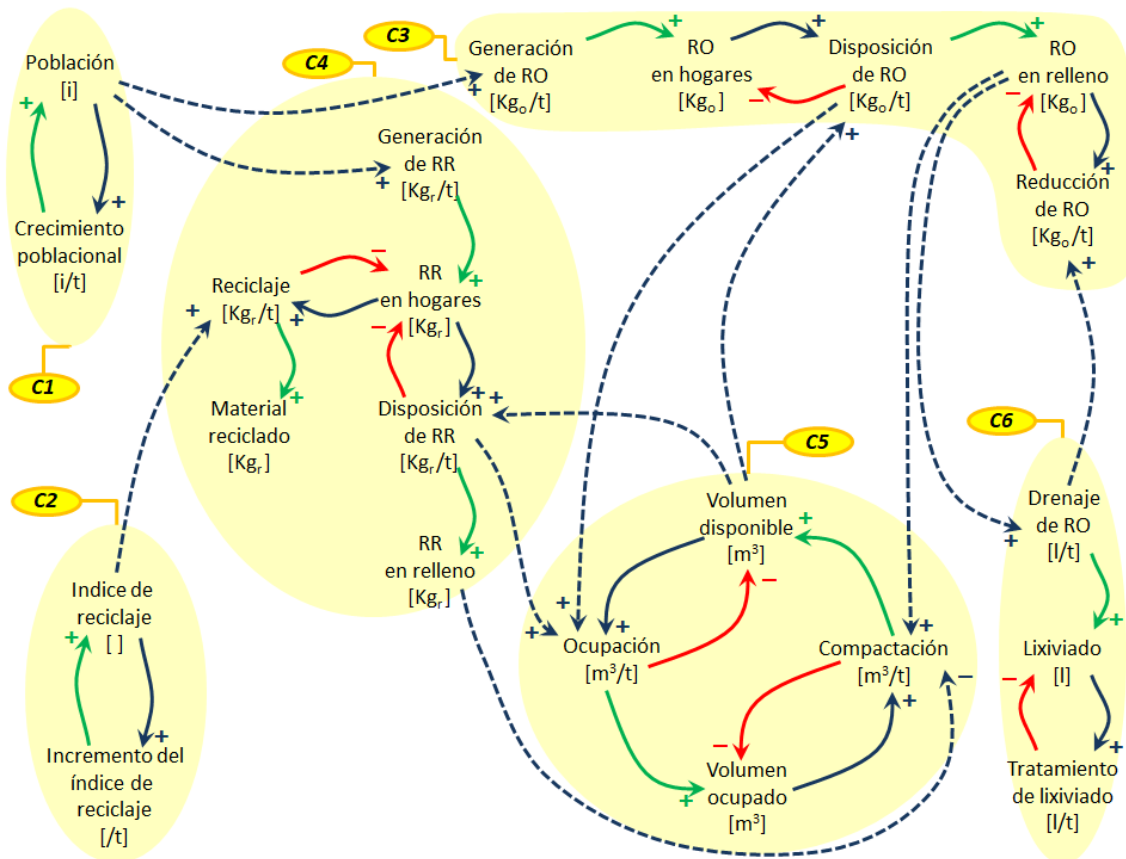


Figura 9.16 Subsistemas de la estructura básica del sistema para determinar clases

9.3.1 Diagrama de dominio

Cada subsistema de la estructura básica del sistema presentada en la Figura 6.18 se ha constituido en una clase, tomando el sustantivo como nombre. Las clases propuestas como base para un eventual desarrollo informático para la gestión de residuos sólidos urbanos serían: **Poblacion** (1), **IndiceReciclaje** (2), **ResiduoOrganico** (3), **ResiduoReciclable** (4), **Volumen** (5) y **Lixiviado** (6), como se observa en la Figura 7.23.

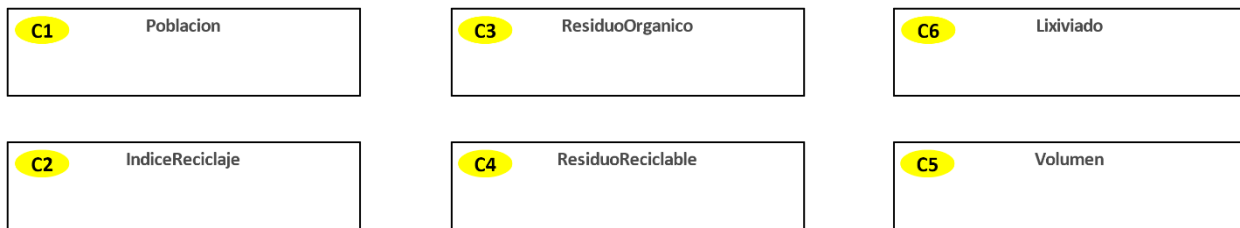


Figura 9.17 Diagrama de dominio – Clases del sistema

En la Figura 6.20 se señalan con rótulos las influencias entre subsistemas, que se utilizan para establecer las dependencias entre clases que se muestran en el diagrama de la Figura 9.19.

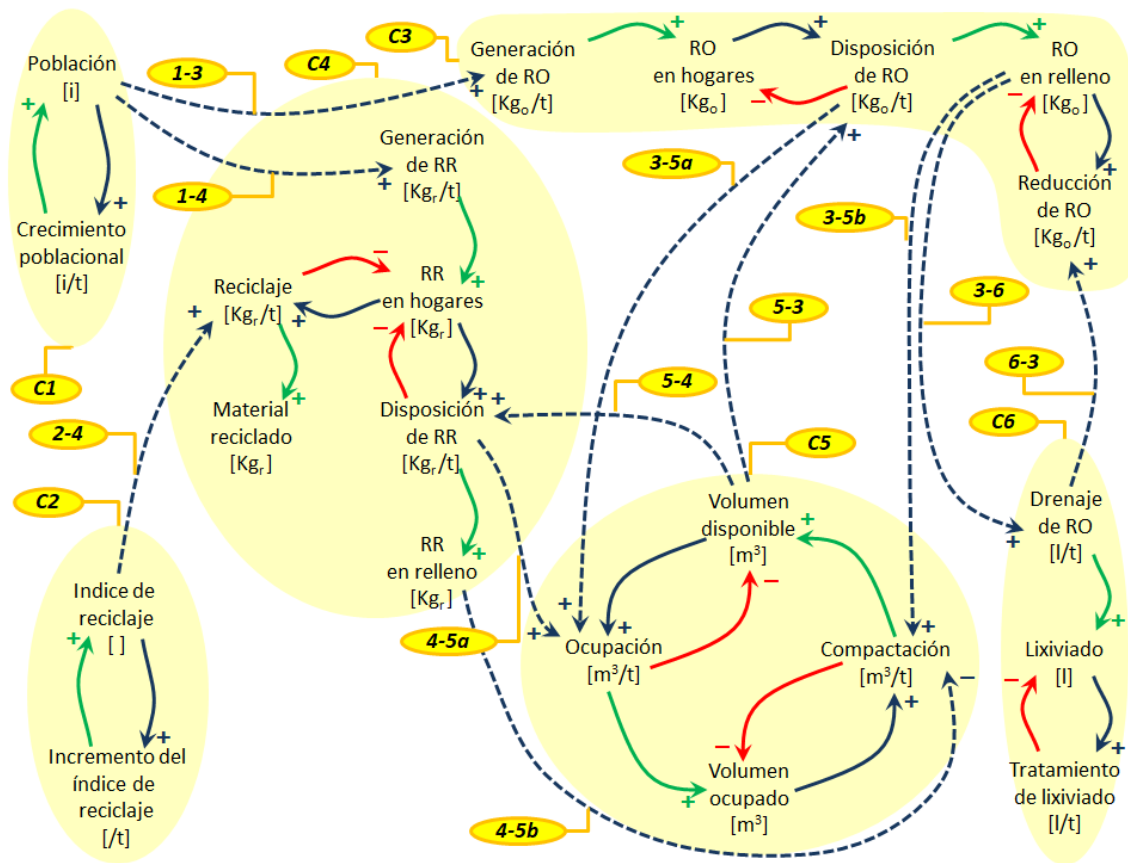


Figura 9.18 Relaciones entre subsistemas para determinar dependencias

La influencia de la población sobre la generación de residuos, tanto orgánicos como reciclables, se traduce en dependencias de las clases **ResiduoOrganico** y **ResiduoReciclable** con respecto a **Poblacion**, rotuladas como 1-3 y 1-4 respectivamente. La clase **ResiduoReciclable** también depende de la clase **IndiceReciclaje**, rotulada como 2-4, por la influencia del **índice de reciclaje** sobre el verbo **reciclaje**. Las clases **Volumen** y **Lixiviado** dependen de las clases de residuos, dadas las influencias sobre los verbos **ocupación** y **compactación**, rotuladas como 3-5a, 3-5b, 4-5a y 4-5b, y sobre el verbo **drenaje de RO**, señalada con el rótulo 3-6.

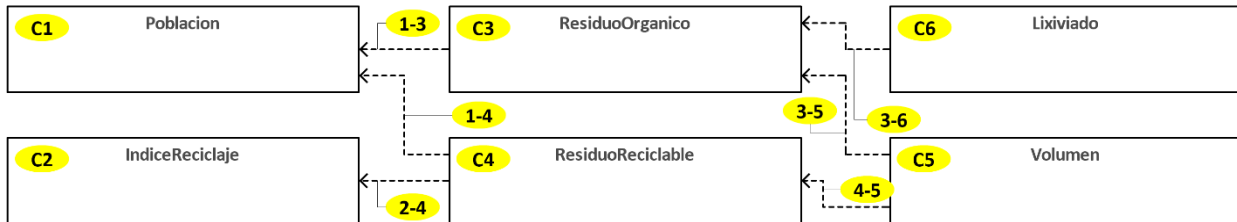


Figura 9.19 Diagrama de dominio – Dependencias entre clases

9.3.2 Diagrama de clases

En la Figura 6.22 se identifican mediante rótulos los sustantivos y verbos que conforman la estructura básica del sistema, atributos y métodos de las clases en el diagrama de la Figura 6.23.

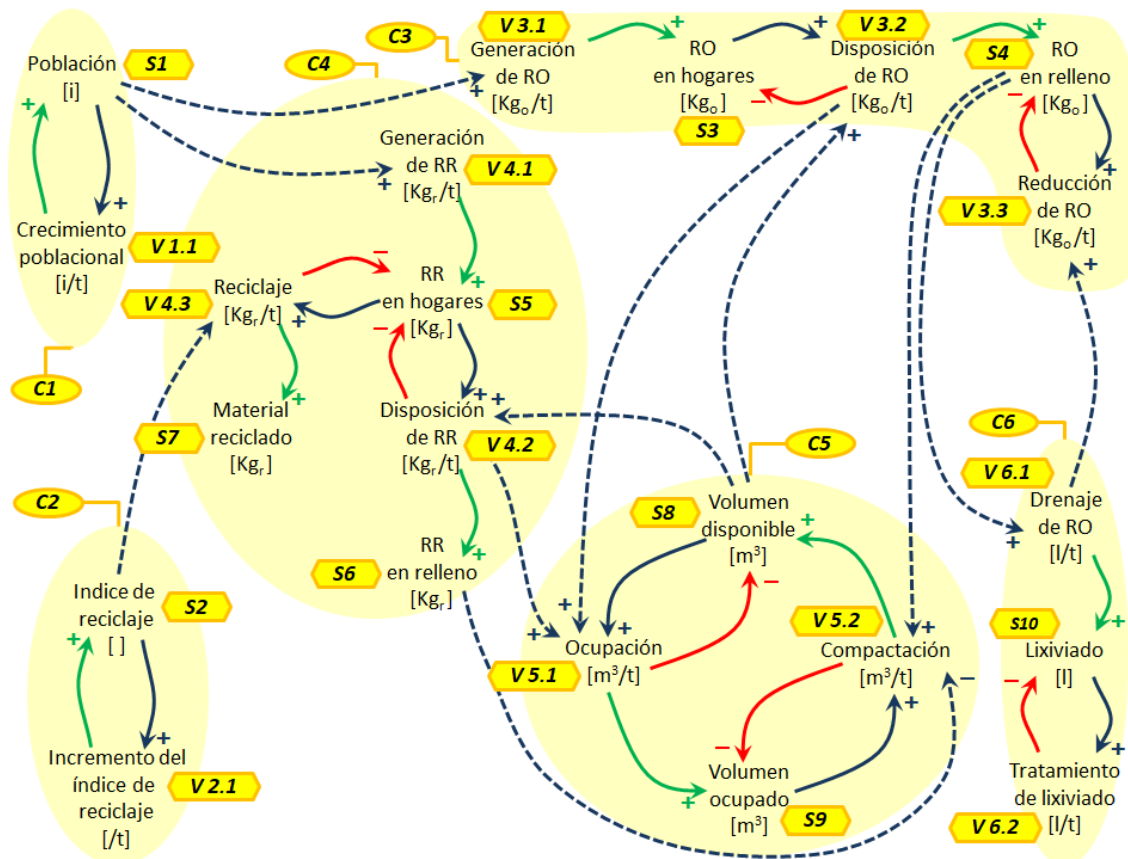


Figura 9.20 Sustantivos y verbos de la estructura básica del sistema

Los sustantivos y verbos de cada uno de los subsistemas se incorporan como los primeros atributos y los métodos en el diagrama de clases, además de los atributos *codigo* y *nombre*.

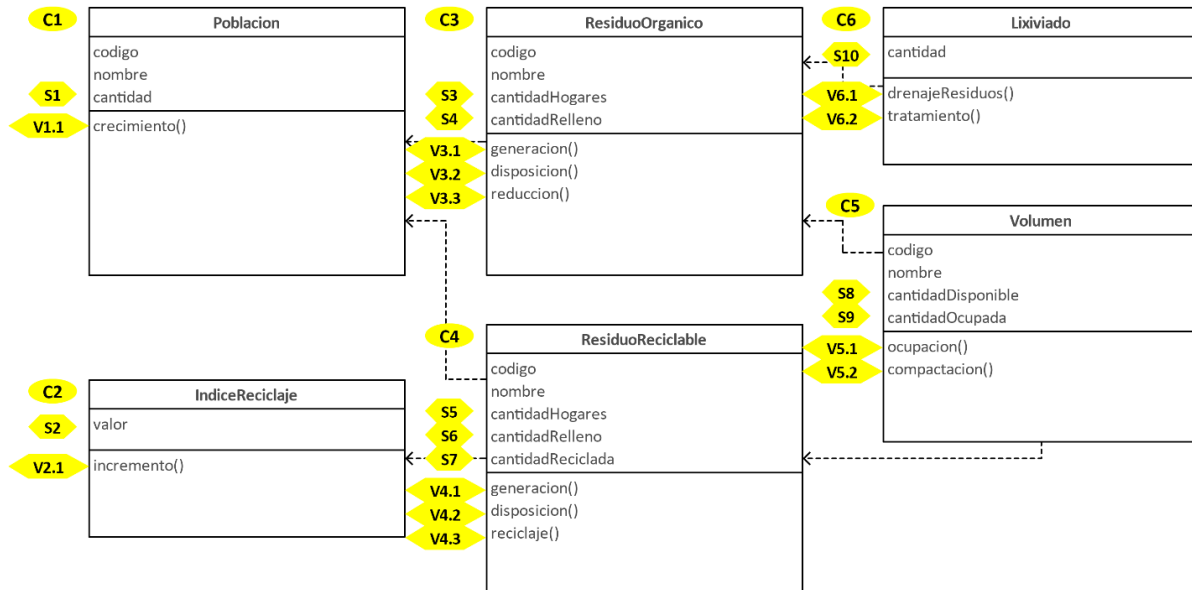


Figura 9.21 Diagrama de clases – Primera aproximación

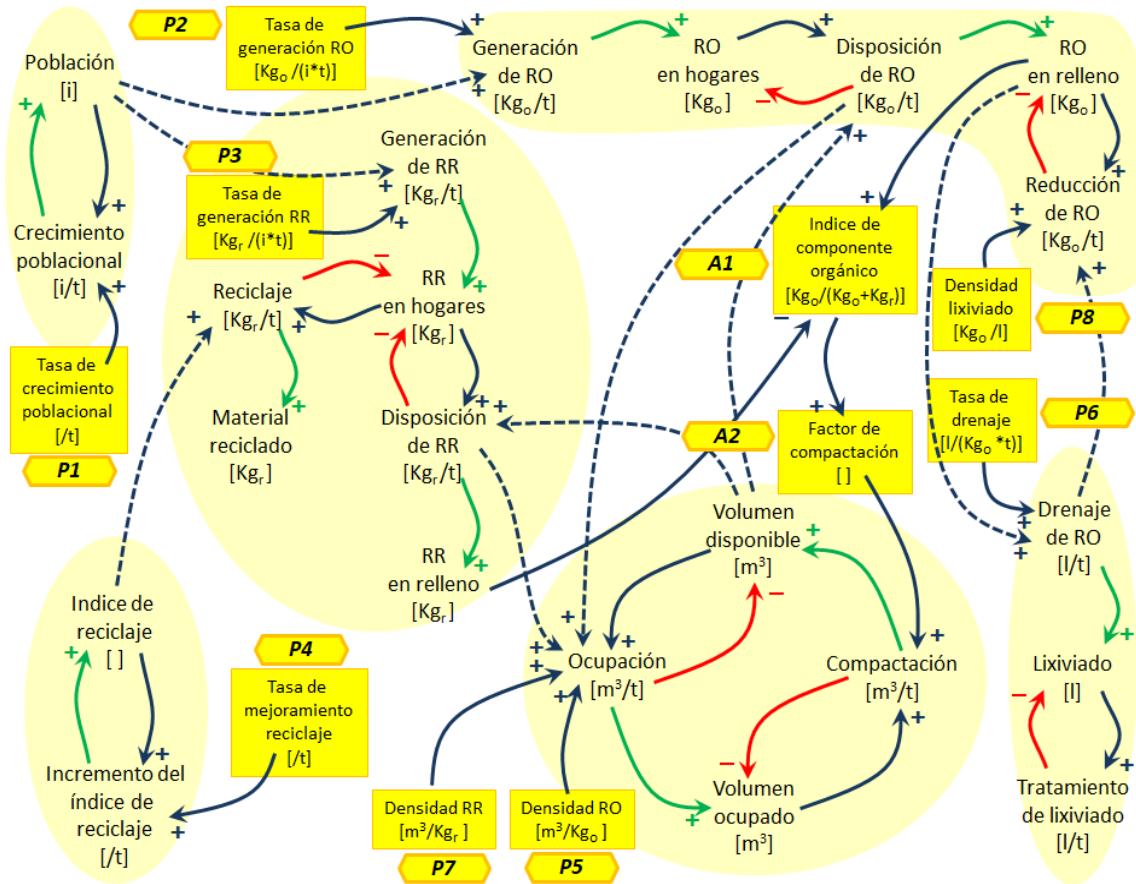


Figura 9.22 Parámetros y sustantivos auxiliares de la estructura enriquecida del sistema

La Figura 6.24 señala los parámetros y sustantivos auxiliares encontrados mediante el modelamiento matemático e incorporados a la estructura enriquecida del sistema. Cada parámetro ha sido incorporado como atributo a la clase con la que más afinidad se establece de acuerdo a las unidades de medida.

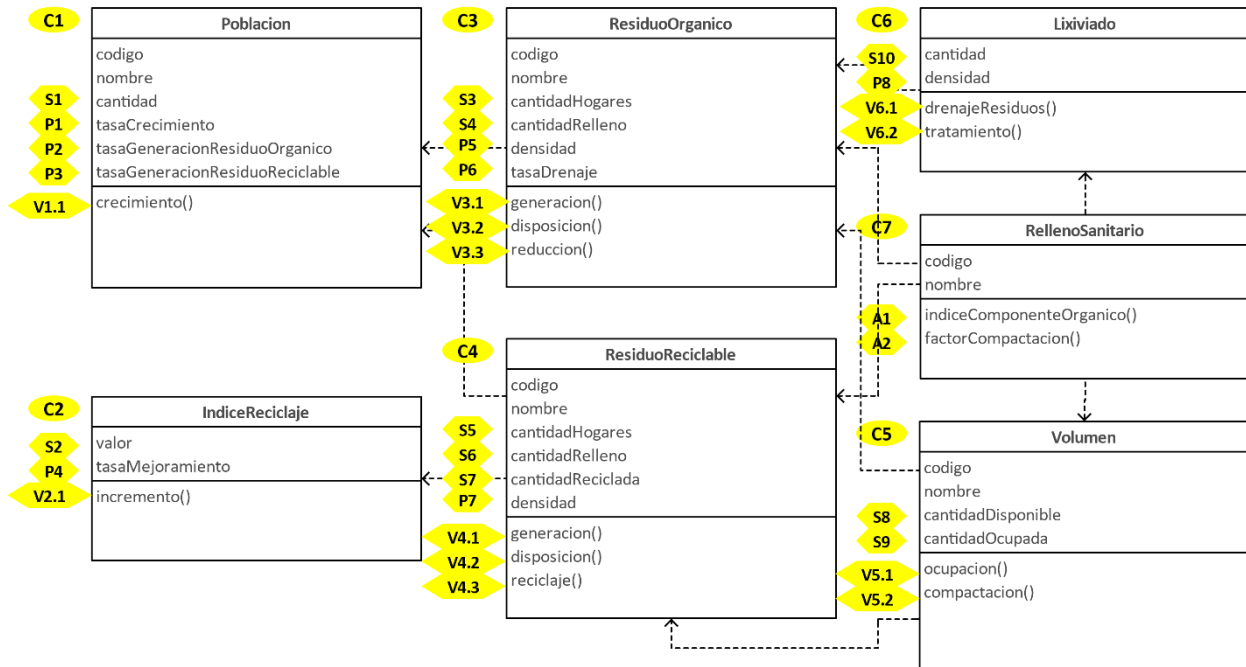


Figura 9.23 Diagrama de clases - Segunda aproximación

En el caso de los sustantivos auxiliares, dado que sus unidades provienen de dos subsistemas diferentes en el caso del **índice de componente orgánico**, o no tiene unidades como sucede con el **factor de compactación**, se optó por incluirlos como métodos de una nueva clase denominada **RellenoSanitario**, que a su vez mantiene dependencia de las demás que modelan diversos aspectos del relleno sanitario.

9.3.3 Diagrama Entidad Relación

El último diagrama que se propone obtener mediante esta metodología como transformación del modelo con Dinámica de Sistemas es el diagrama entidad relación. La Figura 9.24 muestra el que se obtuvo para el presente caso, incluyendo los mismos rótulos con que se puede ubicar el elemento del diagrama de influencias de donde proviene cada entidad, relación o atributo.

En términos generales consiste en una entidad por cada subsistema, cuyos atributos son tomados de sus sustantivos y parámetros, además de los códigos y nombres para la identificación y denominación de registros, y de las fechas que pudieran requerirse para la trazabilidad de los mismos.

A su vez los verbos se transforman en entidades, con fecha para la trazabilidad del registro, y atributos de cantidad para la cuantificación del cambio generado por la relación en la entidad.

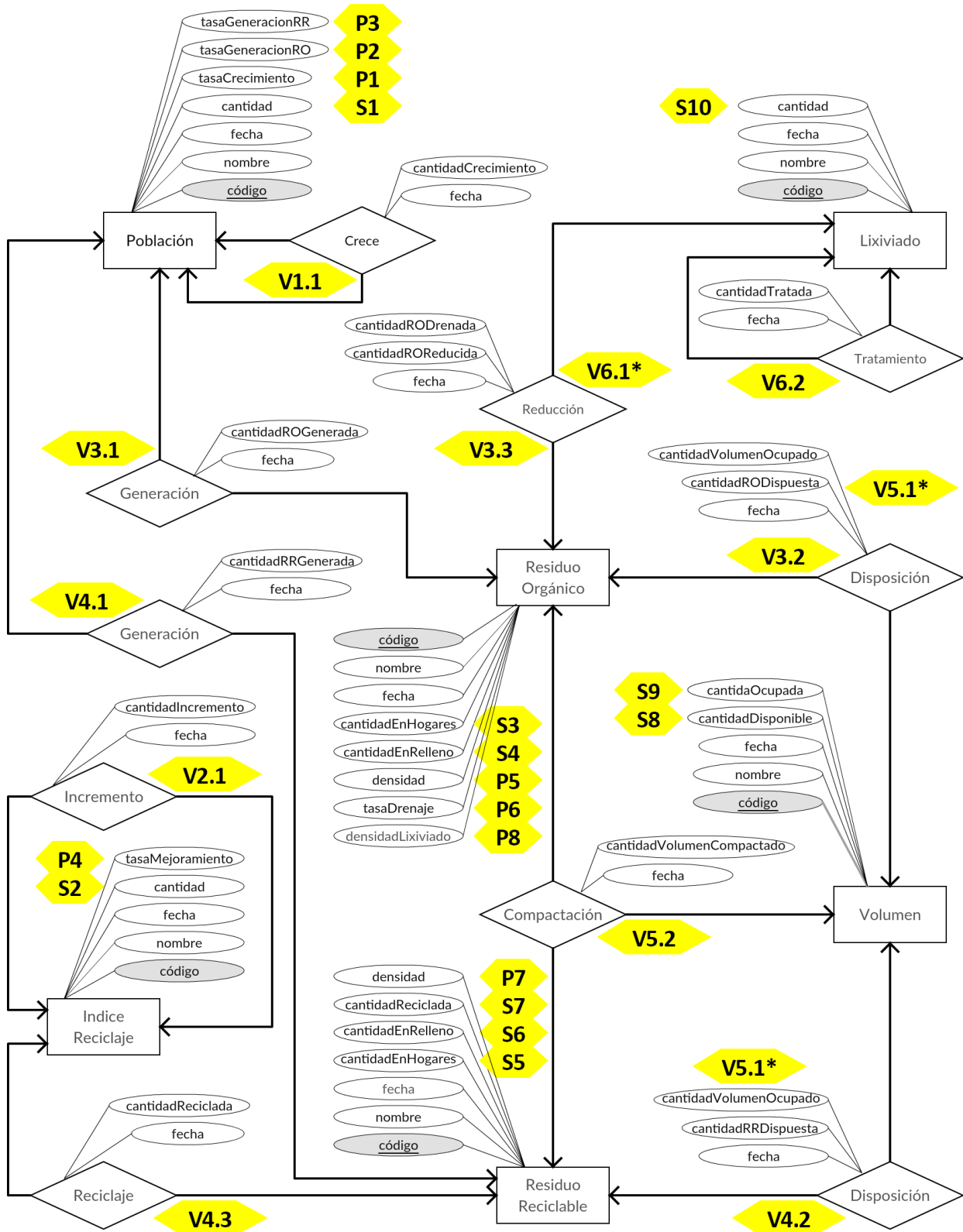


Figura 9.24 Diagrama entidad relación de la base de datos del sistema

9.4 Depuración y consideraciones finales

Solo se pretende llegar con Dinámica de Sistemas a una versión inicial robusta del diseño, que luego sea objeto de depuración por técnicas de Ingeniería del Software.

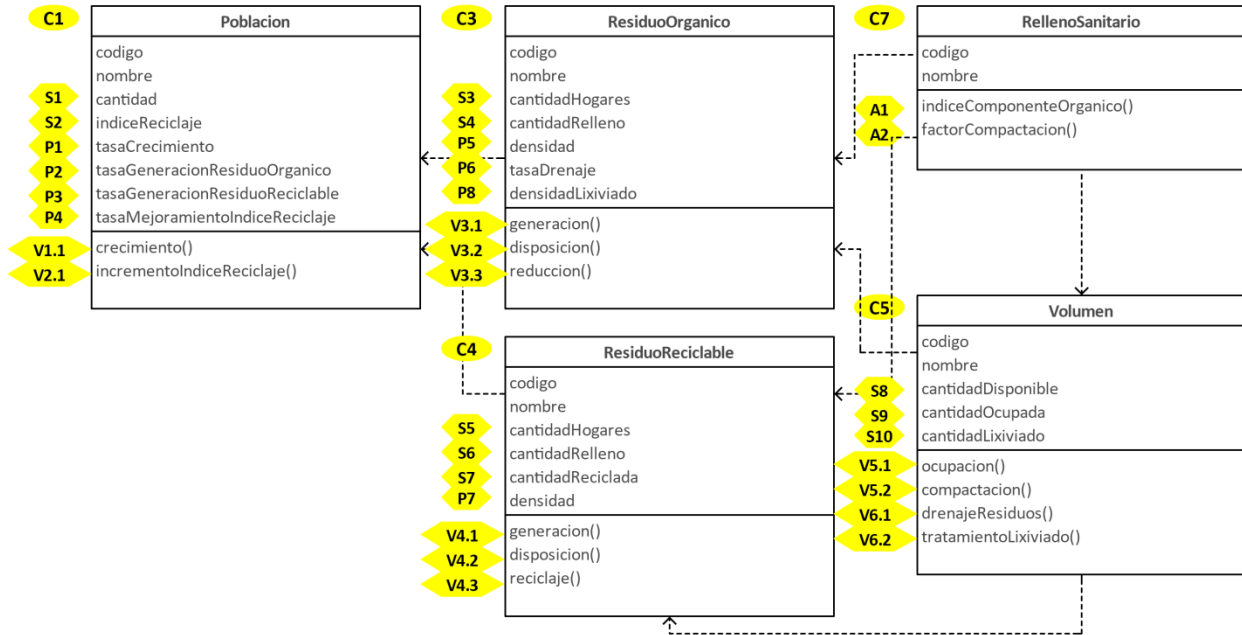


Figura 9.25 Diagrama de clases depurado del sistema

Es de notar que el nuevo diagrama de clases de la Figura 9.25 contiene dos clases menos que el de la Figura 9.23. Su depuración se obtuvo a partir de varios criterios. Primero, se consideró que el **índice de reciclaje** no tenía el carácter de clase en sí mismo, sino que podía asumirse como una característica de la población, con lo que sus atributos y métodos fueron trasladados a la clase **Poblacion**. Algo similar sucede con la clase **Lixiviado**, cuyos atributos y métodos fueron trasladados a la clase **Volumen**, en razón al supuesto de que cada volumen o espacio dispuesto en el relleno sanitario para la disposición de residuos tiene como característica la presencia de una cantidad de lixiviado, resultante de los verbos drenaje y tratamiento.

Con ayuda de los rótulos se puede comprobar que todos los elementos de la estructura enriquecida del sistema están presentes en el diagrama de clases depurado. Es de recalcar nuevamente que esta no es la máxima depuración posible, ya que aún resta por analizar las relaciones entre clases desde la perspectiva de la asociación y composición, lo que va más allá del interés de este libro.

En cuanto al diagrama entidad relación depurado que se muestra en la Figura 9.26, algunos atributos de las entidades han sido trasladados a las relaciones por efecto del análisis de la cardinalidad de las mismas. Por ejemplo, el atributo **tasaGeneracionRO** pasó de la entidad **Población** a la relación **Aplica** que vincula también a la entidad **Residuo Orgánico**, dada la posibilidad de que se declare la existencia de distintos tipos de residuos orgánicos y que la población los genera a tasas diferentes.

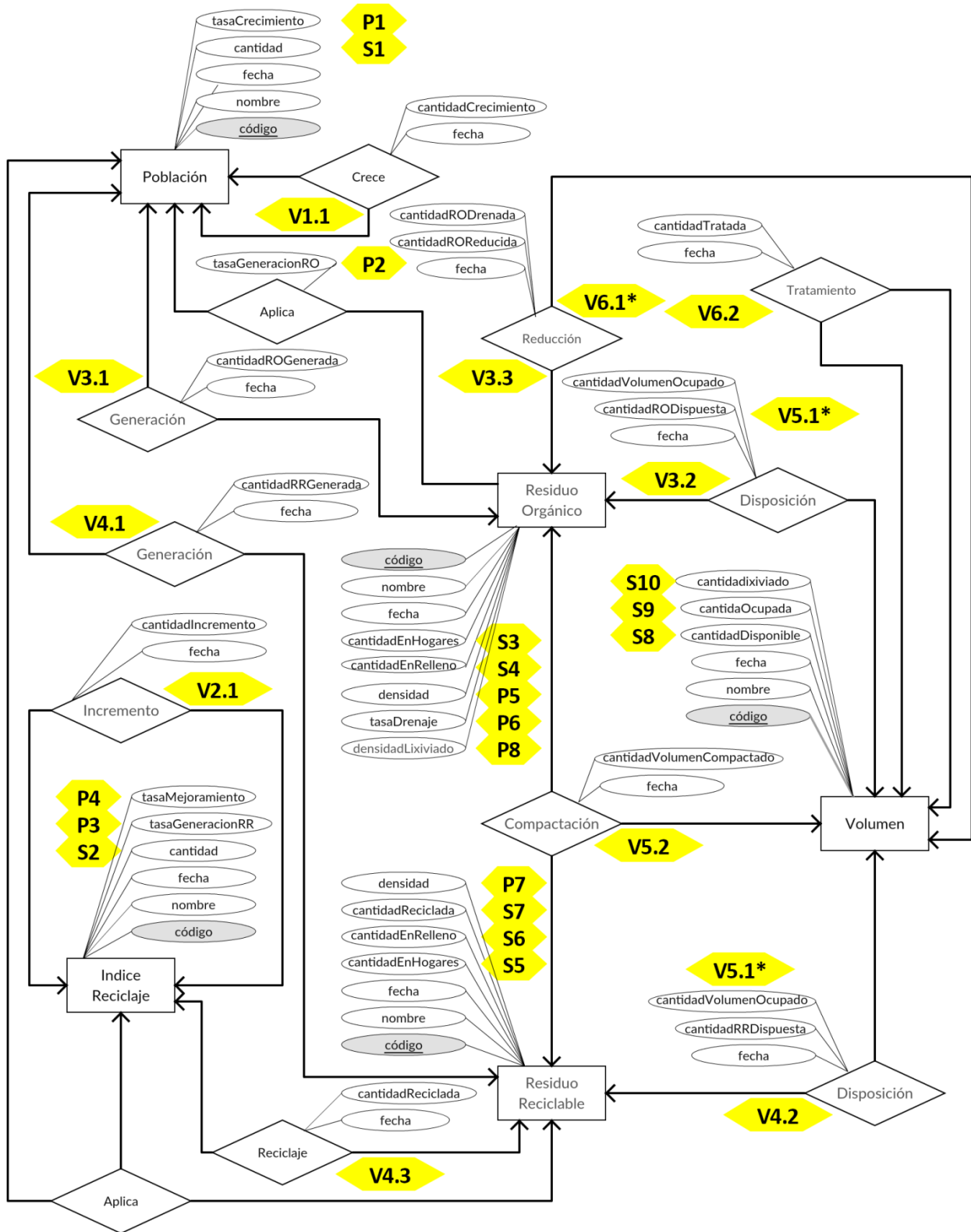


Figura 9.26 Diagrama entidad relación depurado del sistema

9.5 Implementación de prueba

Finalmente, mediante la técnica tradicional el diagrama entidad relación depurado ha sido transformado en el diagrama relacional de la Figura 9.27, documentado en el diccionario de datos de la Tabla 6.7, que luego fue implementado con propósitos didácticos y de verificación mediante la herramienta MBD 3.0.

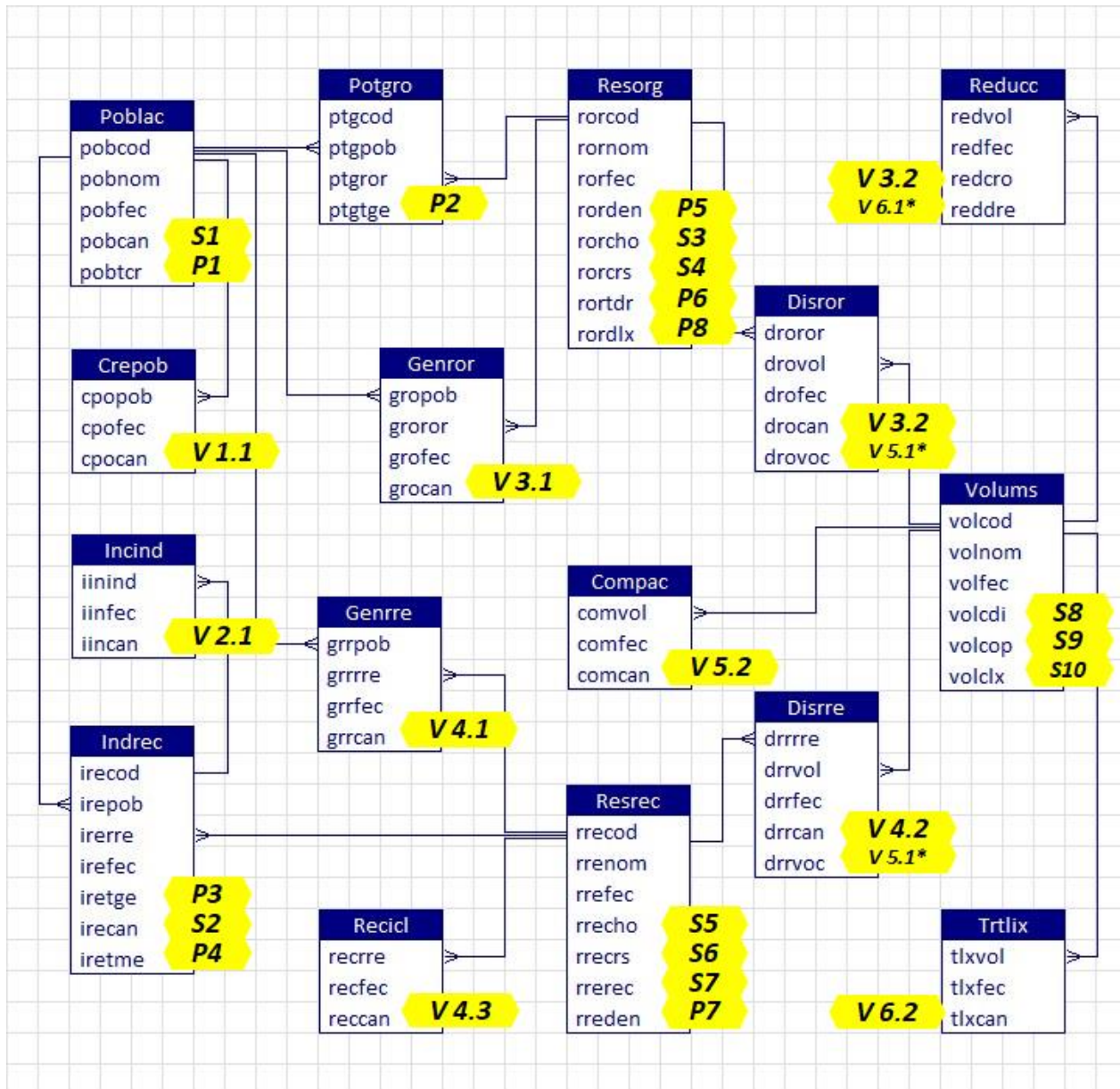


Figura 9.27 Diagrama relacional depurado de la base de datos del sistema

Tabla 9.6 Diccionario de datos de la base de datos del sistema

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|--------|--|----------|---|----------|------------|----------------------|
| Poblac | Relación de población generadora de residuos sólidos | Pobcod | Código de la población | Primaria | | Autoincremental |
| | | Pobnom | Nombre de la población | | | Cadena de caracteres |
| | | Pobfec | Fecha de registro de la población | | | Fecha |
| | | pobcan | Cantidad de individuos que conforman la población | | | Número entero |
| | | pobtr | Tasa de crecimiento [1/semana] | | | Número real |
| Resorg | Relación de residuos orgánicos | rorcod | Código del residuo orgánico | Primaria | | Autoincremental |
| | | rornom | Nombre del residuo orgánico | | | Cadena de caracteres |
| | | rorfec | Fecha de registro | | | Fecha |
| | | rorden | Densidad [Kg/m ³] | | | Número real |
| | | rorcho | Cantidad en hogares [Kg] | | | Número real |
| | | rorcrs | Cantidad en relleno sanitario [Kg] | | | Número real |
| | | rortdr | Tasa de drenaje [l/Kg*semana] | | | Número real |
| | | rordlx | Densidad del lixiviado [Kg/m ³] | | | Número real |
| Resrec | Relación de residuos reciclables | rrecod | Código del residuo reciclable | Primaria | | Autoincremental |
| | | rrenom | Nombre del residuo reciclable | | | Cadena de caracteres |
| | | rrefec | Fecha de registro | | | Fecha |
| | | rrecho | Cantidad en hogares [Kg] | | | Número real |
| | | rrecrs | Cantidad en relleno sanitario [Kg] | | | Número real |
| | | rrerec | Cantidad reciclada [Kg] | | | Número real |
| | | rreden | Densidad [Kg/m ³] | | | Número real |
| Volums | Relación de volúmenes de | volcod | Código del volumen | Primaria | | Autoincremental |

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|---------------|---|----------------|--|----------|---------------|----------------------|
| | relleno sanitario | volnom | Nombre del volumen | | | Cadena de caracteres |
| | | volfec | Fecha de registro | | | Fecha |
| | | volcdi | Volumen disponible [m ³] | | | Número real |
| | | volcop | Volumen ocupado [m ³] | | | Número real |
| | | volclx | Cantidad de lixiviado [l] | | | Número real |
| Potgro | Relación de tasas de generación de residuos orgánicos | ptgcod | Código de la tasa | Primaria | | Autoincremental |
| | | ptgpob | Referencia a la población | Foránea | Poblac.pobcod | Número entero |
| | | ptgror | Referencia al residuo orgánico | Foránea | Resorg.rorcod | Número entero |
| | | ptgtge | Tasa de generación [Kg/semana] | | | Número real |
| Genror | Relación de generación de residuos orgánicos | gropob | Referencia a la población | Foránea | Poblac.pobcod | Número entero |
| | | groror | Referencia al residuo orgánico | Foránea | Resorg.rorcod | Número entero |
| | | grofec | Fecha de registro | | | Fecha |
| | | grocan | Cantidad de residuo orgánico generado [Kg] | | | Número real |
| Genrre | Relación de generación de residuos reciclables | grrpob | Referencia a la población | Foránea | Poblac.pobcod | Número entero |
| | | grrorre | Referencia al residuo reciclable | Foránea | Resrec.rrecod | Número entero |
| | | grrfec | Fecha de registro | | | Fecha |
| | | grrcan | Cantidad de residuo reciclable generado [Kg] | | | Número real |
| Indrec | Relación de índices de reciclaje de la población | irecod | Código del índice | Primaria | | Autoincremental |
| | | irepob | Referencia a la población | Foránea | Poblac.pobcod | Número entero |
| | | irerre | Referencia al residuo reciclable | Foránea | Resrec.rrecod | Número entero |
| | | irefec | Fecha de registro | | | Fecha |
| | | iretge | Tasa de generación [Kg/i*semana] | | | Número real |
| | | irecan | Índice de reciclaje | | | Número real |

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|---------------|--|---------------|---|---------------|---------------|---------------|
| | | iretme | Tasa de mejoramiento [1/semana] | | | Número real |
| Recicl | Relación de registro de reciclaje | recrre | Referencia al residuo reciclable | Foránea | Resrec.rrecod | Número entero |
| | | recfec | Fecha de registro | | | Fecha |
| | | reccan | Cantidad reciclada [Kg] | | | Número real |
| Incind | Relación de incremento en el índice de reciclaje | iinind | Referencia al índice de reciclaje | Foránea | Indrec.irecod | Número entero |
| | | iifec | Fecha de registro | | | Fecha |
| | | lincan | Cantidad en que se incrementa el índice | | | Número real |
| Reducc | Relación de reducción de residuos orgánicos | redvol | Referencia al sitio de disposición | Foránea | Volums.volcod | Número entero |
| | | redfec | Fecha de registro | | | Fecha |
| | | redcro | Cantidad de residuos reducidos [Kg] | | | Número real |
| | | reddre | Cantidad de líxiviado drenado de residuos [l] | | | Número real |
| Crepob | Relación de crecimiento de la población | cpopob | Foránea | Poblac.pobcod | Número entero | Número entero |
| | | cpofec | Fecha de registro | | | Fecha |
| | | cpocan | Cantidad en que crece la población [i] | | | Número real |
| Disror | Relación de disposición de residuos orgánicos en relleno sanitario | droror | Referencia al residuo orgánico | Foránea | Resorg.rorcod | Número entero |
| | | drovol | Referencia al sitio de disposición | Foránea | Volums.volcod | Número entero |
| | | dروفec | Fecha de registro | | | Fecha |
| | | drocan | Cantidad de RO dispuestos [Kg] | | | Número real |
| | | drovoc | Volumen ocupado en la disposición [m ³] | | | Número real |
| Compac | Relación de compactación del volumen | comvol | Referencia al sitio de disposición | Foránea | Volums.volcod | Número entero |
| | | comfec | Fecha de registro | | | Fecha |
| | | comcan | Cantidad compactada [m ³] | | | Número real |

| Tabla | Descripción | Atributo | Descripción | Llave | Referencia | Tipo de dato |
|---------------|---|---------------|---|---------|---------------|---------------|
| Disrre | Relación de disposición de residuos reciclables en el relleno | drrre | Referencia al residuo reciclable | Foránea | Resrec.rrecod | Número entero |
| | | drrvol | Referencia al sitio de disposición | Foránea | Volums.volcod | Número entero |
| | | drrfec | Fecha de registro | | | Fecha |
| | | drrcan | Cantidad de RR dispuestos [Kg] | | | Número real |
| | | drrvoc | Volumen ocupado en la disposición [m ³] | | | Número real |
| Trtlx | Relación de tratamiento de lixiviados | dlxvol | Referencia al sitio de disposición | Foránea | Volums.volcod | Número entero |
| | | tlxfec | Fecha de registro | | | Fecha |
| | | tlxcan | Cantidad de lixiviado tratado [l] | | | Número real |

La interfaz automática generada por el software MBD 3.0, a pesar de las limitaciones propias de una interfaz genérica y no una específica para el problema, alcanza a dar una idea de la funcionalidad que podría alcanzarse con este diseño.

Un eventual desarrollo informático para el sistema debería permitir la caracterización de la población, por ejemplo determinando la cantidad de individuos agrupados en zonas para las cuales se definen las rutas de recolección de residuos. En la Figura 9.28 se propone incluir la población de cada comuna residencial. Otro tipo podrían ser los sectores comerciales, que producen residuos en proporciones diferentes.

También permite el diseño distinguir entre diferentes clases de residuos orgánicos. En la Figura 9.29 se registran los parámetros de densidad, tasa de drenaje y densidad de lixiviado para los desechos resultantes de la preparación de alimentos, que podrían ser diferentes a las de otros residuos orgánicos como los desechos sanitarios, desechos de jardinería entre otros.

| Poblac Registro 1 / 1 Tamaño de registro 70 bytes Tamaño total 70 bytes | |
|--|------------------------------------|
| Código : | 1 |
| Población : | Comuna 1 - Residencial Bucaramanga |
| Fecha (dd/mm/aaaa) : | 30/06/2018 |
| Cantidad [i] : | 54183 |
| Tasa de crecimiento [1/semana] : | 0,00021 |
| <input type="button" value="Agregar"/> <input type="button" value="Editar"/> <input type="button" value="Grabar"/> <input type="button" value="Cancelar"/> <input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/> <input type="button" value="⏪"/> <input type="button" value="⏩"/> <input type="button" value="Salir"/> <input type="button" value="Tabla"/> | |

Figura 9.28 Registro de población generadora de residuos

| Resorg Registro 1 / 1 Tamaño de registro 78 bytes Tamaño total 78 bytes | |
|--|-----------------------|
| Código : | 1 |
| Residuo orgánico : | Desechos de alimentos |
| Fecha (dd/mm/aaaa) : | 09/07/2018 |
| Densidad [Kg/m3] : | 3200 |
| Cantidad en hogares [Kg] : | 765000 |
| Cantidad en relleno sanitario [Kg] : | 27850000 |
| Tasa de drenaje [l/Kg*semana] : | 0,001 |
| Densidad del lixiviado [Kg/m3] : | 1050 |
| <input type="button" value="Agregar"/> <input type="button" value="Editar"/> <input type="button" value="Grabar"/> <input type="button" value="Cancelar"/> <input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/> <input type="button" value="⏪"/> <input type="button" value="⏩"/> <input type="button" value="Salir"/> <input type="button" value="Tabla"/> | |

Figura 9.29 Registro de tipo de residuos orgánicos

Asimismo, la Figura 9.30 sugiere el requisito de caracterizar tipos de residuos reciclables, para los cuales aplican diferentes densidades, lo que a su vez genera impactos diferentes en su gestión. Otros tipos de residuos reciclables podrían ser los envases plásticos, entre otros.

| Resrec Registro 1 / 1 Tamaño de registro 70 bytes Tamaño total 70 bytes | |
|--|-------------------|
| Código : | 1 |
| Reresiduo reciclabe : | Envases de vidrio |
| Fecha (dd/mm/aaaa) : | 30/06/2018 |
| Cantidad en hogares [Kg] : | 687300 |
| Cantidad en relleno sanitario [Kg] : | 3248700 |
| Cantidad reciclada [Kg] : | 2863500 |
| Densidad [Kg/m3] : | 2530 |
| <input type="button" value="Agregar"/> <input type="button" value="Editar"/> <input type="button" value="Grabar"/> <input type="button" value="Cancelar"/> <input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/> <input type="button" value="⏪"/> <input type="button" value="⏩"/> <input type="button" value="Salir"/> <input type="button" value="Tabla"/> | |

Figura 9.30 Registro de tipo de residuos inorgánicos

A partir de los registros anteriores se puede entrar a parametrizar las correspondencias entre los mismos, como se hace en la pantalla de la Figura 9.31, que permite determinar tasas diferenciales de generación de residuos orgánicos en cada sector de la población.

Figura 9.31 Caracterización de población por residuos orgánicos generados

Esta parametrización aplica también para la generación de residuos reciclables por parte de distintos sectores de la población que pueden llegar a tener hábitos de consumo diferentes. La pantalla de la Figura 9.32 sugiere manejar tasas de generación, índices de reciclaje y tasas de mejoramiento del mismo según cada sector poblacional y cada tipo de residuo.

Figura 9.32 Caracterización de población por residuos reciclables generados

Figura 9.33 Registro de generación de residuos orgánicos

Este diseño también permitiría, además de la parametrización, la proyección o registro estimado de las cantidades de residuos orgánico o reciclable de los diferentes tipos registrados,

según se muestra en las Figura 9.34 y Figura 9.35, por ejemplo para efectos de la planificación del proceso de recolección.

| | |
|--|------------------------------------|
| Genre | |
| Población : | Comuna 1 - Residencial Bucaramanga |
| Residuo reciclable : | Envases de vidrio |
| Fecha (dd/mm/aaaa) : | 31/07/2018 |
| Cantidad [Kg] : | 105000 |
| <input type="button" value="Agregar"/> <input type="button" value="Editar"/> <input type="button" value="Grabar"/> <input type="button" value="Cancelar"/> <input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/> <input type="button" value="Salir"/> <input type="button" value="Tabla"/> | |

Figura 9.34 Registro de generación de residuos reciclables

| | |
|--|-------------------|
| Recicl | |
| Residuo reciclable : | Envases de vidrio |
| Fecha (dd/mm/aaaa) : | 31/07/2018 |
| Cantidad reciclada [Kg] : | 58300 |
| <input type="button" value="Agregar"/> <input type="button" value="Editar"/> <input type="button" value="Grabar"/> <input type="button" value="Cancelar"/> <input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/> <input type="button" value="Salir"/> <input type="button" value="Tabla"/> | |

Figura 9.35 Registro de reciclaje

Con respecto al relleno sanitario, el sistema informático desarrollado a partir de este diseño permitiría el registro de las diferentes áreas, usualmente denominadas cárcavas, que conforman la totalidad del relleno.

| | |
|--|--------------------|
| Volums Registro 1/1 Tamaño de registro 62 bytes Tamaño total 62 bytes | |
| Código : | 1 |
| Volumen : | Cárcava de Malpaso |
| Fecha (dd/mm/aaaa) : | 31/01/2018 |
| Cantidad disponible [m3] : | 17350000 |
| Cantidad ocupada [m3] : | 52480000 |
| Cantidad de lixiviado [l] : | 2487 |
| <input type="button" value="Agregar"/> <input type="button" value="Editar"/> <input type="button" value="Grabar"/> <input type="button" value="Cancelar"/> <input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/> <input type="button" value="Salir"/> <input type="button" value="Tabla"/> | |

Figura 9.36 Registro de volumen para disposición de residuos sólidos

La ocupación de las cárcavas registradas podría ser gestionada mediante un registro, estimado o efectivamente cuantificado, de la entrada o disposición de diferentes tipos de residuos, como se muestra en las Figura 9.37 y Figura 9.38.

Con seguridad aún hace falta integrar muchos otros elementos para conseguir un sistema informático completo para la gestión de residuos sólidos urbanos. Desde luego el que aquí se

presenta está limitado por los aspectos tenidos en cuenta durante el modelamiento con Dinámica de Sistemas, que en todo caso ha tenido un alcance estrictamente didáctico.

The screenshot shows a software window titled 'Disror | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 28 bytes | Tamaño total 28 bytes'. It contains a form with the following fields and values:

| | |
|------------------------|-----------------------|
| Residuo orgánico : | Desechos de alimentos |
| Sitio de disposición : | Cárcava de Malpaso |
| Fecha (dd/mm/aaaa) : | 31/07/2018 |
| Cantidad [Kg] : | 101800 |
| Volumen ocupado [m3] : | 31,85 |

At the bottom of the form are several buttons: 'Agregar', 'Editar', 'Grabar', 'Cancelar', navigation arrows, 'Salir', and 'Tabla'.

Figura 9.37 Registro de disposición de residuos orgánicos en relleno sanitario

The screenshot shows a software window titled 'Disre | Registro 1 / 1 | Tamaño de registro 28 bytes | Tamaño total 28 bytes'. It contains a form with the following fields and values:

| | |
|------------------------|--------------------|
| Residuo reciclable : | Envases de vidrio |
| Sitio de disposición : | Cárcava de Malpaso |
| Fecha (dd/mm/aaaa) : | 31/07/2018 |
| Cantidad [Kg] : | 46700 |
| Volumen ocupado [m3] : | 18,45 |

At the bottom of the form are several buttons: 'Agregar', 'Editar', 'Grabar', 'Cancelar', navigation arrows, 'Salir', and 'Tabla'.

Figura 9.38 Registro de disposición de residuos reciclables en relleno sanitario

Las interfaces mostradas implican que un diseño conseguido como transformación del diagrama de influencias cuyo modelamiento incluya mayor complejidad, con una consistencia matemáticamente validada, soportaría los requerimientos de un sistema de información para la gestión del problema real. La simulación no fue el propósito del capítulo, pero no hay que descartar la idea de contrastar las mediciones con datos generados por simulación para hacer un control de su confiabilidad. El propósito en el ámbito de un curso académico está cumplido, y queda como propuesta la conveniencia del modelamiento con Dinámica de Sistemas para la obtención de unos insumos consistentes para la Ingeniería del Software.

Referencias

Hoyos, R. (2014). Botadero de basuras a cielo abierto [Fotografía]. *El nuevo liberal*. Retrieved December 02, 2014, from <http://www.elpueblo.com.co/elnuevoliberal/las-basuras-consumen-al-cauca/>

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. (2014). Diseño de rellenos sanitarios (Diagrama). *Diseño de rellenos sanitarios*. Retrieved December 02, 2014, from <http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358045/ContenidoLinea/>