

III

USO DE SCD EN LA SIMULACIÓN DE APLICACIONES DE INGENIERÍA: CONTROL DE INVERNADEROS INDUSTRIALES

Por medio de éste capítulo, se tratan de exponer los pasos genéricos a la hora de desarrollar una Aplicación de Ingeniería (*Engineering Application*) e implementar la metodología de diseño a través de Lógica Difusa. Posteriormente se presentan las líneas generales de actuación a la hora de implementar con Lógica Difusa aplicaciones que establezcan posibles soluciones a los distintos problemas que subyacen en el ámbito de los sistemas de producción agrícola.

5.1 Aplicaciones de Ingeniería: Metodología de Diseño

Una aplicación de ingeniería consiste en un objetivo que debe conseguirse bajo restricciones de diverso tipo (técnicas, económicas, sociales...). Deben tomarse decisiones en situaciones donde los criterios de decisión no son evidentes y la incertidumbre es mayor de la deseable. En la Figura 5.1 se presenta el esquema de desarrollo donde se incorporan tres tareas principales para la planificación, organización y desarrollo: *Análisis*, *Diseño* y *Conocimiento* según [Anstrom84].

- ❑ **Análisis:** Definir y comprender un problema determinado para conseguir, de forma clara y explícita, expresar los objetivos deseados, las restricciones y las características del comportamiento del sistema.
- ❑ **Diseño:** Idear soluciones factibles, evaluarlas y elegir entre las alternativas planteadas.

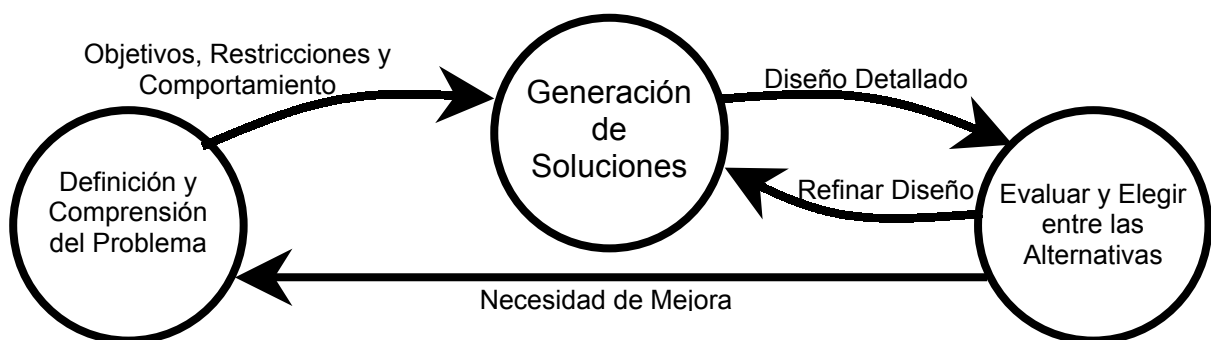


Figura 5.1: Esquema de desarrollo de una Aplicación de Ingeniería.

- **Conocimiento:** Resulta fundamental en la solución de problemas de ingeniería:
 - *Adquisición:* Puede ser conocimiento básico de ingeniería, procedimientos, experiencia y conocimiento experto.
 - *Representación:* Existen diversas formas, como son imágenes, escritura, reglas... que dependen del tipo de problema.
 - *Organización:* Es clave para solucionar el problema eficientemente, ya que será muy habitual la operación de recuperación de cierta porción del conocimiento.
 - *Manipulación:* Engloba las tareas quizás más importantes, pues consiste en definir los procedimientos o técnicas que utilizarán el conocimiento almacenado.

Debe ser exacto, completo, libre de inconsistencias... por lo que la adquisición del conocimiento no es tarea fácil.

Ahora bien, ¿cómo abordar las tareas de análisis, diseño y conocimiento de una aplicación desde el punto de vista de la lógica difusa?, la respuesta a esta pregunta trata de ser respondida en el siguiente apartado.

5.1.1 Metodología de Diseño Usando Lógica Difusa

Desde el punto de vista de la lógica difusa las anteriores fases a la hora de elaborar una aplicación de ingeniería (Sección 5.1) se expresarían tal que:

- **Análisis:**
 1. Definición de los objetivos, las restricciones y el comportamiento del sistema.
 2. Identificación de las variables de entrada y salida: variables lingüísticas y sus etiquetas lingüísticas.
 3. Definición de procedimientos y criterios para la prueba y validación.
- **Diseño:**
 4. Definición de los conjuntos difusos de cada etiqueta lingüística.
 5. Definición del marco de representación de la solución (representación del conocimiento, reglas...).
 6. Definición del marco de los procedimientos empleados (inferencia).
 7. Especificación de la forma requerida de la salida del sistema (decodificación o defuzzificación).

8. Ejecución de pruebas para validar el sistema.
9. Verificar si la solución es compatible con el paso 1:
 - a. Refinar el diseño: Ir al paso 4.
 - b. Necesidad de mejora: Ir al paso 1.

□ **Conocimiento:**

10. Conocimiento de sentido común (*Commonsense Knowledge*): es conocimiento intuitivo, fácil y rápido de obtener y de estructurar.
 - a. Reglas para problemas relativamente pequeños y con pocas variables: cuantas más variables existan, más difícil será conseguir reglas importantes y transparentes y más fácil será obtener protocolos de control incompletos o inconsistentes (con reglas conflictivas).
 - b. Reglas que cumplen, más o menos, con nuestra intuición sobre cómo aplicar acciones de control: son reglas generales de comportamiento que deben cumplirse. En sistemas complejos (con retardo, por ejemplo) estas reglas son más difíciles de obtener.
11. Conocimiento a través de simulaciones interactivas con ordenador: La simulación es un método potente y flexible de adquirir conocimiento.
 - a. Probando distintas simulaciones y distintos protocolos de control, se va aprendiendo (comportamiento, valores...).
 - b. Tras muchos experimentos se puede obtener conocimiento suficientemente refinado que se traducirá en reglas de control.

A continuación, se exponen los conceptos anteriormente expuestos a la hora de elaborar una aplicación de ingeniería desde el punto de vista de los sistemas de producción agrícola a través de la lógica difusa.

5.2 Evaluación Difusa en Sistemas de Producción Agrícola

La preocupación pública sobre, por ejemplo, el cuidado y seguridad en los alimentos, la degradación medioambiental y el bienestar de la fauna y población es hoy día un importante marco a tener en cuenta en el desarrollo de sistemas de producción agrícola según [Frouws00], [Kunkel00], [OECD], [Pinstrup98], [Ruttan97] y [Safley98]. Tal preocupación pública enfatiza que la agricultura es una actividad humana que interrelaciona la naturaleza con la sociedad según [Bland99, Marsh97 y Thompson86]. En el desarrollo de sistemas de

producción agrícola se involucran dos niveles según [Zoeteman01]. En el *nivel social*, la preocupación es una percepción del impacto de las presentes prácticas de producción agrícola en la sociedad. En el *nivel de producción*, la preocupación se encuentra en las medidas correctivas sobre las prácticas de producción (Figura 5.2 (a)). Por ejemplo, es conocida la preocupación concerniente a los restos de residuos de pesticidas en las hortalizas y como se realizan distintas fases de control por parte de las empresas y autoridades involucradas en el control de estos productos.

Dicha preocupación es una expresión lingüística de un complejo problema el cual generalmente puede ser caracterizado a través de múltiples cuestiones. En [Cornelissen01A] se proponen cuatro fases estructuradas las cuales cubren la evaluación del desarrollo de los sistemas de producción agrícola sobre ambos niveles: social y de producción (Figura 5.2 (b)). En la primera fase, el problema es definido en el contexto específico junto al grupo de conocedores del problema identificado. Por ejemplo, la seguridad de las hortalizas tratadas con productos químicos que puedan dejar residuos es definida como una preocupación pública en el poniente almeriense para agricultores, consumidores, peritos agrícolas y aquellos científicos identificados como conocedores relevantes de la problemática planteada. En la segunda fase, se plantean las cuestiones dentro del contexto de la problemática por los conocedores. Por ejemplo, el tiempo que permanecen los residuos sobre la planta y la concentración de los mismos son cuestiones relevantes para velar por la seguridad de estos productos. En la tercera fase, las cuestiones son trasladadas a conceptos cuantificables, son los indicadores medibles. Por ejemplo, la cuestión "tiempo de permanencia de residuos" es trasladada como el indicador "tiempo de toxicidad por producto" la cual es expresada en el nivel de producción como tiempo tras aplicación del producto químico. La cuarta fase de la estructura consiste en tres pasos. En el primer paso, los indicadores son medibles con el objetivo de obtener información: ejemplo tiempo de toxicidad por producto es x toxicidad por producto. En el paso segundo, la información obtenida es interpretada: ejemplo tiempo de toxicidad por producto es *acceptable*. En el tercer paso, la información interpretada es integrada y procesada para la derivación de conclusiones. Ejemplo: Si tiempo de toxicidad por producto es *acceptable*, entonces la posibilidad de que el producto puede ser consumido es *bueno*.

La información obtenida en el nivel de producción a través de indicadores de medición (tiempo de toxicidad por producto es x tiempo por producto) típicamente es interpretado en el nivel social en impreciso, términos lingüísticos (tiempo de toxicidad por producto es *acceptable*). En otras palabras y según [Zadeh73 y Ruspini98], existe un cambio o diferencia entre la complejidad de un problema y la precisión en la formulación de conclusiones sobre el problema.

Para elaborar la cuarta fase operacional, se sugiere el uso de modelos difusos que permitan enlazar esos términos lingüísticos del nivel social con la información medible [Cornelissen01]. Las funciones de pertenencia son el núcleo de los modelos difusos, y el

adecuado uso de tales modelos, por consiguiente, dependerá de la adecuada construcción de tales funciones de pertenencia [Krishnapuram98]. Tales funciones de pertenencia son consideradas como una parte determinante pero a la vez el talón de Aquiles de los modelos difusos. Son determinantes, porque las funciones de pertenencia suministran una compresión lingüística dentro de un contexto determinado de información. Su punto débil, es debido, a que paradójicamente son a menudo estimadas también subjetivamente en su construcción [Munda92].

Según [Cornelissen01A] se propone que esta crítica respecto a la inherente subjetividad a la hora de elaborar las funciones de pertenencia es debida principalmente a dos motivos. En primer lugar, si el conocimiento experto es usado para construir dichas funciones de pertenencia, entonces la apropiada elección de los expertos deberá asegurar el uso del *apropiado* conocimiento experto. Sin embargo, una justificación para la selección de los expertos está generalmente ausente en estudios que apliquen modelos difusos. En segundo lugar, estudios en los que se aplica conocimiento experto para construir funciones de pertenencia abordan con énfasis cualquier aspecto teórico más que aspectos prácticos en la elección de los métodos que permitan para dicha construcción de las funciones según [Blishun89, Giles88 y Norwich84], o ni se plantea la construcción de todas las funciones de pertenencia según [Angel98, Bosserman82 y Zimmer98]. Por consiguiente, como los modelos difusos prometen ser una valiosa herramienta en la evaluación para el desarrollo de sistemas de producción agrícola, es necesario establecer un procedimiento práctico que garantice una adecuada selección de los expertos y métodos que permitan crear un sistema de conocimiento experto.

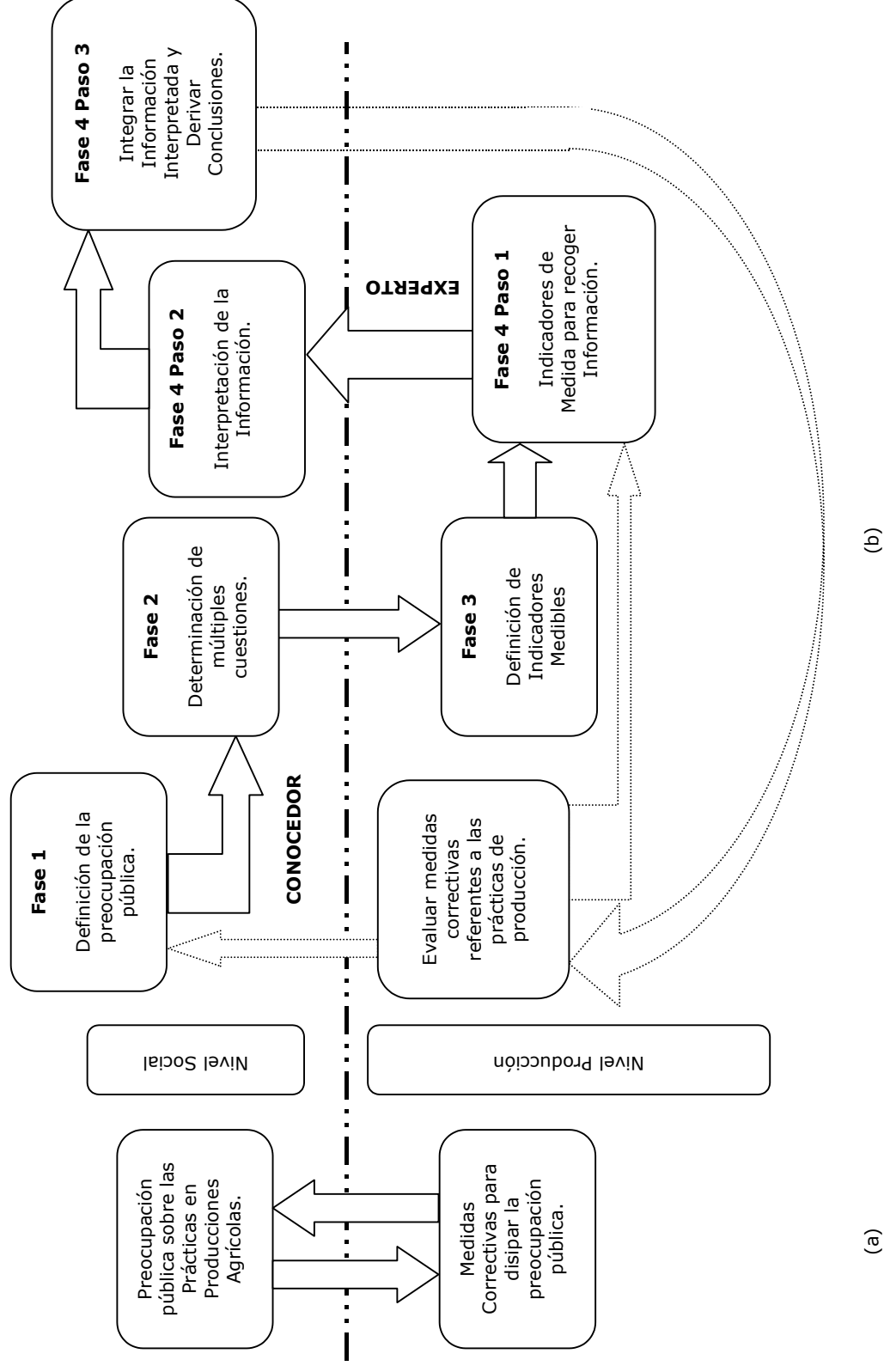


Figura 5.2: (a) Desarrollo de sistemas de producción agrícola contruidos en base a una preocupación pública sobre el impacto de las actividades corrientes de la agricultura en la sociedad. (b) Cuatro fases estructuradas para evaluar el desarrollo de sistemas de producción agrícola.

5.2.1 Criterio de Selección de Expertos

El criterio para seleccionar expertos garantiza la respuesta apropiada del sistema. Son importantes tres aspectos:

1. ¿Cómo es obtenido el conocimiento experto?.
2. ¿Qué conocimiento experto es asequible?.
3. ¿Qué combinación de conocimiento experto es preferida?.

Para obtener un criterio que cualifique a una persona como experto, es necesario establecer un fundamento el cual pueda ser usado para definir el criterio de selección (Sección 5.2.1.1). En suma, es significativo distinguir entre el rol de *conocedor* y el rol de *experto* (Sección 5.2.1.2).

5.2.1.1 Fundamentos para Definir el Criterio de Selección de Expertos

Un experto es una persona cuyo conocimiento es adquirido gradualmente a través de un periodo de aprendizaje y experiencia en un dominio específico [Bromme92, Turban95]. El aprendizaje y experiencia influye en el comportamiento cognitivo, crítico, social, creativo y analítico de una persona [Greenwell88]. De acuerdo a Greenwell, especialmente el comportamiento crítico y analítico de una persona suministra puntos tangibles de partida para definir criterios identificativos de los expertos.

Un compartimiento crítico de una persona se relaciona con la toma de decisiones, evidencias de peso y consecuencias de valoración; un comportamiento analítico se relaciona con el examen de un problema complejo a través de tratar con él en términos de partes mutuamente relacionadas [Greenwell88]. Dentro de la estructura de evaluación en la Figura 5.2 (b), la experiencia analítica y de juicio típicamente es usada en la frontera de ambos niveles. Un experto, por consiguiente, está familiarizado con un análisis de la problemática en términos de múltiples cuestiones y capaz de juzgar medidas de los indicadores correspondientes a esos hechos en términos lingüísticos. La experiencia de una persona puede ser teórica (por ejemplo la experiencia obtenida de un científico de investigación), práctica (por ejemplo la experiencia obtenida de un agricultor) o una combinación de ambas (por ejemplo la experiencia obtenida en la granjas experimentales) [Bromme92, Schreiber00].

El conocimiento experto esta influenciado por las perspectivas y metas individuales [Ford98]. La completa imparcialidad del conocimiento, por consiguiente, es la dificultad a conseguir. Una importante consideración en la selección de expertos es bien usar un grupo

heterogéneo de expertos (por ejemplo científicos y agricultores) o un grupo homogéneo de expertos (por ejemplo sólo científicos). El efecto de diferencias en la experiencia personal sobre un juicio de experto se asume que sea más pequeño en el grupo homogéneo que en el grupo heterogéneo. Tales diferencias, sin embargo, no son necesariamente desventajosas. Un grupo heterogéneo puede tener una ventaja sobre un grupo homogéneo ya que se consideran todas las opiniones y así se compensan los diferentes puntos de vista por otros más liberales.

En resumen, el criterio para identificar expertos está basado en:

- i. El periodo de aprendizaje y experiencia en un dominio específico de conocimiento de una persona, así como la influencia del comportamiento crítico y analítico del mismo.
- ii. Las circunstancias específicas en las cuales la experiencia es obtenida, por ejemplo en circunstancias prácticas o teóricas.

El criterio basado en (i) para identificar un experto relativo a la problemática de los restos de residuos de pesticidas en los productos hortícolas entre un grupo de científicos, por ejemplo, puede ser el número de proyectos en el que esté trabajando sobre este problema, el número de publicaciones científicas que haya publicado sobre la materia, la participación en debates públicos sobre la materia, o el intervalo de tiempo de dicha persona de aprendizaje y experiencia [Ram96]. El criterio basado en (ii) considera si un grupo heterogéneo u homogéneo de expertos es preferido. El criterio puede ser valorado por la persona que sea candidata a experto, y por sus compañeros aspirantes. Aunque no existe una lista definida de criterios, e incluso si el mejor criterio es formulado cualitativamente, la importante contribución es que es la base por la cual los expertos son seleccionados de forma transparente y pública.

5.2.1.2 Distinguiendo entre Conocedores y Expertos

Respecto al uso de conocimiento experto dentro de la estructura de evaluación en la Figura 5.2 (b), es importante distinguir entre el rol de *expertos* en la Fase 4 y el rol de *conocedores* en la Fase 1 y Fase 2. Es decir, expertos no son necesariamente conocedores y conocedores no son necesariamente expertos. Conocedores pueden ser cualquier individuo o grupo el cual pueda afectar o esté afectado por el comportamiento del sistema [Greenwood01, Mitchell97]. El rol de conocedores y expertos en el marco de evaluación es diferente, y por ello son un criterio de selección. En [Mitchell97], por ejemplo, presenta una compresiva discusión del posible criterio para definir los conocedores. La diferencia entre expertos y conocedores puede ser demostrada considerando el rol de testigo experto y no experto en ley [Lectric]. A un testigo experto se le permite dar una opinión sobre el significado de los hechos observados. En cambio, un testigo no experto, sólo le está permitido afirmar los hechos

observados pero no puede dar una opinión del significado de esos hechos. A los expertos, por un lado, les está permitido dar una opinión del significado de la información recogida. Conocedores en el otro lado, pueden formular cuestiones relevantes pero no pueden dar una opinión del significado de la información.

Así, una persona la cual esté cualificada como conocedor no necesariamente estará cualificada como experto, ya que los conocedores y expertos son seleccionados basándose en diferentes criterios. Por ejemplo, aunque los agricultores sean considerados conocedores respecto a las concentraciones de pesticidas en sus productos, ellos no son necesariamente expertos cualificados para juzgar si las concentraciones son aceptables.

5.2.2 Elección de Métodos para la Determinación de Funciones de Pertenencia

El objetivo de éste apartado es el de suministrar un procedimiento para la construcción de funciones de pertenencia y, de ésta manera, acabar con la crítica respecto a la subjetividad inherente a la hora de elaborar las funciones de pertenencias usadas por el sistema experto.

A continuación se suministra al lector un pequeño recordatorio de los términos difusos más comunes ya comentados en la Sección 1.2.1 para establecer una base de trabajo que permita desarrollar una lista de adecuados métodos de elección en la construcción de las funciones de pertenencia (Sección 5.2.2) además de los ya mencionados en la Sección 1.2.1.2.

Los conjuntos difusos usan funciones de pertenencia para operar “variables lingüísticas” e interpretar los indicadores de información usando conocimiento experto. A continuación se indica la nomenclatura utilizada para expresar las características de una variable lingüística:

- i. *Nombre de A ,*
- ii. *Universo de Discurso de la variable x de A ,*
- iii. *Valor lingüístico A_i de A ($i=1, \dots, N$), y*
- iv. *Función de Pertenencia μ_{A_i} de A_i , donde $j=1, \dots, N$.*

Diferentes métodos son accesibles para la construcción de funciones de pertenencia. Cuatro métodos son presentados. *Estimación puntual* (o elección), *estimación intervalar*, *tasa directa* originada de la literatura [Chameau87, Hersch76, Kaymak98, Krishnapuram98, Norwich84 y Türksen91]; y *estimación intervalar de transición* la cual es presentada en [Cornelissen01A] como alternativa a los otros métodos de búsqueda. Además se encuentran

otros métodos más teóricos comentados en la Sección 1.2.1.2 para la determinación de las funciones de pertenencia.

Para cada método de búsqueda, el modo de evaluación del experto, la forma en que la valoración en conjunto de $\mu_{Ai}(x)$ es computada a partir de valoraciones expertas individuales, el significado en conjunto de $\mu_{Ai}(x)$, el número de expertos que han sido necesarios para obtener una apropiada función de pertenencia y las características de las funciones de pertenencia construidas son discutidas e ilustradas a continuación. Además, las ventajas y desventajas en la elección de métodos son planteadas en la Sección 5.2.3.

5.2.2.1 Estimación Puntual (EP)

En la estimación puntual (EP), un experto p ($p=1\dots P$) determina sin ambigüedades si para cada x del dominio, ésta pertenece o no a la función de pertenencia A_i . El experto p , por consiguiente, evalúa si $\mu_{Ai}(x)_p$ tiene valor 1 o 0. En conjunto $\mu_{Ai}(x)$ es evaluada y computada como:

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \mu_{A_i}(x)_p, \quad (5.1)$$

donde $\mu_{Ai}(x)=0.6$ indicaría que el 60 % de los P expertos afirman que x pertenece a A_i . Para obtener una correcta función de pertenencia, por lo tanto, sería necesario más de un experto [Klir95]. De esta forma la construcción de la función de pertenencia estará caracterizada por una colección de puntos que forman $\mu_{Ai}(x)$.

En la Figura 5.3 (a), p expertos consideran como "aceptable" (A_1) la concentración de pesticidas x tal que $(\mu_{A1}(x)_p=1)$ o "inaceptable" (A_2) tal que $(\mu_{A2}(x)_p=0)$. Por consiguiente, los p expertos, determinan una clara transición entre los valores considerados como "aceptables" y los "inaceptables" denominada x_{Tp} .

La principal ventaja de la EP es la facilidad de procesamiento para la búsqueda de conocimiento experto. También decir, que EP podría ser aplicado a variables en dominios discretos y continuos. La principal desventaja de EP radica en la contradicción entre el drástico modo de respuesta del experto (por ejemplo, x es o no es perteneciente a la etiqueta A_i) y la difuminación inherente en el proceso de interpretación humano de la información (por ejemplo, x cumple la etiqueta A_i con un grado) [Zadeh73]. También, los expertos necesitan evaluar un número individual x dentro del rango relevante U de la variable. Por tanto, si un gran número de x necesitan ser evaluadas, entonces la aplicación

práctica de EP puede volverse laboriosa y costosa en tiempo para un experto, y consecuentemente influir en la rentabilidad de las evaluaciones de los expertos [Chameau87 y Nunnally78].

5.2.2.2 Intervalo de Estimación (IE)

En el intervalo de estimación (IE), un experto p determina un intervalo definido bruscamente (sobre el dominio o universo de discurso de la variable) conteniendo valores de x para cuales cumple la etiqueta A_i . El experto p , por consiguiente, determina el intervalo A_{ip} sobre U por el cual $\mu_{A_i}(x)_p$ tiene valor 1. Una valoración conjunta de $\mu_{A_i}(x)$ es calculada usando (5.1) donde $\mu_{A_i}(x) = 0.6$ significa que el 60% de p expertos determinan que x está en el intervalo A_i . La función de pertenencia construida se caracteriza por los datos de los puntos $\mu_{A_i}(x)$.

En la Figura 5.3 (b), el experto p determina un intervalo A_{ip} que contiene todos los valores de concentraciones las cuales los expertos consideran "aceptables".

La principal ventaja de IE es la reducción de tiempo en su elaboración comparado con la EP. Como en EP, la principal desventaja es el drástico modo de respuesta del experto.

5.2.2.3 Tasa Directa (TD)

En la tasa directa, un experto p directamente determina el grado $\mu_{A_i}(x)$ para el cual cada x pertenece a A_i . Por lo tanto, el experto p asigna a cada x un valor $\mu_{A_i}(x)_p$ del intervalo $[0,1]$. Una valoración conjunta $\mu_{A_i}(x)$ es calculada usando (5.1) donde $\mu_{A_i}(x) = 0.6$ significa que x media se parece a x_T , el cual verdaderamente pertenece a A_i en un grado de 0.6. La función de pertenencia construida se caracteriza por los datos de los puntos de $\mu_{A_i}(x)$.

En la Figura 5.3 (c), p expertos determinan el grado por el cual la concentración de pesticidas es "aceptable" asignando un valor del intervalo $[0,1]$. La principal ventaja de TD es que permite difuminar el modo de respuesta de un experto. Por ejemplo, TD no fuerza a los expertos a determinar qué valores x pertenecen o no a la propiedad A_i . También, TD puede ser aplicado a variables discretas y continuas. Una desventaja de TD, sin embargo, puede ser la baja reproducción entre expertos de $\mu_{A_i}(x)_p$ debido a la asignación de precisos grados de pertenencia y porque pequeñas diferencias en valores numéricos de $\mu_{A_i}(x)_p$ no debe presentar problemas para un experto [Leung81]. Como sucede con EP, si es necesario evaluar un gran número de x , entonces las aplicaciones prácticas de TD pueden ser laboriosas y costosas en tiempo para un experto.

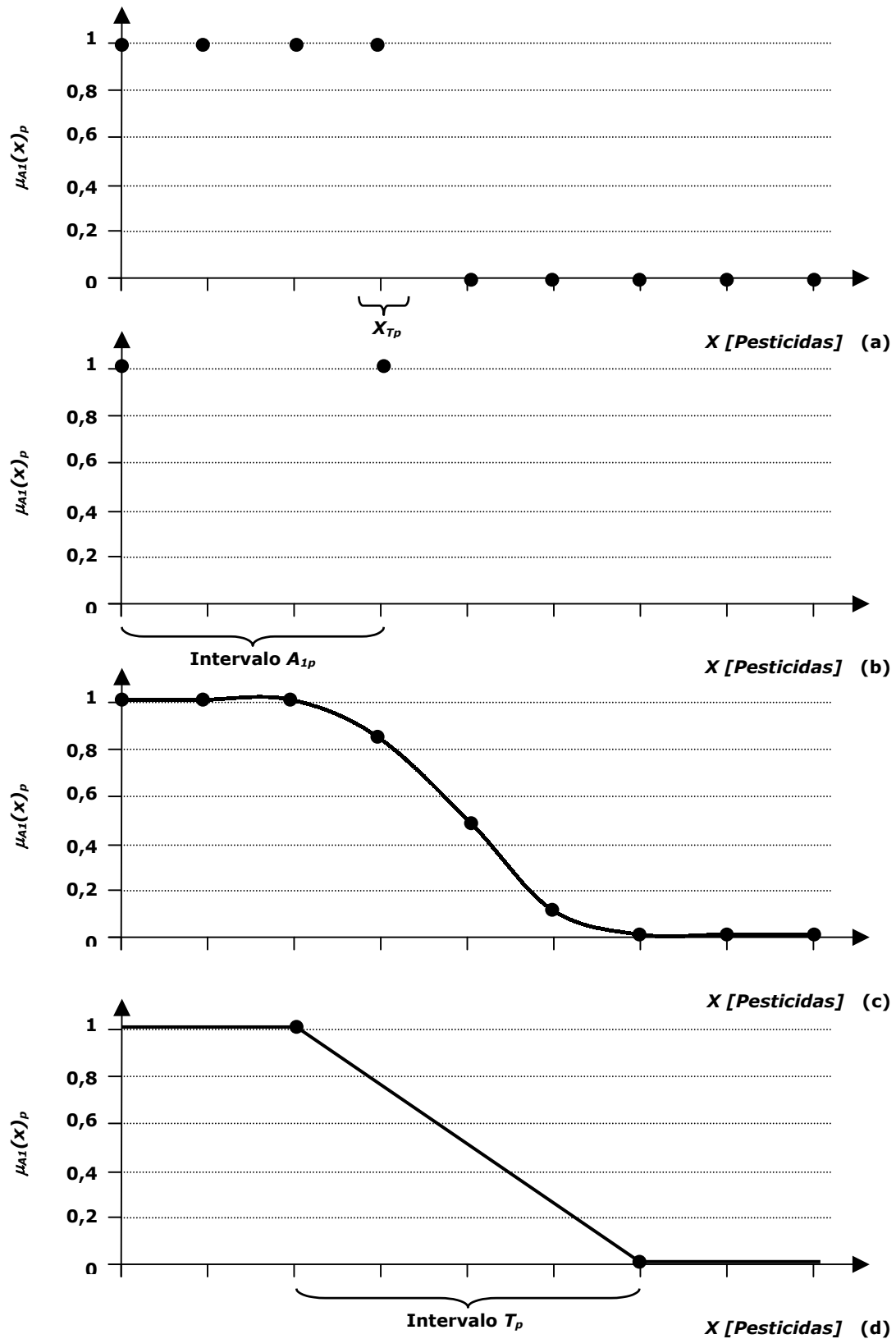


Figura 5.3: Cuatro métodos para la determinación de funciones de pertenencia: (a) Estimación Puntual (EP), (b) Intervalo de Estimación (IE), (c) Tasa Directa (TD), y (d) Estimación Intervalar de Transición (EIT). P expertos determinan el grado $\mu_{A_1}(x)$ la variable x (concentración de pesticidas) es A_1 "Aceptable" (a) por determinación de X_{Tp} , (b) por determinación del intervalo A_{1p} , (c) por determinación de $\mu_{A_1}(x)_{pr}$ o (d) por el intervalo T_p .

5.2.2.4 Estimación Intervalar de Transición (EIT)

En EIT, p expertos determinan un intervalo (sobre el rango relevante del universo de discurso de la variable) que contengan valores de x por los cuales puedan construir no sin ambigüedad si la propiedad A_i es o no aplicable. Un experto p , por consiguiente, determina un intervalo de transición T_p en el universo de discurso definido por $[x_{min,p}, x_{max,p}]$ por el cual $x_{min,p} < x < x_{max,p}$ y $0 < \mu_{A_i}(x)_p < 1$. El valor mínimo y máximo no son significativos en si mismos, sin embargo, pueden ser caracterizados por el punto central y el rango entre ambos valores. Una valoración en conjunto de $\mu_{A_i}(x)_p$ en el intervalo de transición T , no sin ambigüedad, puede ser basada en una transición lineal caracterizada por un punto central x_{mp} y un rango d_p de T_p tal que:

$$x_m = \frac{1}{p} \sum_{p=1}^p x_{mp} \quad (5.2)$$

siendo

$$d = \frac{1}{p} \sum_{p=1}^p d_p, \quad \text{y} \quad d_p = x_{max,p} - x_{min,p}, \quad (5.3)$$

donde x_m es el punto central de T basado en p valoraciones x_{mp} , y d es el rango de T basado en p valoraciones d_p . Un experto, por consiguiente, es suficiente para obtener una apropiada función de pertenencia. El intervalo de transición T es definido por $[x_{min}, x_{max}]$ donde x_{min} y x_{max} son definidos como:

$$x_{min} = x_m - \frac{d}{2} \quad (5.4)$$

y

$$x_{max} = x_m + \frac{d}{2} \quad (5.5)$$

Después, $\mu_{A_i}(x)_p$ es computado como:

$$\mu_{A_i}(x) = \begin{cases} 0 \text{ ó } 1 & \text{cuando } x < x_{min} \\ 0.5 \pm \frac{(x - x_m)}{d} & \text{cuando } x_{min} \leq x \leq x_{max} \\ 1 \text{ ó } 0 & \text{cuando } x > x_{max} \end{cases} \quad (5.6)$$

donde $\mu_{A_i}(x)=0$ para $x < x_{min}$ y $\mu_{A_i}(x)=1$ para $x > x_{max}$ si el signo \pm es el positivo y viceversa. El uso de una transición lineal sería una primera posibilidad en el método EIT para expresar el cambio en $\mu_{A_i}(x)$ sobre T , también podría ser no lineal. La construcción de la función de pertenencia está caracterizada por (5.6). Adicionalmente, en condiciones donde sólo sea usada la transición lineal en (5.6), el parámetro d puede ser interpretado como una medida de la difuminación a la hora de expresar la ambigüedad entre expertos respecto al cambio entre x es A_i y x no es A_i .

En la Figura 5.3 (d), p expertos determinan el intervalo de transición T_p definido entre $x_{min,p}$ y $x_{max,p}$. La principal ventaja de EIT es que los expertos no tienen que determinar de forma precisa $\mu_{A_i}(x)$. La respuesta experta puede ser difusa por medio de la definición de un intervalo por el cual $0 < \mu_{A_i}(x) < 1$ sin tener precisamente de forma determinada $\mu_{A_i}(x)$. En definitiva, EIT es menos laborioso y costoso en tiempo para un experto. Como principal desventaja puede ser que el modo de evaluación del experto sea menos honesto a través de la asignación de los valores frontera $x_{min,p}$ y $x_{max,p}$ de T_p comparado con EP e IE.

5.3 Simulación de Procesos Agrícolas

Según [Urrestarazu00] durante los últimos 25 años se ha alcanzado un progreso rápido en la simulación de procesos agrícolas. Modelos para simular aspectos de tipo climático, hidrológico, mecánico, de reciclado y movimiento de nutrientes, de temperatura del suelo, de erosión de suelos, crecimiento y desarrollo de cultivos, etc. Muchos de estos modelos son bastante restringidos en cuanto a propósitos, simulando únicamente procesos discretos tales como la temperatura del suelo, el movimiento de agua en el suelo, el lavado de nitratos, etc. Otros, por el contrario, integran varios de estos procesos. Así, se han desarrollado con bastante profusión modelos de simulación aplicados a sistemas agrícolas con un carácter comprensivo. Estos modelos simulan un número determinado de procesos y predicen sus efectos interactivos en el crecimiento del cultivo y el rendimiento. En este sentido, los modelos de simulación adoptan la forma de programas como:

- Modelos del británico International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer –IBSNAT- : *CERESWHEAT*, *CERESMAIZE*, *SOYGRO*, *PNUTGRO*.

- ❑ C.SM.P, lenguaje específico para simulación utilizado en los modelos desarrollados por la escuela holandesa de Wageningen.

Si además se produce una integración del modelo con un *Sistema Experto*, el producto que resulta es lo que se denomina un *Sistema de Ayuda a la Decisión* (*Decisión Support System*) dotado de una notable cooperación frente al simple modelo.

El cambio más importante dentro del sistema productivo que representa una planta en su agroecosistema y que justifica su cultivo por el hombre, es el crecimiento. Para un productor, el mayor o menor crecimiento de las especies cultivadas en su conjunto o bien de determinados órganos, se traduce directamente en la rentabilidad de la actividad económica que desarrolla como empresario. La simulación del crecimiento de los cultivos a través de modelos debidamente desarrollados y adaptados a las condiciones en que nos encontremos, permite aportar la valiosa información que resulta el conocer a priori el pronóstico de sus rendimientos, así como evaluar la respuesta del cultivo ante diversas estrategias relacionadas con su manejo, constituyéndose en una interesante herramienta de optimización.

Sin embargo, el comportamiento del cultivo es el resultado de numerosos procesos que acontecen en distintas escalas temporales y espaciales. Los científicos dedicados a la simulación sostienen como premisa que en un modelo como máximo se deben integrar y combinar procesos que acontecen en dos escalas temporales consecutivas, es por ello, por lo cual, los modelos de simulación del crecimiento de cultivos consideran procesos que se sitúan en una escala temporal de días y, a lo sumo, horas.

Es frecuente al hablar de modelos referirse al concepto de nivel de producción que, en resumidas palabras, tiene que ver con las limitaciones impuestas por el sistema al funcionamiento del modelo de crecimiento, así se distinguen cuatro niveles:

- ❑ Nivel I: Producción ante condiciones no limitantes (sólo el clima es limitante).
- ❑ Nivel II: Producción ante condiciones limitantes de agua.
- ❑ Nivel III: Producción ante condiciones limitantes de nutrientes.
- ❑ Nivel IV: Producción ante condiciones limitantes de otros elementos del sistema (plagas, enfermedades, malas hierbas...)

Según [Thornton91] la utilidad de los modelos depende de su capacidad para presentar opciones tecnológicas sobre la gestión de los cultivos. La utilidad del modelo claramente depende de la sensibilidad del mismo, y ésta de su concepción, estructura e implementación. Básicamente intervienen dos aspectos:

- a. La capacidad del modelo a responder de forma clara ante pequeños cambios de las entradas.

- b. Las relaciones específicas en el modelo para simular determinados procesos biológicos.

De un modo muy resumido, puede afirmarse que los modelos de simulación, una vez adaptados a una zona determinada presentan las siguientes utilidades:

1. Son una herramienta predictiva, permitiendo extraer conclusiones sobre planificación y gestión de entradas en sistemas agrícolas. Incluso con la incorporación a su estructura de un módulo económico permiten extraer información sobre la rentabilidad de la gestión de cultivos.
2. Poseen poder didáctico, ya que ayudan al usuario (ya sea agricultor, técnico...) a entender el comportamiento de las plantas cultivadas.
3. Se utilizan para investigación, y la hacen más efectiva y eficiente, evitando incluso el planteamiento de experiencias a nivel de campo.
4. Sirven para identificar vacíos de conocimiento (*gaps*) y/o abren paso a futuras líneas de investigación, con las que complementar su desarrollo.