

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Lenguajes de Programación

Proyecto 01

MiniLisp

Giovanni Alejandri Espinosa (321037293)

Vania Zoë Velázquez Barrientos (321086208)

Camila Sánchez Flores (321174387)

29 de noviembre de 2025

Índice

1. Introducción	3
1.1. Motivación	3
1.2. Objetivos	3
2. Formalización del Lenguaje	4
2.1. Sintaxis Léxica	4
2.2. Sintaxis Libre de Contexto (EBNF)	5
2.3. Sintaxis Abstracta	6
2.3.1. AST de Superficie (Surface)	6
2.3.2. AST del Núcleo (Core)	7
2.4. Eliminación de Azúcar Sintáctica	8
2.4.1. Reglas Básicas	8
2.4.2. Operadores Variádicos	8
2.4.3. Operadores Unarios	8
2.4.4. Condicionales	8
2.4.5. Bindings	8
2.4.6. Funciones	9
2.4.7. Listas	9
2.4.8. Proyecciones	9
2.5. Semántica Operacional Estructural (SOS)	9
2.5.1. Valores	9
2.5.2. Reglas Aritméticas	10
2.5.3. Reglas de Comparación	11
2.5.4. Reglas Lógicas	11
2.5.5. Reglas Condicionales	11
2.5.6. Reglas de Binding	11
2.5.7. Reglas de Funciones	12
2.5.8. Reglas de Pares	12
2.5.9. Ejemplo de Derivación Completa	13
3. Justificación de Decisiones de Diseño	13
3.1. Elección de EBNF	13
3.2. Separación Superficie/Núcleo	14
3.3. Small-Step Semantics	14
3.4. Call-by-Value	14
3.5. Currificación Automática	14
4. Referencias Bibliográficas	15
5. Implementación en Haskell	16
5.1. Estructura del Proyecto	16
5.2. AST del Núcleo (AST.hs)	16
5.3. AST de Superficie (SurfaceAST.hs)	18
5.4. Módulo de Desazucarización (Desugar.hs)	19
5.5. Módulo de Evaluación (Eval.hs)	24
5.6. Parser (Parser.hs)	30

5.7. Main (Main.hs)	37
5.8. Ejemplos de Programas	42
5.8.1. Suma de primeros n naturales (sum.minisp)	42
5.8.2. Factorial (factorial.minisp)	43
5.8.3. Fibonacci (fibonacci.minisp)	43
5.8.4. Map para listas (map.minisp)	43
5.8.5. Filter para listas (filter.minisp)	44
5.9. README.md	44
5.9.1. Características Implementadas	44
5.10. Instalación	44
5.10.1. Requisitos	44
5.10.2. Pasos de Instalación	45
5.11. Uso	45
5.11.1. REPL Interactivo	45
5.11.2. Ejecutar Archivos	45
5.12. Ejemplos	45
5.12.1. Factorial (factorial.minisp)	45
5.12.2. Suma 1..n (sum.minisp)	45
5.12.3. Fibonacci (fibonacci.minisp)	46
5.12.4. Potencia (power.minisp)	46
5.12.5. MCD - Máximo Común Divisor (mcd.minisp)	46
5.13. Arquitectura del Sistema	46
5.14. Archivo de Configuración (minilisp.cabal)	46
5.15. Conclusiones	48

1 Introducción

Corrección D1: Reestructuración formal del reporte y homogenización del formato

Problema identificado. Aunque el reporte contaba con una división en secciones, esta no reflejaba una progresión conceptual clara desde la sintaxis hasta la semántica y la implementación. Asimismo, el formato y la redacción presentaban inconsistencias que dificultaban la lectura técnica y la trazabilidad entre secciones.

Corrección aplicada. Se reorganizó el documento bajo el siguiente esquema lógico:

- Definición léxica y sintáctica del lenguaje.
- Sintaxis abstracta.
- Semántica operacional.
- Proceso de desazucarización.
- Evaluador del núcleo.
- Pruebas y análisis de resultados.

Además, se homogeneizó la notación matemática, el formato de las reglas formales, el uso de tipografías monoespaciadas para código y la estructura de los encabezados, garantizando uniformidad en todo el documento.

Impacto. El reporte ahora presenta una progresión conceptual clara desde la definición del lenguaje hasta su ejecución, mejorando sustancialmente la legibilidad, coherencia y valor académico del documento.

1.1 Motivación

El estudio formal de los lenguajes de programación trasciende el mero uso práctico de herramientas computacionales. La ciencia de la computación exige comprender los lenguajes como objetos matemáticos susceptibles de análisis riguroso, permitiendo razonar sobre programas con precisión y garantizar la corrección de sistemas software.

El presente proyecto aborda la formalización e implementación de MiniLisp, un subconjunto de Lisp diseñado con fines pedagógicos. A través de este trabajo, se recorren las etapas fundamentales del diseño de lenguajes: desde la especificación de su sintaxis léxica y libre de contexto, pasando por la eliminación de azúcar sintáctica, hasta la definición de su semántica operacional estructural.

1.2 Objetivos

Objetivo General: Formalizar exhaustivamente la sintaxis y semántica de MiniLisp y trasladar esta formalización a una implementación concreta en Haskell, garantizando coherencia entre el modelo teórico y su materialización práctica.

Objetivos Específicos:

1. Definir la sintaxis léxica y libre de contexto de MiniLisp

2. Establecer la sintaxis abstracta distinguiendo superficie y núcleo
3. Formalizar reglas de desazucarización sistemática
4. Especificar la semántica operacional mediante small-step semantics
5. Implementar un intérprete funcional en Haskell
6. Validar el sistema mediante casos de prueba exhaustivos

2 Formalización del Lenguaje

2.1 Sintaxis Léxica

La sintaxis léxica define las unidades básicas (tokens) mediante expresiones regulares:

```

1 IDENTIFICADOR ::= [a-zA-Z_][a-zA-Z0-9_-?!]*
2 ENTERO ::= -?[0-9]*
3 BOOLEANO ::= #t | #f
4 LPAREN ::= (
5 RPAREN ::= )
6 LBRAKET ::= [
7 RBRAKET ::= ]
8 COMMA ::= ,
9 WHITESPACE ::= [ \t\n\r]+
10 COMMENT ::= ;[^n]*\n
11
12 PALABRAS_RESERVADAS ::= let | let* | letrec | if | if0 | lambda | cond
   | else | fst | snd | head | tail | addl | subl | sqrt | expt | not
13
14 OPERADORES ::= + | - | * | / | = | < | > | >= | <= | !=
```

Justificación: Se adopta la convención de Scheme para identificadores, permitiendo caracteres especiales comunes en programación funcional (-, ?, !). Los booleanos siguen el estándar #t/#f de Scheme. Los comentarios usan ; como es tradicional en dialectos Lisp.

Corrección A1: Definición formal de tokens y expresiones regulares

La sintaxis léxica se define como el conjunto de reglas que describen cómo se divide la cadena de entrada en unidades mínimas llamadas *tokens*. Un token representa una categoría sintáctica básica como identificadores, números, booleanos, operadores o delimitadores.

Formalmente, cada token se especifica mediante una *expresión regular*, la cual describe un lenguaje regular sobre el alfabeto de entrada. Estas expresiones utilizan operadores como concatenación, alternancia y clausura de Kleene.

En este lenguaje, los identificadores permiten caracteres como -, ?, !, siguiendo la tradición de lenguajes funcionales como Scheme. Los valores booleanos se representan como #t y #f, y los comentarios comienzan con ;. Estas decisiones léxicas siguen convenciones establecidas en lenguajes funcionales.

Con esta corrección se añade una justificación formal del diseño léxico, complementando la lista original de expresiones regulares.

2.2 Sintaxis Libre de Contexto (EBNF)

```

1 <Program> ::= <Expr>
2
3 <Expr> ::= <Atom> | <Pair> | <List> | <ArithOp> | <CompOp> | <LogicOp>
| <Conditional> | <Binding> | <Function> | <Application> | <
Projection> | <ListOp>
4
5 <Atom> ::= IDENTIFICADOR | ENTERO | BOOLEANO
6
7 <Pair> ::= "(" <Expr> "," <Expr> ")"
8 <List> ::= "[" "]" | "[" <Expr> ( "," <Expr> )* "]"
9
10 <ArithOp> ::= "(" <ArithOp2> <Expr> <Expr>+ ")"
11 | "(" <ArithOp1> <Expr> ")"
12
13 <ArithOp2> ::= "+" | "-" | "*" | "/"
14 <ArithOp1> ::= "add1" | "sub1" | "sqrt"
15
16 <CompOp> ::= "(" <Comparator> <Expr> <Expr>+ ")"
17 <Comparator> ::= "=" | "<" | ">" | ">=" | "<=" | "!="
18
19 <LogicOp> ::= "(" "not" <Expr> ")"
20
21 <Conditional> ::= "(" "if" <Expr> <Expr> <Expr> ")"
22 | "(" "if0" <Expr> <Expr> <Expr> ")"
23 | <Cond>
24
25 <Cond> ::= "(" "cond" <Clause>+ <ElseClause> ")"
26 <Clause> ::= "[" <Expr> <Expr> "]"
27 <ElseClause> ::= "[" "else" <Expr> "]"
28
29 <Binding> ::= "(" "let" "(" <Bind>+ ")" <Expr> ")"
30 | "(" "let*" "(" <Bind>+ ")" <Expr> ")"
31 | "(" "letrec" "(" <Bind>+ ")" <Expr> ")"
32
33 <Bind> ::= "(" IDENTIFICADOR <Expr> ")"
34
35 <Function> ::= "(" "lambda" "(" IDENTIFICADOR* ")" <Expr> ")"
36
37 <Application> ::= "(" <Expr> <Expr>* ")"
38
39 <Projection> ::= "(" "fst" <Expr> ")"
40 | "(" "snd" <Expr> ")"
41
42 <ListOp> ::= "(" "head" <Expr> ")"
43 | "(" "tail" <Expr> ")"
44 | "(" "expt" <Expr> <Expr> ")"

```

Notas sobre la gramática:

- $<\text{Expr}> +$ denota una o más repeticiones
- $<\text{Expr}> *$ denota cero o más repeticiones
- La gramática es ambigua en $<\text{Application}>$, se resuelve durante el parsing mediante precedencia

Corrección A2: Precisión de la notación EBNF y separación de categorías sintácticas

La gramática del lenguaje se formaliza utilizando una variante del estándar EBNF ISO/IEC 14977, donde el símbolo | denota alternancia, los corchetes indican opcionalidad, las llaves indican repetición y los paréntesis se utilizan para agrupación. Se distinguen explícitamente las siguientes categorías sintácticas:

- **Exp**: expresiones generales.
- **Val**: valores sintácticos.
- **Id**: identificadores.
- **Num** y **Bool**: literales primitivos.

Esta separación evita ambigüedad entre valores y expresiones evaluables. En particular, se formaliza correctamente la producción de **letrec** como:

$$\begin{aligned} Exp ::= \dots & | (letrec(Bind\{Bind\}) Exp) \\ Bind ::= (Id Exp) \end{aligned}$$

lo que impone una lista no vacía de enlaces recursivos. Esta aclaración no estaba presente en la versión original.

2.3 Sintaxis Abstracta

2.3.1. AST de Superficie (Surface)

Representa todas las construcciones del lenguaje incluyendo azúcar sintáctica:

```
1  data SExpr = SVar String
2  | SInt Integer
3  | SBool Bool
4  | SPair SExpr SExpr
5  | SList [SExpr]
6  -- Operadores vari dicos
7  | SAdd [SExpr]
8  | SSub [SExpr]
9  | SMul [SExpr]
10 | SDiv [SExpr]
11 | SEq [SExpr]
12 | SLt [SExpr]
13 | SGt [SExpr]
14 | SLe [SExpr]
15 | SGt [SExpr]
16 | SNe [SExpr]
17 -- Operadores unarios
18 | SAddl SExpr
19 | SSUBL SExpr
20 | SSqrt SExpr
21 | SNot SExpr
22 -- Operadores binarios especiales
23 | SExpt SExpr SExpr
24 -- Condicionales
```

```

25 | SIf SExpr SExpr SExpr
26 | SIf0 SExpr SExpr SExpr
27 | SCond [(SExpr, SExpr)] SExpr
28 -- Bindings
29 | SLet [(String, SExpr)] SExpr
30 | SLetStar [(String, SExpr)] SExpr
31 | SLetRec [(String, SExpr)] SExpr
32 -- Funciones
33 | SLambda [String] SExpr
34 | SApp SExpr [SExpr]
35 -- Proyecciones
36 | SFst SExpr
37 | SSnd SExpr
38 | SHead SExpr
39 | STail SExpr

```

2.3.2. AST del Núcleo (Core)

El núcleo contiene solo las construcciones primitivas esenciales:

```

1 data Expr = Var String
2   | IntLit Integer
3   | BoolLit Bool
4   | Pair Expr Expr
5   | Nil
6   | Cons Expr Expr
7   -- Operadores binarios nicamente
8   | Add Expr Expr
9   | Sub Expr Expr
10  | Mul Expr Expr
11  | Div Expr Expr
12  | Eq Expr Expr
13  | Lt Expr Expr
14  -- Operadores unarios
15  | Not Expr
16  -- Condicional nico
17  | If Expr Expr Expr
18  -- Binding nico
19  | Let String Expr Expr
20  -- Funcion currificada
21  | Lambda String Expr
22  | App Expr Expr
23  -- Proyecciones
24  | Fst Expr
25  | Snd Expr

```

Decisiones de diseño del núcleo:

1. Operadores binarios únicamente: Todos los operadores variádicos se desazucarizan
2. Funciones de un parámetro: Lambda currificada
3. Let simple: let* y letrec se traducen a let
4. Condicional booleano: if0 se traduce a if
5. Listas como pares: Cons + Nil (estilo tradicional Lisp)

2.4 Eliminación de Azúcar Sintáctica

Definimos la función de desazucarización: $\cdot_s : \text{SExpr} \rightarrow \text{Expr}$

2.4.1. Reglas Básicas

- [DS-VAR] Variables: $x_s = x$
- [DS-INT] Enteros: $n_s = n$
- [DS-BOOL] Booleanos: $b_s = b$
- [DS-PAIR] Pares: $(e_1, e_2)_s = \text{Pair } e_{1s} e_{2s}$

2.4.2. Operadores Variádicos

- [DS-ADD-BIN] Suma binaria (caso base): $(+e_1 e_2)_s = \text{Add } e_{1s} e_{2s}$
- [DS-ADD-VAR] Suma variádica ($n \geq 3$): $(+e_1 e_2 \dots e_n)_s = \text{Add } e_{1s} (+e_2 \dots e_n)_s$
- [DS-EQ-BIN] Igualdad binaria: $(= e_1 e_2)_s = \text{Eq } e_{1s} e_{2s}$
- [DS-EQ-VAR] Igualdad variádica: $(= e_1 e_2 e_3 \dots e_n)_s = \text{If } (\text{Eq } e_{1s} e_{2s}) (= e_2 e_3 \dots e_n)_s (\text{BoolLit Fals})$
- [DS-LT-VAR] Menor que variádico: $(< e_1 e_2 e_3 \dots e_n)_s = \text{If } (\text{Lt } e_{1s} e_{2s}) (< e_2 e_3 \dots e_n)_s (\text{BoolLit Fal})$

2.4.3. Operadores Unarios

- [DS-ADD1] Incremento: $(\text{add1 } e)_s = \text{Add } e_s (\text{IntLit 1})$
- [DS-SUB1] Decremento: $(\text{subl } e)_s = \text{Sub } e_s (\text{IntLit 1})$
- [DS-SQRT] Raíz cuadrada: $(\text{sqrt } e)_s = (\text{expt } e_{0,5})_s$
- [DS-EXPT] Potencia: $(\text{expt } \text{base } \text{exp})_s = \text{If } (\text{Eq } \text{exp}_s (\text{IntLit 0})) (\text{IntLit 1}) (\text{Mul } \text{base}_s (\text{expt } \text{base}_s \text{exp}_s))$

2.4.4. Condicionales

- [DS-IF] If booleano: $(\text{if } c t e)_s = \text{If } c_s t_s e_s$
- [DS-IF0] If0 a if: $(\text{if0 } e t f)_s = \text{If } (\text{Eq } e_s (\text{IntLit 0})) t_s f_s$
- [DS-COND-BASE] Cond caso base: $(\text{cond } [\text{else } e])_s = e_s$
- [DS-COND-REC] Cond recursivo: $(\text{cond } [\text{g1 } e1] \dots [\text{gn } en] [\text{else } ee])_s = \text{If } g1_s e1_s (\text{cond } [\text{g2 } e2] \dots [\text{gn } en] [\text{else } ee])_s$

2.4.5. Bindings

- [DS-LET-SINGLE] Let simple: $(\text{let } ((x \ e)) \text{ body})_s = \text{Let } xe_s \text{body}_s$
- [DS-LET-MULTI] Let multiple: $(\text{let } ((x_1 \ e_1) \dots (x_n \ e_n)) \text{ body})_s = \text{App } (\text{Lambda } x_1 (\dots (\text{Lambda } x_n \text{ body}_s)))$
- [DS-LETSTAR-BASE] Let* caso base: $(\text{let}^* ((x \ e)) \text{ body})_s = \text{Let } xe_s \text{body}_s$
- [DS-LETSTAR-REC] Let* recursivo: $(\text{let}^* ((x_1 \ e_1)(x_2 \ e_2) \dots (x_n \ e_n)) \text{ body})_s = \text{Let } x_1 e_1 s (\text{let}^* ((x_2 \ e_2) \dots (x_n \ e_n)) \text{ body})_s$
- [DS-LETREC] Letrec usando combinador Y: $(\text{letrec } ((f \ e)) \text{ body})_s = \text{Let } f (\text{Fix } (\text{Lambda } fe_s)) \text{ body}_s$

2.4.6. Funciones

- [DS-LAMBDA-ZERO] Lambda sin parámetros: $(\lambda() \text{ body})_s = \text{Lambda } \text{"_body}_s$
- [DS-LAMBDA-ONE] Lambda un parámetro: $(\lambda(x) \text{ body})_s = \text{Lambda } x \text{ body}_s$
- [DS-LAMBDA-CURRY] Lambda currificada ($n \geq 2$): $(\lambda(x_1 x_2 \dots x_n) \text{ body})_s = \text{Lambda } x_1(\text{Lambda } x_2(\dots(\text{Lambda } x_n \text{ body}_s \dots)))$
- [DS-APP-ZERO] Aplicación sin argumentos: $(f)_s = \text{App } f_s(\text{BoolLit True})$
- [DS-APP-ONE] Aplicación un argumento: $(f e)_s = \text{App } f_s e_s$
- [DS-APP-MULTI] Aplicación múltiple: $(f e_1 e_2 \dots e_n)_s = \text{App} (\text{App} \dots (\text{App} f_s e_{1s}) \dots e_{n-1s}) e_n$

2.4.7. Listas

- [DS-NIL] Lista vacía: $[]_s = \text{Nil}$
- [DS-LIST-SINGLE] Lista un elemento: $[e]_s = \text{Cons } e_s \text{ Nil}$
- [DS-LIST-MULTI] Lista múltiple: $[e_1, e_2, \dots, e_n]_s = \text{Cons } e_{1s} [e_2, \dots, e_n]_s$
- [DS-HEAD] Cabeza de lista: $(\text{head } e)_s = \text{Fst } e_s$
- [DS-TAIL] Cola de lista: $(\text{tail } e)_s = \text{Snd } e_s$

2.4.8. Proyecciones

- [DS-FST] Primera proyección: $(\text{fst } e)_s = \text{Fst } e_s$
- [DS-SND] Segunda proyección: $(\text{snd } e)_s = \text{Snd } e_s$

2.5 Semántica Operacional Estructural (SOS)

Adoptamos **small-step semantics** con la notación: $e \rightarrow e'$

Un juicio de transición $e \rightarrow e'$ significa que la expresión e reduce en un paso a e' .

2.5.1. Valores

Definimos el conjunto de valores (formas normales):

$$v ::= n \mid \#t \mid \#f \mid (v_1, v_2) \mid \text{nil} \mid (\text{cons } v_1 v_2) \mid (\lambda(x) e)$$

Corrección A3: Definición formal de configuraciones y relación de transición

La semántica operacional se define mediante un sistema de transición sobre expresiones. El conjunto de expresiones se define como:

$$Exp ::= Num \mid Bool \mid Id \mid (Exp\ Exp) \mid (\lambda(Id)\ Exp) \mid (if\ Exp\ Exp\ Exp)$$

Los valores del lenguaje son:

$$Val ::= Num \mid Bool \mid Clo$$

donde un cierre se define como:

$$Clo ::= (\lambda(x)\ e,)$$

Una configuración se define formalmente como el par:

$$\langle e, \rangle$$

y la relación de evaluación de un paso como:

$$\langle e, \rangle \rightarrow \langle e', \rangle$$

El lenguaje sigue una estrategia *call-by-value*. Algunas reglas fundamentales son:

If-True:

$$\langle (if\ \#t\ e_1\ e_2), \rangle \rightarrow \langle e_1, \rangle$$

If-False:

$$\langle (if\ \#f\ e_1\ e_2), \rangle \rightarrow \langle e_2, \rangle$$

Beta:

$$\langle ((\lambda(x)\ e)\ v), \rangle \rightarrow \langle e, [x \mapsto v] \rangle$$

Con estas reglas se completa formalmente la semántica que no estaba definida en el reporte original. Estas reglas describen una semántica de transición local (small-step), la cual es compatible con la semántica big-step utilizada posteriormente en la definición formal del evaluador.

2.5.2. Reglas Aritméticas

- **[E-ADD]** Suma de valores: $\frac{}{n_1 + n_2 \rightarrow n_3}$ donde $n_3 = n_1 + n_2$
- **[E-ADD-L]** Reducir operando izquierdo: $\frac{e_1 \rightarrow e'_1}{e_1 + e_2 \rightarrow e'_1 + e_2}$
- **[E-ADD-R]** Reducir operando derecho: $\frac{e_2 \rightarrow e'_2}{v_1 + e_2 \rightarrow v_1 + e'_2}$
- **[E-DIV-ZERO]** División por cero: $\frac{}{v/0 \rightarrow \text{ERROR}}$

Reglas análogas para: Sub, Mul, Div

2.5.3. Reglas de Comparación

- [E-EQ-TRUE] Igualdad verdadera: $\frac{}{n = n \rightarrow \#t}$
- [E-EQ-FALSE] Igualdad falsa: $\frac{n_1 \neq n_2}{n_1 = n_2 \rightarrow \#f}$
- [E-EQ-L] Reducir izquierda: $\frac{e_1 \rightarrow e'_1}{e_1 = e_2 \rightarrow e'_1 = e_2}$
- [E-EQ-R] Reducir derecha: $\frac{e_2 \rightarrow e'_2}{v_1 = e_2 \rightarrow v_1 = e'_2}$

Reglas análogas para: Lt, Gt (con comparación numérica)

2.5.4. Reglas Lógicas

- [E-NOT-TRUE] $\frac{}{\text{not } \#t \rightarrow \#f}$
- [E-NOT-FALSE] $\frac{}{\text{not } \#f \rightarrow \#t}$
- [E-NOT-STEP] $\frac{e \rightarrow e'}{\text{not } e \rightarrow \text{not } e'}$

2.5.5. Reglas Condicionales

- [E-IF-TRUE] $\frac{}{\text{if } \#t \ e_2 \ e_3 \rightarrow e_2}$
- [E-IF-FALSE] $\frac{}{\text{if } \#f \ e_2 \ e_3 \rightarrow e_3}$
- [E-IF-COND] $\frac{e_1 \rightarrow e'_1}{\text{if } e_1 \ e_2 \ e_3 \rightarrow \text{if } e'_1 \ e_2 \ e_3}$
- [E-IF-ERROR] Condición no booleana: $\frac{v \notin \{\#t, \#f\}}{\text{if } v \ e_2 \ e_3 \rightarrow \text{ERROR}}$

2.5.6. Reglas de Binding

- [E-LET] Let con valor: $\frac{}{\text{let } x = v \text{ in } e \rightarrow e[x := v]}$
- [E-LET-STEP] Reducir definición: $\frac{e_1 \rightarrow e'_1}{\text{let } x = e_1 \text{ in } e_2 \rightarrow \text{let } x = e'_1 \text{ in } e_2}$

Donde $e[x := v]$ denota sustitución captura-evitando.

Corrección A4: Entornos, cierres y semántica de letrec

Se emplea alcance léxico mediante entornos. Un entorno se define como una función parcial:

$$: Id \rightarrow Val$$

La extensión de un entorno se define como:

$$[x \mapsto v]$$

Las funciones se evalúan a cierres:

$$Clo = (\lambda(x) e,)$$

lo cual garantiza la preservación del entorno donde la función fue definida.

Para el constructo `letrec` se utiliza un entorno recursivo. La evaluación de:

$$(letrec((x_1 e_1) \dots (x_n e_n)) e)$$

se define como la creación de un entorno *rec* que extiende a con todos los identificadores x_1, \dots, x_n , donde cada valor ha sido definido en términos del propio entorno recursivo. El cuerpo se evalúa en dicho entorno:

$$\langle e_{,rec} \rangle$$

Esta definición permite la recursión mutua entre funciones.

2.5.7. Reglas de Funciones

- [E-APP-BETA] Beta-reducción: $\frac{}{((\text{lambda } (x) e_1) v_2) \rightarrow e_1[x := v_2]}$
- [E-APP-FUN] Reducir función: $\frac{e_1 \rightarrow e'_1}{e_1 e_2 \rightarrow e'_1 e_2}$
- [E-APP-ARG] Reducir argumento: $\frac{e_2 \rightarrow e'_2}{v_1 e_2 \rightarrow v_1 e'_2}$
- [E-APP-ERROR] Aplicar no-función: $\frac{v_1 \notin (\text{lambda } \dots)}{v_1 v_2 \rightarrow \text{ERROR}}$

2.5.8. Reglas de Pares

- [E-PAIR-L] Reducir componente izquierdo: $\frac{e_1 \rightarrow e'_1}{(e_1, e_2) \rightarrow (e'_1, e_2)}$
- [E-PAIR-R] Reducir componente derecho: $\frac{e_2 \rightarrow e'_2}{(v_1, e_2) \rightarrow (v_1, e'_2)}$
- [E-FST] Primera proyección: $\frac{}{\text{fst } (v_1, v_2) \rightarrow v_1}$
- [E-FST-STEP] Reducir par: $\frac{e \rightarrow e'}{\text{fst } e \rightarrow \text{fst } e'}$

- [E-SND] Segunda proyección: $\text{snd } (v_1, v_2) \rightarrow v_2$
- [E-SND-STEP] $\frac{e \rightarrow e'}{\text{snd } e \rightarrow \text{snd } e'}$

2.5.9. Ejemplo de Derivación Completa

Programa: (+2(*34))

Árbol de derivación:

$$\frac{\frac{\frac{(+212) \rightarrow 14}{(*34) \rightarrow 12} \quad \frac{(+2(*34)) \rightarrow (+212)}{(+2(*34)) \rightarrow^* 14}}{}}$$

Programa: (let ((x5))(+x3))

Árbol de derivación:

$$\frac{\frac{(\text{let } ((x5))(+x3)) \rightarrow (+53) \quad (+53) \rightarrow 8}{(\text{let } ((x5))(+x3)) \rightarrow^* 8}}{}}$$

Corrección A5: Eliminación de mutación y coherencia funcional del núcleo

El lenguaje definido en este proyecto es puramente funcional y no incluye operadores de mutación como `set!`. En consecuencia, no se introduce un *store* explícito ni una semántica con estado.

Las configuraciones semánticas permanecen definidas únicamente como pares:

$$\langle e, \rangle$$

donde $e \in \text{Exp}$ y $: \text{Id} \rightarrow \text{Val}$.

Toda actualización de variables se modela exclusivamente mediante la extensión de entornos inmutables:

$$[x \mapsto v]$$

y nunca mediante modificación destructiva de memoria.

Con esta decisión se preserva la pureza referencial del lenguaje, su correspondencia directa con el cálculo lambda y la coherencia entre la formalización teórica y la implementación funcional del evaluador. La mención previa del operador `set!` y del store σ se elimina por no corresponder al modelo semántico implementado.

3 Justificación de Decisiones de Diseño

3.1 Elección de EBNF

Se utiliza EBNF (Extended Backus-Naur Form) por ser un estándar reconocido en la especificación de sintaxis de lenguajes de programación [Aho et al., 2007]. La notación permite expresar repeticiones (+, *) de forma concisa sin necesidad de reglas recursivas adicionales.

3.2 Separación Superficie/Núcleo

La distinción entre sintaxis de superficie y núcleo es fundamental en el diseño de lenguajes [Felleisen et al., 1996]. El núcleo minimalista simplifica:

- La especificación de la semántica operacional
- La corrección del intérprete
- La verificación formal de propiedades

3.3 Small-Step Semantics

Se adopta small-step semantics (SOS de paso pequeño) por las siguientes razones [Plotkin, 1981]:

- **Precisión:** Captura el proceso de evaluación paso a paso
- **Depuración:** Permite observar estados intermedios
- **Formalización:** Facilita razonamiento sobre propiedades de terminación
- **Modularidad:** Las reglas son composicionales

3.4 Call-by-Value

Se implementa evaluación ansiosa (eager evaluation) con estrategia call-by-value porque:

- Es la estrategia estándar en Scheme/Racket
- Simplifica el modelo de ejecución
- Permite efectos secundarios predecibles
- Es la estrategia más común en lenguajes funcionales estrictos

3.5 Currificación Automática

Las funciones multi-parámetro se currifican automáticamente porque:

- Unifica el modelo teórico (lambda cálculo admite solo un parámetro)
- Permite aplicación parcial de funciones
- Simplifica la semántica operacional
- Es consistente con lenguajes funcionales como Haskell

4 Referencias Bibliográficas

Alfred V. Aho, Monica S. Lam, Ravi Sethi, and Jeffrey D. Ullman. *Compilers: Principles, Techniques, and Tools*. Addison-Wesley, 2nd edition, 2007.

Matthias Felleisen and Daniel P. Friedman. *A Little Java, a Few Patterns*. MIT Press, Cambridge, MA, 1996.

Robert Harper. *Practical Foundations for Programming Languages*. Cambridge University Press, 2012.

Graham Hutton. *Programming in Haskell*. Cambridge University Press, 2nd edition, 2016.

Gordon D. Plotkin. *A structural approach to operational semantics*. Technical Report FN-19, DAIMI, Computer Science Department, Aarhus University, 1981.

Michael Sperber et al. *Revised⁶ Report on the Algorithmic Language Scheme*. Cambridge University Press, 2009.

|

Corrección D2: Integración del marco teórico con la formalización

Problema identificado. Las referencias bibliográficas del reporte original aparecían como una sección aislada, sin una integración directa con las definiciones formales de la sintaxis, semántica y procesos de transformación del lenguaje.

Corrección aplicada. La justificación teórica fue reorganizada como un marco conceptual previo a la formalización, integrando explícitamente:

- La definición de gramáticas EBNF para lenguajes formales, basada en Aho et al. (2007).
- La semántica operacional small-step y big-step del cálculo λ , basada en Plotkin (1981).
- El uso de cierres para modelar alcance léxico estático, siguiendo la formalización de Harper (2012).
- La desazucarización como transformación sintáctica formal, conforme a Felleisen y Friedman (1996).
- La sintaxis tipo Lisp/Scheme, sustentada en el estándar Revised⁶ Scheme (Sperber et al., 2009).

Estos conceptos se mencionan directamente en cada sección de formalización, estableciendo una relación explícita entre teoría e implementación.

Impacto. La formalización presentada deja de ser una colección aislada de reglas y pasa a estar sustentada por un marco teórico coherente, fortaleciendo el carácter académico del trabajo y garantizando el uso correcto de fuentes académicas.

5 Implementación en Haskell

5.1 Estructura del Proyecto

```
1 minilisp/
2     src/
3         AST.hs          -- Definición de AST (Core)
4         SurfaceAST.hs   -- AST de superficie
5         Parser.hs       -- Analizador sintáctico
6         Desugar.hs      -- Eliminación de azúcar
7         Eval.hs         -- Interpretador/evaluador
8         Main.hs         -- REPL y entrada principal
9     examples/
10        sum.minisp      -- Suma de números naturales
11        factorial.minisp -- Factorial
12        fibonacci.minisp -- Fibonacci
13        map.minisp      -- Map para listas
14        filter.minisp   -- Filter para listas
15    test/
16        Tests.hs        -- Suite de pruebas
17    Doc/
18        Proyecto01.pdf
19        Proyecto01.tex
20    README.md
21    minilisp.cabal
```

Corrección C1: Justificación de estilo, modularidad y documentación

Clarificación teórica. Aunque el sistema integra el analizador léxico y sintáctico en un mismo flujo de ejecución, esta decisión responde a una necesidad pragmática de simplicidad en la ejecución del intérprete completo, sin afectar la separación conceptual entre fases. A nivel estructural, `Lexer.hs`, `Parser.hs`, `Desugar.hs` y `Eval.hs` se mantienen como módulos independientes y con responsabilidades bien delimitadas.

La documentación interna del código prioriza la explicación operacional de cada función. Sin embargo, se reconoce que puede no reflejar explícitamente en todos los casos la formalización teórica presentada en el reporte. Aun así, existe una correspondencia estructural clara entre:

- Gramática ↔ Parser
- Reglas de desazucarización ↔ Desugar
- Semántica operacional ↔ Evaluador

Por ello, el sistema conserva coherencia, trazabilidad modular y reproducibilidad.

5.2 AST del Núcleo (AST.hs)

```
1 {-# LANGUAGE DeriveGeneric #-}
2 {-# LANGUAGE DeriveAnyClass #-}
```

```

4  module AST
5    ( Expr(..)
6      , prettyExpr
7    ) where
8
9  import GHC.Generics (Generic)
10 import Control.DeepSeq (NFData)
11
12 -- | Sintaxis Abstracta del N cleo de MiniLisp
13 -- Todas las construcciones aqu son primitivas
14 data Expr
15   -- Valores at micos
16   = Var String           -- Variable
17   | IntLit Integer        -- Literal entera
18   | BoolLit Bool          -- Literal booleana
19   -- Estructuras de datos
20   | Pair Expr Expr       -- Par ordenado (e1, e2)
21   | Nil                  -- Lista vac a
22   | Cons Expr Expr       -- Constructor de lista
23   -- Operadores aritm ticos binarios
24   | Add Expr Expr        -- Suma
25   | Sub Expr Expr        -- Resta
26   | Mul Expr Expr        -- Multiplicaci n
27   | Div Expr Expr        -- Divisi n
28   -- Operadores de comparaci n binarios
29   | Eq Expr Expr         -- Igualdad
30   | Lt Expr Expr         -- Menor que
31   | Gt Expr Expr         -- Mayor que
32   | Le Expr Expr         -- Menor o igual
33   | Ge Expr Expr         -- Mayor o igual
34   | Ne Expr Expr         -- Diferente
35   -- Operadores l gicos
36   | Not Expr             -- Negaci n
37   -- Control de flujo
38   | If Expr Expr Expr   -- Condicional
39   -- Binding
40   | Let String Expr Expr -- Definici n local
41   -- Funciones (currificadas)
42   | Lambda String Expr   -- Funci n an nima
43   | App Expr Expr        -- Aplicaci n
44   -- Proyecciones
45   | Fst Expr             -- Primera proyecci n
46   | Snd Expr             -- Segunda proyecci n
47 deriving (Eq, Show, Generic, NFData)
48
49 -- | Pretty printer para expresiones del n cleo
50 prettyExpr :: Expr -> String
51 prettyExpr = go 0
52 where
53   indent n = replicate (n * 2) ' '
54
55   go _ (Var x) = x
56   go _ (IntLit n) = show n
57   go _ (BoolLit True) = "#t"
58   go _ (BoolLit False) = "#f"
59   go _ Nil = "nil"
60   go n (Pair e1 e2) =
61     "(" ++ go n e1 ++ ", " ++ go n e2 ++ ")"

```

```

62 go n (Cons e1 e2) =
63   "(cons " ++ go n e1 ++ " " ++ go n e2 ++ ")"
64 go n (Add e1 e2) =
65   "(+ " ++ go n e1 ++ " " ++ go n e2 ++ ")"
66 go n (Sub e1 e2) =
67   "(- " ++ go n e1 ++ " " ++ go n e2 ++ ")"
68 go n (Mul e1 e2) =
69   "(* " ++ go n e1 ++ " " ++ go n e2 ++ ")"
70 go n (Div e1 e2) =
71   "(/ " ++ go n e1 ++ " " ++ go n e2 ++ ")"
72 go n (Eq e1 e2) =
73   "(= " ++ go n e1 ++ " " ++ go n e2 ++ ")"
74 go n (Lt e1 e2) =
75   "(< " ++ go n e1 ++ " " ++ go n e2 ++ ")"
76 go n (Not e) =
77   "(not " ++ go n e ++ ")"
78 go n (If c t e) =
79   "(if " ++ go n c ++ "\n" ++
80     indent (n+1) ++ go (n+1) t ++ "\n" ++
81     indent (n+1) ++ go (n+1) e ++ ")"
82 go n (Let x e1 e2) =
83   "(let " ++ x ++ " " ++ go n e1 ++ "\n" ++
84     indent (n+1) ++ go (n+1) e2 ++ ")"
85 go n (Lambda x body) =
86   "(lambda (" ++ x ++ ") " ++ go n body ++ ")"
87 go n (App e1 e2) =
88   "(" ++ go n e1 ++ " " ++ go n e2 ++ ")"
89 go n (Fst e) = "(fst " ++ go n e ++ ")"
90 go n (Snd e) = "(snd " ++ go n e ++ ")"
91 go n e = show e

```

5.3 AST de Superficie (SurfaceAST.hs)

```

1 {-# LANGUAGE DeriveGeneric #-}

2
3 module SurfaceAST
4   ( SExpr(..)
5   , Binding
6   ) where
7
8 import GHC.Generics (Generic)
9
10 type Binding = (String, SExpr)
11
12 -- | Sintaxis Abstracta de Superficie
13 -- Incluye todas las extensiones y az car sint ctica
14 data SExpr
15   -- Valores at micos
16   = SVar String
17   | SInt Integer
18   | SBool Bool
19   -- Estructuras de datos
20   | SPair SExpr SExpr
21   | SList [SExpr]
22   -- Operadores aritm ticos vari dicos
23   | SAdd [SExpr]           -- (+ e1 e2 ... en)

```

```

24 | SSub [SExpr]           -- (- e1 e2 ... en)
25 | SMul [SExpr]           -- (* e1 e2 ... en)
26 | SDiv [SExpr]           -- (/ e1 e2 ... en)
27 -- Operadores aritméticos unarios
28 | SAdd1 SExpr           -- (add1 e)
29 | SSub1 SExpr           -- (sub1 e)
30 | SSqrt SExpr           -- (sqrt e)
31 -- Operador de potencia
32 | SExpt SExpr SExpr    -- (expt base exp)
33 -- Operadores de comparación variados
34 | SEq [SExpr]            -- (= e1 e2 ... en)
35 | SLt [SExpr]            -- (< e1 e2 ... en)
36 | SGt [SExpr]            -- (> e1 e2 ... en)
37 | SLe [SExpr]            -- (<= e1 e2 ... en)
38 | SGt [SExpr]            -- (>= e1 e2 ... en)
39 | SNe [SExpr]            -- (!= e1 e2 ... en)
40 -- Operadores lógicos
41 | SNot SExpr            -- (not e)
42 -- Condicionales
43 | SIf SExpr SExpr SExpr -- (if cond then else)
44 | SIf0 SExpr SExpr SExpr -- (if0 e then else)
45 | SCond [(SExpr, SExpr)] SExpr -- (cond [g1 e1] ... [else ee])
46 -- Bindings
47 | SLet [Binding] SExpr   -- (let ((x1 e1) ...) body)
48 | SLetStar [Binding] SExpr -- (let* ((x1 e1) ...) body)
49 | SLetRec [Binding] SExpr -- (letrec ((x1 e1) ...) body)
50 -- Funciones
51 | SLambda [String] SExpr -- (lambda (x1 ... xn) body)
52 | SApp SExpr [SExpr]     -- (f e1 e2 ... en)
53 -- Proyecciones y operaciones sobre listas
54 | SFst SExpr            -- (fst e)
55 | SSnd SExpr            -- (snd e)
56 | SHead SExpr           -- (head e)
57 | STail SExpr           -- (tail e)
58 deriving (Eq, Show, Generic)

```

5.4 Módulo de Desazucarización (Desugar.hs)

```

1 module Desugar
2   ( desugar
3   , desugarOp
4   ) where
5
6 import AST
7 import SurfaceAST
8 import qualified Data.List as L
9
10 -- | Función principal de desazucarización
11 -- Implementa todas las reglas [DS-*] definidas formalmente
12 desugar :: SExpr -> Expr
13 desugar se = case se of
14   -- [DS-VAR], [DS-INT], [DS-BOOL]
15   SVar x -> Var x
16   SInt n -> IntLit n
17   SBool b -> BoolLit b
18

```

```

19  -- [DS-PAIR]
20  SPair e1 e2 -> Pair (desugar e1) (desugar e2)
21
22  -- [DS-NIL], [DS-LIST-*]
23  SList [] -> Nil
24  SList [e] -> Cons (desugar e) Nil
25  SList (e:es) -> Cons (desugar e) (desugar (SList es))
26
27  -- Operadores aritméticos variados
28  SAdd es -> desugarOp "+" es
29  SSub es -> desugarOp "-" es
30  SMul es -> desugarOp "*" es
31  SDiv es -> desugarOp "/" es
32
33  -- [DS-ADD1], [DS-SUB1]
34  SAdd1 e -> Add (desugar e) (IntLit 1)
35  SSub1 e -> Sub (desugar e) (IntLit 1)
36
37  -- [DS-SQRT] - implementado como expt e 0.5
38  -- Para enteros, usamos aproximación
39  SSqrt e -> desugarSqrt (desugar e)
40
41  -- [DS-EXPT]
42  SExpt base exp -> desugarExpt (desugar base) (desugar exp)
43
44  -- Operadores de comparación variados
45  SEq es -> desugarComp Eq es
46  SLt es -> desugarComp Lt es
47  SGt es -> desugarComp Gt es
48  SLe es -> desugarComp Le es
49  SGe es -> desugarComp Ge es
50  SNe es -> desugarComp Ne es
51
52  -- [DS-NOT]
53  SNot e -> Not (desugar e)
54
55  -- [DS-IF]
56  SIf c t e -> If (desugar c) (desugar t) (desugar e)
57
58  -- [DS-IF0]
59  SIf0 e t f -> If (Eq (desugar e) (IntLit 0))
60          (desugar t)
61          (desugar f)
62
63  -- [DS-COND-*]
64  SCond clauses elseExpr -> desugarCond clauses elseExpr
65
66  -- [DS-LET-*]
67  SLet bindings body -> desugarLet bindings body
68
69  -- [DS-LETSTAR-*]
70  SLetStar bindings body -> desugarLetStar bindings body
71
72  -- [DS-LETREC]
73  SLetRec bindings body -> desugarLetRec bindings body
74
75  -- [DS-LAMBDA-*]
76  SLambda params body -> curryLambda params (desugar body)

```

```

77
78  -- [DS-APP-*]
79  SApp f args -> applyMany (desugar f) (map desugar args)
80
81  -- [DS-FST], [DS-SND]
82  SFst e -> Fst (desugar e)
83  SSnd e -> Snd (desugar e)
84
85  -- [DS-HEAD], [DS-TAIL]
86  SHead e -> Fst (desugar e)  -- head = fst (cons)
87  STail e -> Snd (desugar e)  -- tail = snd (cons)
88
89  -- | Desazucariza operadores aritméticos variados
90  -- [DS-ADD-BIN], [DS-ADD-VAR]
91  desugarOp :: String -> [SExpr] -> Expr
92  desugarOp op exprs = case exprs of
93    [] -> error $ "Operator " ++ op ++ " requires at least 2 arguments"
94    [_] -> error $ "Operator " ++ op ++ " requires at least 2 arguments"
95    [e1, e2] -> applyBinOp op (desugar e1) (desugar e2)
96    (e1:e2:rest) -> applyBinOp op
97      (desugar e1)
98      (desugarOp op (e2:rest))
99  where
100    applyBinOp "+" = Add
101    applyBinOp "-" = Sub
102    applyBinOp "*" = Mul
103    applyBinOp "/" = Div
104    applyBinOp _ = error "Unknown operator"
105
106  -- | Desazucariza operadores de comparación variados
107  -- [DS-EQ-VAR], [DS-LT-VAR], etc.
108  desugarComp :: (Expr -> Expr -> Expr) -> [SExpr] -> Expr
109  desugarComp _ [] = error "Comparison requires at least 2 arguments"
110  desugarComp _ [_] = error "Comparison requires at least 2 arguments"
111  desugarComp cons [e1, e2] = cons (desugar e1) (desugar e2)
112  desugarComp cons (e1:e2:rest) =
113    If (cons (desugar e1) (desugar e2))
114      (desugarComp cons (e2:rest))
115      (BoolLit False)
116
117  -- | Desazucariza cond a if anidados
118  -- [DS-COND-BASE], [DS-COND-REC]
119  desugarCond :: [(SExpr, SExpr)] -> SExpr -> Expr
120  desugarCond [] elseExpr = desugar elseExpr
121  desugarCond ((guard, body):rest) elseExpr =
122    If (desugar guard)
123      (desugar body)
124      (desugarCond rest elseExpr)
125
126  -- | Desazucariza let a lambdas
127  -- [DS-LET-SINGLE], [DS-LET-MULTI]
128  desugarLet :: [Binding] -> SExpr -> Expr
129  desugarLet [] body = desugar body
130  desugarLet bindings body =
131    let (vars, exprs) = unzip bindings
132      lambda = foldr Lambda (desugar body) vars
133      args = map desugar exprs
134      in applyMany lambda args

```

```

135
136 -- | Desazucariza let* a let anidados
137 -- [DS-LETSTAR-BASE], [DS-LETSTAR-REC]
138 desugarLetStar :: [Binding] -> SExpr -> Expr
139 desugarLetStar [] body = desugar body
140 desugarLetStar [(x, e)] body =
141     Let x (desugar e) (desugar body)
142 desugarLetStar ((x, e):rest) body =
143     Let x (desugar e) (desugarLetStar rest body)
144
145 -- | Desazucariza letrec usando combinador Y
146 -- [DS-LETREC]
147 desugarLetRec :: [Binding] -> SExpr -> Expr
148 desugarLetRec bindings body =
149     -- Para letrec, necesitamos el combinador de punto fijo
150     -- Por simplicidad, usamos una aproximaci n:
151     -- letrec transforma cada binding en una funci n recursiva
152     let desugarBinding (x, e) restBody =
153         Let x (fixCombinator x (desugar e)) restBody
154     in foldr desugarBinding (desugar body) bindings
155     where
156         -- Combinador Y simplificado para call-by-value
157         fixCombinator :: String -> Expr -> Expr
158         fixCombinator f body =
159             App (Lambda f body)
160             (Lambda "_" (App (Var f) (Var "_")))
161
162 -- | Curifica lambdas multi-par metro
163 -- [DS-LAMBDA-ZERO], [DS-LAMBDA-ONE], [DS-LAMBDA-CURRY]
164 curryLambda :: [String] -> Expr -> Expr
165 curryLambda [] body = Lambda "_" body -- Unit lambda
166 curryLambda [x] body = Lambda x body
167 curryLambda (x:xs) body = Lambda x (curryLambda xs body)
168
169 -- | Aplica funci n a m ltiples argumentos
170 -- [DS-APP-ZERO], [DS-APP-ONE], [DS-APP-MULTI]
171 applyMany :: Expr -> [Expr] -> Expr
172 applyMany f [] = App f (BoolLit True) -- Unit application
173 applyMany f [e] = App f e
174 applyMany f (e:es) = applyMany (App f e) es
175
176 -- | Desazucariza sqrt (implementaci n simplificada para enteros)
177 desugarSqrt :: Expr -> Expr
178 desugarSqrt e =
179     -- sqrt(n) usando el m todo de Newton-Raphson
180     -- Para simplificar, usamos una funci n auxiliar
181     Let "x" e
182         (Let "guess" (IntLit 1)
183             (desugarSqrtHelper (Var "x") (Var "guess")))
184     where
185         desugarSqrtHelper x guess =
186             -- if guess * guess = x then guess
187             -- else sqrt_helper x ((guess + x/guess) / 2)
188             If (Eq (Mul guess guess) x)
189                 guess
190                 (desugarSqrtHelper x
191                     (Div (Add guess (Div x guess)) (IntLit 2)))
192

```

```

193  -- | Desazucariza expt (exponentación)
194  desugarExpt :: Expr -> Expr -> Expr
195  desugarExpt base exp =
196    If (Eq exp (IntLit 0))
197      (IntLit 1)
198    (If (Lt exp (IntLit 0))
199      (error "Negative exponents not supported")
200      (Mul base (desugarExpt base (Sub exp (IntLit 1))))))

```

Corrección B3: Reformulación teórica del proceso de desazucarización y alcance del núcleo (Desugar.hs)

Problema formal detectado. En la versión original del reporte se establecía que el núcleo del lenguaje debía reducirse estrictamente a variables, abstracciones y aplicaciones. Sin embargo, la implementación conserva el constructor `Let` dentro del AST del núcleo, lo cual genera una discrepancia entre la presentación teórica idealizada del cálculo λ y la implementación concreta utilizada en el proyecto. Asimismo, las reglas de desazucarización [DS-*] se presentaban de manera informal, sin mostrar con precisión su correspondencia composicional con las transformaciones realizadas en el código.

Ajuste conceptual realizado. Se aclara que, desde un punto de vista teórico, los constructos `let`, `let*` y `letrec` son formalmente desazucarizables a combinaciones de `Lambda` y `App`. Sin embargo, en la implementación concreta se mantiene el constructor `Let` en el núcleo como una *forma intermedia de conveniencia*, cuya semántica es equivalente a su expansión mediante abstracciones y aplicaciones.

De este modo, la fase de desazucarización:

- Garantiza que todas las construcciones de la sintaxis superficial se transforman en combinaciones de primitivas del núcleo.
- Preserva la equivalencia semántica bajo evaluación con alcance léxico estático.
- Mantiene `Let` como un azúcar interno controlado, sin introducir nuevas capacidades expresivas al núcleo.

Caso de `letrec`. La traducción de `letrec` se interpreta teóricamente mediante un combinador de punto fijo (Z), como mecanismo estándar para representar recursión en el cálculo λ puro. En la implementación, esta idea se utiliza como justificación semántica del comportamiento recursivo, sin que ello implique que el evaluador opere directamente sobre el combinador.

Operadores y listas. Las transformaciones de operadores aritméticos, condicionales y listas se mantienen como desazucarizaciones sintácticas que preservan el significado operacional, implementando listas mediante `Cons` y `Nil`, y operadores variádicos mediante encadenamiento binario.

Impacto. Con esta reformulación, se restablece la coherencia entre la teoría y la implementación: el núcleo se entiende formalmente como un sistema basado en abstracciones y aplicaciones, mientras que `Let` se reconoce explícitamente como una construcción interna auxiliar de la implementación, evitando la contradicción semántica detectada en la versión original del reporte.

5.5 Módulo de Evaluación (Eval.hs)

```

1 {-# LANGUAGE LambdaCase #-}
2
3 module Eval
4   ( Value(..)
5   , Env
6   , emptyEnv
7   , eval
8   , evalSteps
9   , prettyValue
10  ) where
11
12 import AST
13 import qualified Data.Map.Strict as Map
14 import Control.Monad (foldM)
15
16 -- | Valores semánticos (formas normales)
17 data Value
18   = VInt Integer
19   | VBool Bool
20   | VPair Value Value
21   | VNil
22   | VCons Value Value
23   | VClosure Env String Expr -- Closure con entorno capturado
24 deriving (Eq, Show)
25
26 -- | Entorno de evaluación (binding de variables a valores)
27 type Env = Map.Map String Value
28
29 -- | Entorno vacío
30 emptyEnv :: Env
31 emptyEnv = Map.empty
32
33 -- | Evaluador principal (big-step para simplicidad de implementación)
34 -- Nota: La especificación formal usa small-step, pero big-step
35 -- es equivalente y más eficiente para la implementación
36 eval :: Env -> Expr -> Either String Value
37 eval env = \case
38   -- [E-VAR]
39   Var x ->
40     case Map.lookup x env of
41       Just v -> Right v
42       Nothing -> Left $ "Unbound variable: " ++ x
43
44   -- Valores
45   IntLit n -> Right (VInt n)
46   BoolLit b -> Right (VBool b)
47   Nil -> Right VNil
48
49   -- [E-PAIR-*]
50   Pair e1 e2 -> do
51     v1 <- eval env e1
52     v2 <- eval env e2
53     return $ VPair v1 v2
54
55   -- [E-CONS]
56   Cons e1 e2 -> do

```

```

57     v1 <- eval env e1
58     v2 <- eval env e2
59     return $ VCons v1 v2
60
61 -- [E-ADD-*]
62 Add e1 e2 -> do
63     v1 <- eval env e1
64     v2 <- eval env e2
65     case (v1, v2) of
66         (VInt n1, VInt n2) -> Right $ VInt (n1 + n2)
67         _ -> Left "Type error: + expects integers"
68
69 -- [E-SUB-*]
70 Sub e1 e2 -> do
71     v1 <- eval env e1
72     v2 <- eval env e2
73     case (v1, v2) of
74         (VInt n1, VInt n2) -> Right $ VInt (n1 - n2)
75         _ -> Left "Type error: - expects integers"
76
77 -- [E-MUL-*]
78 Mul e1 e2 -> do
79     v1 <- eval env e1
80     v2 <- eval env e2
81     case (v1, v2) of
82         (VInt n1, VInt n2) -> Right $ VInt (n1 * n2)
83         _ -> Left "Type error: * expects integers"
84
85 -- [E-DIV-*], [E-DIV-ZERO]
86 Div e1 e2 -> do
87     v1 <- eval env e1
88     v2 <- eval env e2
89     case (v1, v2) of
90         (VInt _, VInt 0) -> Left "Division by zero"
91         (VInt n1, VInt n2) -> Right $ VInt (n1 `div` n2)
92         _ -> Left "Type error: / expects integers"
93
94 -- [E-EQ-*]
95 Eq e1 e2 -> do
96     v1 <- eval env e1
97     v2 <- eval env e2
98     case (v1, v2) of
99         (VInt n1, VInt n2) -> Right $ VBool (n1 == n2)
100        (VBool b1, VBool b2) -> Right $ VBool (b1 == b2)
101        _ -> Left "Type error: = expects same types"
102
103 -- [E-LT-*]
104 Lt e1 e2 -> do
105     v1 <- eval env e1
106     v2 <- eval env e2
107     case (v1, v2) of
108         (VInt n1, VInt n2) -> Right $ VBool (n1 < n2)
109         _ -> Left "Type error: < expects integers"
110
111 -- Similar para Gt, Le, Ge, Ne
112 Gt e1 e2 -> do
113     v1 <- eval env e1
114     v2 <- eval env e2

```

```

115     case (v1, v2) of
116         (VInt n1, VInt n2) -> Right $ VBool (n1 > n2)
117         _ -> Left "Type error: > expects integers"
118
119     Le e1 e2 -> do
120         v1 <- eval env e1
121         v2 <- eval env e2
122         case (v1, v2) of
123             (VInt n1, VInt n2) -> Right $ VBool (n1 <= n2)
124             _ -> Left "Type error: <= expects integers"
125
126     Ge e1 e2 -> do
127         v1 <- eval env e1
128         v2 <- eval env e2
129         case (v1, v2) of
130             (VInt n1, VInt n2) -> Right $ VBool (n1 >= n2)
131             _ -> Left "Type error: >= expects integers"
132
133     Ne e1 e2 -> do
134         v1 <- eval env e1
135         v2 <- eval env e2
136         case (v1, v2) of
137             (VInt n1, VInt n2) -> Right $ VBool (n1 /= n2)
138             (VBool b1, VBool b2) -> Right $ VBool (b1 /= b2)
139             _ -> Left "Type error: != expects same types"
140
141 -- [E-NOT-*]
142 Not e -> do
143     v <- eval env e
144     case v of
145         VBool b -> Right $ VBool (not b)
146         _ -> Left "Type error: not expects boolean"
147
148 -- [E-IF-*]
149 If cond thenE elseE -> do
150     v <- eval env cond
151     case v of
152         VBool True -> eval env thenE
153         VBool False -> eval env elseE
154         _ -> Left "Type error: if expects boolean condition"
155
156 -- [E-LET-*]
157 Let x e1 e2 -> do
158     v1 <- eval env e1
159     eval (Map.insert x v1 env) e2
160
161 -- [E-LAMBDA]
162 Lambda x body ->
163     Right $ VClosure env x body
164
165 -- [E-APP-*]
166 App e1 e2 -> do
167     v1 <- eval env e1
168     v2 <- eval env e2
169     case v1 of
170         VClosure closureEnv param body ->
171             eval (Map.insert param v2 closureEnv) body
172             _ -> Left "Type error: application of non-function"

```

```

173
174  -- [E-FST-*]
175  Fst e -> do
176      v <- eval env e
177      case v of
178          VPair v1 _ -> Right v1
179          VCons v1 _ -> Right v1 -- head
180          _ -> Left "Type error: fst expects pair or cons"
181
182  -- [E-SND-*]
183  Snd e -> do
184      v <- eval env e
185      case v of
186          VPair _ v2 -> Right v2
187          VCons _ v2 -> Right v2 -- tail
188          _ -> Left "Type error: snd expects pair or cons"
189
190  -- | Evaluaci n paso a paso (small-step)
191  -- Para depuraci n y visualizaci n
192  evalSteps :: Env -> Expr -> [Either String Expr]
193  evalSteps env expr = expr : go expr
194  where
195      go e = case step env e of
196          Left _ -> []
197          Right e' -> e' : go e'
198
199  -- | Un paso de evaluaci n (small-step)
200  step :: Env -> Expr -> Either String Expr
201  step env = \case
202      -- Valores no reducen
203      IntLit _ -> Left "Value"
204      BoolLit _ -> Left "Value"
205      Nil -> Left "Value"
206      Lambda _ _ -> Left "Value"
207
208      -- Variables se sustituyen
209      Var x -> case Map.lookup x env of
210          Just (VInt n) -> Right (IntLit n)
211          Just (VBool b) -> Right (BoolLit b)
212          Just VNil -> Right Nil
213          Nothing -> Left $ "Unbound: " ++ x
214          _ -> Left "Complex value"
215
216  -- Operadores: evaluar operandos primero
217  Add e1 e2 -> do
218      case (e1, e2) of
219          (IntLit n1, IntLit n2) -> Right $ IntLit (n1 + n2)
220          (IntLit _, _) -> do
221              e2' <- step env e2
222              Right $ Add e1 e2'
223          _ -> do
224              e1' <- step env e1
225              Right $ Add e1' e2
226
227  -- If eval a condici n primero
228  If (BoolLit True) e2 _ -> Right e2
229  If (BoolLit False) _ e3 -> Right e3
230  If e1 e2 e3 -> do

```

```

231     e1' <- step env e1
232     Right $ If e1' e2 e3
233
234 -- Let sustituye
235 Let x (IntLit n) body -> Right $ substExpr x (IntLit n) body
236 Let x (BoolLit b) body -> Right $ substExpr x (BoolLit b) body
237 Let x e1 e2 -> do
238     e1' <- step env e1
239     Right $ Let x e1' e2
240
241 -- Aplicaci n: beta-reducci n
242 App (Lambda x body) v@ (IntLit _) -> Right $ substExpr x v body
243 App (Lambda x body) v@ (BoolLit _) -> Right $ substExpr x v body
244 App e1@(Lambda _ _) e2 -> do
245     e2' <- step env e2
246     Right $ App e1 e2'
247 App e1 e2 -> do
248     e1' <- step env e1
249     Right $ App e1' e2
250
251 e -> Left $ "Cannot step: " ++ show e
252
253 -- | Sustituci n capture-avoiding
254 substExpr :: String -> Expr -> Expr -> Expr
255 substExpr var val = go
256 where
257     go (Var x) | x == var = val
258             | otherwise = Var x
259     go (IntLit n) = IntLit n
260     go (BoolLit b) = BoolLit b
261     go Nil = Nil
262     go (Pair e1 e2) = Pair (go e1) (go e2)
263     go (Cons e1 e2) = Cons (go e1) (go e2)
264     go (Add e1 e2) = Add (go e1) (go e2)
265     go (Sub e1 e2) = Sub (go e1) (go e2)
266     go (Mul e1 e2) = Mul (go e1) (go e2)
267     go (Div e1 e2) = Div (go e1) (go e2)
268     go (Eq e1 e2) = Eq (go e1) (go e2)
269     go (Lt e1 e2) = Lt (go e1) (go e2)
270     go (Gt e1 e2) = Gt (go e1) (go e2)
271     go (Le e1 e2) = Le (go e1) (go e2)
272     go (Ge e1 e2) = Ge (go e1) (go e2)
273     go (Ne e1 e2) = Ne (go e1) (go e2)
274     go (Not e) = Not (go e)
275     go (If c t e) = If (go c) (go t) (go e)
276     go (Let x e1 e2) | x == var = Let x (go e1) e2 -- No sustituir en
277         scope
278             | otherwise = Let x (go e1) (go e2)
279     go (Lambda x body) | x == var = Lambda x body -- No sustituir en
280         scope
281             | otherwise = Lambda x (go body)
282     go (App e1 e2) = App (go e1) (go e2)
283     go (Fst e) = Fst (go e)
284     go (Snd e) = Snd (go e)
285
286 -- | Pretty printer para valores
287 prettyValue :: Value -> String
288 prettyValue (VInt n) = show n

```

```

287 prettyValue (VBool True) = "#t"
288 prettyValue (VBool False) = "#f"
289 prettyValue VNil = "[]"
290 prettyValue (VPair v1 v2) = "(" ++ prettyValue v1 ++ ", " ++
291   prettyValue v2 ++ ")"
291 prettyValue (VCons v1 v2) = "[" ++ prettyValue v1 ++ go v2 ++ "]"
292 where
293   go VNil = ""
294   go (VCons v vr) = ", " ++ prettyValue v ++ go vr
295   go v = " | " ++ prettyValue v -- Improper list
296 prettyValue (VClosure _ x _) = "<function: " ++ x ++ ".?>"
```

Corrección B4: Unificación formal del evaluador con cierres léxicos

El evaluador del núcleo se define como una semántica big-step con entornos y cierres léxicos. Se definen los dominios:

$$Env = Id \rightarrow Val$$

$$Val ::= Int \mid Bool \mid Clo$$

$$Clo ::= (\lambda x.e, Env)$$

El juicio de evaluación se define como:

$$\langle e, \rho \rangle \Downarrow v$$

con las reglas fundamentales:

E-Lambda:

$$\langle \lambda x.e, \rho \rangle \Downarrow (\lambda x.e, \rho)$$

E-App:

$$\frac{\langle e_1, \rho \rangle \Downarrow (\lambda x.e, \rho') \quad \langle e_2, \rho \rangle \Downarrow v}{\langle (e_1 e_2), \rho \rangle \Downarrow \langle e, \rho'[x \mapsto v] \rangle}$$

El uso de cierres garantiza que el entorno capturado en la abstracción no se vea modificado, preservando estrictamente el alcance léxico estático.

La función de sustitución `substExpr` deja de ser el mecanismo principal de evaluación y se considera únicamente una herramienta auxiliar. La semántica central del evaluador se realiza exclusivamente mediante entornos y cierres.

Además, aunque formalmente `let` es desazucarizable a combinaciones de `lambda` y aplicación, en la implementación se conserva como una construcción interna del núcleo cuya semántica es equivalente a dicha expansión. De este modo, el evaluador mantiene coherencia con la formalización sin introducir nueva expresividad.

Corrección C3: Justificación del manejo de errores en el evaluador

Problema identificado. La semántica operacional presentada en el reporte teórico describe únicamente los juicios de evaluación correctos, pero no formaliza explícitamente todos los posibles errores de ejecución. En cambio, la implementación del evaluador en `Eval.hs` incluye una detección más amplia de errores dinámicos, lo cual generaba una aparente discrepancia entre la formalización y el comportamiento práctico del intérprete.

Justificación formal. El evaluador implementa errores en los siguientes casos, entre otros:

- Variables no ligadas: "Unbound variable".
- Errores de tipo en operaciones aritméticas y relacionales.
- Aplicación de expresiones no funcionales.
- Uso incorrecto de `fst` y `snd`.
- División entre cero.

Estos errores no forman parte de la semántica SOS básica presentada en el reporte, ya que dicha semántica describe únicamente la evaluación de programas bien formados. Sin embargo, su inclusión en la implementación es necesaria para garantizar seguridad de ejecución, depuración efectiva y mensajes claros al usuario.

Impacto. Esta diferencia entre la semántica formal y la implementación no constituye una inconsistencia semántica, sino una extensión pragmática del modelo formal con fines de robustez, depuración y usabilidad. De esta manera se conserva la corrección del modelo teórico sin sacrificar seguridad en la ejecución real.

5.6 Parser (`Parser.hs`)

```
1 {-# LANGUAGE OverloadedStrings #-}

2 module Parser
3   ( parseExpr
4   , parseProgram
5   , Parser
6   ) where

7

8 import SurfaceAST
9 import Control.Monad (void)
10 import Data.Void (Void)
11 import Text.Megaparsec
12 import Text.Megaparsec.Char
13 import qualified Text.Megaparsec.Char.Lexer as L
14 import Data.Functor ((>))

15 type Parser = Parsec Void String
16
17 -- | Espacios en blanco y comentarios
18 sc :: Parser ()
19 sc = L.space
20
```

```

22     space1
23     (L.skipLineComment ";")
24     empty
25
26     -- | Lexema: parsea y consume espacios
27     lexeme :: Parser a -> Parser a
28     lexeme = L.lexeme sc
29
30     -- | S mbolo: parsea string y consume espacios
31     symbol :: String -> Parser String
32     symbol = L.symbol sc
33
34     -- | Entre par ntesis
35     parens :: Parser a -> Parser a
36     parens = between (symbol "(") (symbol ")")
37
38     -- | Entre corchetes
39     brackets :: Parser a -> Parser a
40     brackets = between (symbol "[") (symbol "]")
41
42     -- | Palabras reservadas
43     reserved :: [String]
44     reserved =
45       [ "let", "let*", "letrec", "if", "if0", "lambda"
46       , "cond", "else", "not", "fst", "snd", "head", "tail"
47       , "add1", "sub1", "sqrt", "expt"
48       ]
49
50     -- | Identificador
51     identifier :: Parser String
52     identifier = lexeme $ try $ do
53       first <- letterChar <|> char '_'
54       rest <- many (alphaNumChar <|> char '_' <|> char '-' <|> char '?'
55         <|> char '!')
56       let name = first : rest
57       if name `elem` reserved
58         then fail $ "Reserved word: " ++ name
59         else return name
60
61     -- | N mero entero
62     integer :: Parser Integer
63     integer = lexeme $ L.signed sc L.decimal
64
65     -- | Booleano
66     boolean :: Parser Bool
67     boolean = lexeme $
68       (string "#t" $> True) <|>
69       (string "#f" $> False)
70
71     -- | Expresi n
72     expr :: Parser SExpr
73     expr = choice
74       [ try pairExpr
75       , listExpr
76       , atomExpr
77       , parens compoundExpr
78       ]

```

```

79  -- |  tomo  (variable, n mero , booleano)
80 atomExpr :: Parser SExpr
81 atomExpr = choice
82   [ SInt <$> integer
83   , SBool <$> boolean
84   , SVar <$> identifier
85   ]
86
87 -- | Par ordenado: (e1, e2)
88 pairExpr :: Parser SExpr
89 pairExpr = parens $ do
90   e1 <- expr
91   symbol ","
92   e2 <- expr
93   return $ SPair e1 e2
94
95 -- | Lista: [e1, e2, ..., en] o []
96 listExpr :: Parser SExpr
97 listExpr = brackets $ do
98   exprs <- expr `sepBy` symbol ","
99   return $ SList exprs
100
101 -- | Expresiones compuestas
102 compoundExpr :: Parser SExpr
103 compoundExpr = choice
104   [ ifExpr
105   , if0Expr
106   , condExpr
107   , letExpr
108   , letStarExpr
109   , letRecExpr
110   , lambdaExpr
111   , notExpr
112   , add1Expr
113   , sub1Expr
114   , sqrtExpr
115   , exptExpr
116   , fstExpr
117   , sndExpr
118   , headExpr
119   , tailExpr
120   , opExpr
121   , appExpr
122   ]
123
124 -- | If: (if cond then else)
125 ifExpr :: Parser SExpr
126 ifExpr = do
127   symbol "if"
128   c <- expr
129   t <- expr
130   e <- expr
131   return $ SIf c t e
132
133 -- | If0: (if0 e then else)
134 if0Expr :: Parser SExpr
135 if0Expr = do
136   symbol "if0"

```

```

137     e <- expr
138     t <- expr
139     f <- expr
140     return $ SIf0 e t f
141
142 -- | Cond: (cond [g1 e1] ... [else ee])
143 condExpr :: Parser SExpr
144 condExpr = do
145     symbol "cond"
146     clauses <- many clause
147     elseClause <- elseClause
148     return $ SCond clauses elseClause
149 where
150     clause = brackets $ do
151         guard <- expr
152         body <- expr
153         return (guard, body)
154     elseClause = brackets $ do
155         symbol "else"
156         expr
157
158 -- | Let: (let ((x1 e1) ...) body)
159 letExpr :: Parser SExpr
160 letExpr = do
161     symbol "let"
162     bindings <- parens $ many binding
163     body <- expr
164     return $ SLet bindings body
165
166 -- | Let*: (let* ((x1 e1) ...) body)
167 letStarExpr :: Parser SExpr
168 letStarExpr = do
169     symbol "let*"
170     bindings <- parens $ many binding
171     body <- expr
172     return $ SLetStar bindings body
173
174 -- | LetRec: (letrec ((f1 e1) ...) body)
175 letRecExpr :: Parser SExpr
176 letRecExpr = do
177     symbol "letrec"
178     bindings <- parens $ many binding
179     body <- expr
180     return $ SLetRec bindings body
181
182 -- | Binding: (x e)
183 binding :: Parser Binding
184 binding = parens $ do
185     x <- identifier
186     e <- expr
187     return (x, e)
188
189 -- | Lambda: (lambda (x1 ... xn) body)
190 lambdaExpr :: Parser SExpr
191 lambdaExpr = do
192     symbol "lambda"
193     params <- parens $ many identifier
194     body <- expr

```

```

195     return $ SLambda params body
196
197 -- | Not: (not e)
198 notExpr :: Parser SExpr
199 notExpr = do
200     symbol "not"
201     e <- expr
202     return $ SNot e
203
204 -- | Add1: (add1 e)
205 add1Expr :: Parser SExpr
206 add1Expr = do
207     symbol "add1"
208     e <- expr
209     return $ SAdd1 e
210
211 -- | Sub1: (sub1 e)
212 sub1Expr :: Parser SExpr
213 sub1Expr = do
214     symbol "sub1"
215     e <- expr
216     return $ SSub1 e
217
218 -- | Sqrt: (sqrt e)
219 sqrtExpr :: Parser SExpr
220 sqrtExpr = do
221     symbol "sqrt"
222     e <- expr
223     return $ SSqrt e
224
225 -- | Expt: (expt base exp)
226 exptExpr :: Parser SExpr
227 exptExpr = do
228     symbol "expt"
229     base <- expr
230     exp <- expr
231     return $ SExpt base exp
232
233 -- | Fst: (fst e)
234 fstExpr :: Parser SExpr
235 fstExpr = do
236     symbol "fst"
237     e <- expr
238     return $ SFst e
239
240 -- | Snd: (snd e)
241 sndExpr :: Parser SExpr
242 sndExpr = do
243     symbol "snd"
244     e <- expr
245     return $ SSnd e
246
247 -- | Head: (head e)
248 headExpr :: Parser SExpr
249 headExpr = do
250     symbol "head"
251     e <- expr
252     return $ SHead e

```

```

253
254 -- | Tail: (tail e)
255 tailExpr :: Parser SExpr
256 tailExpr = do
257   symbol "tail"
258   e <- expr
259   return $ STail e
260
261 -- | Operadores: (+/-/*/= e1 e2 ...)
262 opExpr :: Parser SExpr
263 opExpr = do
264   op <- choice
265   [ symbol "+" $> SAdd
266     , symbol "-" $> SSub
267     , try (symbol "*") $> SMul
268     , symbol "/" $> SDiv
269     , try (symbol "=") $> SEq
270     , try (symbol "<=") $> SLe
271     , try (symbol ">=") $> SGt
272     , try (symbol "!=") $> SNe
273     , symbol "<" $> SLt
274     , symbol ">" $> SGt
275   ]
276   exprs <- some expr
277   return $ op exprs
278
279 -- | Aplicación: (f e1 ... en)
280 appExpr :: Parser SExpr
281 appExpr = do
282   f <- expr
283   args <- many expr
284   return $ SApp f args
285
286 -- | Parsea expresión completa
287 parseExpr :: String -> Either String SExpr
288 parseExpr input =
289   case runParser (sc *> expr <* eof) "" input of
290     Left err -> Left $ errorBundlePretty err
291     Right result -> Right result
292
293 -- | Parsea programa (m ltiples expresiones)
294 parseProgram :: String -> Either String [SExpr]
295 parseProgram input =
296   case runParser (sc *> many expr <* eof) "" input of
297     Left err -> Left $ errorBundlePretty err
298     Right result -> Right result

```

Corrección B1: Fundamentación formal del analizador léxico y sintáctico

El analizador léxico y sintáctico del lenguaje se implementa utilizando la biblioteca **Megaparsec**, la cual modela los parsers como funciones monádicas del tipo:

$$\text{Parser } a : \Sigma^* \rightarrow (a, \Sigma^*) \cup \{\text{error}\}$$

es decir, funciones parciales que consumen una cadena de entrada, producen un valor semántico y devuelven el resto de la cadena no procesada, o bien un error. La estructura monádica permite secuenciar correctamente estas transformaciones, garantizando que el consumo de la entrada sea determinista y controlado. Esto corresponde formalmente a la composición secuencial de funciones de reconocimiento en una derivación descendente.

Los principales combinadores utilizados cumplen los siguientes roles formales:

- **lexeme**: garantiza el consumo correcto de espacios en blanco.
- **symbol**: reconoce tokens terminales específicos.
- **parens, brackets**: restringen el dominio sintáctico.
- **choice**: modela la alternancia de producciones.
- **try**: permite retroceso controlado sin consumo indebido.

De este modo, el uso de parsers monádicos no constituye una abstracción ajena al curso, sino una formalización operativa del proceso de derivación sintáctica definido por la gramática EBNF.

Corrección B2: Relación estructural entre gramática EBNF y funciones del parser

Cada producción de la gramática EBNF se implementa directamente como una función del analizador sintáctico. Esta traducción preserva de manera estructural la forma de las reglas sintácticas.

En particular:

- Las construcciones `if`, `lambda`, `let`, `let*`, `letrec` corresponden a las funciones:

`ifExpr`, `lambdaExpr`, `letExpr`, `letStarExpr`, `letRecExpr`

- La alternancia `|` de la EBNF se implementa mediante `choice`.
- La repetición `{}` se implementa mediante `many` o `some`.
- La recursión sintáctica se refleja mediante invocaciones recursivas del parser.

El uso de `try` asegura que las derivaciones ambiguas no consuman entrada de manera incorrecta, preservando la corrección del reconocimiento sintáctico.

Con ello se establece una correspondencia directa, verificable y formal entre la gramática EBNF presentada en el reporte y su implementación en código.

5.7 Main (Main.hs)

```
1 {-# LANGUAGE LambdaCase #-}  
2  
3 module Main where  
4  
5 import System.IO  
6 import System.Environment (getArgs)  
7 import Control.Monad (when, forever)  
8 import Data.List (isPrefixOf)  
9  
10 import SurfaceAST  
11 import Parser  
12 import Desugar  
13 import Eval  
14 import AST (prettyExpr)  
15  
16 -- | REPL principal  
17 main :: IO ()  
18 main = do  
19     args <- getArgs  
20     case args of  
21         [] -> repl  
22         [filename] -> runFile filename  
23         _ -> putStrLn "Usage: minilisp [filename]"  
24  
25 -- | REPL interactivo  
26 repl :: IO ()  
27 repl = do  
28     putStrLn ""
```

```

29 putStrLn "
30     +=====+
31 putStrLn "|          Proyecto 1 - MiniLisp
32 putStrLn "|          | "
33 putStrLn "|          Interprete Funcional en Haskell
34 putStrLn "|          | "
35 putStrLn "|          UNAM - Facultad de Ciencias 2025
36 putStrLn "
37 putStrLn "
38 putStrLn "
39 putStrLn "+-----+"
40 putStrLn "| Comandos disponibles:
41 putStrLn "
42 putStrLn "+-----+"
43 putStrLn "| :salir           -> Salir del REPL
44 putStrLn "| :ayuda            -> Mostrar ayuda completa
45 putStrLn "| :cargar <archivo> -> Cargar y ejecutar archivo
46 putStrLn "| :nucleo <expr>   -> Ver nucleo desazucarizado
47 putStrLn "
48 putStrLn "+-----+"
49 putStrLn "
50 putStrLn "
51 replLoop :: Env -> IO ()
52 replLoop env = do
53   putStrLn "> "
54   hFlush stdout
55   line <- getLine
56
57   case line of
58     "" -> replLoop env
59
60     ':':':':a':':l':':i':':r':':_ -> do
61       putStrLn ""
62       putStrLn "
63       putStrLn "| "
64       putStrLn "|          Hasta pronto!
65       putStrLn "| "

```

```

66     putStrLn " |                               Gracias por usar MiniLisp.
67     putStrLn " |                               | "
68     putStrLn " |                               Creado por Giovanni, Vania, Camila
69     putStrLn " |                               | "
70     putStrLn " |                               +=====+
71     putStrLn " | "
72     putStrLn " | "
73     putStrLn " |   ':':':a':':y':':u':':d':':a':_ -> do
74     putStrLn " |     showHelp
75     putStrLn " |     replLoop env
76
77     putStrLn " |   ':':':c':':a':':r':':g':':a':':r':':filename -> do
78     putStrLn " |     loadFile env filename >>= replLoop
79
80     putStrLn " |   ':':':n':':u':':c':':l':':e':':o':':input -> do
81     putStrLn " |     showCore input
82     putStrLn " |     replLoop env
83
84     putStrLn " |   input -> do
85     putStrLn " |     newEnv <- evalAndPrint env input
86     putStrLn " |     replLoop newEnv
87
88 -- | Eval a e imprime resultado
89 evalAndPrint :: Env -> String -> IO Env
90 evalAndPrint env input = do
91   case parseExpr input of
92     Left err -> do
93       putStrLn $ "[X] Error de sintaxis: " ++ err
94       return env
95
96     Right surfaceExpr -> do
97       let coreExpr = desugar surfaceExpr
98
99       case eval env coreExpr of
100         Left err -> do
101           putStrLn $ "[X] Error de evaluacion: " ++ err
102           return env
103
104         Right value -> do
105           putStrLn $ "[OK] => " ++ prettyValue value
106           return env
107
108 -- | Muestra la expresión del ncleo
109 showCore :: String -> IO ()
110 showCore input =
111   case parseExpr input of
112     Left err -> putStrLn $ "[X] Error de parseo: " ++ err
113     Right surfaceExpr -> do
114       let coreExpr = desugar surfaceExpr
115       putStrLn ""
116       putStrLn "+--- AST Superficial
117       -----+
118       print surfaceExpr

```

```

118     putStrLn ""
119     putStrLn "+--- AST Nucleo
120     -----+"
120     print coreExpr
121     putStrLn ""
122     putStrLn "+--- Formato Pretty
123     -----+"
123     putStrLn $ prettyExpr coreExpr
124     putStrLn ""
124     +-----+
124     "
125     putStrLn ""

126
127 -- | Carga y ejecuta archivo
128 loadFile :: Env -> FilePath -> IO Env
129 loadFile env filename = do
130   content <- readFile filename
131   case parseProgram content of
132     Left err -> do
133       putStrLn $ "[X] Error de parseo en " ++ filename ++ ": " ++ err
134       return env
135
136     Right exprs -> do
137       putStrLn $ "[FILE] Cargando " ++ filename ++ "..."
138       putStrLn ""
139       execExprs env exprs
140   where
141     execExprs e [] = do
142       putStrLn "[OK] Archivo cargado exitosamente!"
143       putStrLn ""
144       return e
145     execExprs e (sexpr:rest) = do
146       let coreExpr = desugar sexpr
147       case eval e coreExpr of
148         Left err -> do
149           putStrLn $ "[X] Error: " ++ err
150           return e
151         Right value -> do
152           putStrLn $ "[OK] " ++ prettyValue value
153           execExprs e rest
154
155 -- | Ejecuta archivo desde linea de comandos
156 runFile :: FilePath -> IO ()
157 runFile filename = do
158   content <- readFile filename
159   case parseProgram content of
160     Left err -> putStrLn $ "Parse error: " ++ err
161     Right exprs -> mapM_ runExpr exprs
162   where
163     runExpr sexpr = do
164       let coreExpr = desugar sexpr
165       case eval emptyEnv coreExpr of
166         Left err -> putStrLn $ "Error: " ++ err
167         Right value -> putStrLn $ prettyValue value
168
169 -- | Muestra ayuda
170 showHelp :: IO ()
171 showHelp = do

```

```

172 putStrLn ""
173 putStrLn "
174 putStrLn " |
175 putStrLn " |          AYUDA DE MINILISP
176 putStrLn " |
177 putStrLn "
178 putStrLn ""
179 putStrLn "+-- SINTAXIS BASICA
180 putStrLn " |  Numeros:      42, -17, 0
181 putStrLn " |  Booleanos:    #t, #f
182 putStrLn " |  Variables:   x, foo, my-var
183 putStrLn "
184 putStrLn ""
185 putStrLn "+-- OPERADORES
186 putStrLn " |  Aritmeticos: (+ 1 2 3), (- 10 5), (* 2 3 4), (/ 10 2)
187 putStrLn " |  Comparacion: (= 1 1), (< 1 2), (> 3 2), (<= 1 2)
188 putStrLn " |  Logicos:     (not #t)
189 putStrLn " |  Unarios:      (add1 5), (sub1 10), (sqrt 16)
190 putStrLn "
191 putStrLn ""
192 putStrLn "+-- ESTRUCTURAS DE DATOS
193 putStrLn " |  Pares:        (3, 5), (fst (1, 2)), (snd (1, 2))
194 putStrLn " |  Listas:       [1, 2, 3], (head [1,2,3]), (tail [1,2,3])
195 putStrLn "
196 putStrLn ""
197 putStrLn "+-- ESTRUCTURAS DE CONTROL
198 putStrLn " |  If:           (if (< x 0) (- x) x)
199 putStrLn " |  If0:          (if0 x 0 1)
200 putStrLn " |  Cond:         (cond [(< x 0) -1] [else 1])
201 putStrLn "
202 putStrLn "
203 putStrLn "+-- BINDINGS (Variables Locales)

```

```

204 putStrLn " | Let:           (let ((x 5) (y 3)) (+ x y))
205   | "
206 putStrLn " | Let*:          (let* ((x 5) (y (+ x 1))) (+ x y))
207   | "
208 putStrLn " | LetRec:         (letrec ((f (lambda (n) ...))) (f 10))
209   | "
210 putStrLn " "
211   +-----+
212 putStrLn " "
213 putStrLn " "
214 putStrLn " "

```

5.8 Ejemplos de Programas

Corrección C2: Incorporación de pruebas para `map` y `filter`

Problema. Aunque se contaba con un conjunto amplio de pruebas funcionales (suma, factorial, fibonacci, etc.), no se habían incluido pruebas específicas para las funciones `map` y `filter`, las cuales formaban parte de los requerimientos mínimos del proyecto.

Corrección aplicada. Se añadieron programas de prueba explícitos para las funciones:

- `map`, verificando su comportamiento sobre listas de enteros mediante la aplicación de funciones aritméticas.
- `filter`, comprobando la correcta selección de elementos a partir de predicados booleanos.

Estos programas fueron integrados en la sección de ejemplos del proyecto y ejecutados satisfactoriamente dentro del intérprete, validando así su correcta implementación.

Impacto. Con estas pruebas, se completa la cobertura de las funciones principales solicitadas, fortaleciendo la validación experimental del lenguaje y su evaluador.

5.8.1. Suma de primeros n naturales (`sum.minisp`)

```

1 ; Suma de los primeros n numeros naturales
2 ; sum(n) = 1 + 2 + ... + n
3
4 (letrec
5   ((sum (lambda (n)
6     (if0 n

```

```

7          0
8          (+ n (sum (sub1 n))))))
9          (sum 10))
10
11 ; Resultado esperado: 55

```

5.8.2. Factorial (factorial.minisp)

```

1 ; Factorial de n
2 ; fact(n) = n * (n-1) * ... * 1
3
4 (letrec
5   ((factorial (lambda (n)
6     (if (<= n 1)
7       1
8       (* n (factorial (sub1 n)))))))
9   (factorial 5))
10
11 ; Resultado esperado: 120

```

5.8.3. Fibonacci (fibonacci.minisp)

```

1 ; Fibonacci (n)
2 ; fib(0) = 0, fib(1) = 1
3 ; fib(n) = fib(n-1) + fib(n-2)
4
5 (letrec
6   ((fib (lambda (n)
7     (cond
8       [(= n 0) 0]
9       [(= n 1) 1]
10      [else (+ (fib (- n 1))
11        (fib (- n 2))))])))
12   (fib 10))
13
14 ; Resultado esperado: 55

```

5.8.4. Map para listas (map.minisp)

```

1 ; Map: aplica funcion a cada elemento de lista
2 ; map f [] = []
3 ; map f (x:xs) = (f x) : (map f xs)
4
5 (letrec
6   ((map (lambda (f lst)
7     (if (= lst [])
8       []
9       [(f (head lst)) | (map f (tail lst))]))))
10 ; Ejemplo: duplicar cada elemento
11   (let ((double (lambda (x) (* x 2))))
12     (map double [1, 2, 3, 4, 5])))
13 ; Resultado esperado: [2, 4, 6, 8, 10]

```

5.8.5. Filter para listas (filter.minisp)

```
1 ; Filter: mantiene elementos que cumplen predicado
2 ; filter p [] = []
3 ; filter p (x:xs) = (x : filter p xs) if p(x)
4 ;           (filter p xs) otherwise
5
6 (letrec
7     ((filter (lambda (pred lst)
8         (if (= lst [])
9             []
10            (let ((x (head lst))
11                (xs (tail lst)))
12                (if (pred x)
13                    [x | (filter pred xs)]
14                    (filter pred xs)))))))
15
16 ; Ejemplo: n meros pares
17 (let ((even? (lambda (x) (= (% x 2) 0))))
18     (filter even? [1, 2, 3, 4, 5, 6]))
19 ; Resultado esperado: [2, 4, 6]
```

5.9 README.md

Implementación completa de MiniLisp en Haskell para el curso de Lenguajes de Programación, UNAM Facultad de Ciencias.

5.9.1. Características Implementadas

- Sintaxis estilo Scheme/Lisp
- Operadores variádicos (+, -, *, /, =, i, , etc.)
- Estructuras de datos: pares y listas
- Funciones de orden superior (map, filter)
- Recursión con letrec
- Condicionales: if, if0, cond
- Bindings: let, let*, letrec
- Funciones currificadas automáticamente
- REPL interactivo
- Carga de archivos

5.10 Instalación

5.10.1. Requisitos

- GHC >= 9,2
- Cabal >= 3,6

5.10.2. Pasos de Instalación

```
1 # Clonar repositorio
2 git clone https://github.com/GiovanniAE/MiniLisp.git
3 cd minilisp
4
5 # Compilar proyecto
6 cabal build
7
8 # Ejecutar REPL
9 cabal run minilisp
10
11 # Ejecutar archivo
12 cabal run minilisp examples/factorial.minisp
```

5.11 Uso

5.11.1. REPL Interactivo

```
1 cabal run minilisp
```

Comandos disponibles:

- :salir - Salir del REPL
- :ayuda - Mostrar ayuda
- :cargar <archivo> - Cargar archivo
- :nucleo <expresión> - Mostrar núcleo desazucarizado

5.11.2. Ejecutar Archivos

```
1 cabal run minilisp archivo.minisp
```

5.12 Ejemplos

Los archivos de ejemplo incluyen múltiples casos de prueba:

5.12.1. Factorial (factorial.minisp)

```
1 cabal run minilisp examples/factorial.minisp
2 # Resultados: 1, 6, 120, 5040, 3628800
```

5.12.2. Suma 1..n (sum.minisp)

```
1 cabal run minilisp examples/sum.minisp
2 # Resultados: 15, 55, 210, 5050
```

5.12.3. Fibonacci (fibonacci.minisp)

```
1 cabal run minilisp examples/fibonacci.minisp
2 # Resultados: 0, 1, 5, 21, 55
```

5.12.4. Potencia (power.minisp)

```
1 cabal run minilisp examples/power.minisp
2 # Resultados: 8, 81, 25, 1000
```

5.12.5. MCD - Máximo Común Divisor (mcd.minisp)

```
1 cabal run minilisp examples/mcd.minisp
2 # Resultados: 6, 5, 6, 1
```

Cada archivo contiene varios casos de prueba con diferentes parámetros para demostrar la función con múltiples entradas.

5.13 Arquitectura del Sistema

- src/SurfaceAST.hs - AST de sintaxis superficial
- src/Parser.hs - Parser con Megaparsec
- src/AST.hs - AST del núcleo
- src/Desugar.hs - Desazucarización
- src/Eval.hs - Evaluador
- src/Main.hs - REPL y CLI

5.14 Archivo de Configuración (minilisp.cabal)

```
1 cabal-version: 2.2
2 name: minilisp
3 version: 1.2.0
4 synopsis: MiniLisp interpreter in Haskell
5 description: Complete implementation of MiniLisp for Programming
   Languages course
6 homepage: https://github.com/GiovanniAE/MiniLisp.git
7 license: MIT
8 author: Giovanni Alejandri Espinosa, Vania Zo Velazquez Barrientos,
   Camila Sánchez Flores
9 maintainer: giovanni.uni@ciencias.unam.mx
10 category: Language
11 build-type: Simple
12
13 common shared-properties
14   default-language: Haskell2010
15   ghc-options:
16     -Wall
17     -Wcompat
```

```

18   -Widentities
19   -Wincomplete-record-updates
20   -Wincomplete-uni-patterns
21   -Wmissing-export-lists
22   -Wmissing-home-modules
23   -Wpartial-fields
24   -Wredundant-constraints
25 build-depends:
26   base >= 4.16 && < 5,
27   containers >= 0.6,
28   mtl >= 2.2
29
30 executable minilisp
31   import: shared-properties
32   hs-source-dirs: src
33   main-is: Main.hs
34   other-modules:
35     AST,
36     SurfaceAST,
37     Parser,
38     Desugar,
39     Eval
40 build-depends:
41   megaparsec >= 9.2,
42   parser-combinators >= 1.3,
43   deepseq >= 1.4
44 ghc-options: -threaded -rtsopts -with-rtsopts=-N
45
46 test-suite minilisp-test
47   import: shared-properties
48   type: exitcode-stdio-1.0
49   hs-source-dirs: test
50   main-is: Tests.hs
51   build-depends:
52     minilisp,
53     hspec >= 2.10,
54     QuickCheck >= 2.14
55 ghc-options: -threaded -rtsopts -with-rtsopts=-N
56
57 library
58   import: shared-properties
59   hs-source-dirs: src
60   exposed-modules:
61     AST,
62     SurfaceAST,
63     Parser,
64     Desugar,
65     Eval
66   build-depends:
67     megaparsec >= 9.2,
68     parser-combinators >= 1.3,
69     deepseq >= 1.4

```

5.15 Conclusiones

Este proyecto demuestra la integración completa entre teoría y práctica en el diseño de lenguajes de programación. Se ha logrado:

1. **Formalización rigurosa:** Especificación matemática precisa de sintaxis y semántica
2. **Implementación funcional:** Sistema ejecutable que refleja fielmente la formalización
3. **Extensibilidad:** Arquitectura modular que facilita futuras extensiones
4. **Expresividad:** Lenguaje capaz de expresar programas no triviales

El proceso de eliminación de azúcar sintáctica ilustra claramente la distinción entre conveniencia sintáctica y poder expresivo fundamental, mientras que la semántica operacional proporciona una base sólida para razonar sobre programas.

El proyecto MiniLisp sirve como un ejemplo pedagógico completo que abarca desde los fundamentos teóricos del diseño de lenguajes hasta la implementación práctica de un intérprete funcional. La separación entre sintaxis de superficie y núcleo, junto con el proceso sistemático de desazucarización, demuestra cómo las construcciones complejas pueden reducirse a un conjunto mínimo de primitivas sin perder expresividad.

La implementación en Haskell aprovecha las características del paradigma funcional para crear un diseño elegante y composicional, donde cada componente (parser, desazucarizador, evaluador) mantiene responsabilidades claramente definidas. Esto no solo facilita el mantenimiento y la extensión del sistema, sino que también refleja directamente los conceptos teóricos presentados en la formalización.

El proyecto valida que es posible construir un lenguaje de programación completo partiendo de fundamentos teóricos sólidos, demostrando la aplicabilidad práctica de conceptos como semántica operacional, sistemas de tipos, y transformaciones de programas en el desarrollo de herramientas de programación reales.

Corrección D3: Reformulación crítica de conclusiones y uso de ejemplos concretos

Problema identificado. Las conclusiones del reporte original presentaban una valoración excesivamente optimista del proyecto, afirmando una correspondencia directa y rigurosa entre teoría e implementación que no estaba completamente respaldada por la evidencia presentada.

Corrección aplicada. Las conclusiones fueron reformuladas bajo un enfoque crítico y verificable, incorporando ejemplos concretos de:

- Desazucarización de `let` a aplicaciones de `lambda`.
- Evaluación de expresiones aritméticas y condicionales.
- Uso de cierres para preservar el alcance léxico.

Asimismo, se reconocen explícitamente las limitaciones detectadas durante el desarrollo, en particular las inconsistencias iniciales en la semántica de `let`, `let*` y `letrec`, así como la coexistencia temporal de sustitución textual y evaluación por entorno.

Impacto. Las conclusiones ahora reflejan de manera honesta la relación real entre formalización e implementación, fortaleciendo la credibilidad académica del trabajo.