



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN**

**DEV E-R: UN MODELO COMPUTACIONAL DEL DESARROLLO  
COGNITIVO TEMPRANO IMPLEMENTADO COMO UN PROCESO  
CREATIVO**

**T E S I S**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DRA. EN CIENCIAS (COMPUTACIÓN)**

**P R E S E N T A**

**WENDY ELIZABETH AGUILAR MARTÍNEZ**

**TUTOR**

**DR. RAFAEL PÉREZ Y PÉREZ**  
**POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN**

**COMITÉ TUTOR**

**DR. CHRISTIAN LEMAÎTRE LEÓN**  
**POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN**  
**DR. EDUARDO ABEL PEÑALOSA CASTRO**  
**POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN**

**MÉXICO, D.F. MAYO 2015**



*Dev E-R: Un Modelo Computacional del Desarrollo Cognitivo Temprano  
Implementado como un Proceso Creativo*

Wendy Elizabeth Aguilar Martínez

Tutor: Rafael Pérez y Pérez

La siguiente página web contiene información adicional y actualizada acerca de esta tesis y temas relacionados:

<http://turing.iimas.unam.mx/~weam>

Texto impreso en México D.F

mayo 2015

---



## Resumen

En este trabajo de investigación se propone un modelo computacional llamado *Dev E-R*, el cual, inspirado en la teoría de Piaget, simula los procesos de *asimilación*, *acomodación* y *equilibración*, mecanismos que conforman la esencia de la teoría del desarrollo cognitivo de dicho autor. Estos se implementaron con una versión extendida del modelo computacional del proceso creativo *Engagement-Reflection* (Pérez y Pérez & Sharples, 2001, 2004; Pérez y Pérez, 2007). En consecuencia *Dev E-R* considera la adaptación, y por lo tanto la construcción del conocimiento, como una actividad creativa. Esta perspectiva es afín a la teoría de Cohen (1989), quien concibe a la creatividad como una serie de comportamientos adaptativos en un continuo de siete niveles de desarrollo (la cual inicialmente involucra la adecuación del individuo al mundo y en los niveles más altos involucra la adecuación del mundo al individuo). Para probar el modelo propuesto se creó un agente artificial que usa como su componente central el modelo *Dev E-R* a través del cual es capaz de adaptarse a su ambiente.

Se diseñaron tres conjuntos de experimentos. El primero de ellos consistió en configurar al agente de tal forma que éste solo pudiera ver pero no tocar su mundo. En el segundo se hizo lo contrario, es decir, se configuró para que pudiera tocar pero no ver su mundo. Finalmente en el tercero le habilitamos su capacidad tanto de ver como de tocar. Para evaluar los resultados obtenidos, se propusieron 2 conjuntos de criterios. El primero es útil para determinar si las habilidades que aprende el agente lo llevan a mostrar un desarrollo cognitivo, y está compuesto de los siguientes criterios: a) los nuevos comportamientos deben representar habilidades características de etapas posteriores a la que se inicializó el agente, b) debe de ser posible construir una trayectoria de desarrollo, de tal forma que se pueda observar la dependencia de los nuevos comportamientos de los ya conocidos, y c) el agente debe de ser capaz de crear sus nuevas conductas de manera

autónoma, incluyendo la transición de una subetapa de desarrollo a la siguiente. El segundo conjunto ayuda a establecer si los comportamientos generados son creativos, y está compuesto de los siguientes criterios: a) deben de ser novedosos, es decir, éstos no existían explícitamente en la base de conocimiento inicial del agente, b) deben de ser útiles, es decir, éstos debieron de haber servido como base para la construcción de nuevo conocimiento que eventualmente llevó al agente a la adquisición de nuevas habilidades características de su siguiente etapa de desarrollo, c) deben de haber emergido, es decir, su origen no debe de poder rastrearse directamente a los componentes del sistema, sino que debieron de haberse originado como resultado de la manera en que tales componentes interactuaron, d) debieron de haber surgido como resultado de una motivación intrínseca o extrínseca, y e) deben de cumplir con la características de haber sido adquiridos como resultado de un proceso de adaptación al ambiente. Bajo estos criterios, se concluyó que el agente mostró haberse desarrollado cognitivamente (pasó de conductas características de la primera subetapa del periodo sensorio-motor, a aquellas típicas de la segunda, y a los comienzos de la tercera) y que los nuevos comportamientos aprendidos se caracterizan por ser creativos.

*A mi esposo, a mis pequeños hijos, y a mis padres.*



## **Agradecimientos**

*A mi esposo, mi compañero y mi apoyo incondicional, a quien amo con todo mi corazón. Gracias por emocionarte y vivir conmigo este gran sueño.*

*A mis hijos Diego y Alex, quienes desde mi vientre me acompañaron durante esta hermosa etapa de mi vida; mis hermosas y pequeñas fuentes de inspiración y de amor.*

*A mis padres, mis grandes pilares, a quienes agradezco infinitamente toda su confianza y apoyo en este y todos mis proyectos; este logro es suyo.*

*A mi hermana, quien con los años se ha convertido en una buena amiga a quien adoro.*

*A mi muy querida suegra Emperatriz, por todo su cariño, consejos, optimismo y apoyo brindado desde siempre.*

*A mi tutor Rafael, por contagiarme de su gran entusiasmo por nuestra investigación, por las muy interesantes y largas charlas que mantuvimos, por sus consejos, apoyo y confianza en mis ideas y capacidades.*

*A los miembros de mi jurado, por su valiosa retroalimentación y consejos.*

*A Conacyt, por la beca que me otorgaron para realizar esta  
investigación.*

*A Cinthya Ceja, por compartir conmigo sus talentos artísticos y  
ayudarme con la creación de la portada de este trabajo.*

mayo 2015



<b>4</b>	<b>Jacques, el Agente que se Desarrolla</b>	<b>27</b>
4.1	Mundo Virtual . . . . .	27
4.2	Características Físicas . . . . .	29
4.3	Características Cognitivas . . . . .	31
4.3.1	El Agente Puede “Ver” su Mundo . . . . .	32
4.3.2	El Agente Puede “Tocar” su Mundo . . . . .	37
4.3.3	El Agente Simula un Proceso de Atención . . . . .	38
4.3.4	El Agente Simula Respuestas Afectivas, Estados Emocionales y Motivaciones que lo Empujan a Actuar . . . . .	39
4.3.5	El Agente Cuenta con una Memoria . . . . .	42
4.3.6	El Agente Cuenta con Mecanismos de Adaptación . . . . .	48
4.4	Interacción del Agente con su Mundo . . . . .	48
<b>5</b>	<b>El Modelo <i>Dev E-R</i></b>	<b>51</b>
5.1	Funcionamiento General . . . . .	51
5.2	Simulación del Proceso de Acomodación . . . . .	53
5.3	Simulación del Proceso de Equilibrio Cognitivo . . . . .	62
5.4	Simulación del Proceso de Asimilación. . . . .	65
<b>6</b>	<b>Experimentos y Resultados</b>	<b>69</b>
6.1	Primer Conjunto de Experimentos: El Agente Sólo Puede Ver su Mundo . . . . .	69
6.1.1	Conocimiento Inicial . . . . .	70
6.1.2	Desarrollo de las Habilidades Visuales del Agente en la Sala de una Casa . . . . .	72
6.1.2.1	Resultados . . . . .	72
6.1.3	Desarrollo de las Habilidades Visuales del Agente en la Carretera de una Ciudad . . . . .	83
6.1.3.1	Resultados . . . . .	83
6.2	Segundo Conjunto de Experimentos: El Agente Sólo Puede Tocar su Mundo . . . . .	91
6.2.1	Conocimiento Inicial . . . . .	91

6.2.2	Desarrollo de las Habilidades Táctiles del Agente en la Sala de una Casa . . . . .	93
6.2.2.1	Resultados . . . . .	94
6.3	Tercer Conjunto de Experimentos: El Agente Puede Ver y Tocar su Mundo . . . . .	100
6.3.1	Conocimiento Inicial . . . . .	102
6.3.2	Desarrollo de las Habilidades Visuales y Táctiles del Agente en la Sala de una Casa . . . . .	104
6.3.2.1	Resultados . . . . .	104
<b>7</b>	<b>Evaluación y Discusión</b>	<b>115</b>
7.1	Criterios de Evaluación . . . . .	115
7.1.1	Desarrollo Cognitivo . . . . .	115
7.1.2	Comportamientos Creativos . . . . .	116
7.2	Evaluación del modelo Dev E-R . . . . .	118
7.2.1	Desarrollo Cognitivo . . . . .	118
7.2.2	Comportamientos Creativos . . . . .	122
<b>8</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>127</b>
8.1	Trabajo a futuro. . . . .	130
	<b>Apéndices</b>	<b>133</b>
<b>A</b>	<b>Ejemplo paso a paso del desarrollo de los esquemas del tacto</b>	<b>135</b>
A.1	Conocimiento inicial . . . . .	135
A.2	El agente interactuando con su ambiente usando sólo sus esquemas básicos . . . . .	136
A.3	El agente crea su primer esquema desarrollado . . . . .	143
A.4	El agente continúa interactuando con su ambiente usando y modificando sus esquemas desarrollados . . . . .	145
A.5	El agente alcanza un estado de equilibrio cognitivo por primera vez . . . . .	155

## ÍNDICE GENERAL

---

A.6 El agente alcanza un estado de equilibrio cognitivo por segunda vez . . . . .	159
A.7 Resumen . . . . .	163
<b>B Publicaciones</b>	<b>169</b>
<b>Referencias</b>	<b>171</b>

# Índice de figuras

4.1	Ejemplo de un mundo virtual con el cual puede interactuar el agente: (a) vista aérea y (b)-(c) dos vistas panorámicas interiores.	28
4.2	(a) El agente virtual que se desarrolla; (b) organización de su campo de visión. . . . .	29
4.3	Un ejemplo ilustrativo de cómo el agente ve su mundo conforme se desarrolla: (a) datos visuales sensados; (b)-(d) los mismos datos vistos por el agente conforme su percepción se enriquece. Primero el agente ve los objetos del mundo sólo como manchas luminosas, y gradualmente comienza a verlos como manchas de diferentes colores y tamaños. . . . .	33

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

4.4	(a) Al inicio el agente sólo puede diferenciar los colores primarios verde, rojo y azul; (b) cuando alguno de los colores diferenciables recibe suficiente estimulación de su ambiente (es decir, cuando su variable asociada alcanza el valor de $N$ ), el agente adquiere la habilidad de reconocerlo; (c) el reconocimiento del nuevo color permite que el agente lo pueda usar como parte de sus estructuras de conocimiento (como sus contextos y esquemas), y a partir de ese momento se vuelve capaz de ver manchas luminosas del color reconocido; (d) cuando se reconoce un nuevo color, entonces se incrementan las habilidades del agente para diferenciar dos nuevas variedades de éste: una versión más clara y una versión más oscura; (e) cuando los nuevos colores se reconocen a su vez, el ciclo se repite dando lugar a la diferenciación y reconocimiento de variedades de verdes, rojos y azules; (f) el reconocimiento de dos o más colores primarios da lugar a la diferenciación, y posteriormente al reconocimiento, de los colores secundarios amarillo, cian, y magenta; (g) de la misma manera, el reconocimiento de los colores secundarios da lugar a la diferenciación y posteriormente al reconocimiento de los colores terciarios. . . . .	34
4.5	(a) Estado inicial de la estructura de tamaños diferenciables, en donde 2500 pixeles corresponden al tamaño pequeño y 7500 pixeles al tamaño grande; (b) cuando el agente logra reconocer el tamaño pequeño, se vuelve capaz de diferenciar dos nuevas variedades de éste; (c) lo mismo sucede cuando logra diferenciar el tamaño grande, pero ahora también surge un nuevo tamaño intermedio al que llamamos mediano.	35
4.6	Ejemplos de situaciones en donde se disparan algunas respuestas afectivas, estados emocionales, y motivaciones. . . . .	40
4.7	(a) La estructura del <i>contexto-actual</i> ; (b) la estructura del <i>contexto-actual-visual</i> y del <i>contexto-actual-táctil</i> . . . . .	44

4.8	(a) Un ejemplo de un <i>contexto-actual</i> , el cual representa la pelota verde, pequeña, y brillante que estaba en movimiento y que le agradó al agente en la Figura 4.6a; (b) El mismo <i>contexto-actual</i> usando la notación alternativa. . . . .	45
4.9	(a) La estructura de los esquemas básicos; (b) un ejemplo de un esquema básico. . . . .	46
4.10	(a) La estructura de los esquemas desarrollados; (b) un ejemplo de un esquema desarrollado. . . . .	47
5.1	Un ejemplo de la correspondencia de la estructura del <i>contexto-actual</i> de la Figura 4.7c con un esquema en memoria. En este caso, el <i>contexto-actual</i> corresponde al 100 % con el contexto asociado al esquema debido a que ambos están compuestos de la misma respuesta afectiva, con la misma valencia y la misma intensidad, y porque todas las características que definen al objeto del contexto están en términos de variables (es decir, éstas se asocian a la descripción de cualquier objeto visual: de cualquier color, de cualquier tamaño, con cualquier movimiento, y en cualquier posición). . . . .	52
5.2	Ilustra el proceso de <i>acomodación</i> en la situación en la que el agente dispara un estado emocional de sorpresa. . . . .	54
5.3	Ilustra la manera en la que el esquema va guardando la experiencia de su uso: (a) en el caso en el que se cumplen las expectativas, y (b) en el caso en el que no se cumplen. . . . .	56
5.4	(a) Muestra el esquema de la Figura 5.3 en el momento en el que está listo para sufrir un proceso de acomodación, ya que: 1) se ha usado 50 veces y 2) en el 56 % de éstas no se han cumplido sus expectativas. (b) Muestra los dos esquemas resultantes de su proceso de acomodación, los cuales surgen como una diferenciación del esquema general en estructuras más particulares. . . . .	57
5.5	Ejemplifica el proceso de generalización de esquemas $T_0$ en esquemas tipo $T_1 \dots T_{n-1}$ . . . . .	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

5.6	Ejemplifica el proceso de diferenciación de esquemas tipo $T_1$ en esquemas tipo $T_0$ . . . . .	60
5.7	Ejemplifica el proceso de diferenciación de esquemas tipo $T_{n-1} \dots T_2$ . . . . .	61
5.8	Resume los procesos de acomodación de los esquemas del agente: 1) Se crea un nuevo esquema tipo $T_n$ cuando el agente presenta un estado emocional de sorpresa, es decir, cuando recupera por accidente un objeto de interés; 2) se diferencia en estructuras particulares tipo $T_0$ cuando sus expectativas asociadas no se cumplen un cierto porcentaje de veces; 3) se generaliza en un esquema tipo $T_{n-1} \dots T_1$ cuando se detecta que una misma acción puede recuperar varios objetos con características diferentes; 4) si el esquema sigue provocando que el agente entre en estados de conflicto cognitivo, entonces se considera que éste es aún muy general y se vuelve a diferenciar en esquemas más particulares; 5) este proceso continúa hasta que el esquema se elimina o hasta que deja de sufrir acomodaciones debido a que sus expectativas se cumplen la mayoría de las veces, es decir, hasta que se estabiliza. . . . .	63
5.9	Ejemplifica el momento en el que el agente entra en un estado de equilibrio cognitivo. Cuando el agente inicia y comienza a crear sus propios esquemas, sus expectativas se cumplen un porcentaje muy bajo de ocasiones produciéndole la necesidad de acomodar su conocimiento. Con el tiempo, logra interactuar con su mundo sin verse en la necesidad de modificar más su conocimiento debido a que sus expectativas se cumplieron la mayoría de las veces (por lo menos el $P_{Success} \%$ de las veces durante los últimos $N_C$ ciclos). En ese momento se dice que el agente ha entrado en un estado de equilibrio cognitivo. . . . .	64
6.1	Esquemas básicos iniciales. Estos esquemas representan los comportamientos predefinidos que el agente inicialmente conoció para interactuar con su mundo. . . . .	70
6.2	Imágenes del primer ambiente con el cual el agente interactuó. . . . .	72

6.3	Muestra los colores (en el espacio de color rgb) y tamaños (en número de píxeles) que el agente aprendió a reconocer cuando interactuó con la sala de una casa. . . . .	73
6.4	Muestra las nuevas habilidades que el agente adquirió durante las tres ejecuciones, cuando éste se desarrolló en la sala de una casa: (a)-(c) posiciones del campo de visión en donde el agente aprendió cómo <i>recuperar</i> objetos placenteros perdidos, (d)-(f) posiciones dentro del campo de visión en donde el agente aprendió cómo <i>preservar</i> objetos placenteros, y (g)-(i) posiciones dentro del campo de visión en donde el agente aprendió cómo preservar objetos placenteros <i>estáticos</i> . . . .	74
6.5	Muestra el número de objetos que el agente perdió a lo largo de su ejecución. . . . .	75
6.6	Un esquema típico de la fase 1. . . . .	76
6.7	Muestra la evolución de la habilidad del agente en recuperar los objetos de su agrado. . . . .	77
6.8	Ilustra el comportamiento típico del agente al inicio de su ejecución. . . . .	77
6.9	Ilustra el comportamiento típico del agente al final de la fase 1. . . . .	78
6.10	Muestra la evolución del cumplimiento de las expectativas del agente. . . . .	79
6.11	Un esquema típico de la fase 2. . . . .	79
6.12	Muestra la evolución de las posiciones en donde el agente atendió los objetos de su interés. . . . .	80
6.13	Ilustra el comportamiento típico del agente al final de la fase 2. . . . .	81
6.14	Un esquema típico de la fase 3. . . . .	82
6.15	Ilustra el comportamiento típico del agente al final de fase 3. . . . .	83
6.16	Imágenes del segundo ambiente con el cual interactuó el agente, el cual representa la carretera de una ciudad. . . . .	84
6.17	Muestra los colores (en el espacio de color rgb) y tamaños (en número de píxeles) que el agente aprendió a reconocer cuando interactuó con la carretera de una ciudad. . . . .	84
6.18	Muestra las nuevas habilidades adquiridas por el agente cuando éste se desarrolló en la carretera de una ciudad, para tres corridas independientes. . . . .	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

6.19	Muestra el número de objetos que el agente perdió a lo largo de su ejecución en la carretera de una ciudad. . . . .	86
6.20	Muestra la evolución del porcentaje de los objetos perdidos de la gráfica 6.19, que logra recuperar. . . . .	87
6.21	Ilustra el comportamiento típico del agente al inicio de su ejecución. . . . .	88
6.22	Ilustra el comportamiento típico del agente al final de la fase 1. . . . .	88
6.23	Muestra la evolución del cumplimiento de las expectativas del agente, cuando éste interactuó con la carretera de una ciudad. . . . .	89
6.24	Muestra la evolución de las posiciones en donde el agente atendió los objetos de su interés, cuando éste interactuó con la carretera de una ciudad. . . . .	89
6.25	Ilustra el comportamiento típico del agente al final de la fase 2. . . . .	90
6.26	Ilustra el comportamiento típico del agente al final de la fase 3. . . . .	90
6.27	Esquemas básicos con los cuales el agente se inicializó en el segundo conjunto de experimentos. Estos esquemas representan los comportamientos predefinidos que el agente inicialmente conoció para interactuar con su mundo. . . . .	93
6.28	Muestran la evolución del número de objetos placenteros perdidos por el agente contrastados contra el número de objetos que pudo recuperar, en cada una de las tres ejecuciones. . . . .	95
6.29	Esquema creado durante la fase 1. . . . .	97
6.30	Muestran el número de expectativas totales generadas por el agente contrastadas contra el número de expectativas cumplidas, en cada una de las tres ejecuciones. . . . .	98
6.31	Esquema creado durante la fase 2. . . . .	99
6.32	Esquema creado al final de la fase 2. . . . .	99
6.33	Muestran la evolución del número promedio de ciclos que el agente mantuvo agarrado un objeto de su interés, a lo largo de sus tres ejecuciones. . . . .	101
6.34	Esquemas básicos con los cuales el agente se inicializó en el tercer conjunto de experimentos. . . . .	102

6.35	Conjunto de esquemas desarrollados con los cuales el agente se inicializó en el tercer conjunto de experimentos. . . . .	103
6.36	Ilustra cómo el agente observa su mano en movimiento. . . . .	105
6.37	Esquemas creados cuando el agente pudo tanto ver como tocar su mundo, los cuales le sirven para conservar y recuperar objetos que ve y tal vez toca en la posición 6 de su campo de visión. . . . .	106
6.38	Conjunto de esquemas creados cuando el agente pudo tanto ver como tocar su mundo, para todas las posiciones del campo de visión. . . . .	107
6.39	Primer esquema desarrollado que involucra tanto placer por lo que ve como placer por lo que siente. . . . .	108
6.40	Segundo esquema desarrollado que involucra tanto placer por lo que ve como placer por lo que siente. . . . .	110
6.41	Tercer esquema desarrollado que involucra tanto placer por lo que ve como placer por lo que siente. . . . .	111
6.42	Cuarto esquema desarrollado que involucra tanto placer por lo que ve como placer por lo que siente. . . . .	112
7.1	Ejemplifica la trayectoria desarrollo de las habilidades adquiridas por el agente. . . . .	120
A.1	Esquemas básicos iniciales. Estos esquemas representan los comportamientos predefinidos que el agente inicialmente conoce para interactuar con su mundo. . . . .	136
A.2	(a) <i>contexto-actual</i> creado en el ciclo 1; (b) <i>contexto-actual</i> creado en el ciclo 2. . . . .	137
A.3	(a) <i>contexto-actual</i> creado en el ciclo 3; (b) <i>contexto-actual</i> modificado al final del ciclo 3. . . . .	138
A.4	(a) <i>contexto-actual</i> creado en el ciclo 4; (b) <i>contexto-actual</i> creado en el ciclo 5. . . . .	139
A.5	(a) <i>contexto-actual</i> creado en el ciclo 6; (b) <i>contexto-actual</i> creado en el ciclo 7. . . . .	140

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

A.6	(a) <i>contexto-actual</i> modificado al final del ciclo 7; (b) <i>contexto-actual</i> creado en el ciclo 8. . . . .	141
A.7	Ejemplifica las correspondencias parciales entre el <i>contexto-actual</i> del ciclo 8 y los esquemas básicos. Se consideran correspondencias parciales porque sólo una de las dos respuestas afectivas del <i>contexto-actual</i> corresponde con la única respuesta afectiva de los esquemas <i>Basic Schema<sub>1</sub></i> , <i>Basic Schema<sub>2</sub></i> y <i>Basic Schema<sub>3</sub></i> . Las correspondencias se encuentran marcadas en rojo y en azul. . . . .	143
A.8	(a) <i>contexto-actual</i> creado en el ciclo 9; (b) <i>contexto-actual</i> modificado al final del ciclo 9. . . . .	144
A.9	Primer esquema desarrollado que construye el agente. . . . .	145
A.10	(a) <i>contexto-actual</i> creado en el ciclo 10; (b) <i>contexto-actual</i> modificado al final del ciclo 10. . . . .	146
A.11	Esquemas existentes en el ciclo 10. . . . .	146
A.12	Ejemplifica cómo en el ciclo 11 se agrega el <i>contexto-actual</i> del ciclo 10 al conjunto “Expectations Fulfilled” del esquema <i>DevelopedSchema<sub>1</sub></i> . 148	
A.13	(a) Contexto-actual creado en el ciclo 12; (b) Contexto-actual al final del ciclo 12. . . . .	149
A.14	Ejemplifica cómo en el ciclo 13 se agrega el <i>contexto-actual</i> del ciclo 12 al conjunto “Expectations NOT Fulfilled” del esquema <i>Developed Schema<sub>1</sub></i> . 150	
A.15	Contexto-actual creado en el ciclo 13. . . . .	150
A.16	Contextos asimilados al primer esquema desarrollado, en el ciclo 75. . . . .	151
A.17	Los tres nuevos esquemas creados en el ciclo 75 a consecuencia de un proceso de diferenciación del esquema <i>Developed Schema<sub>1</sub></i> . . . . .	152
A.18	Los tres esquemas diferenciados se generalizan en un solo esquema, en el ciclo 75. . . . .	153
A.19	Esquemas existentes al final del ciclo 75. . . . .	154
A.20	(a) <i>contexto-actual</i> creado en el ciclo 325; (b) <i>contexto-actual</i> al final del ciclo 326. . . . .	155

A.21 Ejemplifica la correspondencia parcial que realiza <i>Dev E-R</i> entre el <i>contexto-actual</i> del ciclo 325 y el esquema desarrollado <i>Developed Schema<sub>1</sub></i> .	156
A.22 Contexto actual creado en el ciclo 326. . . . .	157
A.23 Nuevo esquema creado en el ciclo 326 como resultado del cumplimiento de las expectativas disparadas por la correspondencia parcial de la Figura A.21. . . . .	158
A.24 Conjunto de esquemas que forman parte de la base de conocimiento del agente en el ciclo 326. . . . .	159
A.25 (a) <i>contexto-actual</i> creado en el ciclo 576; (b) <i>contexto-actual</i> al final del ciclo 576. . . . .	160
A.26 Ejemplifica la correspondencia parcial que realiza <i>Dev E-R</i> entre el <i>contexto-actual</i> del ciclo 576 y el esquema desarrollado <i>Developed Schema<sub>2</sub></i>	161
A.27 Contexto actual creado en el ciclo 577. . . . .	162
A.28 Nuevo esquema creado en el ciclo 577 como resultado del cumplimiento de las expectativas disparadas por la correspondencia parcial de la Figura A.26. . . . .	162
A.29 Conjunto de esquemas que forman parte de la base de conocimiento del agente en el ciclo 577. . . . .	164
A.30 Resume el proceso de construcción del conocimiento del agente cuando éste puede tocar pero no ver su mundo. . . . .	165
A.31 Continuación (parte 2) del resumen del proceso de construcción del conocimiento del agente cuando éste puede tocar pero no ver su mundo.	166
A.32 Continuación (parte 3) del resumen del proceso de construcción del conocimiento del agente cuando éste puede tocar pero no ver su mundo.	167
A.33 Continuación (parte 4) del resumen del proceso de construcción del conocimiento del agente cuando éste puede tocar pero no ver su mundo.	168



# Índice de tablas

4.1	Resume las características de los objetos que se encuentran en el mundo virtual del agente. . . . .	29
4.2	El repertorio inicial de acciones físicas, también llamadas acciones externas, que el agente puede realizar. . . . .	30
4.3	Lista el repertorio inicial de acciones internas que el agente puede realizar. . . . .	41
4.4	Resume las situaciones bajo las cuales se disparan las diferentes respuestas afectivas, estados emocionales y motivaciones. . . . .	43
6.1	Valores y descripciones de los principales parámetros de <i>Dev E-R</i> usados en los experimentos. . . . .	71
6.2	Valores y descripciones de los principales parámetros de <i>Dev E-R</i> usados en el segundo conjunto de experimentos. . . . .	92



*“Begin at the beginning,” the King  
said, very gravely, “and go on till  
you come to the end: then stop.”*

Lewis Carroll, *Alice in  
Wonderland*

CAPITULO

# 1

## Introducción

La creatividad es una característica fascinante de los seres humanos, la cual se ha relacionado con otras capacidades y comportamientos importantes como la innovación, imaginación, inteligencia, originalidad, descubrimiento, solución de problemas, y en particular con la adaptación o adaptabilidad. Con respecto a esta última, la habilidad de ser capaces de ajustarnos a nuestro ambiente se ha visto tradicionalmente (quizás desde Darwin) como un prerrequisito para el comportamiento verdaderamente creativo (Gorney, 2007; Runco, 2007, p. 398). Estas dos están tan relacionadas entre sí, que incluso Leonora Cohen considera a la adaptación como el sinónimo más cercano de la creatividad (Cohen, 1989 citado en Runco, 2007, p. 44), quien describe a esta última como una serie de comportamientos adaptativos en un continuo de siete niveles de desarrollo. Inicialmente, la creatividad involucra la adaptación del individuo al mundo y, en los niveles más altos, involucra la adaptación del mundo al individuo. El primer nivel es llamado *Learning Something New: Universal Novelty*, el cual es similar al concepto de *little c creativity* de Kozbelt et al. (2010) o como Beghetto & Kaufman (2007) sugirieron, *mini-c creativity*. Este tipo de creatividad se refiere a aquella que resulta en productos o comportamientos que son útiles y nuevos para

## 1. Introducción

---

el individuo, pero que no son raros ni de valor para el mundo (Runco & Pritzker, 1999, p. 9). De acuerdo a su teoría, ésta se puede observar en los bebés y niños pequeños como resultado de su necesidad de comenzar a adaptarse al mundo.

Para Piaget la adaptación se da por medio de dos procesos complementarios a los que llamó *asimilación* y *acomodación*. El proceso de asimilación le permite a los niños enfrentarse a las nuevas situaciones haciendo uso de su conocimiento adquirido de experiencias pasadas. Por ejemplo, imaginemos que a un bebé se le ofrece un objeto desconocido y que éste lo agarra y lo succiona como lo ha hecho anteriormente con artículos similares. Podemos entonces interpretar este comportamiento como que el infante aprende que los nuevos elementos se pueden tratar de la misma manera que los ya conocidos. Sin embargo, ¿qué pasa si ahora se le ofrece un objeto muy pequeño, que por lo mismo no lo puede agarrar? En este caso, él experimenta un conflicto cognitivo debido a que su información del mundo no concuerda con la realidad. Cuando surge tal conflicto, el proceso de acomodación permite que los niños se enfrenten a la nueva situación modificando progresivamente su conocimiento (a través de la continua interacción con su ambiente), con la finalidad de incorporar los resultados de sus nuevas experiencias. Así, el bebé eventualmente aprende que puede agarrar los objetos pequeños si usa sus dedos a manera de pinzas. De esta manera, la actividad creativa adaptativa del primer nivel de Cohen nos ayuda a adecuarnos a nuestro mundo, ya sea modificando nuestra percepción del ambiente para que ésta se ajuste a nuestro conocimiento adquirido en experiencias pasadas (es decir, adaptación por asimilación), o modificando y creando nuevo conocimiento cuando éste no se ajusta a la realidad (es decir, adaptación por acomodación).

Piaget consideró que cuando los niños interactúan con su ambiente haciendo uso de su conocimiento previamente adquirido, se encuentran en un estado que llamó *equilibrio cognitivo*. Por el contrario, cuando tal interacción provoca que su conocimiento se conflictúe con la realidad, entonces entran en un momento de crisis llamado *desequilibrio cognitivo*. Así mismo, sugirió que el movimiento del equilibrio al *desequilibrio* y de nuevo al equilibrio (por medio de la acomodación) promueve que los niños evolucionen a través de cuatro estadios

---

sucesivos de pensamiento cualitativamente diferentes, los cuales abarcan desde el nacimiento hasta la edad adulta. El primero de ellos se llama estadio o periodo sensoriomotor, el cual inicia desde el nacimiento y termina alrededor de los 2 años de edad (aproximadamente el mismo periodo de tiempo en el que se observa la creatividad adaptativa del primer nivel de Cohen). De acuerdo a su teoría, este primer estadio se divide a su vez en seis subestadios (resumidos en la sección 3.1.2), cada uno de los cuales se caracteriza por el surgimiento de nuevas habilidades. Por ejemplo, el primer subestadio se caracteriza porque los comportamientos del niño corresponden a conductas reflejas, como el cerrar automáticamente la mano cuando un objeto entra en contacto con ésta; el segundo subestadio se caracteriza por la adquisición de comportamientos centrados en su cuerpo, tales como el aprender a seguir visualmente o a mantener agarrados los objetos de su interés; el tercer subestadio se caracteriza por la adquisición de conductas que involucran consecuencias en objetos externos, tales como el aprender a apretar un pato de hule para que haga “quack”, así como porque el niño comienza a diferenciar entre fines y medios; el cuarto subestadio se caracteriza por que los comportamientos comienzan a estar orientados a metas; el quinto subestadio se caracteriza porque el niño durante esta etapa comienza a realizar pseudo-experimentos que le ayudan a descubrir nuevos medios para llegar a sus metas; y el sexto subestadio se caracteriza porque el niño comienza a inventar nuevos comportamientos en respuesta a un problema al que se enfrenta, tal como usar un palo para alcanzar un objeto. Piaget le llamó desarrollo cognitivo a la evolución a través de los distintos subestadios y estadios.

La primera etapa de desarrollo, es decir, el periodo sensoriomotor, es sumamente interesante tanto desde el punto de vista de la creatividad como del desarrollo cognitivo. Por un lado, porque durante ella surgen en los niños las primeras manifestaciones de comportamientos creativos, ya que es en ésta en la que: 1) deben de comenzar a construir su conocimiento del mundo, y tal construcción requiere de creatividad; y 2) sus conductas empiezan a estar orientadas a metas, la cual es una habilidad necesaria para que posteriormente puedan comenzar a solucionar problemas (Scandura 1977, define la solución de problemas

## 1. Introducción

---

como: “the generation and selection of discretionary actions to bring about a goal state.”); capacidad que se ha considerado como una forma de creatividad (Runco, 2007). Y por otro lado, porque es durante ésta que se presentan las primeras manifestaciones de inteligencia en los niños, y en donde elaboran sus primeras estructuras cognitivas que le servirán como base para la construcción de conocimiento y comportamientos más complejos en las siguientes etapas de desarrollo. Por estas razones Piaget mismo lo consideró como el periodo más creativo de la vida (Runco & Pritzker, 1999, p. 13).

De esta manera, durante la etapa de la niñez temprana utilizamos nuestra creatividad para ir construyendo nuestro conocimiento del mundo, el cual se crea por medio de la continua adaptación a éste, provocándonos pasar de estados de equilibrio a estados de desequilibrio y de vuelta al equilibrio, lo que nos lleva a desarrollarnos cognitivamente. Es así que la creatividad, adaptación y desarrollo cognitivo están fuertemente relacionados.

**Objetivo.** El presente trabajo de investigación tiene como objetivo crear un modelo computacional, que inspirado en la teoría de Piaget, simule los procesos de *asimilación*, *acomodación* y *equilibración* implementándolos con una versión extendida del modelo computacional del proceso creativo *Engagement-Reflection* (Pérez y Pérez & Sharples, 2001, 2004; Pérez y Pérez, 2007). Es decir, se desea simular el proceso del desarrollo cognitivo como una actividad creativa. Para probar el modelo propuesto, es también un objetivo el crear un agente artificial que lo implemente. Dicho agente se debe inicializar con comportamientos básicos que representen conductas reflejas y a partir de ahí debe de ser capaz de construir de manera autónoma nuevos comportamientos (a través de la interacción y adaptación a su ambiente) característicos del primer, segundo y tercer subestadios del periodo sensoriomotor. Es decir, debe mostrar un desarrollo cognitivo.

**Motivaciones.** Construir este tipo de sistemas ayuda a investigar los modelos procedentes de las ciencias del desarrollo, como es sugerido por Mareschal

---

& Thomas (2006); a los ingenieros y científicos de la computación a desarrollar nuevas metodologías para la construcción de mejores sistemas artificiales que muestren mayor inteligencia y autonomía; y a los investigadores en creatividad computacional a comprender mejor el proceso creativo. Por ejemplo, una de las principales motivaciones detrás de este tipo de sistemas, proviene de la idea de que puede ser más sencillo construir un agente artificial que simule a un bebé para luego dejarlo que aprenda hasta llegar a un nivel adulto, que directamente implementar toda la complejidad de la mente adulta (ver p. ej. Turing, 1950, p. 18-21; Guerin, 2011a). Esta es una motivación compartida por una comunidad de investigadores en inteligencia artificial, en particular en lo que se llama *Developmental Artificial Intelligence* o *developmental approach to AI* (ver por ejemplo Weng et al., 2001; Lungarella et al., 2003; Guerin, 2011a).

**Organización de la tesis.** Este trabajo de investigación está organizado como sigue. El capítulo 2 presenta un resumen de los trabajos previos relacionados. El capítulo 3 introduce brevemente la teoría de Piaget y el modelo computacional *Engagement-Reflection*, teorías que fundamentan esta investigación. El capítulo 4 presenta la descripción de un agente artificial que construimos para que pueda interactuar con un ambiente virtual, haciendo uso de los mecanismos de adaptación que proponemos y describimos a detalle en el capítulo 5. En el capítulo 6 se describen los experimentos y resultados obtenidos al dejar al agente interactuar con diferentes mundos virtuales y con diferentes configuraciones. En el capítulo 7 se proponen algunos criterios para evaluar este tipo de sistemas y los usamos para evaluar nuestro modelo. En el capítulo 8 se presentan las conclusiones y trabajo a futuro. Con el objetivo de lograr un mejor entendimiento del modelo propuesto, en el apéndice A se describe un ejemplo paso a paso que muestra el desarrollo de las habilidades táctiles del agente. Finalmente, en el apéndice B se listan las publicaciones derivadas de este trabajo de investigación.



“*Learning never exhaust the mind*”

Leonardo da Vinci

CAPITULO

# 2

## Investigación Relacionada

Alan Turing (quien ha sido considerado como el padre de las ciencias de la computación y de la inteligencia artificial) fue el primero en conceptualizar la idea de construir un programa que simulara un bebé artificial, al que después se educaría de manera similar a como se educan a los niños, hasta que lograra un nivel de adulto (Turing, 1950). Él estimó que sería más fácil hacerlo de esta manera, que programar directamente la inteligencia de un adulto. Sin embargo, esta aproximación no recibió mucha atención durante los siguientes 40 años, hasta que Drescher (1991) presentó como su trabajo doctoral la simulación de un bebé artificial, cuyo objetivo era replicar algunos de los aspectos clave del desarrollo cognitivo que se dan durante la etapa sensoriomotora descrita por Piaget.

A principios de los años 90's, bajo la influencia de la idea de que el comportamiento inteligente sólo puede surgir de la interacción entre la mente, el cuerpo y el medio ambiente (llamado “embodiment”, y teorizado por ejemplo por Brooks, 1991; Varela et al., 1991; Clark, 1997; and Beer et al., 1998), surgió una nueva área de investigación llamada *developmental robotics* (a veces también llamada *epigenetic robotics*). Esta área de investigación se crea como la intersección

## 2. Investigación Relacionada

---

entre la robótica y las ciencias del desarrollo (en particular de la psicología del desarrollo y de la neurociencia del desarrollo). De esta manera, por un lado utiliza a los robots para implementar e investigar los modelos procedentes de las ciencias del desarrollo, y por otro busca diseñar mejores sistemas robóticos al aplicar conocimiento adquirido de estudios sobre el desarrollo cognitivo. Lungarella et al. (2003) presentan una revisión completa de esta área emergente. También presentan los marcos teóricos existentes para la creación de robots que se desarrollan: *developmental engineering* (ver p. ej. Elliott & Shadbolt, 2003; Sandini et al., 1997; Metta et al., 2001), *cognitive developmental robotics* (ver p. ej. Asada et al., 2001), y *autonomous mental development* (ver p. ej. Weng et al., 2001).

Guerin (2011a) presenta en su artículo *learning like a baby*, una revisión de aquellos trabajos que: (1) abordan los problemas de la inteligencia artificial desde una perspectiva del desarrollo, (2) el aprendizaje se da en un dominio que tiene cierta similitud con el mundo físico natural con el cual estamos familiarizados, y (3) que están enfocados específicamente en aprendizaje temprano (es decir, programas que intentan aprender partiendo de un nivel mínimo de conocimiento innato).

La comunidad de vida artificial también ha mostrado un interés en modelar organismos que se desarrollen. Su investigación se enfoca en la implementación de agentes artificiales a los cuales se les provee de un cuerpo (físico o simulado), de un ambiente con el cual interactúan, de un genotipo heredado (es decir, de información heredada que determina su comportamiento y sus habilidades cognitivas), y que son miembros de poblaciones que evolucionan (es decir, nacen, se desarrollan, posiblemente se reproducen, y mueren). Por ejemplo, Parisi & Schlesinger (2002) introdujeron el concepto de *Artificial Life Neural Network*, la cual usan para ilustrar cómo varios elementos clave de la teoría de Piaget (p. ej. esquemas sensoriomotores) pueden ser investigados dentro del marco de trabajo de la vida artificial.

Además de la propuesta de Parisi acerca de modelar algunos aspectos de la teoría del desarrollo cognitivo de Piaget, ha habido otras aproximaciones (ver

---

Stojanov, 2009). Una de las investigaciones pioneras que se inspiró en la teoría de Piaget para implementar un agente que realiza planificación y aprendizaje de manera simultánea, es el trabajo que Lemaitre presentó como su proyecto doctoral en 1974 (Lemaitre, 1974). También se han creado modelos conexionistas que proveen implementaciones computacionales de los procesos de asimilación y acomodación (ver p. ej. McClelland, 1995; Shultz et al., 1995). En estos modelos, la asimilación se representa como el flujo de activación a través de la red neuronal, mientras que la acomodación se representa como la modificación de los pesos de las conexiones o de la arquitectura de la red, para reducir el error de la salida. Otro ejemplo representativo es el previamente mencionado trabajo de Drescher (1991), quien propuso un modelo computacional del mecanismo de esquemas de Piaget, el cual está basado en probabilidades marginales. Su programa opera en un micromundo (una cuadrícula de 7 x 7 con algunos objetos que se pueden agarrar y mover) y controla un robot “bebé” simulado que posee un cuerpo. Su trabajo ha sido muy influyente, y varias investigaciones subsecuentes han estado inspiradas por éste (ver p. ej. Holmes & Isbell., 2005; Chaput, 2004; Stojanov, 2001; Perotto et al., 2007; Guerin & McKenzie, 2008).

Con lo que respecta a los modelos computacionales del proceso creativo, éstos suelen enfocarse en dominios particulares como la generación de pinturas, narrativas, música, etc., (ver por ejemplo Gervás, 2001; Manurung et al., 2008; Ritchie, 2007; Colton, 2012). Sin embargo, hasta donde nosotros sabemos, no existen propuestas computacionales enfocadas al estudio de la génesis de la creatividad. El modelo computacional *Engagement-Reflection*, el cual empleamos en este trabajo, ha sido aplicado exitosamente a varios dominios como la generación de narrativas (Pérez y Pérez & Sharples, 2001, 2004; Pérez y Pérez, 2007), solución de problemas en geometría (Acosta & Pérez y Pérez, 2005, 2006), diseño de interiores (Pérez y Pérez et al., 2010), entre otros. La idea básica de dicho modelo es representar un estado de generación automática de ideas (*Engagement*) y otro de evaluación y modificación analítico de las mismas (*Reflection*). En la sección 5 explicamos en detalle su funcionamiento en el contexto del desarrollo cognitivo.



*“It is with children that we have the best chance of studying the development of logical knowledge, mathematical knowledge, physical knowledge, and so forth.”*

Jean Piaget

CAPITULO

# 3

## Fundamentos

### 3.1 Teoría del Desarrollo Cognitivo de Piaget

A principios del siglo XX, Jean Piaget inició un programa de investigación en Ginebra, Suiza, el cual probablemente ha sido uno de los programas que mayor impacto ha tenido en las teorías contemporáneas del desarrollo cognitivo. Formado como biólogo, Piaget también mostró interés en la filosofía y estaba especialmente curioso acerca de los orígenes del conocimiento, una rama de la filosofía conocida como epistemología. Para descubrir de dónde surge el conocimiento y las formas que toma conforme se desarrolla, Piaget y sus colegas llevaron a cabo una serie de estudios que produjeron diversas ideas acerca de cómo piensan y aprenden los niños del mundo que los rodea.

El trabajo de Piaget probablemente sigue siendo tan popular hoy en día debido a que es una teoría global del desarrollo intelectual, que incorpora diversos temas tales como el lenguaje, el razonamiento lógico, los juicios morales y las concepciones del tiempo, espacio y número. A continuación se describen las ideas esenciales de su teoría.

#### 3.1.1 Principios y Conceptos Centrales en la Teoría de Piaget

- *Los niños son aprendices activos y motivados.* Piaget propone que los infantes son naturalmente curiosos acerca de su mundo y buscan activamente información que les ayude a comprenderlo. De tal forma que en vez de simplemente responder a los estímulos que encuentran, ellos los manipulan y observan los efectos de sus acciones.
- *Los niños organizan lo que aprenden a partir de sus experiencias.* Los infantes no juntan simplemente las cosas que aprenden en una colección de hechos aislados, sino que juntan sus experiencias de una manera integrada que les indica cómo opera el mundo. Por ejemplo, cuando observan que la comida, juguetes y otros objetos siempre caen cuando se sueltan, ellos comienzan a construir un entendimiento básico acerca de la gravedad. Es así que Piaget describe el aprendizaje como un proceso constructivo: los niños crean y no simplemente absorben su conocimiento del mundo. Usando su terminología, lo que los infantes aprenden se organiza en estructuras cognitivas llamadas **esquemas**, los cuales son usados repetidamente en respuesta al ambiente. Inicialmente, éstos son principalmente conductuales por naturaleza, pero con el tiempo se convierten de manera incremental en mentales y eventualmente en abstractos. Por ejemplo, un niño podría tener un esquema para agarrar y lo aplica para tomar cualquier cosa. Un adolescente podría tener ciertos esquemas relacionados con el pensamiento lógico que podrían ser aplicados al razonamiento acerca de una variedad de aspectos sociales, políticos o morales. Piaget propone que los niños usan sus esquemas recientemente adquiridos una y otra vez tanto en situaciones familiares como en las novedosas. Conforme se desarrollan emergen nuevos esquemas y los existentes se practican repetidamente, los cuales ocasionalmente se modifican y algunas otras veces se integran con otros. Una gran parte de su teoría se enfoca en las estructuras cognitivas que gobiernan el razonamiento lógico.

### 3.1 Teoría del Desarrollo Cognitivo de Piaget

---

- *La interacción con el ambiente físico es crítica para el aprendizaje y para el desarrollo cognitivo.* En el proceso de interactuar con su ambiente los niños desarrollan y modifican sus esquemas, por ejemplo para aprender que algunos objetos pueden ser utilizados como herramientas para obtener otros. Así, al explorar y manipular el mundo que los rodea, llevando a cabo muchos pequeños “experimentos” con objetos y con sustancias, aprenden la naturaleza de sus características físicas tales como el volumen y peso, descubren principios relacionados con la fuerza y la gravedad, adquieren un mejor entendimiento de las relaciones causa y efecto, etc.
- *La interacción con otras personas es igualmente crítica para el aprendizaje y el desarrollo.* A pesar de que Piaget creía que el conocimiento y entendimiento de los niños acerca del mundo es en gran parte auto-construido, también tienen mucho que aprender de la interacción con otros.
- *Los niños se adaptan a su ambiente a través del proceso de asimilación y acomodación.* De acuerdo con Piaget, los niños interactúan con su ambiente a través de dos procesos conocidos como asimilación y acomodación. La asimilación es un proceso mediante el cual se interactúa con los objetos o eventos de una manera consistente con los esquemas existentes. Por ejemplo, un bebé que ve a su mamá usando unos aretes llamativos que penden de sus oídos, podría asimilar los aretes a su esquema de *agarrar*, tomándolos firmemente y jalándolos de manera similar en la que agarra sus biberones. Un ejemplo para el caso de un niño mayor, podría ser aquél en el que éste ya desarrolló un esquema para sumar dos manzanas y tres manzanas para tener finalmente cinco manzanas. En este caso podría usar este esquema conocido para enfrentarse a una nueva situación en la que involucre la suma de dos pesos y tres pesos. Sin embargo, existen situaciones en las que los niños no pueden interpretar fácilmente un objeto o evento nuevo usando sus esquemas existentes. En tales situaciones, ocurre alguna de las dos formas de *acomodación* haciendo que el infante: a) modifique un esquema existente para considerar el nuevo objeto o evento, o

### 3. Fundamentos

---

b) forme un esquema completamente nuevo para lidiar con esta nueva situación. Como un ejemplo de la primera forma de acomodación considera un niño que ya ha aprendido a gatear y que se encuentra por primera vez en su camino con unas escaleras, entonces él debe de ajustar su estilo de gatear para enfrentar la nueva situación. En contraste, como un ejemplo de la segunda forma de acomodación considera un niño que se encuentra por primera vez con una criatura larga con forma de serpiente que tiene cuatro patas, el cual después de hacer algo de investigación rechaza el esquema de *serpiente* debido a que las serpientes no tienen patas, en favor de la construcción de un nuevo esquema que represente a una *lagartija*.

La asimilación y la acomodación son procesos complementarios: la primera involucra el modificar nuestra percepción del ambiente para que se ajuste a un esquema, mientras que la segunda involucra el modificar un esquema o crear uno nuevo para ajustarse al ambiente. Desde el punto de vista de Piaget, los dos procesos van típicamente mano a mano, de tal forma que los niños interpretan los nuevos eventos dentro del contexto de su conocimiento existente (asimilación), pero también modifican su conocimiento como resultado de esos eventos (acomodación). De esta manera, el aprendizaje es mucho el resultado del proceso de acomodación, es decir, de modificar los esquemas existentes o de formar nuevos. Aún así, la asimilación es casi siempre una condición necesaria para que ocurra la acomodación. Debemos ser capaces de relacionar una nueva experiencia con lo que ya sabemos, antes de que podamos aprender de ésta. La idea de que es necesario que exista un traslape entre el conocimiento previo y la nueva información es un principio importante no solo en la teoría de Piaget, sino también en las teorías contemporáneas del aprendizaje cognitivo.

- *El proceso de equilibración promueve el progreso hacia formas de pensamiento cada vez más complejas.* Piaget sugirió que los niños se encuentran algunas veces en un estado de *equilibrio* en el que ellos pueden cómodamente interpretar y responder a los nuevos eventos usando sus esquemas existentes. Pero este equilibrio no continúa indefinidamente. Conforme los

### 3.1 Teoría del Desarrollo Cognitivo de Piaget

---

niños crecen, se encuentran frecuentemente con situaciones en las cuales su conocimiento actual y sus habilidades son inadecuadas. Tales situaciones crean un desequilibrio, un tipo de “incomodidad mental” que los estimula a tratar de darle sentido a lo que están observando. Al reemplazar, reorganizar o al integrar mejor sus esquemas (a través del proceso de acomodación), los niños eventualmente son capaces de comprender y de enfrentar eventos previamente misteriosos. El movimiento del equilibrio al desequilibrio y de vuelta al equilibrio se conoce como *equilibración*. Desde el punto de vista de Piaget, el proceso de equilibración junto con el deseo intrínseco de los niños por lograr un equilibrio promueve su desarrollo a niveles más complejos de pensamiento y de conocimiento.

- *Los niños piensan cualitativamente diferente en distintas edades.* Una de las principales aportaciones de la teoría de Piaget, es la descripción de cuatro etapas distintas que se dan durante el desarrollo cognitivo. Cada una de ellas cuenta con sus únicos patrones de pensamiento y se construye con las bases de las etapas anteriores. De tal manera, que los niños progresan a través de las cuatro etapas en la misma e invariante secuencia (en sus primeros escritos Piaget sugirió que las etapas eran universales). Él también especuló que el progreso a través de las cuatro etapas está limitado por la maduración neurológica, es decir, por cambios en el cerebro controlados genéticamente. En otras palabras, un infante es capaz de moverse de una etapa a la siguiente sólo cuando el cerebro madura lo suficiente como para habilitar las estructuras cognitivas y los procesos del pensamiento asociados con la siguiente etapa. Se ha visto que el cerebro continúa su desarrollo durante la infancia y la adolescencia, e incluso en los primeros años de la edad adulta. Muy posiblemente, este continuo desarrollo neurológico y especialmente el desarrollo de la corteza frontal, podría permitir el crecimiento de los seres humanos para pensar de maneras incrementalmente más sofisticadas. Sin embargo, a pesar de que algunos investigadores han encontrado evidencia de que ocurren cambios neurológicos significativos en las etapas de transición típicas para el progreso de una etapa cognitiva

### 3. Fundamentos

---

de Piaget a la siguiente (Epstein, 1978; Hudspeth, 1985), el cuándo tales cambios están específicamente relacionados con los cambios cognitivos que Piaget describió es aún una pregunta abierta.

#### 3.1.2 Etapas del Desarrollo Cognitivo

Piaget sugirió cuatro etapas del desarrollo cognitivo. En este trabajo estamos interesados sólo en la primera de ellas, la cual se describe a continuación.

##### 3.1.2.1 Etapa 1: Sensoriomotora (desde el nacimiento hasta aproximadamente los dos años de edad)

De acuerdo a Piaget, los comportamientos de los recién nacidos son sólo poco más que reflejos (respuestas biológicamente construídas a estímulos particulares, por ejemplo el succionar) que aseguran su supervivencia. Sin embargo, en su segundo mes de vida los niños comienzan a exhibir conductas voluntarias que repiten una y otra vez, reflejando el desarrollo de la percepción y de comportamientos basados en esquemas. Inicialmente éstos últimos se enfocan principalmente en los propios cuerpos del bebé (por ejemplo, en poner repetidamente algunos de sus dedos en sus bocas), pero eventualmente éstos involucran también a los objetos que los rodean.

Posteriormente, después de observar repetidamente que ciertas acciones llevan a ciertas consecuencias, los niños adquieren gradualmente conocimiento de relaciones causa-efecto en el mundo que los rodea. En este punto, ellos comienzan a interesarse en comportamientos dirigidos a metas, actuando de maneras en las que conocen que los llevarán a obtener los resultados deseados. Más o menos al mismo tiempo, adquieren el concepto de **permanencia de los objetos**, un entendimiento de que los objetos físicos continúan existiendo incluso cuando no están a su alcance visual.

Para la segunda mitad del segundo año, los niños comienzan a mostrar un **pensamiento simbólico**, es decir, desarrollan la habilidad para representar y pensar acerca de los objetos y eventos en términos de entidades mentales internas o de símbolos. De tal forma que se vuelven capaces de “experimentar” con objetos

### 3.1 Teoría del Desarrollo Cognitivo de Piaget

---

en sus mentes, primeramente prediciendo lo que sucederá si hacen algo a algún objeto y después poniendo sus planes en acción. Para este momento, ellos pueden también recordar e imitar comportamientos que han visto en otras personas (por ejemplo el pretender que hablan por teléfono usando alguno de sus juguetes). Tales pensamientos simbólicos, de acuerdo a Piaget, marcan el inicio del verdadero pensamiento.

Estos cambios que se dan en la primera etapa del desarrollo cognitivo, Piaget los dividió en seis subetapas o subestadios, los cuales resumimos a continuación.

1. **Ejercicio de los reflejos (0-1 mes):** en donde el niño comprende su ambiente a través de un conjunto de estructuras de conocimiento innatas (que él llamó esquemas) que corresponden a comportamientos reflejos. Por ejemplo, el cerrar la mano cuando un objeto entra en contacto con ésta.
2. **Reacciones circulares primarias (1-4 meses aproximadamente):** en donde el niño utiliza sus reflejos para adaptarse a su ambiente, los esquemas innatos se reemplazan por nuevos esquemas contruídos y las acciones se repiten debido a que éstas causan efectos placenteros en el infante. Por ejemplo, cuando un bebé succiona su pulgar por accidente causándole una sensación agradable, dando como resultado que repita la acción debido al placer que le causa.
3. **Reacciones circulares secundarias (4-8 meses aproximadamente):** en las cuales el niño repite intencionalmente acciones para disparar una respuesta en el ambiente. Por ejemplo, cuando un bebé aprieta por accidente su patito de hule y éste suena “quack”, entonces el bebé realiza nuevamente la acción de apretarlo debido a que considera que tal sonido es interesante. En este subestadio también se desarrolla la coordinación entre la visión y la prensión (la cual se describe con más detalle en la sección 3.1.5), así como la diferenciación entre fines y medios.

### 3. Fundamentos

---

4. **Coordinación de reacciones (8-12 meses aproximadamente):** en donde el niño comienza a explorar su ambiente y a imitar el comportamiento de otros, comúnmente combinando diferentes esquemas para actuar y obtener el efecto deseado.
5. **Reacciones circulares terciarias (12-18 meses aproximadamente):** en las cuales el niño realiza experimentación por prueba y error para descubrir nuevos métodos para enfrentar retos. Por ejemplo, cuando un bebé pisa un juguete y éste hace un sonido agradable, entonces él intenta realizar la acción de apretar el juguete para obtener un resultado similar.
6. **Representación temprana del pensamiento (18-24 meses aproximadamente):** la cual marca el comienzo del desarrollo de símbolos para representar objetos o eventos y el entendimiento del mundo del niño comienza a realizarse a través de operaciones mentales y no sólo a través de acciones.

#### 3.1.3 Inteligencia y Emociones

Piaget también se interesó en la relación entre la afectividad y el desarrollo de la inteligencia (Piaget, 1981). Para él, la afectividad es la fuerza que impulsa y regula el comportamiento, mientras que la cognición es aquella que provee las estructuras sobre las cuales se basa todo el comportamiento. Así, Piaget vio la afectividad y la inteligencia como dos componentes interdependientes e inseparables, que constituyen dos aspectos diferentes, pero complementarios, de cualquier acto de comportamiento. Una de sus contribuciones en este tema, fue el identificar los elementos afectivos presentes, en particular, durante los diferentes subestadios del periodo sensoriomotor. Él propuso que durante el primer subestadio los niños nacen con tendencias instintivas (p. ej. la tendencia a preservar la percepción luminosa, y la tendencia instintiva de la necesidad de conocer, llamada curiosidad cognitiva, la cual surge cuando la realidad difiere de sus expectativas indicando que las estructuras de conocimiento existentes no representan adecuadamente la realidad y que por lo tanto necesitan ser modificadas)

y con emociones sobre las cuales se comienza a desarrollar su sistema afectivo. Posteriormente, durante el segundo subestadio, identificó que surgen sentimientos ligados a las percepciones, como el placer, dolor, y sentimientos de agrado y desagrado. Durante el resto de los subestadios (a partir de los 6 u 8 meses, hasta la adquisición del lenguaje) surgen reacciones de terminación con sentimientos de éxito o fracaso.

#### 3.1.4 Desarrollo de la Visión de acuerdo a Piaget

Para Piaget (1952; 1954), durante el periodo sensoriomotor la visión se desarrolla en tres etapas, las cuales están basadas en el comportamiento. Es decir, en ¿por qué mirar? o en ¿cuál es el motor de la conducta de mirar?:

1. **Mirar por la necesidad de mirar.** Piaget propone que los esquemas del niño requieren alimento para sostenerse (es decir, objetos para asimilar) y que los objetos que ve a su alrededor cumplen tal función. Esto lo lleva a concluir que los bebés nacen con una necesidad de mirar (para alimentar sus esquemas), de donde se deriva una tendencia a conservar la percepción luminosa y a realizar un tanteo para recuperarla cuando ésta desaparece. Por lo tanto, en sus propias palabras, “If the child looks at moving objects it is simply because, at the beginning, they constitute an aliment for the activity of the glance”(Piaget, 1952, p. 65). Así, durante la primera etapa de desarrollo visual, el motor de la conducta de mirar es la necesidad misma de mirar.
2. **Mirar para reconocer.** Con el tiempo, conforme la percepción visual de los niños se va enriqueciendo y van logrando seguir con su mirada las manchas que se mueven, éstas se van convirtiendo en alimento más diferenciado para los esquemas; provocando que éstos se especialicen en alimentarse sólo de cierto tipo de objetos (p. ej. únicamente de aquellos que son de color rojo y que están cercanos). Cuando esto sucede, es decir, cuando un objeto se asimila a alguno de los esquemas especializados

### 3. Fundamentos

---

en alimentarse en ese tipo de objetos, Piaget considera que éste se ha reconocido. Es así que el mirar por la necesidad de mirar se transforma en mirar para reconocer. O en otras palabras, a mirar para asimilar los objetos a sus esquemas especializados. Ésta corresponde a la segunda etapa del desarrollo de la visión.

3. **Mirar para actuar.** Sin embargo, no es suficiente que un objeto sea reconocido cuando reaparece para que éste constituya por sí mismo un objeto sólido e independiente sobre el cual se puede ejercer alguna acción (recordemos que los bebés comienzan viendo los objetos de su alrededor como manchas luminosas que aparecen, se mueven y desaparecen). Para que esto pueda suceder, es preciso que los esquemas visuales estén coordinados con otros esquemas, tales como los esquemas de la prensión, de la audición o de la succión. Cuando ésto sucede es cuando el niño comienza a mirar para actuar, es decir, para agarrar un objeto, balancearlo, tirarlo, chuparlo, etc. El mirar para actuar corresponde a la tercera y última etapa de desarrollo de la visión.

#### 3.1.5 Desarrollo de la Prensión de acuerdo a Piaget

Para Piaget, la mano (junto con la boca, el ojo y el oído) es uno de los instrumentos más esenciales de que se sirve la inteligencia. Su actividad principal reside en la prensión. Piaget la consideró tan importante, que incluso comentó que la conquista definitiva de los mecanismos de prensión representa el inicio de las conductas complejas que caracterizan las primeras formas de la acción intencional. Sin embargo, es evidente que no podemos desasociar enteramente la función de la prensión de la del tacto, o de las coordinaciones entre la cinestesia, la visión, etc. Así, de acuerdo a Piaget, la función de la prensión se desarrolla en 5 etapas, las cuales no corresponden a unas edades definidas, pero su sucesión es necesaria (salvo por lo que se refiere quizás a la tercera etapa):

1. **Movimientos impulsivos y del puro reflejo.** Durante esta primera etapa el recién nacido cierra la mano cuando se ejerce presión sobre su palma,

como resultado del reflejo de prensión con el que nace. Así mismo, realiza movimientos impulsivos de los brazos, de las manos y de los dedos, que casi son continuos durante las primeras semanas (balanceo de los brazos, abrir y cerrar las manos, etc.).

2. **Prensión por la prensión, y la visión se adapta a los movimientos de la mano.** En esta segunda etapa el bebé logra agarrar y mantener los objetos en su mano sin verlos y sin intentar llevárselos a la boca. Este comportamiento es equivalente a las primeras actividades de la visión en donde el bebé “ve por ver”, pero en este caso es “agarra por agarrar”. Durante ésta etapa también se da la coordinación entre la visión y los movimientos generales de la mano. Es decir, el bebé logra seguir visualmente sus manos, pero solo puede mantenerlas dentro de su campo de visión con movimientos de su mirada más no con movimientos de sus manos. Mucho menos, es capaz de llevarlas a su vista. En otras palabras, la visión se adapta a los movimientos de la mano, pero la recíproca no es todavía cierta. Más adelante, en esta misma etapa se observa un inicio de reconocimiento táctil. De tal forma que el bebé logra reconocer perfectamente su nariz, sus ojos, y sus manos al tacto.
3. **Coordinación entre la prensión y la succión, y la limitación de los movimientos de la mano al campo de visión.** Durante esta tercera etapa, el bebé logra agarrar los objetos y llevárselos a la boca, y recíprocamente, sucede que la mano se apodera de los objetos que la boca chupa. Con respecto a la visión, durante esta etapa el bebé ya ejerce una influencia sobre los movimientos de la mano. Por ejemplo, el hecho de mirarla parece aumentar su actividad, o al contrario, a limitar sus desplazamientos en el interior del campo visual. Con este avance en su desarrollo, se comienza a observar que cuando la mano aparece por azar en el campo de visión del bebé, ésta tiende a permanecer en él. Así, surge un inicio de adaptación recíproca: la mano tiende a conservar y a repetir aquellos movimientos que el ojo contempla, y el ojo tiende a mirar cuanto hace la mano. O en

### 3. Fundamentos

---

otros términos, la mano tiende a asimilar a sus esquemas el dominio visual del mismo modo que el ojo asimila a los suyos el dominio manual.

Pero, ¿cómo explicar el surgimiento de esta asimilación recíproca? De acuerdo a Piaget, llega un momento en el que el niño descubre la relación de la imagen visual de las manos con el movimiento de éstas. De tal forma, que cuando mira su mano que actúa, por un lado se siente inclinado por su interés visual a prolongar el espectáculo (es decir, a no separar su mirada de su mano), y por otra parte se siente inclinado por su interés cinestésico y motor a prolongar esta actividad manual (es decir, a continuar moviendo su mano para verla). Es entonces cuando se opera la coordinación de los dos esquemas, no ya por asociación, sino por asimilación recíproca: el niño descubre que puede agitar con sus manos la imagen que contempla, al igual que puede mirar con sus ojos el movimiento que producen. Así, mientras que antes los objetos táctiles únicamente servían de alimento a los esquemas manuales, ahora los cuadros visuales se convierten también en alimento para los ejercicios de la mano. Concluyendo, durante esta etapa se da al menos la conjunción de tres tipos de esquemas: los de la succión, la visión y la actividad motriz de la mano con la exclusión de la prensión propiamente dicha.

- 4. Prensión desde que el niño percibe simultáneamente su mano y el objeto deseado.** A partir de la cuarta etapa el niño logra agarrar los objetos que ve, a diferencia de la etapa anterior en la que solo podía agarrar aquellos que tocaba o chupaba. La única limitación que todavía existe, y que opone la cuarta a la quinta etapa, es que el niño no intenta agarrar los objetos vistos más que en la medida en que percibe, dentro del mismo campo visual, su propia mano. ¿Cómo explicar el surgimiento de este comportamiento? Para Piaget la respuesta consiste en decir que la visión simultánea de las manos y del objeto suscita la aparición de una nueva estructura que ni la visión de las manos ni la del objeto bastaba para hacer surgir. Es importante subrayar que esta estructura no aparece de pronto, sino más bien

surge en relación con una serie de búsquedas anteriores y de coordinaciones entre la visión y los movimientos de la mano. De tal forma, que una vez que los esquemas visuales y los esquemas sensoriomotores de la mano se han asimilado mutuamente, en el transcurso de la tercera etapa (el ojo mira la mano del mismo modo que la mano reproduce algunos de los movimientos que el ojo ve), una coordinación semejante se aplica tarde o temprano al acto mismo de la prensión: al mirar la mano que agarra un objeto, el niño pretende, con la mano, mantener en acción el espectáculo que contempla el ojo, del mismo modo que continúa, con el ojo, mirando lo que hace la mano. Una vez constituido este doble esquema de “mirar-agarrar”, el niño comenzará a intentar asir un objeto cuando mira al mismo tiempo su mano.

5. **El niño agarra lo que ve sin limitaciones relativas a la posición de la mano.** Durante la quinta y última etapa, la coordinación entre la visión y la prensión es ahora suficiente para que todo objeto que atraiga la atención de la mirada origine un movimiento de prensión incluso cuando la mano no es percibida dentro del mismo campo visual que el objeto. ¿Cómo explicar esta última coordinación? Para Piaget, este último logro se puede concebir como el desenlace de la asimilación recíproca entre los esquemas visuales y los esquemas manuales. Es decir, ya durante la segunda etapa la mirada intenta seguir (y por consiguiente asimilar) todo lo que hace la mano. Durante la tercera etapa la mano intenta, en cambio, reproducir aquellos de sus movimientos que el ojo mira, o en otras palabras, intenta asimilar a los esquemas manuales el dominio visual. En el transcurso de la cuarta etapa, esta asimilación de lo visual a lo manual se extiende a la misma prensión, cuando la mano aparece en el mismo campo de observación que el objeto que trata de asir: de este modo la mano se apodera de lo que el ojo mira, del mismo modo que el ojo tiende a contemplar lo que la mano agarra. Durante la quinta etapa, por último, la asimilación recíproca es completa: todo lo que es susceptible a ser visto lo es también a ser agarrado, y todo lo que se agarra se ha de ver también.

#### 3.1.6 Principales fortalezas y debilidades de su teoría

Piaget ha sido ampliamente reconocido como aquél que identificó las preguntas clave que han estado en la agenda de la investigación del desarrollo cognitivo durante los últimos 70 años. Por ejemplo, él fue posiblemente el primer hombre en preguntarse cómo surgía el razonamiento lógico y abstracto de los adultos, a partir de los simples reflejos presentes en los recién nacidos (Piaget, 1971; Boden, 1995). Desafortunadamente, falló en aterrizar muchas de sus propuestas teóricas debido en parte a la falta de vocabulario apropiado con el cual pudiera expresar sus ideas (Boden, 1988).

En lo que respecta al periodo sensoriomotor, el trabajo de Piaget ha sido criticado por sus deficiencias científicas. Por ejemplo, a que basó sus conclusiones únicamente en las observaciones de sus tres hijos, lo cual difícilmente se puede considerar una muestra representativa. Adicionalmente, en años recientes docenas de investigadores han trabajado en mostrar que Piaget subestimó las capacidades de los niños (es decir, en mostrar que éstos son mucho más inteligentes de lo que él consideró), encontrando por ejemplo que los infantes muestran signos preliminares de permanencia de objetos tan tempranamente como a los dos meses y medio y continúan reafirmando ésta comprensión por un periodo de varios meses (Baillargeon, 2004). Así mismo, ha recibido críticas con respecto a que las etapas de desarrollo no son tan discretas y bien definidas como lo propuso.

Sin embargo, a pesar de sus debilidades su teoría presenta ideas generales y unificadas que capturan aspectos esenciales del desarrollo cognitivo. Por ejemplo, algunas de sus principales ideas respecto del aprendizaje y la motivación son compatibles con las teorías contemporáneas y a pesar de que fue vago acerca de cómo podrían trabajar la asimilación y la acomodación (Flavell et al., 2002), la mayoría de los teóricos del aprendizaje comparten el principio de que el nuevo aprendizaje se construye a partir del conocimiento previo. Muchos otros también creen que el aprendizaje, como Piaget lo propuso, es un proceso constructivo. Así mismo, muchos otros teóricos de la motivación comparten las creencias de Piaget con respecto a que gran parte de la motivación de los humanos para aprender y desarrollarse proviene del interior de ellos mismos y que tales motivacio-

### 3.2 El Modelo Computacional del Proceso Creativo: Engagement-Reflection

---

nes son causadas en parte por las experiencias que los conflictúan. De hecho, concuerdan en que la experimentación de malestar (desequilibrio) motiva a las personas a realizar una mayor exploración de aprendizaje. Así, parece que los niños y adultos están naturalmente inclinados a tratar de darle sentido a la gente, objetos y eventos que los rodean. Además, a pesar de que algunos investigadores contemporáneos cuestionan las edades en las cuales aparecen varias habilidades, en general existen resultados de investigaciones que confirman la secuencia de etapas que propuso Piaget. Es decir, que parece que los niños se mueven a través de las diferentes subetapas y etapas en el orden en que Piaget las propuso. Esto es particularmente cierto para el periodo sensoriomotor (Harris, 1983).

Es así, que a pesar de las deficiencias en su teoría, las ideas de Piaget han sido una influencia enorme en el estudio de la psicología del desarrollo, provocando que se cambiara la manera en que la gente concebía el mundo de los niños y por lo tanto causando que se cambiaran los métodos para estudiarlos.

### 3.2 El Modelo Computacional del Proceso Creativo: Engagement-Reflection

Pérez y Pérez desarrolló en 1999 (Pérez y Pérez, 1999) un modelo computacional del proceso creativo al cual llamó *Engagement-Reflection* (abreviado *E-R*). Dicho modelo fue usado inicialmente para el desarrollo de un programa que escribe historias acerca de los Mexicas, los antiguos habitantes del Valle de México (Pérez y Pérez & Sharples, 2001, 2004). Posteriormente se usó para la generación de soluciones creativas de problemas geométricos (Acosta & Pérez y Pérez, 2005, 2006), en diseño de interiores Pérez y Pérez et al. (2010) y en la generación de composiciones visuales (Pérez y Pérez et al., 2013), entre otros.

El modelo *E-R* está basado en las ideas expresadas por diferentes investigadores y que Mike Sharples recolecta y emplea para describir cómo funciona el proceso creativo cuando escribimos textos literarios (Sharples, 1999). En forma muy general, los conceptos desarrollados por Sharples se pueden resumir de la siguiente manera: el proceso creativo consiste en un ciclo constante entre dos

### 3. Fundamentos

---

estados mentales conocidos como estado E (*engagement*) y estado R (*reflection*). Durante el estado E las personas estamos totalmente inmersas en la generación de secuencias de nuevas ideas por medio de asociaciones: una idea produce un contexto que nos lleva a asociar otra nueva idea, la cual lleva a una más, y así sucesivamente. Un típico ejemplo del estado E es soñar despierto, donde claramente se observa cómo una idea se liga a otras a veces sin conexión aparente entre ellas; este tipo de asociaciones permite ir desarrollando en forma novedosa un texto (o una melodía, etc.) en la cual se está trabajando. Como característica principal, durante este período no hacemos ningún tipo de evaluación sobre el material generado, simplemente dejamos que fluyan las secuencias de ideas. El estado E se interrumpe cuando somos distraídos por alguien o por algo, o cuando no podemos generar más material produciéndose un bloqueo de ideas. Durante el estado R evaluamos que el material generado satisfaga los requerimientos de la tarea en marcha (no es lo mismo escribir un cuento para niños que un cuento de terror); en caso necesario modificamos el material producido para satisfacer dichos requerimientos. Esta evaluación produce una serie de lineamientos o constricciones que condicionan la generación de material durante el estado E. Por ejemplo, si una persona está escribiendo un cuento muy aburrido, esta evaluación lo alerta para así tratar de asociar eventos más interesantes. Una vez que se han completado las evaluaciones volvemos al estado E y el ciclo continúa.

En este trabajo usamos estas ideas esenciales del modelo *E-R* para modelar el desarrollo cognitivo como un proceso creativo, como se explica a detalle en el capítulo 5.

*The most exciting phrase to hear in science, the one that heralds new discoveries, is not “Eureka!” but “That’s funny...”*

Isaac Asimov

CAPITULO

# 4

## Jacques, el Agente que se Desarrolla

En este capítulo presentamos la descripción de un agente virtual, a quien llamamos *Jacques* (en referencia a una de las hijas de Jean Piaget llamada Jacqueline, quien fue objeto de estudio e inspiración de dicho autor). La idea principal es que éste se inicialice con estructuras de conocimiento básicas que representen conductas innatas características de la primera subetapa del periodo sensorio-motor, y que a partir de ahí sea capaz de crear nuevos comportamientos típicos de las siguientes subetapas de desarrollo. El agente *Jacques* deberá poder llevarlo a cabo a través de la interacción con un ambiente virtual, y a que simula características físicas y cognitivas, como se explica a continuación.

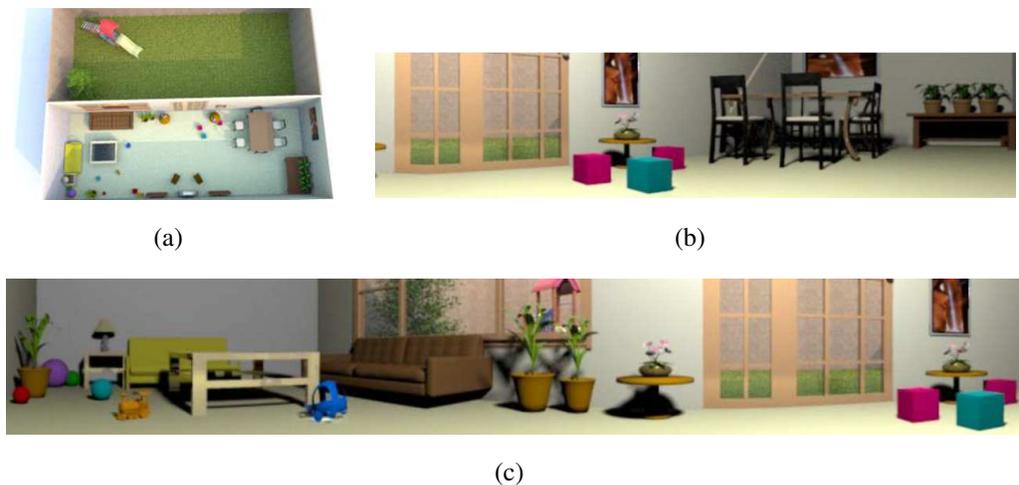
### 4.1 Mundo Virtual

El agente interactúa con un mundo 3D, el cual representa lugares comunes como una sala, un cuarto de juegos, un parque o un bosque. Cada vez que éste inicia su ejecución su ambiente puede ser diferente, de tal forma que algunas veces se

#### 4. Jacques, el Agente que se Desarrolla

---

puede desarrollar en una casa y algunas otras en el bosque. Más aún, puede interactuar con la casa por cierto tiempo y posteriormente se puede mover al bosque, en donde continúa con su desarrollo. Su ambiente contiene modelos 3D simples de objetos típicos que se pueden encontrar en la vida real. Por ejemplo, la Figura 4.1 muestra un ambiente virtual que consiste de una casa decorada con muebles, plantas, juguetes, etc. Todos los objetos cuentan con las siguientes características relevantes: son luminosos o no luminosos, estáticos o en movimiento, y poseen un color, un tamaño y una textura perceptible al tacto (como se resume en la Tabla 4.1). Adicionalmente, algunos de los objetos han sido diseñados para promover el desarrollo del agente, de tal manera que éstos no necesariamente siguen las leyes físicas del mundo real. Por ejemplo, una pelota puede de repente comenzar a botar o a rodar por sí misma y detenerse en un cierto momento (las trayectorias de los objetos en movimiento están predefinidas y los objetos no se ocultan unos a otros).



**Figura 4.1:** Ejemplo de un mundo virtual con el cual puede interactuar el agente: (a) vista aérea y (b)-(c) dos vistas panorámicas interiores.

Características de los objetos
luminosos o no-luminosos
estáticos o en movimiento
color
tamaño
textura

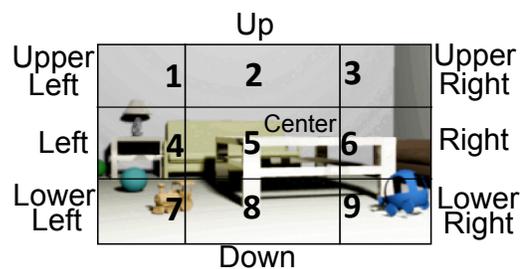
**Tabla 4.1:** Resume las características de los objetos que se encuentran en el mundo virtual del agente.

## 4.2 Características Físicas

El agente está físicamente implementado como un personaje virtual, el cual tiene la apariencia de un “robot bebé”(ver Figura 4.2a). Cuenta con una cabeza, dos ojos, dos brazos con manos, dos piernas con pies y un tronco. Sin embargo, para esta implementación sólo puede mover su cabeza a la izquierda, derecha, arriba, abajo y la combinación de estos movimientos, así como abrir y cerrar su mano, moverla hacia arriba, abajo, izquierda, derecha, enfrente y atrás. El resto de su cuerpo permanece inmóvil. Estos movimientos representan el repertorio inicial de acciones físicas, también conocidas como acciones externas, que puede ejecutar (como se resume en la Tabla 4.2).



(a)



(b)

**Figura 4.2:** (a) El agente virtual que se desarrolla; (b) organización de su campo de visión.

#### 4. Jacques, el Agente que se Desarrolla

---

<b>Nombre de la acción externa</b>	<b>Descripción</b>
<i>MHLeft</i>	Mueve la cabeza a la izquierda
<i>MHRight</i>	Mueve la cabeza a la derecha
<i>MHUp</i>	Mueve la cabeza hacia arriba
<i>MHDown</i>	Mueve la cabeza hacia abajo
<i>MHRightUp</i>	Mueve la cabeza hacia arriba y a la derecha
<i>MHRightDown</i>	Mueve la cabeza hacia abajo y a la derecha
<i>MHLeftUp</i>	Mueve la cabeza hacia arriba y a la izquierda
<i>MHLeftDown</i>	Mueve la cabeza hacia abajo y a la izquierda
<i>close_hand</i>	Cierra la mano
<i>open_hand</i>	Abre la mano
<i>HandLeft</i>	Mueve la mano a la izquierda
<i>HandRight</i>	Mueve la mano a la derecha
<i>HandUp</i>	Mueve la mano hacia arriba
<i>HandDown</i>	Mueve la mano hacia abajo
<i>HandForward</i>	Mueve la mano hacia el frente
<i>HandBackwards</i>	Mueve la mano hacia atrás
<i>random_physical_action</i>	Elige una acción de las anteriores de manera aleatoria.

**Tabla 4.2:** El repertorio inicial de acciones físicas, también llamadas acciones externas, que el agente puede realizar.

Así mismo, el agente cuenta con sensores simulados de visión y tacto a través de los cuales es capaz de capturar información visual y táctil del mundo con el que interactúa. El primer sensor está implementado como una cámara virtual con un campo de visión de 60 grados que se encuentra colocada en su ojo derecho. El segundo se encuentra colocado en la palma de su mano derecha, y está implementado como un sensor que detecta la presencia y textura de un objeto que está haciendo contacto con éste. Es así, que sólo puede recibir información visual con un solo ojo e información táctil con una mano. Esta característica ayuda a reducir la complejidad del sistema.

La forma en la que el agente visualmente sensa su mundo es tomando una fotografía con su cámara virtual. Esta foto la representa internamente como una matriz de 180 x 120 x 3: 180 píxeles de ancho, 120 píxeles de alto y 3 valores (en el rango [0-255]) que corresponden a los componentes de color rojo, verde, y azul de cada píxel. Todas las posibles combinaciones de los diferentes valores de rojo, verde y azul dan como resultado que sea capaz de capturar 16.7 millones de diferentes colores. Su campo de visión se divide en las nueve zonas que se muestran en la Figura 4.2b y éste es capaz de determinar en cuál de ellas se localiza un objeto visual (la zona se determina por la posición del centroide del objeto).

De manera similar, el agente sensa su entorno a través del tacto detectando en el mundo virtual si existe una intersección espacial entre el modelo tridimensional que representa la mano y alguno de los objetos que se encuentra en el ambiente. Adicionalmente, éste es capaz de determinar si su mano está abierta o cerrada.

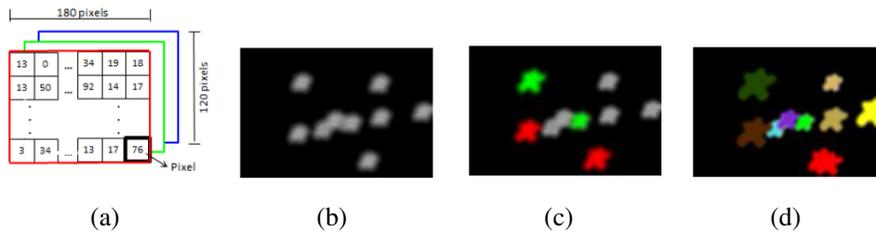
### 4.3 Características Cognitivas

El agente implementa cinco principales características cognitivas: 1) cuenta con habilidades para poder “ver” y “tocar” su mundo, 2) simula un proceso de atención, 3) simula respuestas afectivas, estados emocionales y motivaciones intrínsecas que lo empujan a actuar, 4) cuenta con una memoria y 5) simula un proceso de adaptación a su medio ambiente.

### 4.3.1 El Agente Puede “Ver” su Mundo

De acuerdo a la teoría de Piaget, los bebés recién nacidos ven el mundo como manchas luminosas que aparecen, se mueven y desaparecen sin ser capaces de seguirlas con su mirada. Él considera que la percepción de las formas, tamaños, distancias, relieves, etc. no son dadas de nacimiento y más bien se desarrollan con el tiempo. Así, inspirados en estas ideas implementamos nuestro agente de tal forma que cuando inicia su funcionamiento ve los objetos que entran en su campo de visión como manchas luminosas, estáticas o en movimiento, las cuales son detectadas a partir de los datos capturados por su sensor simulado (es decir, por su cámara virtual). Éstas por el momento no poseen ninguna otra característica visual, como se ilustra en las Figuras 4.3a y 4.3b. Con el tiempo, a través de la interacción con su ambiente, el agente va adquiriendo la capacidad de reconocer diferentes colores y tamaños. Es decir, su percepción visual se va enriqueciendo. Esto le permite adquirir progresivamente la habilidad de ver las manchas ya no sólo como entes luminosos, sino como entes con diferentes propiedades (como se ilustra en las Figuras 4.3c y 4.3d). Los colores y tamaños que aprende a reconocer dependen de las características de los objetos que encuentra a su alrededor. De tal manera que si el agente vive en un ambiente predominantemente verde, como un bosque por ejemplo, entonces desarrollaría la habilidad de reconocer una gran variedad de verdes. Por el contrario, si vive en un ambiente más heterogéneo, como una ciudad, entonces sería menos sensible a los diversos tonos de verdes, pero sería capaz de reconocer un espectro más amplio de colores.

Las manchas detectadas, son usadas para crear una representación interna de lo que el agente está viendo. A esta representación se le llama *contexto-actual-visual*, el cual incluye, entre otras cosas, las características de los objetos vistos (la sección 4.3.5 presenta una descripción detallada de esta estructura). De esta manera, como al inicio el agente no puede reconocer ninguna propiedad visual, sus primeros contextos sólo describen manchas luminosas que aparecen, se mueven y desaparecen de su campo de visión. Más adelante, a partir del momento en que se comienza a enriquecer su percepción visual, éstos empiezan a representar manchas luminosas de diferentes colores y tamaños que aparecen, se mue-



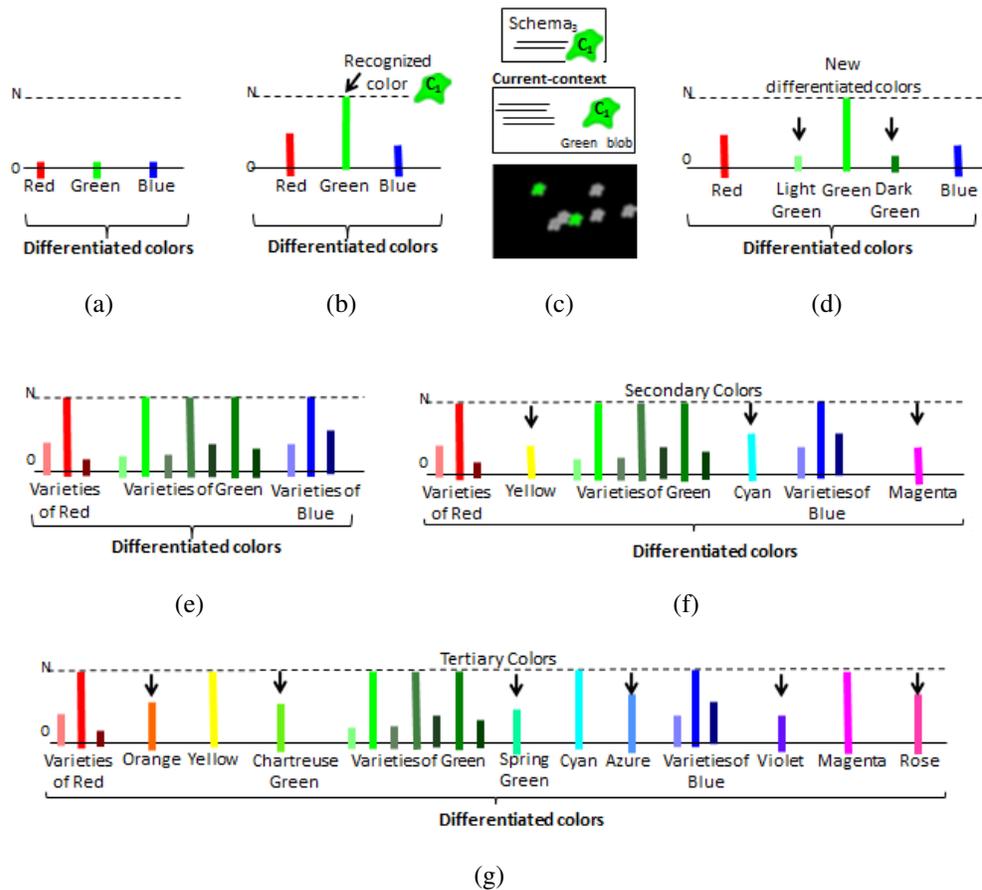
**Figura 4.3:** Un ejemplo ilustrativo de cómo el agente ve su mundo conforme se desarrolla: (a) datos visuales sentidos; (b)-(d) los mismos datos vistos por el agente conforme su percepción se enriquece. Primero el agente ve los objetos del mundo sólo como manchas luminosas, y gradualmente comienza a verlos como manchas de diferentes colores y tamaños.

ven y desaparecen. Una característica importante de los contextos, es que éstos son usados para la construcción de estructuras de conocimiento que simulan los esquemas sensoriomotores descritos por Piaget (como se explica en la sección 4.3.5). Por lo tanto, dado que las propiedades de los objetos que se encuentran en el mundo virtual se usan para crear tanto los contextos como los esquemas, con diferentes ambientes se crean diferentes estructuras de conocimiento.

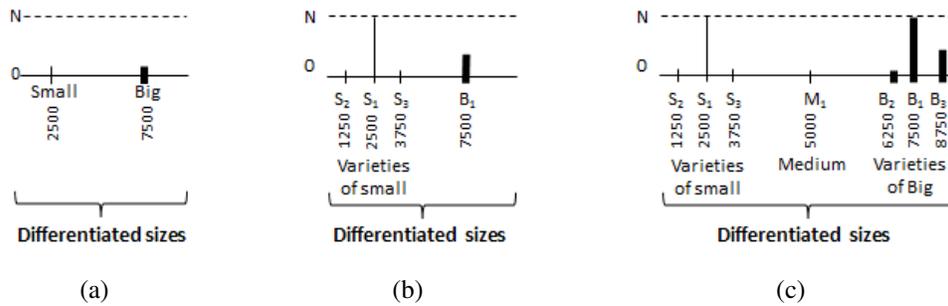
El proceso mediante el cual el agente aprende a reconocer diversos colores y tamaños se describe a continuación:

- Cuando el agente inicia su ejecución es capaz de detectar los millones de diferentes colores y miles de diferentes tamaños que pueden tener los objetos capturados con su sensor de visión. Sin embargo, con el afán de representar el proceso de enriquecimiento de su percepción visual (descrito líneas arriba), aún no puede usar estas propiedades en sus estructuras de conocimiento. Para que esto pueda ser posible, determinamos que necesita recibir estimulación de su ambiente, viendo los objetos que encuentra a su alrededor. De tal forma que es hasta que una característica ha estado repetidamente presente en los elementos de su mundo, que el agente adquiere la habilidad de reconocerla y de poder usarla en la construcción de sus contextos y esquemas.

#### 4. Jacques, el Agente que se Desarrolla



**Figura 4.4:** (a) Al inicio el agente sólo puede diferenciar los colores primarios verde, rojo y azul; (b) cuando alguno de los colores diferenciables recibe suficiente estimulación de su ambiente (es decir, cuando su variable asociada alcanza el valor de  $N$ ), el agente adquiere la habilidad de reconocerlo; (c) el reconocimiento del nuevo color permite que el agente lo pueda usar como parte de sus estructuras de conocimiento (como sus contextos y esquemas), y a partir de ese momento se vuelve capaz de ver manchas luminosas del color reconocido; (d) cuando se reconoce un nuevo color, entonces se incrementan las habilidades del agente para diferenciar dos nuevas variedades de éste: una versión más clara y una versión más oscura; (e) cuando los nuevos colores se reconocen a su vez, el ciclo se repite dando lugar a la diferenciación y reconocimiento de variedades de verdes, rojos y azules; (f) el reconocimiento de dos o más colores primarios da lugar a la diferenciación, y posteriormente al reconocimiento, de los colores secundarios amarillo, cian, y magenta; (g) de la misma manera, el reconocimiento de los colores secundarios da lugar a la diferenciación y posteriormente al reconocimiento de los colores terciarios.



**Figura 4.5:** (a) Estado inicial de la estructura de tamaños diferenciables, en donde 2500 pixeles corresponden al tamaño pequeño y 7500 pixeles al tamaño grande; (b) cuando el agente logra reconocer el tamaño pequeño, se vuelve capaz de diferenciar dos nuevas variedades de éste; (c) lo mismo sucede cuando logra diferenciar el tamaño grande, pero ahora también surge un nuevo tamaño intermedio al que llamamos mediano.

- Para simular este proceso, el agente cuenta con dos estructuras en las cuales se van registrando las propiedades de los objetos que encuentra en su mundo. La primera se llama “colores diferenciables” e inicialmente está compuesta de tres variables que representan los colores primarios rojo, verde y azul (ver Figura 4.4a). La segunda se llama “tamaños diferenciables” e inicialmente está compuesta de dos variables que representan los tamaños predefinidos pequeño y grande (ver Figura 4.5a). El objetivo de estas variables es contabilizar el número de veces que un determinado color o tamaño está presente en el ambiente que rodea al agente, por lo cual las variables en ambas estructuras se inicializan con el valor de 0. De esta manera, los colores que al inicio el agente puede registrar (diferenciar) son o rojo, o verde o azul, y los tamaños son pequeño o grande.
- Cada vez que un objeto entra en su campo de visión, se incrementa en uno el valor de la variable que representa el color y el tamaño más similar a los detectados. Por ejemplo, si una pelota de color anaranjado entra en su campo de visión, entonces se incrementa en uno el valor de la variable

#### 4. Jacques, el Agente que se Desarrolla

---

que representa el color rojo (ya que el anaranjado es más similar al rojo, que al azul o verde). De la misma manera, si el agente detecta un objeto de tamaño gigante, entonces incrementa en uno el valor de la variable que representa el tamaño grande.

- Cuando el valor de la variable asociada a alguno de los colores o tamaños diferenciables alcanza un cierto valor predefinido  $N$  (como se ilustra en la Figura 4.4b, en donde la variable asociada al color verde alcanzó el valor de  $N$ ), entonces se dice que tal característica ha recibido suficiente estimulación del ambiente y por lo tanto el agente adquiere la habilidad de reconocerla y de poder usarla en la construcción de sus estructuras de conocimiento (p. ej. sus contextos actuales). A partir de ese momento el agente se vuelve capaz de ver manchas luminosas del nuevo color o tamaño reconocido (ver Figura 4.4c).
- A las características que el agente adquiere la habilidad de reconocer les asigna un nombre arbitrario, el cual usa posteriormente para describir los objetos que ve a su alrededor (por ejemplo “ $C_1$ ”, “ $C_2$ ”, “ $C_3$ ”, etc. para los colores y “ $S_1$ ”, “ $S_2$ ”, “ $S_3$ ”, etc. para los tamaños).
- En el momento en el que el agente logra reconocer un nuevo color, automáticamente se incrementa su capacidad de diferenciar dos nuevas tonalidades de éste: un tono más claro y un tono más oscuro (p. ej. un verde más claro y un verde más oscuro, como se ilustra en la Figura 4.4d). Las nuevas tonalidades se representan por medio de dos nuevas variables que son agregadas en la estructura de colores diferenciables, las cuales se inicializan con el valor de 0.
- Cuando el agente logra reconocer los nuevos colores, es decir, cuando sus variables asociadas alcanzan el valor de  $N$ , el ciclo se repite. De esta manera logra progresivamente diferenciar y reconocer variedades de los colores primarios (variedades de verdes, rojos, y azules, como se ilustra en la Figura 4.4e).

- Adicionalmente, en el momento en el que logra reconocer un segundo color primario, automáticamente adquiere la habilidad de diferenciar el resultante de mezclarlos. Por ejemplo, si primero logra reconocer el verde y luego logra reconocer el rojo, entonces se agregan a los colores diferenciables un rojo más claro, un rojo más oscuro, así como el amarillo resultante de mezclar el verde y rojo (ver Figura 4.4f). Lo mismo sucede cuando reconoce el azul, dando lugar a la creación de los colores diferenciables magenta (resultante de mezclar el rojo y azul) y cian (resultante de mezclar el verde y el azul). De esta manera, el agente se puede volver capaz de diferenciar, y posteriormente reconocer, los colores secundarios magenta, amarillo y cian (ver Figura 4.4f). Así mismo, cuando logra reconocer los colores secundarios éstos se mezclan con los primarios dando lugar a los colores terciarios (ver Figura 4.4g).
- De manera análoga el agente va progresivamente adquiriendo la capacidad de diferenciar y reconocer más tamaños (variedades de tamaños pequeños, medianos y grandes), como se ilustra en la Figura 4.5.
- Es así que el agente progresivamente logra reconocer diferentes colores y tamaños, los cuales dependen de las características de los objetos que hay en su ambiente.

### 4.3.2 El Agente Puede “Tocar” su Mundo

El agente es capaz de poder tocar su mundo a través del uso de su sensor de tacto, mediante el cual se detectan 2 aspectos: 1) la presencia de un objeto en contacto con la palma de la mano (sólo puede tocar un elemento a la vez) y 2) su textura. Con respecto al segundo, es posible realizar una implementación que permita que el agente pueda ir incrementando sus capacidad de diferenciar diversas propiedades táctiles que presentan las superficies de los elementos del ambiente. Por ejemplo, varios grados de rugosidad. Ésto se puede llevar a cabo de manera análoga a la visión. Así, al inicio éste sólo podría diferenciar entre lo liso y lo completamente rugoso. Con el tiempo, a través de su interacción con

## 4. Jacques, el Agente que se Desarrolla

---

el mundo virtual, aprendería a diferenciar y posteriormente a reconocer diversos grados de rugosidad. Sin embargo, por simplicidad, en este trabajo de investigación asumimos que ya ha aprendido a reconocer un cierto número de texturas y que las ha etiquetado como “ $t_1$ ”, “ $t_2$ ”, etc.

El objeto detectado es usado para crear una representación interna de lo que el agente está tocando. A esta representación se le llama *contexto-actual-táctil* (la sección 4.3.5 presenta una descripción detallada de esta estructura).

### 4.3.3 El Agente Simula un Proceso de Atención

Cada vez que el agente sensa su mundo, detecta los objetos que están en su entorno y selecciona uno de ellos para interactuar. El proceso de selección consiste en asignarle un número a cada elemento detectado que represente qué tan atractivo le resulta, y en escoger aquél con el valor más alto. A éste se le llama *valor de interés*.

Para el caso de los objetos que ve, el *valor de interés* depende de tres aspectos. Primero, el agente está preprogramado para tener preferencias. De tal forma que éste le asigna un número más alto a los elementos que están en movimiento, que a los que están estáticos; y a los que poseen colores brillantes, que a los que tienen colores opacos. Segundo, se consideran más atractivos aquellos que poseen las características menos vistas (p. ej. le es más llamativa una pelota de color rojo brillante que ve por primera vez, que una pelota azul que ha visto en repetidas ocasiones). Y tercero, el agente prefiere seleccionar aquellos hacia los cuales ha establecido una respuesta afectiva, un estado emocional o una motivación (ver sección 4.3.4). Entonces, el *valor de interés* se calcula: 1) asignándole un número entre 0 y 1 a cada uno de los tres aspectos descritos anteriormente (en donde 0 significa que no le es interesante y 1 lo contrario), 2) asignándole una constante de ponderación a cada uno de estos tres aspectos, y 3) sumando las tres cantidades resultantes.

En el caso del tacto, debido a que el agente sólo puede tocar un objeto a la vez, a todo lo que toca le asigna un *valor de interés* de  $v_t$ .

Una vez seleccionado un objeto visual y uno táctil, se elige aquél con el *valor de interés* más alto. Por ejemplo, si a la variable  $v_t$  se le asigna el valor de 1, entonces por lo general el agente preferirá seleccionar lo que toca sobre lo que ve.

Al elemento seleccionado se le considera como aquél sobre el cual el agente ha centrado su atención. De esta manera, sólo puede interactuar con un objeto a la vez. Sin embargo, como se explicará en el capítulo 5, conforme construye sus esquemas se vuelve capaz de atender tanto lo que toca como lo que ve.

### 4.3.4 El Agente Simula Respuestas Afectivas, Estados Emocionales y Motivaciones que lo Empujan a Actuar

El agente simula respuestas afectivas, estados emocionales y motivaciones, los cuales están inspirados en las ideas de Piaget referentes a la relación entre la afectividad y el desarrollo de la inteligencia (ver capítulo 3, sección 3.1.3).

#### **Respuestas Afectivas.**

El agente simula dos tipos de respuestas afectivas: agrado y desagrado. Éstas están compuestas por una intensidad y una valencia, las cuales se representan por medio de variables que toman los valores de -1, +1, o +2, en donde -1 representa desagrado y +1/+2 representan dos intensidades de agrado.

En este trabajo, de manera predefinida, todos los objetos luminosos que el agente selecciona como su centro de atención le disparan automáticamente una respuesta afectiva de placer. Esto representa que le “agrada” enfocar su atención en objetos luminosos. Si éstos se encuentran en la periferia de su campo de visión, entonces la intensidad de agrado es igual a +1. Por el contrario, si se encuentran en el centro de su campo de visión, entonces la intensidad es igual a +2. Es decir, le agrada más ver los objetos de interés en el centro que en la periferia. La Figura 4.6a muestra un ejemplo de esta situación. De manera similar, todos los objetos que el agente toca y atiende le generan placer con intensidad +1.

Las respuestas afectivas de desagrado se disparan automáticamente cuando el agente está atendiendo un objeto que le agrada y éste “desaparece”(p. ej. debido

#### 4. Jacques, el Agente que se Desarrolla



- |   |  |  |  |   |   |
|---|--|--|--|---|---|
| <p>(a) El agente enfoca su atención en la pelota verde brillante que se mueve hacia la izquierda, causándo que se dispare una respuesta afectiva de <b>placer</b> con intensidad +1 hacia dicho objeto.</p> | <p>(b) El agente pierde la pelota verde brillante en la que estaba interesado. Esto causa que se dispare una respuesta afectiva de <b>displacer</b>.</p> | <p>(c) El agente mueve aleatoriamente su cabeza a la izquierda y por “accidente” recupera la pelota verde brillante que había perdido. Se dispara entonces un estado emocional de <b>sorpresa</b>.</p> | <p>(d) El agente enfoca su atención en la pelota azul brillante que se mueve hacia arriba.</p> | <p>(e) El agente pierde la pelota azul brillante en la que estaba interesado. Usa su experiencia pasada para recuperarla, por lo cual mueve su cabeza hacia la izquierda.</p> | <p>(f) No recuperó la pelota como lo esperaba, y por lo tanto se dispara una motivación de <b>curiosidad cognitiva</b>.</p> |
|---|--|--|--|---|---|

**Figura 4.6:** Ejemplos de situaciones en donde se disparan algunas respuestas afectivas, estados emocionales, y motivaciones.

a que se está moviendo y sale de su campo de visión, o a que lo suelta mientras lo estaba agarrando), y se definen por medio de una variable a la que se le asigna el valor de -1. Esto representa que le “disgusta perder los objetos agradables”. La Figura 4.6b muestra un ejemplo de esta situación.

#### Estados Emocionales.

El agente simula tres estados emocionales: interés, sorpresa y aburrimiento. Éstos se representan por medio de variables Booleanas, y se disparan automáticamente en las siguientes situaciones.

El estado emocional de interés, hacia un cierto objeto  $A$ , se activa a conse-

cuencia de la ejecución de una acción interna llamada *show interest in A*. Este estado emocional, junto con otras variables, es usado posteriormente por el procedimiento que selecciona el centro de atención del agente, permitiéndole mantenerse enganchado durante cierto tiempo con un mismo objeto, hasta que otro le resulte de mayor interés. La acción *show interest in A* representa la única acción interna que se implementa (como se resume en la Tabla 4.3).

<b>Nombre de la Acción Interna</b>	<b>Descripción</b>
<i>show_interest_in A</i>	Dispara un estado emocional de interés hacia el objeto <i>A</i> .

**Tabla 4.3:** Lista el repertorio inicial de acciones internas que el agente puede realizar.

El estado emocional de sorpresa se dispara en la siguiente circunstancia. Cuando el agente pierde un objeto agradable, el sistema ejecuta una acción externa aleatoria (p. ej. un movimiento de su cabeza a la izquierda). Eventualmente y “accidentalmente” alguna de las acciones aleatorias, llamada “acción de recuperación”, causará que regrese el objeto perdido (p. ej. un movimiento de su cabeza a la izquierda normalmente causará que un objeto que se mueve hacia la izquierda vuelva a su campo de visión). La recuperación accidental del objeto de interés causa que a la variable booleana que representa al estado emocional de sorpresa se le asigne el valor de *TRUE*. La Figura 4.6c muestra un ejemplo de esta situación.

Finalmente, el estado emocional de aburrimiento se dispara cuando el agente detecta consecutivamente los mismos objetos en las mismas posiciones (p. ej. después de que ve una misma escena estática en 10 ocasiones seguidas). Este estado causa que se realice una acción física aleatoria, produciendo por ejemplo un movimiento de su cabeza, que provoca un cambio en los objetos presentes en su campo de visión.

### **Motivaciones.**

El agente simula una motivación intrínseca llamada curiosidad cognitiva. Esta se representa por medio de una variable Booleana, y se dispara en la siguiente circunstancia.

Las situaciones en las que el agente recupera por accidente un objeto de interés (es decir, cuando se activa un estado emocional de sorpresa), se registran en su memoria a través de nuevas estructuras de conocimiento llamadas esquemas (los cuales se describen a detalle en la sección 4.3.5). Los esquemas asocian la respuesta afectiva de desagrado causada por la pérdida del objeto de interés, con la acción de recuperación, y con la situación de volver a sentir agrado hacia el objeto que se había perdido. A ésta última situación se le llama “expectativa”, y se explica a detalle en las secciones 4.3.5 y 5.2. Así, continuando con el ejemplo de la Figura 4.6, de ahora en adelante cada vez que el agente se enfrente a una situación similar, es decir, cada vez que pierda un objeto de interés, usará su experiencia registrada en el nuevo esquema y ejecutará la acción de recuperación (en este ejemplo mover su cabeza a la izquierda) con la expectativa de volver a sentir agrado hacia el objeto que se había perdido. Sin embargo, algunas veces esta acción recuperará el objeto y otras no (p. ej. el esquema descrito no ayudará a recuperar los objetos que se estaban moviendo a la derecha con un movimiento de su cabeza a la izquierda). En los casos en los que no se cumplen sus expectativas, se dispara la variable que representa la motivación de curiosidad cognitiva, como se ilustra en la Figura 4.6(d)-(f). Esta motivación le indica al proceso de adaptación (descrito en la sección 4.3.6) que es necesario modificar los esquemas del agente debido a que sus expectativas asociadas no se están cumpliendo.

En general, esta es la manera en la que se activan las diferentes respuestas afectivas, estados emocionales y motivaciones, las cuales se resumen en la Tabla 4.4.

### **4.3.5 El Agente Cuenta con una Memoria**

El agente cuenta con una memoria en la cual almacena todo su conocimiento. En particular, almacena su percepción actual del mundo (representada por medio de

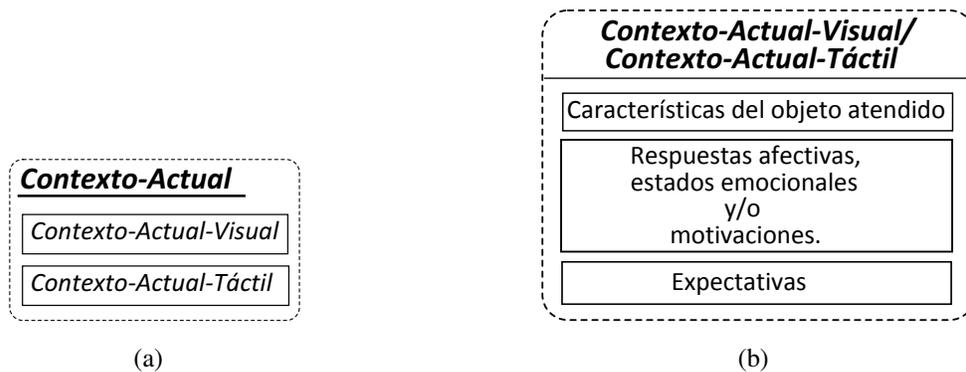
Nombre	Descripción
<b>Respuestas Afectivas:</b> <i>placer</i> <i>displacer</i>	Se dispara cuando el agente atiende un objeto luminoso y/o alguno que esté tocando. Se dispara cuando el agente pierde un objeto que le agrada.
<b>Estados Emocionales:</b> <i>interés</i> <i>sorpresa</i> <i>aburrimiento</i>	Se dispara como resultado de la ejecución de la acción interna <i>show_interest_in A</i> . Se dispara cuando el agente recupera “por accidente” un objeto que le agrada. Se dispara cuando el agente detecta consecutivamente los mismos objetos un cierto número de veces.
<b>Motivaciones:</b> <i>curiosidad cognitiva</i>	Se dispara cuando las expectativas del agente no se cumplen.

**Tabla 4.4:** Resume las situaciones bajo las cuales se disparan las diferentes respuestas afectivas, estados emocionales y motivaciones.

su *contexto-actual*) y de cómo interactuar con éste (representado por medio de sus esquemas).

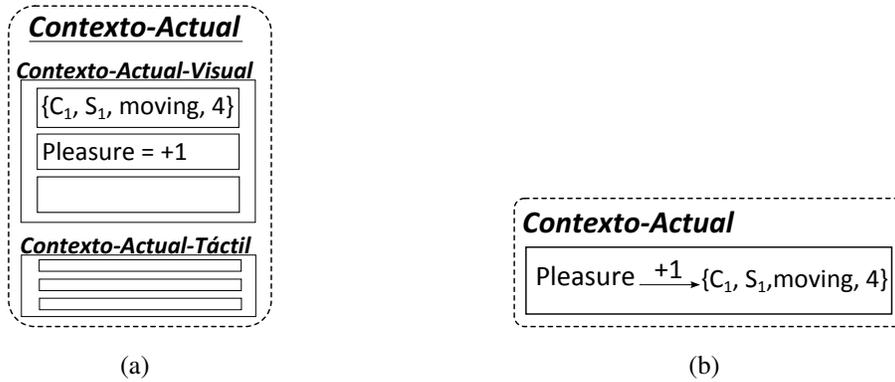
### Contexto-Actual

El *contexto-actual* es una estructura que está compuesta de dos partes (ver Figura 4.7a): 1) del *contexto-actual-visual* y 2) del *contexto-actual-táctil*. A su vez, éstos dos últimos se definen como tres componentes (ver Figura 4.7b): 1) de las características del objeto que se encuentra en el centro de atención del agente (su color, tamaño, movimiento y posición dentro del campo de visión; o del estado de su mano, abierta o cerrada, así como de la textura del objeto que toca), 2) de las respuestas afectivas, estados emocionales y motivaciones que di-



**Figura 4.7:** (a) La estructura del *contexto-actual*; (b) la estructura del *contexto-actual-visual* y del *contexto-actual-táctil*.

cho elemento dispara, y 3) de las expectativas actuales (ver sección 5.2). De esta manera, el agente representa lo que está viendo y/o tocando en términos de lo que el/los objeto(s) en su centro de atención (descritos por medio de sus características) le están disparando, es decir, si le están causando agrado, desagrado, interés, aburrimiento, sorpresa, curiosidad cognitiva, y/o alguna expectativa. Por ejemplo, la Figura 4.8a muestra el *contexto-actual* correspondiente a la situación de la Figura 4.7a, en donde el agente centró su atención en una pelota pequeña, de color verde brillante, que estaba en movimiento en la posición 4 de su campo de visión, y que le disparó una respuesta afectiva de placer con intensidad +1. En este ejemplo, el color verde brillante es un color que ya adquirió la habilidad de reconocer, y al cual le asignó el nombre “ $C_1$ ”. De manera similar sucede con el tamaño pequeño, al cual nombró “ $S_1$ ”. Para los objetos en movimiento usa la etiqueta “*moving*”, y para los estáticos la etiqueta “*static*”. Con la finalidad de hacer la notación más simple y compacta, de ahora en adelante los contextos actuales que estén compuestos únicamente de respuestas afectivas, los presentaremos en el formato de la Figura 4.8b. En ésta notación escribimos el nombre de la respuesta afectiva seguido por una flecha etiquetada con su valencia e intensidad que apunta hacia la descripción del objeto que la disparó.



**Figura 4.8:** (a) Un ejemplo de un *contexto-actual*, el cual representa la pelota verde, pequeña, y brillante que estaba en movimiento y que le agradó al agente en la Figura 4.6a; (b) El mismo *contexto-actual* usando la notación alternativa.

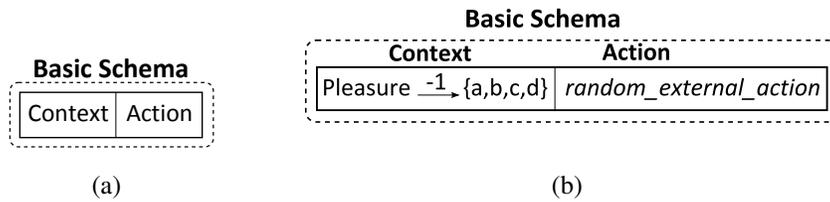
### Esquemas

En este trabajo se definen como estructuras de conocimiento que simulan los esquemas sensoriomotores descritos por Piaget, y definidos por Guerin (2011b) como: “*Within constructivist theories the sensorimotor schema is held to be the principal unit of knowledge in use during infancy. A sensorimotor schema is a psychological construct which gathers together the perceptions and associated actions involved in the performance of one of the habitual behaviors in the infant’s repertoire. The schema represents knowledge generalized from all the experiences of that behavior. It includes knowledge about the context in which the behavior was performed as well as expectations about the effects. Sensorimotor schemas are central to Jean Piaget’s explanation of infant development*”. Inspirados en estas ideas, nuestro agente cuenta con dos tipos de esquemas: básicos y desarrollados.

Los esquemas básicos representan algunos de los comportamientos innatos y tendencias que Piaget observó en los bebés, y están presentes en el agente desde su inicialización. Se representan como contextos asociados a acciones (ver Figura 4.9a). Los contextos usados en los esquemas son estructuras similares a los contextos-actuales, sólo que a diferencia de éstos últimos, los componentes visuales y táctiles sólo contienen las características del objeto atendido así co-

#### 4. Jacques, el Agente que se Desarrolla

---



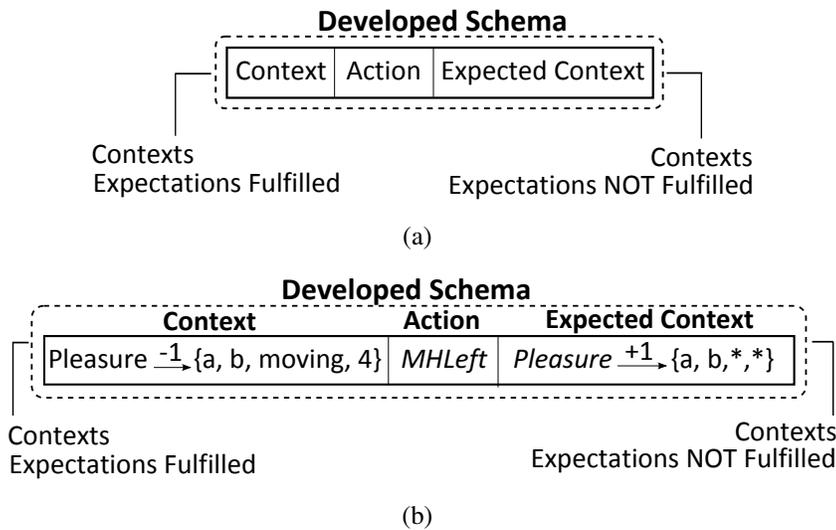
**Figura 4.9:** (a) La estructura de los esquemas básicos; (b) un ejemplo de un esquema básico.

mo las respuestas afectivas disparadas por éste. En otras palabras, los contextos asociados a los esquemas describen situaciones de agrado o desagrado, que en nuestro modelo ocurren con la presencia o pérdida de un objeto de interés. Adicionalmente, a diferencia de los contextos-actuales, los contextos de los esquemas pueden definir las características del objeto en términos de variables no instanciadas. Para ejemplificar esto último, la Figura 4.9b muestra un ejemplo de un esquema básico, el cual asocia la situación de sentir desagrado, disparada por un objeto de cualquier color =  $a$ , de cualquier tamaño =  $b$ , con cualquier movimiento =  $c$  y en cualquier posición dentro del campo de visión =  $d$ , con la acción de realizar una acción externa aleatoria (p. ej. un movimiento de su cabeza a la derecha). De ahora en adelante, las letras minúsculas simbolizarán variables no instanciadas. Cuando las  $n$  características que describen al objeto de un contexto están en términos de variables no instanciadas, se dice que la estructura a la que está asociado es un esquema abstracto de tipo  $T_n$  (como es el caso del esquema de la Figura 4.9b, que es de tipo  $T_4$ ). Por el contrario, si todas las variables de las características están instanciadas, se dice que es un esquema concreto de tipo  $T_0$ . De la misma manera, existen esquemas intermedios de tipo  $T_1, T_2 \dots T_{n-1}$ , con varias características en términos de variables no instanciadas.

Los esquemas desarrollados se construyen conforme el agente interactúa con su ambiente (como se explica a detalle en el capítulo 5), y representan nuevos comportamientos. Éstos están compuestos de un contexto, una acción, un contexto esperado, y un conjunto de contextos con los cuales se cumplieron las expectativas (llamado “Contexts Expectations Fulfilled”), y otro con el cual no se

cumplieron (llamado “Contexts Expectations NOT Fulfilled”), como se ilustra en le Figura 4.10a. La Figura 4.10b muestra un ejemplo de un esquema desarrollado, el cual asocia la situación de *displacer* disparada por un objeto de cualquier color, cualquier tamaño, en movimiento, y en la posición 4 de su campo de visión, con la acción de mover la cabeza a la izquierda y la expectativa de recuperar la respuesta afectiva de *placer* hacia ese mismo objeto (se considera que dos objetos son el mismo si ambos tienen el mismo color). Este es un ejemplo de un esquema tipo  $T_2$ , ya que dos de sus características están en términos de variables no instanciadas.

Finalmente, se les llama *esquemas visuales* a aquellas estructuras cuyo contexto hace referencia únicamente a objetos visuales, *esquemas táctiles* a los que sólo hacen referencia a objetos táctiles y *esquemas tactilo-visuales* a aquellos que hacen referencia tanto a objetos visuales como a táctiles.



**Figura 4.10:** (a) La estructura de los esquemas desarrollados; (b) un ejemplo de un esquema desarrollado.

### 4.3.6 El Agente Cuenta con Mecanismos de Adaptación

El agente cuenta con mecanismos de adaptación, los cuales simulan los procesos de *asimilación-acomodación-equilibración* descritos por Piaget. La manera en que se implementan es a través de una versión extendida del modelo computacional del proceso creativo *Engagement-Reflection* (Pérez y Pérez & Sharples, 2001, 2004; Pérez y Pérez, 2007). Dichos mecanismos le permiten adecuarse a su mundo, ya sea modificando su percepción del ambiente para que ésta se ajuste a su conocimiento adquirido en experiencias pasadas (es decir, adaptación por asimilación), o modificando y creando nuevo conocimiento cuando éste no se ajusta a su “realidad” (es decir, adaptación por acomodación). La finalidad de esta capacidad es llevar al agente a evolucionar de un comportamiento reflejo (característico del primer subestadio del periodo sensoriomotor) a un comportamiento voluntario con conductas basadas en el cuerpo (característico del segundo subestadio del periodo sensoriomotor) y a los comienzos de un comportamiento que involucra consecuencias en objetos externos (característico del tercer subestadio del periodo sensoriomotor). Por tal motivo, llamamos a nuestro modelo *Dev E-R (Developmental Engagement- Reflection)*, el cual se describe a detalle en el capítulo 5.

## 4.4 Interacción del Agente con su Mundo

Cuando el agente comienza su ejecución se inicializa con una base de conocimiento que consiste en un conjunto de esquemas básicos, los cuales representan conductas reflejas. A partir de ahí, interactúa con el mundo siguiendo los siguientes pasos:

1. Sensa el ambiente a través de su cámara virtual y de su sensor táctil.
2. Crea un *contexto-actual* que representa su “percepción” actual de su entorno.

#### 4.4 Interacción del Agente con su Mundo

---

3. *Dev E-R* usa el *contexto-actual* para determinar la acción a realizar. Durante este proceso es posible que se lleve a cabo alguna modificación en la base de conocimiento (creación, eliminación o cambio de algún esquema).
4. Ejecuta la acción seleccionada.
5. Regresa al paso 1.

A los pasos del 1 al 4 le llamamos *ciclo de percepción-acción*.



“Creativity is intelligence having fun.”

Albert Einstein

CAPITULO

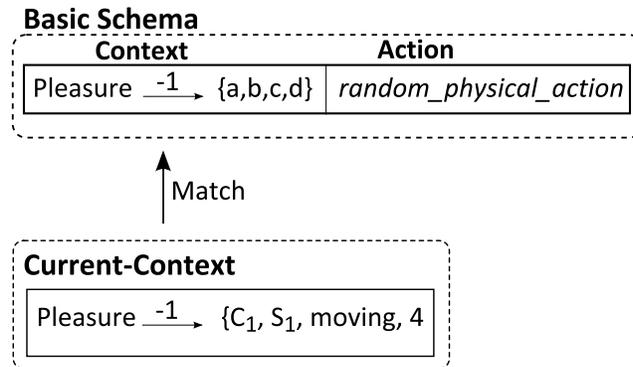
# 5

## El Modelo *Dev E-R*

*Dev E-R* es un modelo computacional que, inspirado en la teoría de Piaget, simula los procesos de *asimilación-acomodación-equilibración* implementándolos con una versión extendida del modelo computacional del proceso creativo *Engagement-Reflection* (Pérez y Pérez & Sharples, 2001, 2004; Pérez y Pérez, 2007). Se encarga de usar y construir el conocimiento del agente (representado como esquemas sensoriomotores). Cuenta con dos formas de llevarlo a cabo: 1) de manera automática a través del proceso de *Engagement*, y 2) de manera analítica a través del proceso de *Reflection*.

### 5.1 Funcionamiento General

*Dev E-R*, en modo de *Engagement*, busca en memoria los esquemas cuyos contextos representen la misma situación a la del *contexto-actual* (ver por ejemplo el caso de la Figura 5.1 en el que hay una correspondencia del 100 % entre ambas estructuras). Si durante este proceso se encuentra que el agente conoce más de una manera de actuar dada la situación actual, entonces se selecciona sólo uno de ellos. La selección se realiza de tal forma que se le asigna a los esquemas



**Figura 5.1:** Un ejemplo de la correspondencia de la estructura del *contexto-actual* de la Figura 4.7c con un esquema en memoria. En este caso, el *contexto-actual* corresponde al 100 % con el contexto asociado al esquema debido a que ambos están compuestos de la misma respuesta afectiva, con la misma valencia y la misma intensidad, y porque todas las características que definen al objeto del contexto están en términos de variables (es decir, éstas se asocian a la descripción de cualquier objeto visual: de cualquier color, de cualquier tamaño, con cualquier movimiento, y en cualquier posición).

desarrollados una mayor probabilidad de ser elegidos que a los básicos, y de los desarrollados es más probable elegir aquél que posee el mayor número de objetos con los que se cumplieron las expectativas y con el que se espera obtener mayor placer. Cuando se selecciona un esquema, se ejecuta su acción asociada, y en caso de ser uno desarrollado se registran sus expectativas en el *contexto-actual*. El agente sensa nuevamente su mundo, actualiza la estructura del *contexto-actual*, y el ciclo continúa. En los casos en los que no es posible asociar ningún esquema en memoria, es decir, cuando el agente se enfrenta a una situación desconocida, entonces se declara en una situación de *impasse*. En este caso se requiere realizar un proceso de adaptación, ya sea por asimilación o por acomodación. Estos procesos se pueden llevar a cabo de manera automática o analítica, por ejemplo a través de razonamiento analógico. Sin embargo, cuando el agente inicia su ejecución carece de capacidades reflexivas que le ayuden a lidiar con este tipo de situaciones (por las subetapas tempranas que se están modelando). Por lo tanto, en esta implementación la adaptación se simula como una actividad automática

que se lleva a cabo en modo de *Engagement*.

### 5.2 Simulación del Proceso de Acomodación

La *Acomodación*, en el sentido de Piaget, se refiere al proceso por medio del cual el niño modifica un esquema existente o forma uno completamente nuevo para lidiar con un objeto o evento desconocido Ormrod (2012). Inspirados en este concepto, en este trabajo la acomodación consiste en la creación de nuevas estructuras de conocimiento y modificación de las existentes como resultado de enfrentar nuevas situaciones en su mundo. Esto se lleva a cabo por medio de uno de los siguientes dos métodos: generalización o diferenciación.

La diferenciación ocurre cuando las expectativas de un esquema abstracto (tipo  $T_1, T_2, \dots T_n$ ) no se cumplen la mayoría de las veces, dando como resultado la creación de estructuras más concretas, cuyos objetos se definen en términos de más variables instanciadas.

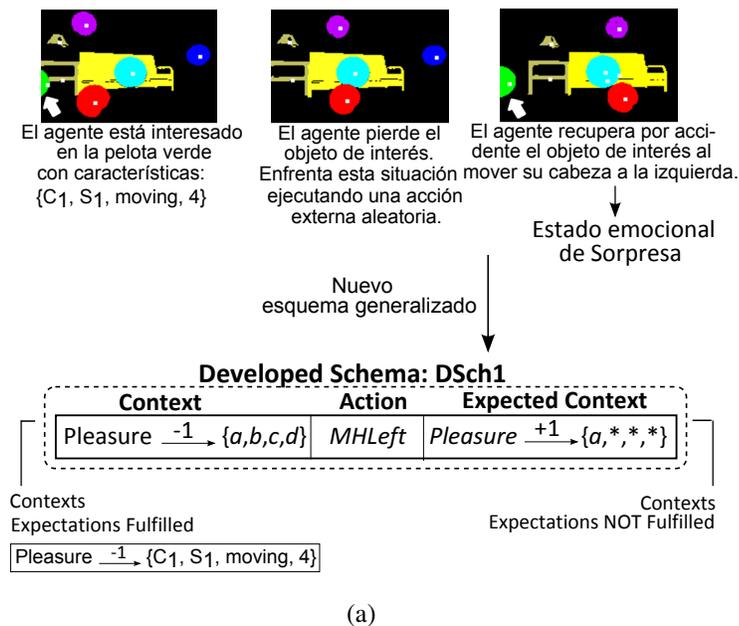
La generalización ocurre en dos situaciones: 1) cuando el agente recupera por accidente un objeto de interés y generaliza esa única experiencia en un esquema abstracto, y 2) cuando detecta que una misma acción puede recuperar varios objetos con características diferentes, lo cual produce que las estructuras concretas sean reemplazadas por una nueva más general que abarque la recuperación de los diferentes objetos.

Es así que simulamos el proceso de acomodación como un ciclo continuo de generalizar y concretar esquemas, como se explica a continuación.

**Primeras generalizaciones:** creación de esquemas tipo  $T_n$ . Como se explicó anteriormente, los primeros esquemas desarrollados que construye el agente se crean cuando recupera por accidente un objeto de interés (es decir, cuando el *contexto-actual* tiene registrado un estado emocional de sorpresa). Por ejemplo, supongamos que recupera por accidente, con un movimiento de la cabeza a la izquierda, un objeto de color  $C_1$ , tamaño  $S_1$ , en movimiento, que se encontraba en la posición 4 de su campo de visión (como se ejemplifica en la parte superior de la Figura 5.2). Entonces, a partir de esta única experiencia se crea un

## 5. El Modelo Dev E-R

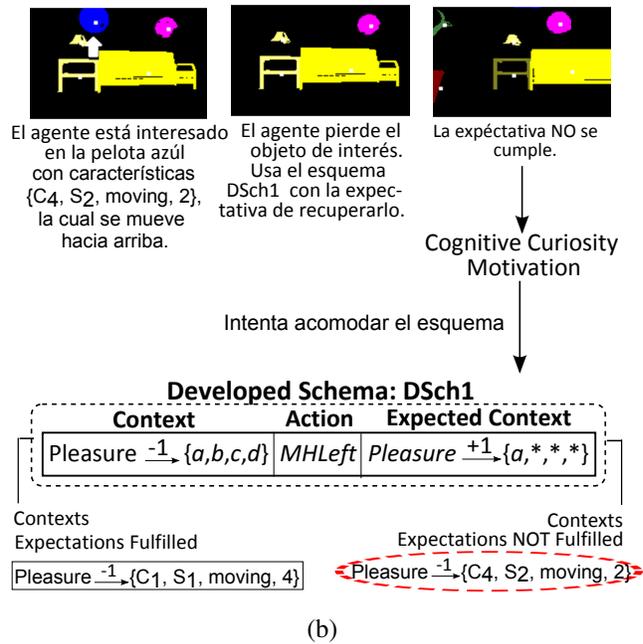
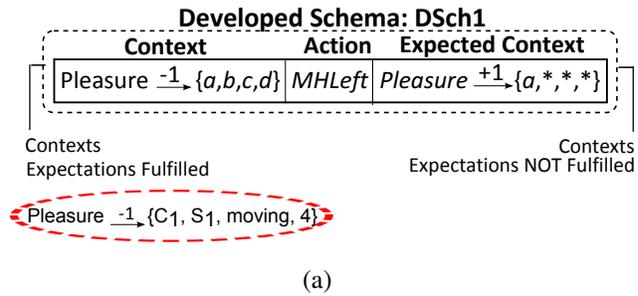
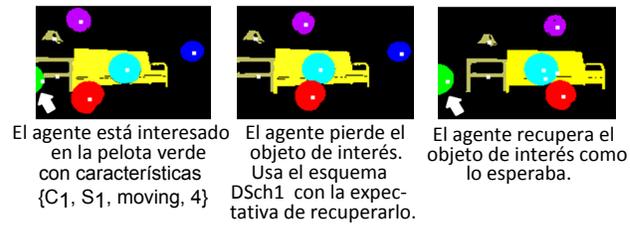
nuevo esquema (el cual se muestra en la parte inferior de la Figura 5.2) que asocia la respuesta afectiva de *displacer* disparada por un objeto de cualquier color, tamaño, movimiento, y en cualquier posición de su campo de visión, con la acción de mover la cabeza a la izquierda, y la expectativa de obtener una respuesta afectiva de *placer* hacia ese mismo objeto. Por lo tanto, las nuevas estructuras de conocimiento representan una generalización excesiva de la nueva experiencia. Es decir, basta con que el agente recupere accidentalmente un sólo objeto en particular, para que uno de sus esquemas comience a registrar la expectativa de que con la misma acción puede recuperar cualquier otro objeto. Estas nuevas estructuras son de tipo  $T_n$ ,  $T_4$  para este ejemplo en particular, ya que los objetos que pueden recuperar se describen en términos de todas sus variables no instanciadas:  $\text{color}=a$ ,  $\text{tamaño}=b$ ,  $\text{movimiento}=c$  y  $\text{posición dentro del campo de visión}=d$ .



**Figura 5.2:** Ilustra el proceso de *acomodación* en la situación en la que el agente dispara un estado emocional de sorpresa.

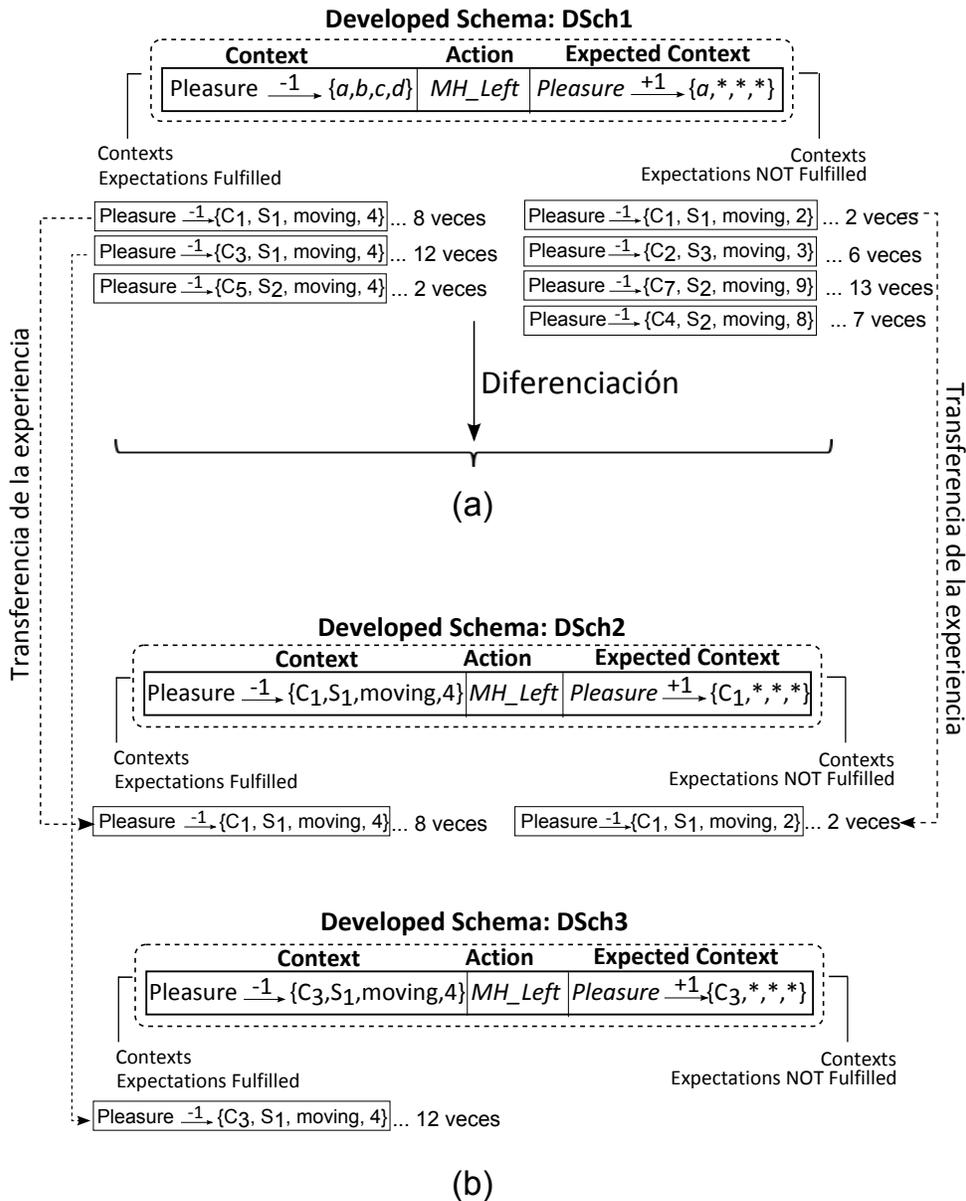
**Primeras diferenciaciones:** creación de esquemas tipo  $T_0$ . A partir del momento en el que el agente comienza a crear y a usar sus esquemas desarrollados, comienza también a registrar en su *contexto-actual* las expectativas de las consecuencias de sus acciones, las cuales algunas veces se cumplen y otras no (recordemos que por el momento sus expectativas están relacionadas con la recuperación de la respuesta afectiva de placer causada por el objeto de interés). Cuando sus expectativas se cumplen, entonces se agrega el último *contexto-actual* al grupo *Contexts Expectations Fulfilled* (ver Figura 5.3a). Por el contrario, cuando las expectativas no se cumplen, se agrega el último *contexto-actual* al grupo *Contexts Expectations NOT Fulfilled* (ver Figura 5.3b). Adicionalmente, en este último caso se dispara una motivación de curiosidad cognitiva que se registra en el *contexto-actual*, indicando que el conocimiento del mundo se está conflictuando con la realidad y que por lo tanto necesita ser modificado. Sin embargo, esto sólo es posible cuando la estructura de conocimiento en conflicto ha registrado la suficiente experiencia. Es decir, cuando cumple con las siguientes dos condiciones: 1) que *Engagement* la haya usado un número mínimo de veces (p. ej. por lo menos  $N_{UsedT_4} = 50$  veces) y 2) que de éstas, por lo menos en un cierto porcentaje no se hayan cumplido las expectativas (p. ej. por lo menos en el  $P_{FailureT_4} = 30\%$  de las ocasiones), como aquél que se muestra en la Figura 5.4a. Si estas dos condiciones se cumplen, entonces se considera que la estructura en conflicto es muy general y debe ser diferenciada. La diferenciación consiste en crear un nuevo esquema por cada objeto que el agente haya registrado la expectativa de recuperar por lo menos en un cierto número de ocasiones (p. ej. en  $N_{Trials} = 10$ ), y que de éstas lo haya recuperado la mayoría de las veces (p. ej. por lo menos en el  $P_{SuccessObj} = 80\%$ ), como se ejemplifica en la Figura 5.4b. Los nuevos esquemas son de tipo  $T_0$ , ya que los objetos que pueden recuperar se describen en términos de características particulares (es decir, todas sus características se definen en términos de variables instanciadas). Como parte final del proceso de diferenciación, se transfiere la experiencia registrada en los conjuntos *Contexts Expectations Fulfilled* y *Contexts Expectations NOT Fulfilled* de la estructura general a los esquemas diferenciados, como se ejemplifica en la Figura 5.4. Si

## 5. El Modelo Dev E-R



**Figura 5.3:** Ilustra la manera en la que el esquema va guardando la experiencia de su uso: (a) en el caso en el que se cumplen las expectativas, y (b) en el caso en el que no se cumplen.

## 5.2 Simulación del Proceso de Acomodación



**Figura 5.4:** (a) Muestra el esquema de la Figura 5.3 en el momento en el que está listo para sufrir un proceso de acomodación, ya que: 1) se ha usado 50 veces y 2) en el 56 % de éstas no se han cumplido sus expectativas. (b) Muestra los dos esquemas resultantes de su proceso de acomodación, los cuales surgen como una diferenciación del esquema general en estructuras más particulares.

después de este proceso el número de contextos restantes en el conjunto *Contexts Expectations NOT Fulfilled* excede un cierto porcentaje (p. ej. si excede el  $P_{DeleteT_4} = 70\%$ ), entonces éste se elimina (como el caso del esquema  $D_{Sch1}$  de la Figura 5.4).

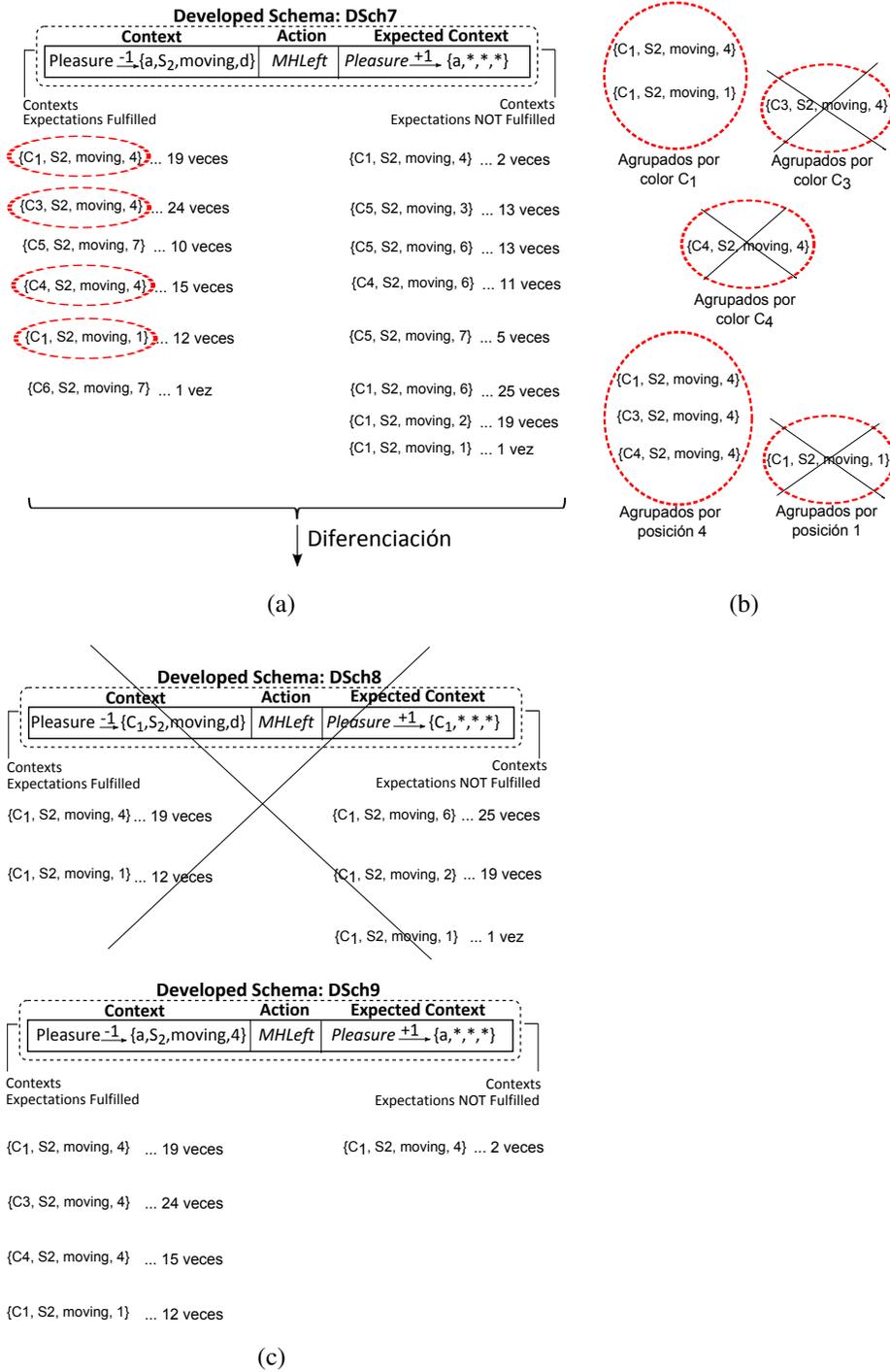
**Generalizaciones intermedias:** creación de esquemas tipo  $T_{n-1} \dots T_1$ . Los procesos de generalizaciones excesivas y diferenciaciones continúan hasta que *Dev E-R* detecta que se han creado  $N_{T_0}$  estructuras de conocimiento de tipo  $T_0$  con la misma acción asociada y con la misma relación afectiva de displacer en sus contextos (por ejemplo, aquellos que se muestran en la Figura 5.5a). En ese momento se realiza nuevamente un proceso de acomodación, el cual consiste en generalizar la experiencia registrada en los  $N_{T_0}$  esquemas particulares. Por ejemplo, si el agente detecta que con un movimiento de la cabeza a la izquierda ha logrado recuperar objetos de diferentes colores, en diferentes posiciones de su campo de visión, pero todos ellos de tamaño  $S_1$  y en movimiento, entonces extiende esta experiencia creando la nueva estructura de la Figura 5.5b (la cual reemplaza a todos los esquemas particulares usados en este proceso, e indica que con un movimiento de la cabeza a la izquierda se tiene la expectativa de recuperar la respuesta afectiva causada por objetos de cualquier color, de tamaño  $S_1$ , en movimiento y en cualquier posición del campo de visión). A estas nuevas estructuras se les llama esquemas tipo  $T_{n-1} \dots T_1$ , ya que describen cómo recuperar objetos que cuentan con sólo algunas características definidas por medio de variables sin instanciar (por ejemplo, el nuevo esquema de la Figura 5.5b es de tipo  $T_2$ ). Al final del proceso de generalización se transfiere la experiencia registrada en las estructuras de conocimiento particulares al nuevo esquema general, como se ejemplifica en la Figura 5.5.

**Diferenciaciones intermedias:** creación de esquemas tipo  $T_{n-2} \dots T_0$ . Los esquemas tipo  $T_{n-1} \dots T_1$  pueden seguir provocando que el agente entre en estados de conflicto cognitivo debido a que las variables no instanciadas permiten incluir casos inadecuados o a que la generalización de la que surgieron fue inco-





## 5.2 Simulación del Proceso de Acomodación



**Figura 5.7:** Ejemplifica el proceso de diferenciación de esquemas tipo  $T_{n-1} \dots T_2$ .

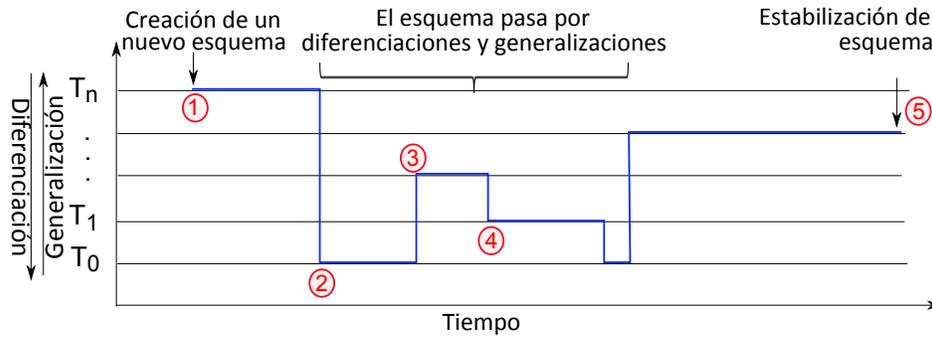
los objetos que puede recuperar están en términos de variables no instanciadas). Entonces, se diferencia de la siguiente manera. 1) Se seleccionan todos los objetos que el agente haya tenido la expectativa de recuperar por lo menos en  $N_{Trials}$  ocasiones, y que de esas  $N_{Trials}$  ocasiones, los haya recuperado por lo menos en el  $P_{SuccessObj}$  % de las veces (los objetos seleccionados se encuentran señalados con un círculo en la Figura 5.7a, para  $N_{Trials} = 2$  y  $P_{SuccessObj} = 80$  %). 2) Aquellos que fueron seleccionados se agrupan por color y por posición, es decir, se agrupan por cada característica no instanciada (ver Figura 5.7b). 3) Se eliminan los grupos que contengan menos de  $N_{Trials}$  objetos (como se ilustra en la Figura 5.7b). 4) Por cada característica representativa de los grupos restantes (es decir, por cada color y posición restante), se crea una nueva estructura que indique cómo recuperar esos objetos en particular (ver Figura 5.7c). 5) Se transfiere la experiencia a los nuevos esquemas particulares (como se muestra en la Figura 5.7c). 6) Si el porcentaje de éxito de la nueva estructura es mayor del  $P_{SuccessNew}$  % (p. ej. si es mayor del 60 %), entonces se conserva, en caso contrario se elimina (como el caso de *DSch8* de la Figura 5.7). Y 7) si el porcentaje de fracaso del esquema general, después de la transferencia de la experiencia, supera un cierto porcentaje  $P_{DeleteT3T2}$  %, entonces se elimina (como el caso de *DSch7* de la Figura 5.7a, quien terminó con un 66 % de falla). Sin embargo, para no perder la experiencia que aún tiene registrada, antes de eliminarlo se diferencia en estructuras tipo  $T_0$  de la misma manera en la que se diferenciaron los esquemas de las Figuras 5.4 y 5.6. Si en algún momento alguno de los esquemas tipo  $T_0$  supera un cierto porcentaje de falla (p. ej. si supera el  $P_{DeleteT0} = 50$  % de falla), y tiene por lo menos  $N_{UsedT0}$  objetos asimilados, entonces se elimina.

De esta manera, los esquemas se van creando, generalizando, diferenciando y eliminando conforme el agente se enfrenta a situaciones desconocidas o situaciones de conflicto (como se resume en la Figura 5.8).

### 5.3 Simulación del Proceso de Equilibrio Cognitivo

El proceso de acomodación, resumido en la Figura 5.8, continúa hasta que llega el momento en el que el agente logra interactuar con su mundo durante los últi-

### 5.3 Simulación del Proceso de Equilibrio Cognitivo

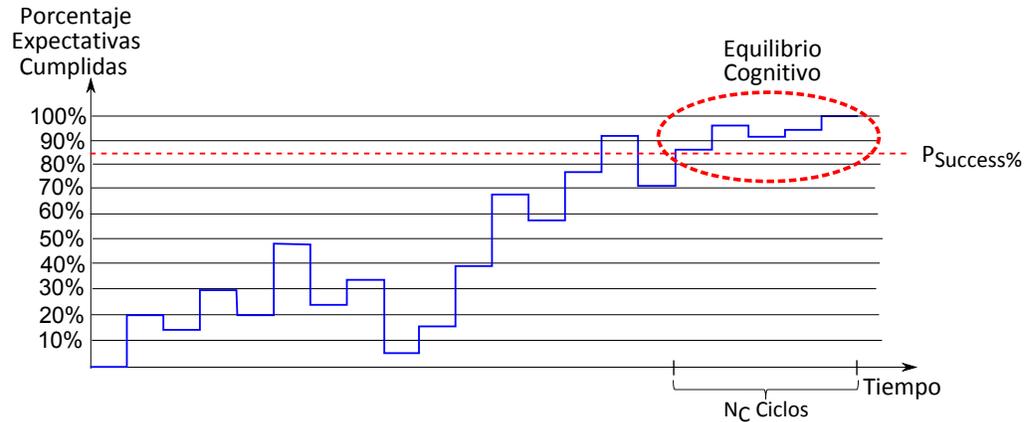


**Figura 5.8:** Resume los procesos de acomodación de los esquemas del agente: 1) Se crea un nuevo esquema tipo  $T_n$  cuando el agente presenta un estado emocional de sorpresa, es decir, cuando recupera por accidente un objeto de interés; 2) se diferencia en estructuras particulares tipo  $T_0$  cuando sus expectativas asociadas no se cumplen un cierto porcentaje de veces; 3) se generaliza en un esquema tipo  $T_{n-1}$  ...  $T_1$  cuando se detecta que una misma acción puede recuperar varios objetos con características diferentes; 4) si el esquema sigue provocando que el agente entre en estados de conflicto cognitivo, entonces se considera que éste es aún muy general y se vuelve a diferenciar en esquemas más particulares; 5) este proceso continúa hasta que el esquema se elimina o hasta que deja de sufrir acomodaciones debido a que sus expectativas se cumplen la mayoría de las veces, es decir, hasta que se estabiliza.

mos  $N_C$  ciclos sin verse en la necesidad de modificar su conocimiento, debido a que sus expectativas se cumplieron la mayoría de las veces (por lo menos en el  $P_{Success}$  % de las veces), como se ilustra en la Figura 5.9. En ese momento decimos que el agente ha entrado en un estado de equilibrio cognitivo (ver Figura 5.9), y a los esquemas que ha construido hasta el momento se les considera como estabilizados. Es decir, son estructuras de conocimiento que durante cierto tiempo ya no han sufrido ninguna de modificación, como se ilustra en la Figura 5.8).

Si se vuelve a construir, eliminar o modificar algún esquema, entonces se considera que el agente ha entrado nuevamente en un estado de desequilibrio cognitivo. De tal forma que éste tendrá que volver a cumplir con que en los últimos  $N_C$  ciclos no se vio en la necesidad de modificar su conocimiento debido

## 5. El Modelo Dev E-R



**Figura 5.9:** Ejemplifica el momento en el que el agente entra en un estado de equilibrio cognitivo. Cuando el agente inicia y comienza a crear sus propios esquemas, sus expectativas se cumplen un porcentaje muy bajo de ocasiones produciéndole la necesidad de acomodar su conocimiento. Con el tiempo, logra interactuar con su mundo sin verse en la necesidad de modificar más su conocimiento debido a que sus expectativas se cumplieron la mayoría de las veces (por lo menos el  $P_{Success} \%$  de las veces durante los últimos  $N_C$  ciclos). En ese momento se dice que el agente ha entrado en un estado de equilibrio cognitivo.

a que sus expectativas se cumplieron la mayoría de las veces, para que vuelva a entrar en un estado de equilibrio cognitivo.

Cada vez que el agente entra en este estado, se van activando nuevas habilidades. En la primera ocasión, se activa su capacidad de realizar correspondencias parciales entre su *contexto-actual* y sus esquemas básicos y aquellos desarrollados que ya se hayan estabilizado, como se describe a detalle en la siguiente sección. Habilidad que no era capaz de realizar en un inicio. Posteriormente, cuando se detecta que el agente se ha mantenido en este estado por  $N_C$  ciclos, y su base de conocimiento contiene esquemas visuales y táctiles estabilizados, entonces se vuelve capaz de representar en sus contextos actuales tanto información visual como táctil. Es decir, se vuelve capaz de atender al mismo tiempo tanto lo ve como lo que toca.

### 5.4 Simulación del Proceso de Asimilación.

La *asimilación* se refiere al proceso de responder a nuevos hechos y situaciones en concordancia con lo ya conocido y recuperable de la memoria (Guerin, 2011b). En este sentido, *Dev E-R* simula el proceso de asimilación a través de la búsqueda de esquemas que representen situaciones similares a la descrita en el *contexto-actual*. De esta manera, permite que el agente se adapte a las nuevas situaciones haciendo uso de su conocimiento adquirido en experiencias pasadas.

En un inicio, el *contexto-actual* debe de corresponder en un 100 % con el contexto asociado a un esquema (como es el caso del ejemplo de la Figura 5.1). Para ejemplificar este caso (es decir, cómo el agente usa su conocimiento adquirido para enfrentar una nueva situación con una correspondencia del 100 %), supongamos que comienza a atender un objeto que ve por primera vez con características  $\{C_9, S_1, moving, 1\}$ , el cual se está moviendo hacia la izquierda causando que salga de su campo de visión y disparándole una respuesta afectiva de desagrado. En este caso, puede usar su conocimiento registrado en el esquema de la Figura 5.5b (ya que hay una correspondencia del 100 % entre el objeto que perdió, registrado en el *contexto-actual*, con el del esquema) para enfrentar esta nueva situación. Al usar dicho esquema, mueve su cabeza a la izquierda, y logra recuperar el objeto de interés.

Una vez que comienzan a existir esquemas estabilizados en la base de conocimiento del agente, éste empieza a ser capaz de disminuir su porcentaje de correspondencia que usa para encontrar en memoria un esquema que represente una situación similar al *contexto-actual*. En otras palabras, comienza a permitir que haya correspondencias parciales. De tal forma, que cada vez que *Engagement* busca una acción a realizar dada la situación actual, ejecuta el siguiente procedimiento:

1. Decide aleatoriamente si en esta ocasión disminuirá el porcentaje de correspondencia, ya que solo un cierto porcentaje de veces que el agente entra en modo de engagement elige realizar correspondencias parciales.

2. Si decide no disminuir el porcentaje, entonces busca todos los esquemas cuyos contextos representen exactamente la misma situación del contexto-actual (correspondencia del 100 %, como el caso ilustrado en la Figura 5.1).
3. Si durante el paso anterior *Engagement* no logró asociar al 100 % algún esquema desarrollado con el contexto-actual, o si en el paso 1 decidió que en esta ocasión realizaría una correspondencia parcial, entonces disminuye automáticamente su porcentaje de correspondencia y vuelve a realizar la búsqueda. Las correspondencias parciales pueden darse de dos maneras. Primero, si el *contexto-actual* está compuesto de una sólo respuesta afectiva entonces se permite que alguno de los elementos de ésta difiera de alguno de los elementos del contexto asociado a un esquema (puede diferir en el tipo, valencia o intensidad de la respuesta afectiva, o en el color, tamaño, movimiento, posición dentro del campo, o en la textura o posición de la mano). Segundo, si el *contexto-actual* está compuesto de más de una respuesta afectiva entonces se permite que cada una de ellas se haga corresponder con un esquema diferente, o incluso que una de ellas se quede sin correspondencia (en la sección 6.3.2 se presentan varios ejemplos de éste segundo caso). Es importante enfatizar que las correspondencias parciales se realizan únicamente con los esquemas básicos, así como con aquellos desarrollados que ya se consideran como estabilizados, y se llevan a cabo en el siguiente orden. Primero intenta hacer corresponder parcialmente el *contexto-actual* con los esquemas que se estabilizaron durante la primera vez que el agente entro en equilibrio cognitivo. Si esto no fue posible, lo intenta con los esquemas que se estabilizaron en la segunda vez que el agente entro en equilibrio cognitivo. Y así, sucesivamente. Si al final de este proceso no logra realizar ninguna correspondencia parcial, entonces lo intenta con los básicos.
4. Si *Engagement* no pudo encontrar ninguna correspondencia total o parcial, entonces pasa a modo de *Reflection*, en donde por el momento sólo puede resolver estas situaciones eligiendo realizar una acción física aleatoria.

## 5.4 Simulación del Proceso de Asimilación.

---

5. Por el contrario, si encontró uno o varios esquemas (ya sea con correspondencia total o parcial) le asigna una mayor probabilidad de ser elegido a aquellos que tengan el mayor porcentaje de expectativas cumplidas, y con los se espera obtener mayor placer.
6. Una vez seleccionado un esquema, se ejecuta su acción asociada, el agente sensa nuevamente su mundo, actualiza su *contexto-actual*, y el ciclo se repite.

Si la estructura elegida por *Engagement* es un esquema desarrollado que se seleccionó como resultado de una correspondencia parcial, y si después de aplicar su acción asociada sus expectativas se cumplen, entonces se construye un nuevo esquema que representa la manera en que el agente enfrentó con éxito la nueva situación. Con la creación de nuevos esquemas la base de conocimiento del agente vuelve a sufrir acomodaciones, provocando que éste vuelva a entrar en un estado de desequilibrio cognitivo. El agente permanece en este estado hasta que los nuevos esquemas logran estabilizarse. Así, vuelve a entrar en equilibrio cognitivo. Los nuevos esquemas estabilizados comienzan a usarse entonces en la realización de correspondencias parciales, produciendo la creación de nuevos esquemas y provocando que éste entre nuevamente en un estado de desequilibrio cognitivo, y así sucesivamente. De esta manera, el agente simula un proceso de adaptación que lo lleva a pasar de estados de desequilibrio, a estados de equilibrio, y de nuevo al desequilibrio.



*“No amount of experimentation can ever prove me right; a single experiment can prove me wrong.”*

Albert Einstein

CAPITULO

# 6

## Experimentos y Resultados

Para probar el modelo *Dev E-R* diseñamos tres conjuntos de experimentos. El primero de ellos consistió en configurar al agente de tal forma que éste sólo podía ver pero no tocar su mundo. En el segundo hicimos lo opuesto, es decir, lo configuramos de tal forma que sólo podía tocar pero no ver su mundo. Finalmente, en el tercero le habilitamos su capacidad tanto de ver como de tocar. Las descripciones de tales experimentos así como los resultados obtenidos se reportan a continuación.

### 6.1 Primer Conjunto de Experimentos: El Agente Sólo Puede Ver su Mundo

Para el primer conjunto de experimentos se crearon dos ambientes virtuales con los cuales el agente interactuó en tres ocasiones independientes. Su ejecución se consideró como terminada cuando sus esquemas creados le permitieron mantenerse en un estado de equilibrio cognitivo durante los últimos 1000 ciclos (lo cual, como veremos, ocurre después de que en varias ocasiones pasa de estados

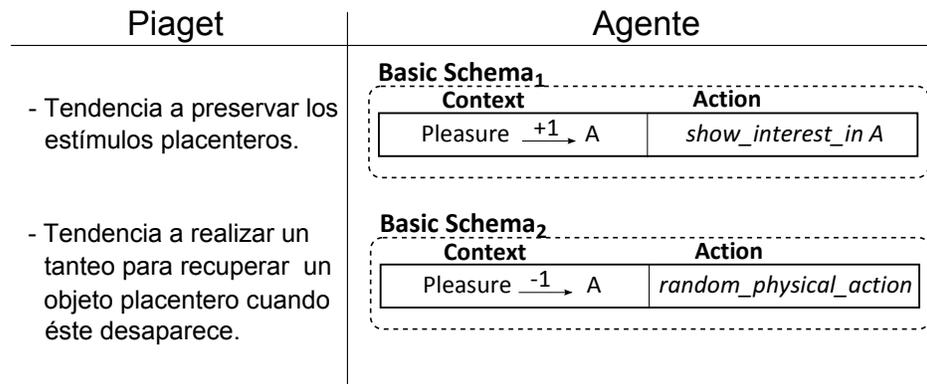
## 6. Experimentos y Resultados

de equilibrio a estados de desequilibrio y de vuelta al equilibrio). Es decir, hasta que mostró haber adquirido nuevas habilidades que le permitieron interactuar con su mundo (recuperando y conservando visualmente los objetos de su agrado) haciendo uso de su conocimiento construido. Para realizar los experimentos se inicializó con los valores de los parámetros de *Dev E-R* que se muestran en la tabla 6.1, así como con el siguiente conocimiento inicial.

### 6.1.1 Conocimiento Inicial

El agente se inicializó con los dos esquemas básicos que se muestran en la Figura 6.1. Éstos representaron los únicos dos comportamientos que conocía para interactuar con su mundo, los cuales modelan dos tendencias innatas que Piaget observó en los recién nacidos (referentes a la conservación de los estímulos placenteros). El primero de ellos le permite mantener su atención en los objetos de su interés, mientras que el segundo le permite realizar un tanteo para recuperarlos cuando éstos desaparecen. La variable  $A$  representa cualquier elemento visual definido como  $A = \{\text{color, tamaño, movimiento, posición}\}$ .

Adicionalmente, recordemos que el agente se inicializa con la capacidad de poder diferenciar únicamente los colores primarios rojo, verde y azul, así como



**Figura 6.1:** Esquemas básicos iniciales. Estos esquemas representan los comportamientos predefinidos que el agente inicialmente conoció para interactuar con su mundo.

## 6.1 Primer Conjunto de Experimentos: El Agente Sólo Puede Ver su Mundo

Parámetro	Descripción	Valor
$N_{UsedT4}$	Número mínimo de veces que un esquema tipo $T_4$ debe ser usado antes de que pueda acomodarse.	4
$P_{FailureT4}$	Porcentaje mínimo de falla de un esquema tipo $T_4$ para que se considere que debe ser acomodado.	10
$P_{DeleteT4}$	Porcentaje mínimo de falla para eliminar un esquema tipo $T_4$	90 %
$N_{Trials}$	Número mínimo de veces que un objeto debe ser asimilado a un esquema, para que éste se considere en el proceso de diferenciación.	2
$P_{SuccessObj}$	Porcentaje mínimo de éxito para recuperar el mismo objeto para que éste pueda ser considerado en el proceso de diferenciación.	60 %
$N_{T0}$	Número necesario de esquemas de tipo $T_0$ para poder realizar una <i>generalización</i> .	2
$P_{DeleteT0}$	Porcentaje mínimo de fallas necesarias para eliminar un esquema tipo $T_0$ .	50 %
$N_{UsedT0}$	Número mínimo de objetos asimilados a un esquema tipo $T_0$ necesarios para eliminarlo.	6
$P_{DeleteT3T2}$	Porcentaje mínimo de falla de los esquemas de tipo $T_3$ y $T_2$ para que sean eliminados.	85 %
$P_{SuccessNew}$	Porcentaje mínimo de éxito de un nuevo esquema diferenciado para conservarlo.	60 %
$N_C$	Número necesario de ciclos en los que no ha habido ningún proceso de acomodación para considerar que el agente ha alcanzado un estado de equilibrio cognitivo.	2000
$P_{Success}$	Porcentaje mínimo de expectativas satisfechas para considerar que el agente ha alcanzado un estado de equilibrio cognitivo.	75 %

**Tabla 6.1:** Valores y descripciones de los principales parámetros de *Dev E-R* usados en los experimentos.

## 6. Experimentos y Resultados

---

los tamaños pequeño y grande, de los cuales aún no puede reconocer ninguno. Para estos experimentos se considera que un objeto es pequeño cuando tiene un valor cercano a 5400 píxeles, es decir cuando abarca una cuarta parte del campo de visión; y que es grande cuando tiene un valor cercano a 16,200 píxeles, es decir cuando abarca tres cuartas partes del campo de visión. Finalmente, recordemos que las únicas acciones físicas (o externas) que puede realizar son aquellas relacionadas con el movimiento de su cabeza, las cuales se listaron en la Tabla 4.2.

### 6.1.2 Desarrollo de las Habilidades Visuales del Agente en la Sala de una Casa

En este primer experimento el agente interactuó con el modelo tridimensional de la sala de una casa, la cual contenía en su interior muebles, plantas, juguetes, etc., (ver Figuras 4.1 y 6.2). En este mundo todos los objetos se encontraban estáticos a excepción de 5 pelotas de diferentes colores que comenzaban a moverse en distintos momentos y en diversas direcciones predefinidas (a veces rodaban de izquierda a derecha y de regreso, y otra veces botaban). Colocamos al agente sentado en medio del ambiente y lo dejamos interactuar con éste en tres ocasiones independientes. Los resultados obtenidos los reportamos a continuación.

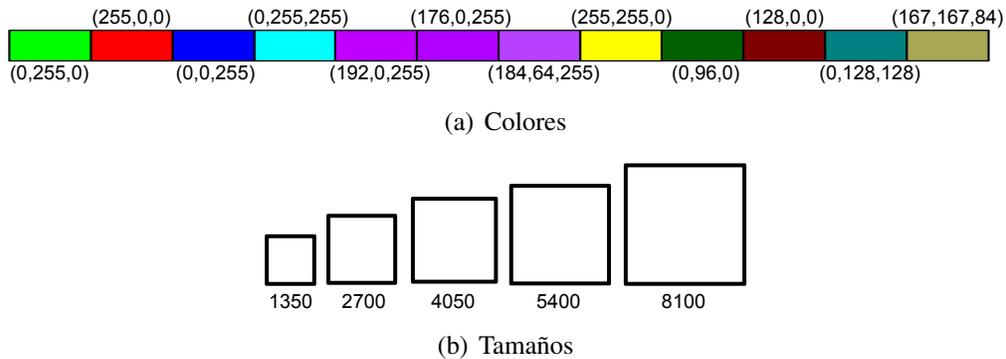
#### 6.1.2.1 Resultados

Primeramente, en la Figura 6.3 se muestran los colores y tamaños que el agente aprendió a reconocer al interactuar con este ambiente.



**Figura 6.2:** Imágenes del primer ambiente con el cual el agente interactuó.

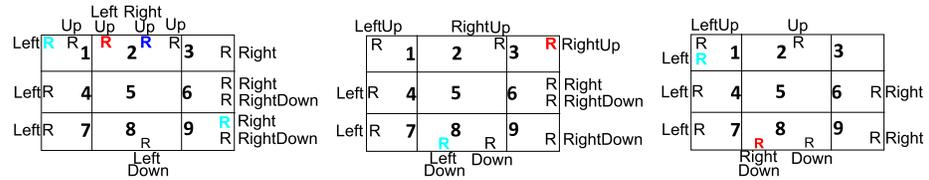
## 6.1 Primer Conjunto de Experimentos: El Agente Sólo Puede Ver su Mundo



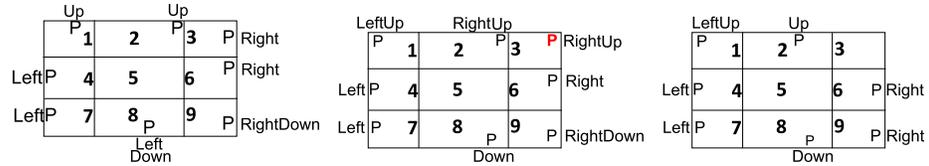
**Figura 6.3:** Muestra los colores (en el espacio de color rgb) y tamaños (en número de píxeles) que el agente aprendió a reconocer cuando interactuó con la sala de una casa.

Segundo, durante las etapas de desarrollo que consideramos en este modelo (los primeros tres subestadios del periodo sensoriomotor), las nuevas conductas que el agente adquiere están basadas en el aprendizaje de cómo recuperar las respuestas afectivas de placer causadas por los objetos de su interés, y en aprender a recuperarlas cuando las pierde. Con esto en mente, en la Figura 6.4 presentamos los comportamientos que desarrolló al final de las tres ejecuciones. Las letras “R”, “P” y “S” se usaron para indicar las posiciones dentro del campo de visión en donde aprendió cómo recuperar y preservar los objetos perdidos placenteros (estáticos y en movimiento), así como una etiqueta con el nombre de una acción (fuera del cuadro que representa el campo de visión) que indica el movimiento que aprendió a ejecutar en tal posición. Por ejemplo, durante la primera corrida (ver la Figura 6.4a) el agente aprendió a recuperar y a conservar los objetos placenteros que veía o dejaba de ver en la posición 6 moviendo su cabeza a la derecha. También aprendió que era posible recuperar los objetos de color cian que salían de su campo de visión por la posición 1 moviendo su cabeza hacia la izquierda. Fue así que durante la primera ejecución el agente creó 29 nuevos esquemas (13 para recuperar objetos que perdía en las diferentes posiciones del campo de visión, 8 para conservar aquellos que estaban en movimiento y 8 para conservar aquellos que estaban estáticos), durante la segunda ejecución creó 26

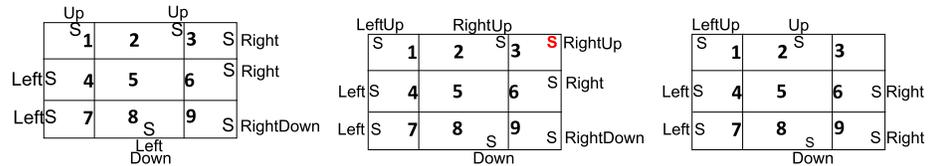
## 6. Experimentos y Resultados



(a) Primera ejecución: *recuperación* de objetos placenteros. (b) Segunda ejecución: *recuperación* de objetos placenteros. (c) Tercera ejecución: *recuperación* de objetos placenteros.



(d) Primera ejecución: *preservación* de objetos placenteros. (e) Segunda ejecución: *preservación* de objetos placenteros. (f) Tercera ejecución: *preservación* de objetos placenteros.



(g) Primera ejecución: *preservación* de objetos placenteros *estáticos*. (h) Segunda ejecución: *preservación* de objetos placenteros *estáticos*. (i) Tercera ejecución: *preservación* de objetos placenteros *estáticos*.

**Figura 6.4:** Muestra las nuevas habilidades que el agente adquirió durante las tres ejecuciones, cuando éste se desarrolló en la sala de una casa: (a)-(c) posiciones del campo de visión en donde el agente aprendió cómo *recuperar* objetos placenteros perdidos, (d)-(f) posiciones dentro del campo de visión en donde el agente aprendió cómo *preservar* objetos placenteros, y (g)-(i) posiciones dentro del campo de visión en donde el agente aprendió cómo preservar objetos placenteros *estáticos*.

y durante la tercera corrida creó 23 nuevos esquemas en total.

Para comenzar a analizar estos resultados, generamos la gráfica de la Figura 6.5, en la cual presentamos en grupos de 1000 ciclos (graficados en el eje de las abscisas) el número de objetos placenteros que el agente perdió durante su primera interacción con el ambiente. Es decir, ésta muestra el número de elementos

## 6.1 Primer Conjunto de Experimentos: El Agente Sólo Puede Ver su Mundo



**Figura 6.5:** Muestra el número de objetos que el agente perdió a lo largo de su ejecución.

visuales que el agente no logró conservar dentro de su campo de visión durante esas iteraciones (graficados en el eje de las ordenadas). Por ejemplo, en la gráfica podemos observar que el agente perdió 55 objetos agradables en los primeros 1000 ciclos. Más importante aún, en ésta podemos identificar 3 fases (las cuales también se pudieron identificar en las otras dos ejecuciones):

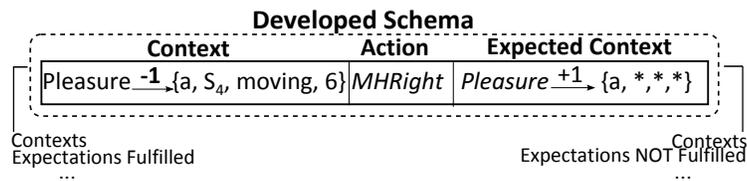
1. **Fase 1:** Abarca del ciclo 0 al ciclo 73,000. Durante ésta el agente se mantuvo constantemente perdiendo objetos de interés.
2. **Fase 2:** Abarca del ciclo 73,000 al ciclo 76,000. Durante ésta se dió una disminución significativa en el número de objetos que el agente perdió.
3. **Fase 3:** Abarca del ciclo 76,000 al ciclo 80,000. Durante ésta el agente no perdió ningún objeto.

A continuación analizaremos cada una de las fases.

**Fase 1.** Durante la fase 1 el agente comenzó a interactuar con su mundo haciendo uso únicamente de sus dos esquemas básicos (mostrados en la Figura 6.1). A partir de ahí, empezó a crear sus primeros esquemas desarrollados: generalizándolos, diferenciándolos y eliminando aquellos cuyas expectativas asociadas no se cumplían la mayoría de las veces. De tal forma, que al término de

## 6. Experimentos y Resultados

los primeros 73,000 ciclos concluyó con 13 nuevas estructuras de conocimiento. Cada una de las cuales representa cómo recuperar un objeto agradable en las diferentes posiciones de su campo de visión. La Figura 6.6 muestra un esquema típico construido durante este periodo de ejecución. Se le considera como típico porque todos aquellos creados en esta primera fase asocian situaciones de *displacer* causadas por la pérdida de un elemento en las diferentes posiciones del campo de visión, con movimientos de la cabeza, y con la expectativa de sentir *agradado* hacia ese mismo objeto una vez ejecutada la acción. Los 13 esquemas desarrollados se resumen en la Figura 6.4a, en donde la letra “R”(de *Recover*) indica las posiciones dentro del campo de visión en donde el agente aprendió cómo recuperar los elementos visuales placenteros.

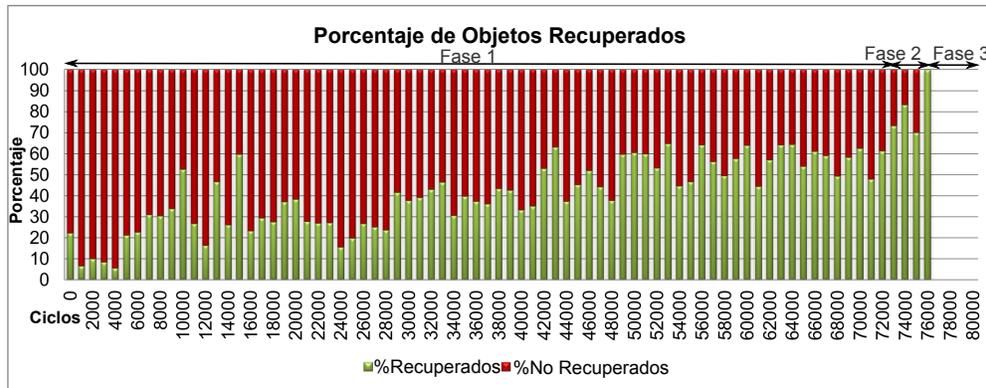


**Figura 6.6:** Un esquema típico de la fase 1.

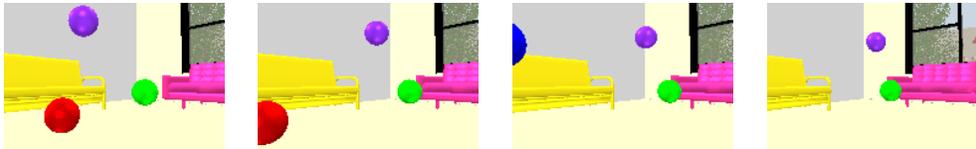
Para observar la evolución de la habilidad del agente en recuperar los objetos de su agrado, conforme desarrollaba sus esquemas, generamos la gráfica de la Figura 6.7. En ésta vemos que al inicio su porcentaje de elementos recuperados no superaba el 22 %, mientras que hacia el final (para el ciclo 73,000) su porcentaje se incrementó hasta poco más del 70 %. Por lo tanto, la fase 1 se caracteriza por la adquisición progresiva de la habilidad para recuperar objetos agradables que por estar en movimiento salieron del campo de visión.

Finalmente, las Figuras 6.8 y 6.9 ilustran los comportamientos típicos del agente al comienzo y al final de esta primera etapa. Al inicio, cuando el agente pierde un elemento visual agradable sólo cuenta con su esquema básico para recuperarlo, el cual tiene asociado una acción externa aleatoria. Esto provoca que en esta fase inicial, veamos al agente voltear en direcciones erróneas ante la pérdida de los objetos de su interés (ver Figura 6.8). Por el contrario, hacia el final de esta primera fase vemos al agente logrando recuperar los elementos

## 6.1 Primer Conjunto de Experimentos: El Agente Sólo Puede Ver su Mundo



**Figura 6.7:** Muestra la evolución de la habilidad del agente en recuperar los objetos de su agrado.



(a) El agente está interesado en la pelota roja, la cual se está moviendo hacia la izquierda.

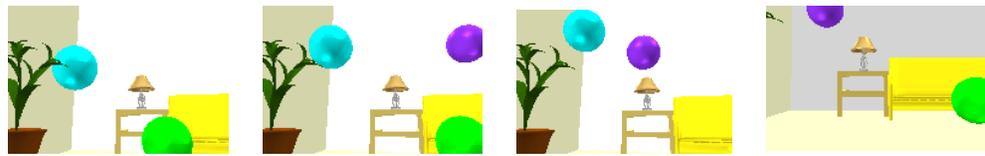
(b) El agente se mantiene interesado en la misma pelota roja.

(c) El movimiento de la pelota roja causa que ésta salga de su campo de visión. Usa entonces su esquema básico y ejecuta una acción externa aleatoria.

(d) La acción seleccionada fue mover su cabeza a la derecha, con la cual no logra recuperar el objeto de interés.

**Figura 6.8:** Ilustra el comportamiento típico del agente al inicio de su ejecución.

## 6. Experimentos y Resultados



(a) El agente está interesado en la pelota verde, la cual se está moviendo hacia la derecha.

(b) El agente se mantiene interesado en la misma pelota verde.

(c) La pelota sale del campo de visión por la posición 9. Usa uno de sus esquemas desarrollados (ver Figura 6.4a), con la expectativa de recuperarla.

(d) La acción seleccionada, voltear su cabeza hacia la derecha y hacia abajo, causa que recupere el objeto de su interés.

**Figura 6.9:** Ilustra el comportamiento típico del agente al final de la fase 1.

visuales de su interés con movimientos adecuados de su cabeza (ver Figura 6.9).

**Fase 2.** Para explicar el surgimiento de la fase 2 generamos la gráfica de la Figura 6.10, en la cual presentamos en grupos de 1000 ciclos (graficados en el eje de las abscisas) el porcentaje de las expectativas que se cumplieron durante esas iteraciones. Por ejemplo, podemos observar que durante los primeros 1000 ciclos se cumplieron apenas el 30 % de sus expectativas, mientras que hacia el final de la fase 2 (para el ciclo 75,000) éstas superaron el 90 %. En esta gráfica también se encuentran marcados con una flecha los ciclos en los cuales el agente entró en un estado de equilibrio cognitivo. Como podemos observar, éste entró por primera vez en equilibrio en el ciclo 73,250, es decir, al inicio de la fase 2. Como consecuencia, a partir de ese momento comenzó a ser capaz de disminuir el porcentaje de correspondencia entre el *contexto-actual* y los esquemas generados durante la fase 1 (por considerarlos después del equilibrio cognitivo como esquemas estables), lo cual dio como resultado la construcción de 8 nuevos esquemas. Cada uno de los cuales representa cómo conservar un objeto agradable que se encuentra en las diferentes posiciones del campo de visión. La Figura 6.11 muestra el típico esquema construido durante esta fase, el cual surgió como resultado de que

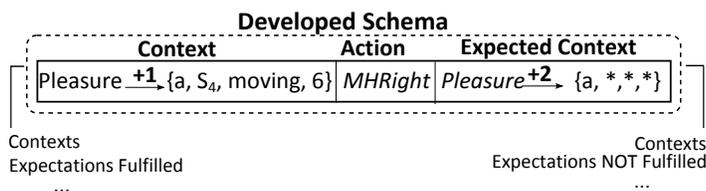
## 6.1 Primer Conjunto de Experimentos: El Agente Sólo Puede Ver su Mundo



**Figura 6.10:** Muestra la evolución del cumplimiento de las expectativas del agente.

el agente atendiera un objeto agradable en la posición 6 de su campo de visión, y realizara una correspondencia parcial con el esquema de la Figura 6.6 (es una correspondencia parcial porque los contextos únicamente difieren en la valencia de la respuesta afectiva). Se le considera un esquema típico de la fase 2 porque todos los esquemas creados en esta segunda fase asocian situaciones de placer (causadas por la presencia de un objeto luminoso en su campo de visión), con un movimiento de la cabeza, y con la expectativa de volver a sentir agrado hacia ese mismo objeto una vez ejecutada la acción.

Los 8 esquemas desarrollados se resumen en la Figura 6.4d, en donde la letra “P”(de *Preserve*) indica las posiciones dentro del campo de visión en donde el agente aprendió cómo preservar los objetos placenteros. Después de que el agente creó y usó estos nuevos esquemas durante algún tiempo, fue posible observar cómo emergió un nuevo comportamiento: el agente comenzó a seguir visualmente los objetos de su interés. Más aún, cuando analizamos las posiciones dentro del



**Figura 6.11:** Un esquema típico de la fase 2.

## 6. Experimentos y Resultados

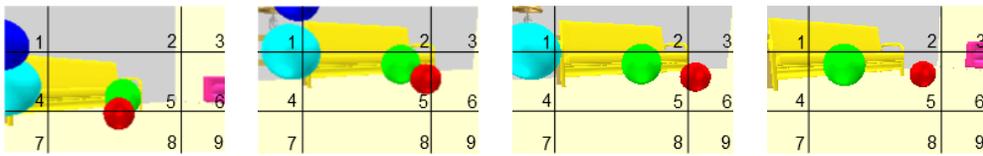
campo visión en donde el agente vio los objetos, observamos que una nueva habilidad había surgido: centrar los objetos de interés en el campo de visión, como se puede observar en la gráfica de la Figura 6.12. En esta gráfica presentamos en grupos de 1000 ciclos (graficados en el eje de las abscisas) el porcentaje de veces que el agente atendió los objetos en el centro y en la periferia de su campo de visión. Por ejemplo, podemos observar que durante los primeros 1000 ciclos el agente atendió apenas el 16 % de los objetos en el centro de su campo de visión, mientras que hacia el final de la fase 2 (para el ciclo 75000) éstos aumentaron al 90 %. Por lo tanto, la fase 2 se caracteriza por la adquisición progresiva de la habilidad para conservar objetos agradables en movimiento, dando como resultado el surgimiento de dos nuevas habilidades: 1) seguir visualmente los objetos de interés, y 2) mantenerlos centrados en su campo de visión.

Para concluir, la Figura 6.13 ilustra el comportamiento típico del agente durante esta fase. En este ejemplo el agente atiende un objeto agradable en la posición 8 de su campo de visión, y usa uno de sus nuevos esquemas desarrollados (ver Figura 6.4d) con la expectativa de conservarlo. La acción ejecutada es un movimiento de su cabeza a la izquierda y hacia abajo, causando que el objeto de interés se coloque en el centro de su campo de visión, en donde lo vuelve a atender. El objeto se mueve hacia la derecha, causando que ahora se coloque en la posición 6 de su campo de visión. Situación en la cual vuelve a usar uno de



**Figura 6.12:** Muestra la evolución de las posiciones en donde el agente atendió los objetos de su interés.

## 6.1 Primer Conjunto de Experimentos: El Agente Sólo Puede Ver su Mundo



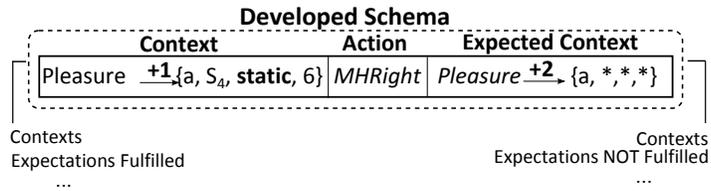
- (a) El agente atiende la pelota roja que se encuentra en la posición 8 de su campo de visión. Usa uno de sus esquemas desarrollados (ver Figura 6.4d) con la expectativa de conservarla.
- (b) La acción ejecutada, un movimiento de su cabeza hacia la izquierda y hacia abajo, causa que la pelota de interés se coloque en el centro de su campo de visión, en donde la vuelve a atender.
- (c) La pelota roja se mueve a la derecha y el agente ahora la ve en la posición 6 de su campo de visión. Usa uno de sus esquemas desarrollados (ver Figura 6.4d) con la expectativa de conservarla.
- (d) La acción ejecutada, mover su cabeza a la derecha, causa que la pelota de interés se coloque nuevamente en el centro del campo de visión del agente.

**Figura 6.13:** Ilustra el comportamiento típico del agente al final de la fase 2.

sus nuevos esquemas desarrollados con la expectativa de conservarlo y mueve su cabeza a la derecha. Ahora el objeto se encuentra nuevamente en el centro de su campo de visión. Es así, que el agente durante esta segunda fase ya no se espera a mover su cabeza hasta que pierde el objeto de interés, como lo hacía en la fase 1, sino que ahora basta con que atienda un objeto agradable para ejecutar un movimiento de su cabeza que le permite conservarlo en su campo de visión. Esto da como resultado el efecto de observar al agente seguir visualmente y centrar los objetos de su interés.

**Fase 3.** Al igual que la anterior, la fase 3 surge a consecuencia de que el agente entrara nuevamente en un estado de equilibrio cognitivo (ver la Figura 6.10). Ya que a partir de ese momento comenzó a ser capaz de disminuir el porcentaje de correspondencia entre el *contexto-actual* y los esquemas generados en la fase 1 y 2, lo cual dio como resultado la construcción de 8 nuevas estructuras de conocimiento. Cada una de las cuales representa cómo conservar un objeto agradable estático en las diferentes posiciones de su campo de visión. La Figura 6.14 muestra el típico esquema construido durante este periodo, el cual sur-

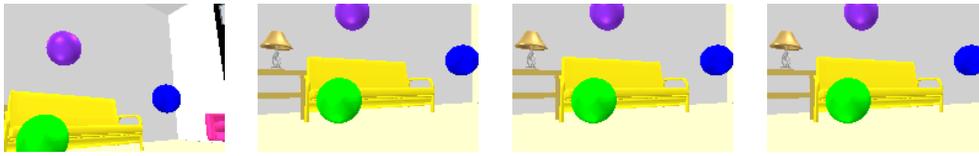
## 6. Experimentos y Resultados



**Figura 6.14:** Un esquema típico de la fase 3.

gió como resultado de que el agente atendiera un objeto estático en la posición 6 de su campo de visión y realizara una correspondencia parcial con la estructura de la Figura 6.11 (es una correspondencia parcial porque los contextos únicamente difieren en el movimiento del objeto). Se le considera como un esquema típico porque todas las estructuras de conocimiento creadas en esta tercera fase asocian situaciones de placer hacia objetos estáticos, con un movimiento de la cabeza, y con la expectativa de volver a sentir agrado hacia ese mismo objeto. Los 8 esquemas desarrollados se resumen en la Figura 6.4g, en donde la letra “S” (de *Static*) indica las posiciones dentro del campo de visión en donde el agente aprendió cómo preservar los objetos placenteros estáticos. Por lo tanto, la fase 3 se caracteriza por la adquisición progresiva de la habilidad para conservar los objetos estáticos de su agrado, la mayoría de las veces, en el centro de su campo de visión.

Para concluir, la Figura 6.15 ilustra el comportamiento típico del agente durante esta fase final, en la que dejó de perder visualmente los objetos de su interés, logrando seguirlos con su visión y manteniéndolos la mayor parte del tiempo en el centro de su campo de visión (tanto aquellos que están en movimiento como los estáticos).



(a) El agente atiende el sillón amarillo en la posición 8 de su campo de visión. Usa uno de sus esquemas desarrollado con la expectativa de conservarlo (ver Figura 6.4g).

(b) La acción ejecutada, un movimiento de su cabeza hacia abajo y a la izquierda, hace que ahora el sillón se encuentre en el centro de su campo de visión.

(c) El agente atiende nuevamente el sillón, el cual se encuentra ahora en el centro de su campo de visión.

(d) El agente continúa atendiendo el sillón en el centro de su campo de visión.

**Figura 6.15:** Ilustra el comportamiento típico del agente al final de fase 3.

### 6.1.3 Desarrollo de las Habilidades Visuales del Agente en la Carretera de una Ciudad

En este segundo experimento el agente interactuó con un modelo tridimensional que representaba la carretera de una ciudad (ver Figura 6.16a). El ambiente estaba compuesto por bancas, árboles, postes, dos puentes y 2 automóviles (uno rojo y otro verde) que se movían a diferentes velocidades de izquierda a derecha y cuando llegaban al final del puente cambiaban su dirección para moverse ahora de derecha a izquierda. El resto de los objetos se encontraban estáticos. El agente se colocó sentado en una banca mirando inicialmente hacia el frente en dirección de los automóviles (ver Fig. 6.16b). Lo dejamos interactuar con este ambiente en tres diferentes ocasiones. Los resultados obtenidos los reportamos a continuación.

#### 6.1.3.1 Resultados

En la Figura 6.17a se muestran los colores y tamaños que el agente aprendió a reconocer al interactuar con este ambiente. Como podemos observar, en contraste con el mundo virtual del experimento 1 que representaba la sala de una casa, en

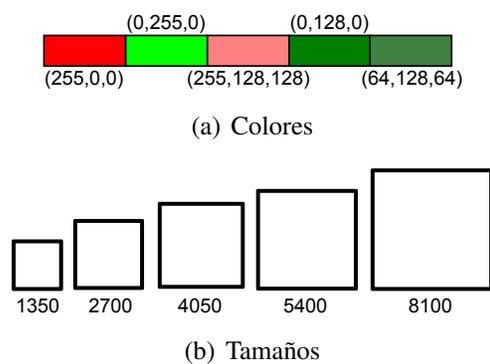
## 6. Experimentos y Resultados



**Figura 6.16:** Imágenes del segundo ambiente con el cual interactuó el agente, el cual representa la carretera de una ciudad.

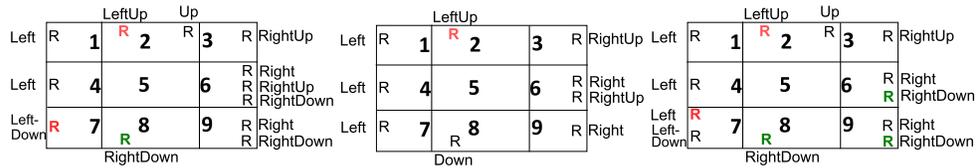
este caso aprendió a reconocer únicamente 5 colores (los cuales son básicamente diferentes tonalidades del color rojo y verde). Con respecto a los tamaños, no hubo ninguna diferencia entre ambos ambientes virtuales (ver Figura 6.17b).

Los comportamientos que el agente desarrolló al final de las tres ejecuciones se presentan en la Figura 6.18. En estos resultados podemos observar que a pesar de que este entorno estaba compuesto de objetos de solo tres colores (rojo, verde y gris), en donde solo dos de ellos captaban la atención del agente (los que eran de color rojo y verde) y en donde las trayectorias de los objetos en movimiento eran solo laterales, el agente adquirió las mismas habilidades (recuperar y pre-

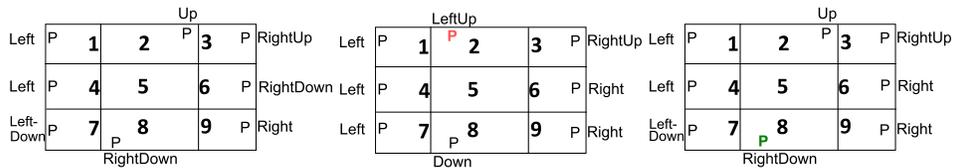


**Figura 6.17:** Muestra los colores (en el espacio de color rgb) y tamaños (en número de píxeles) que el agente aprendió a reconocer cuando interactuó con la carretera de una ciudad.

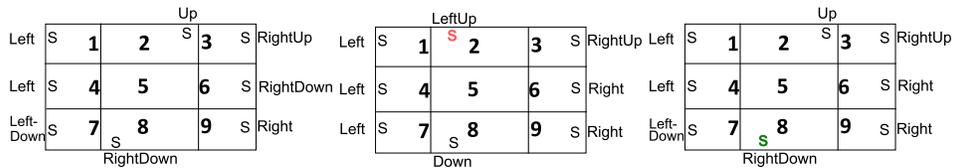
## 6.1 Primer Conjunto de Experimentos: El Agente Sólo Puede Ver su Mundo



(a) Primera ejecución: *recuperación* de objetos placenteros. (b) Segunda ejecución: *recuperación* de objetos placenteros. (c) Segunda ejecución: *recuperación* de objetos placenteros.



(d) Primera ejecución: *preservación* de objetos placenteros. (e) Segunda ejecución: *preservación* de objetos placenteros. (f) Tercera ejecución: *preservación* de objetos placenteros.



(g) Primera ejecución: *preservación* de objetos placenteros *estáticos*. (h) Segunda ejecución: *preservación* de objetos placenteros *estáticos*. (i) Tercera ejecución: *preservación* de objetos placenteros *estáticos*.

**Figura 6.18:** Muestra las nuevas habilidades adquiridas por el agente cuando éste se desarrolló en la carretera de una ciudad, para tres corridas independientes.

## 6. Experimentos y Resultados



**Figura 6.19:** Muestra el número de objetos que el agente perdió a lo largo de su ejecución en la carretera de una ciudad.

servar los objetos placenteros en las diferentes posiciones de su campo de visión) que cuando se desarrolló en un ambiente más “rico” en color y movimiento como lo fue la sala de una casa. Una de las principales razones de este resultado se debe a que el valor usado en el parámetro  $N_{T_0}$  (que representa el número necesario de esquemas de tipo  $T_0$  para poder realizar una generalización) fue un valor pequeño ( $N_{T_0} = 2$ ). Si aumentáramos dicho valor, entonces el agente solo hubiera aprendido a recuperar y a preservar los objetos de color verde y rojo, y no hubiera sido capaz de generalizar tal conocimiento. Una segunda razón se debe a que el movimiento de la cabeza del agente logra que éste pueda ver los coches en movimiento desde diferentes perspectivas, lo que produce que los coches en movimiento desde diferentes perspectivas, lo que produce que vea a éstos en todas las posiciones posibles de su campo de visión.

Para analizar el surgimientos de los nuevos comportamientos, al igual que en el experimento 1, generamos la gráfica de la Figura 6.19, en la cual presentamos en grupos de 1000 ciclos (graficados en el eje de las abscisas) el número de objetos placenteros que el agente perdió, es decir, que salieron de su campo de visión durante esas iteraciones (graficados en el eje de las ordenadas). En ella podemos observar que el resultado de la interacción del agente con un ambiente completamente diferente a la sala de la casa, causó que se pudieran observar nuevamente 3 fases:

## 6.1 Primer Conjunto de Experimentos: El Agente Sólo Puede Ver su Mundo



**Figura 6.20:** Muestra la evolución del porcentaje de los objetos perdidos de la gráfica 6.19, que logra recuperar.

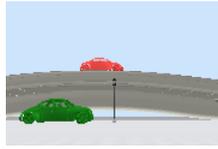
1. **Fase 1:** Abarca desde el ciclo 0 al ciclo 67,000. Durante ésta el agente se mantuvo constantemente perdiendo objetos de interés.
2. **Fase 2:** Abarca del ciclo 67,000 al ciclo 72,000. Durante ésta se dio una disminución significativa en el número de objetos que el agente perdió.
3. **Fase 3:** Abarca del ciclo 72,000 al ciclo 74,000. Durante ésta el agente no perdió ningún objeto.

A continuación analizaremos cada una de las fases.

**Fase 1.** La primera fase se volvió a caracterizar por ser aquella en la que los nuevos esquemas se construyeron como resultado de procesos de generalización y diferenciación causados por la pérdida de objetos agradables. Logrando así adquirir la habilidad de recuperarlos, como se muestra en las Figuras 6.20, 6.21 y 6.22.

**Fase 2.** La segunda fase, al igual que cuando el agente interactuó con la sala de una casa, se caracterizó por ser aquella en la que los esquemas se construyeron como resultado de que el agente entrara por primera vez en un estado de equilibrio cognitivo y con ésto se volviera capaz de realizar correspondencias parciales entre el *contexto-actual* y los esquemas generados durante la fase anterior. De esta manera, en esta fase el agente aprendió a seguir visualmente los

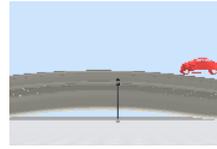
## 6. Experimentos y Resultados



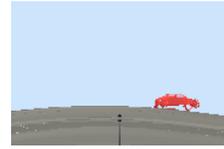
(a) El agente está interesado en el auto verde, el cual se está moviendo hacia la izquierda.



(b) El agente se mantiene interesado en el mismo automóvil.



(c) El movimiento del automóvil causa que éste salga de su campo de visión. Usa entonces su esquema básico y ejecuta una acción aleatoria.



(d) La acción seleccionada fue mover su cabeza hacia arriba, con la cual no logra recuperar el automóvil verde.

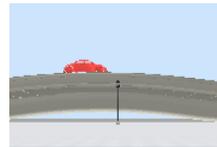
**Figura 6.21:** Ilustra el comportamiento típico del agente al inicio de su ejecución.



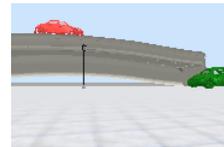
(a) El agente está interesado en el automóvil verde, el cual se está moviendo hacia la derecha.



(b) El agente se mantiene interesado en el mismo automóvil.



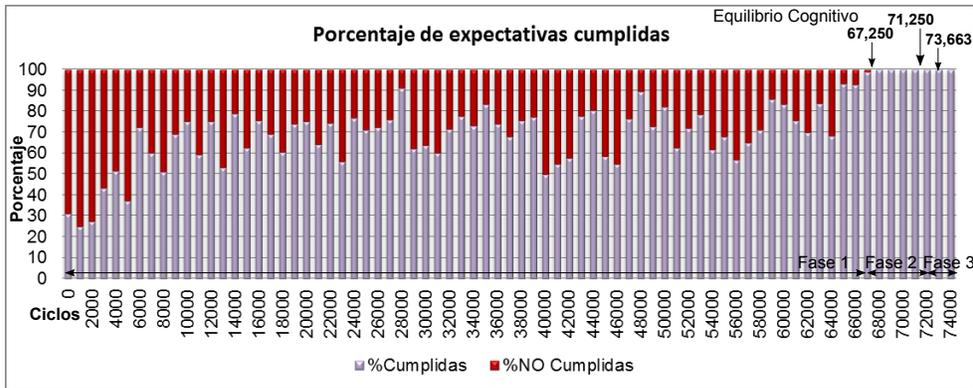
(c) El movimiento del automóvil causa que éste salga de su campo de visión por la posición 9. Usa entonces uno de sus esquemas desarrollados (ver Figura 6.18a), con la expectativa de recuperarlo.



(d) La acción seleccionada, mover su cabeza hacia la derecha y hacia abajo, provoca que logre recuperar el automóvil verde.

**Figura 6.22:** Ilustra el comportamiento típico del agente al final de la fase 1.

## 6.1 Primer Conjunto de Experimentos: El Agente Sólo Puede Ver su Mundo



**Figura 6.23:** Muestra la evolución del cumplimiento de las expectativas del agente, cuando éste interactuó con la carretera de una ciudad.

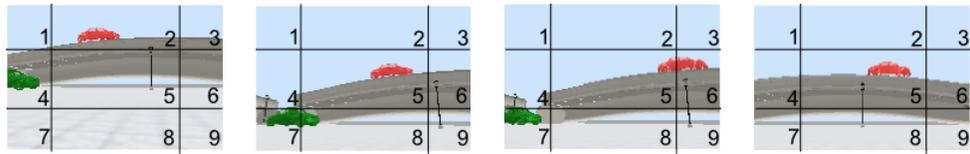


**Figura 6.24:** Muestra la evolución de las posiciones en donde el agente atendió los objetos de su interés, cuando éste interactuó con la carretera de una ciudad.

objetos de interés que estaban en movimiento y a centrarlos en su campo de visión, como se muestra en las Figuras 6.23, 6.24 y 6.25.

**Fase 3.** Finalmente, la tercera fase se volvió a caracterizar por ser aquella en la que el agente entró nuevamente en un estado de equilibrio cognitivo causando que éste comenzara a realizar correspondencias parciales entre el *contexto-actual* y los esquemas creados en las dos fases anteriores. Esto dio como resultado que aprendiera a atender los objetos estáticos en el centro de su campo de visión, como se muestra en la Figura 6.26. Es importante comentar que durante esta fase

## 6. Experimentos y Resultados



(a) El agente está interesado en el automóvil rojo, el cual ve en la posición 2 de su campo de visión. Usa entonces uno de sus esquemas desarrollados (ver Figura 6.18d) con la expectativa de conservarlo.

(b) La acción ejecutada, un movimiento de su cabeza hacia la izquierda y hacia arriba, causa que el automóvil de interés se coloque en el centro de su campo de visión.

(c) El automóvil rojo se mueve a la derecha causando que el agente ahora lo vea en la posición 6 de su campo de visión. Usa uno de sus esquemas desarrollados (ver Figura 6.18d) con la expectativa de conservarlo.

(d) La acción ejecutada, mover su cabeza hacia la derecha, causa que el automóvil de interés se coloque nuevamente en el centro de su campo de visión.

**Figura 6.25:** Ilustra el comportamiento típico del agente al final de la fase 2.



(a) El agente atiende el automóvil verde, el cual ve en la posición 2 de su campo de visión. Usa entonces uno de sus esquemas desarrollados (ver Figura 6.18g) con la expectativa de conservarlo.

(b) La acción ejecutada, un movimiento de su cabeza hacia arriba, causa que el automóvil de interés se coloque en el centro de su campo de visión.

(c) El agente atiende nuevamente el automóvil verde, el cual se encuentra ahora en el centro de su campo de visión.

(d) El agente continúa atendiendo el automóvil en el centro de de su campo de visión.

**Figura 6.26:** Ilustra el comportamiento típico del agente al final de la fase 3.

los 2 automóviles se detuvieron, razón por la cual fueron considerados como elementos visuales estáticos.

## 6.2 Segundo Conjunto de Experimentos: El Agente Sólo Puede Tocar su Mundo

El segundo conjunto de experimentos consistió en configurar al agente de tal forma que sólo pudiera tocar, pero no ver su mundo. Su desarrollo se dio por terminado cuando se mantuvo en un estado de equilibrio cognitivo durante los últimos 500 ciclos. Es decir, hasta que mostró haber adquirido nuevas habilidades que le permitieron interactuar con su ambiente (recuperando y conservando los objetos táctiles de su agrado) haciendo uso de su conocimiento construido. Para realizar los experimentos se inicializó el agente con los valores de los parámetros de *Dev E-R* que se muestran en la tabla 6.2, así como con el siguiente conocimiento inicial.

### 6.2.1 Conocimiento Inicial

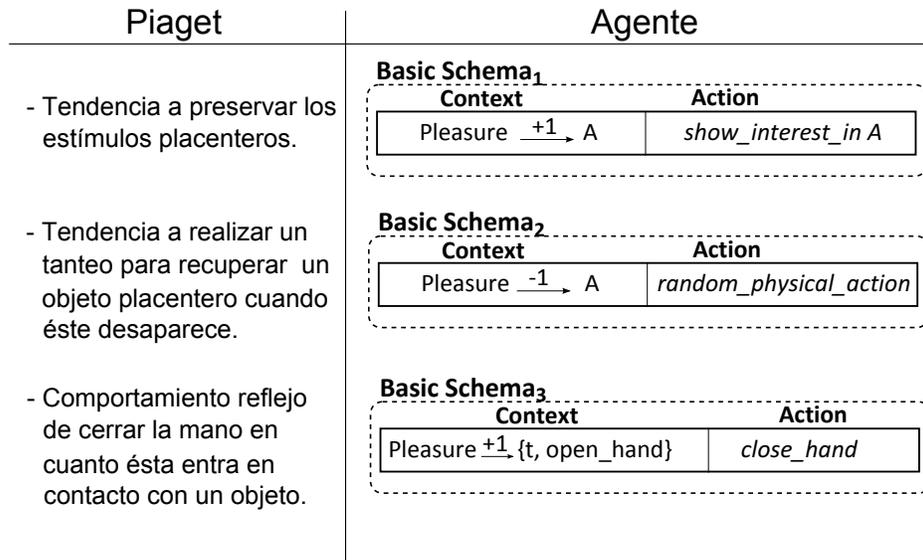
El agente se inicializó con los tres esquemas básicos que se muestran en la Figura 6.27. Éstos representan los únicos comportamientos iniciales que conocía para interactuar con su mundo, los cuales modelan dos tendencias innatas (referentes a la conservación de los estímulos placenteros) y un comportamiento reflejo que Piaget observó en los recién nacidos. El primero de ellos le permite mantener su atención en los objetos de su interés; el segundo le permite realizar un tanteo para recuperarlos cuando éstos desaparecen; y el tercero modela el comportamiento reflejo de cerrar la mano cuando un elemento placentero entra en contacto con ésta. La variable  $A$  representa cualquier objeto táctil definido como  $A = \{ \text{textura, estado\_mano} \}$ , en donde el estado de la mano puede tomar los valores *closed\_hand* u *open\_hand*.

Finalmente, las únicas acciones físicas (o externas) que puede realizar el agente son aquellas relacionadas con el movimiento de su mano (moverla hacia arriba, abajo, derecha, izquierda, adelante, atrás, cerrarla y abrirla).

## 6. Experimentos y Resultados

Parameter name	Description	Value
$N_{UsedT4}$	Número mínimo de veces que un esquema tipo $T_4$ debe ser usado antes de que pueda acomodarse.	4
$P_{FailureT4}$	Porcentaje mínimo de falla de un esquema tipo $T_4$ para que se considere que debe ser acomodado.	10
$P_{DeleteT4}$	Porcentaje mínimo de falla para eliminar un esquema tipo $T_4$ .	90 %
$N_{Trials}$	Número mínimo de veces que un objeto debe ser asimilado a un esquema, para que éste se considere en el proceso de diferenciación.	2
$P_{SuccessObj}$	Porcentaje mínimo de éxito para recuperar el mismo objeto para que éste pueda ser considerado en el proceso de diferenciación.	60 %
$N_{T0}$	Número necesario de esquemas de tipo $T_0$ para poder realizar una generalización.	2
$P_{DeleteT0}$	Porcentaje mínimo de fallas necesarias para eliminar un esquema tipo $T_0$ .	50 %
$N_{UsedT0}$	Número mínimo de objetos asimilados a un esquema tipo $T_0$ necesarios para eliminarlo.	6
$P_{DeleteT3T2}$	Porcentaje mínimo de falla de los esquemas de tipo $T_3$ y $T_2$ para que sean eliminados.	85 %
$P_{SuccessNew}$	Porcentaje mínimo de éxito de un nuevo esquema diferenciado para conservarlo.	60 %
$N_C$	Número necesario de ciclos en los que no ha habido ningún proceso de acomodación para considerar que el agente ha alcanzado un estado de equilibrio cognitivo.	250
$P_{Success}$	Porcentaje mínimo de expectativas satisfechas para considerar que el agente ha alcanzado un estado de equilibrio cognitivo.	75 %

**Tabla 6.2:** Valores y descripciones de los principales parámetros de *Dev E-R* usados en el segundo conjunto de experimentos.



**Figura 6.27:** Esquemas básicos con los cuales el agente se inicializó en el segundo conjunto de experimentos. Estos esquemas representan los comportamientos predefinidos que el agente inicialmente conoció para interactuar con su mundo.

### 6.2.2 Desarrollo de las Habilidades Táctiles del Agente en la Sala de una Casa

En este experimento el agente interactuó nuevamente en tres ocasiones con la sala de la casa de la Figura 6.2. En estas ejecuciones todos los objetos se encontraban estáticos, a excepción de las 5 pelotas que se movían de la siguiente manera:

- Cuando el agente tenía su mano abierta y ésta no estaba en contacto con ningún objeto, en algunas ocasiones el sistema elegía aleatoriamente alguna de las 5 pelotas y la colocaba en su mano (de tal forma que su sensor táctil la detectara durante el siguiente ciclo).
- Cuando el sensor táctil estaba en contacto con algún objeto y el agente ejecutaba la acción de cerrar la mano, entonces se consideraba que el objeto había sido agarrado.

## 6. Experimentos y Resultados

---

- Los objetos agarrados se movían junto con los movimientos de la mano.
- De manera predefinida, después de  $n$  ciclos (para este experimento  $n = 1$ ) el agente abría automáticamente la mano (a menos de que durante el ciclo actual hubiera seleccionado la acción *close\_hand*).
- Ante la acción de abrir la mano, el objeto agarrado podía: 1) permanecer en la misma posición y continuar en contacto con el sensor táctil, o 2) regresar a su posición inicial. La elección la realizaba el sistema aleatoriamente.

Con respecto a las características táctiles que el agente podía reconocer en los objetos que tocaba, en este experimento se inicializó con la capacidad de reconocer 5 texturas diferentes (etiquetadas como “ $t_1$ ”, “ $t_2$ ”, “ $t_3$ ”, “ $t_4$ ” y “ $t_5$ ”), una para cada pelota.

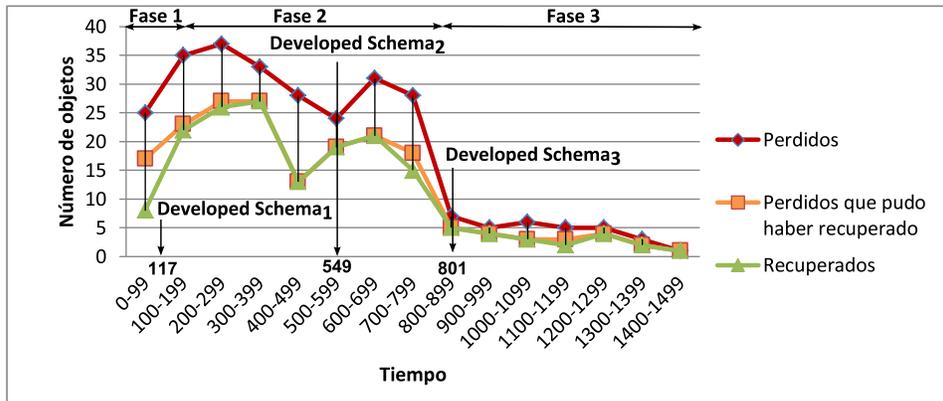
Las tres ejecuciones iniciaron con el agente sentado en medio del ambiente con su mano abierta frente a él, y con las 5 pelotas en posiciones en las que estaban fuera su alcance. Los resultados obtenidos los reportamos a continuación.

### 6.2.2.1 Resultados

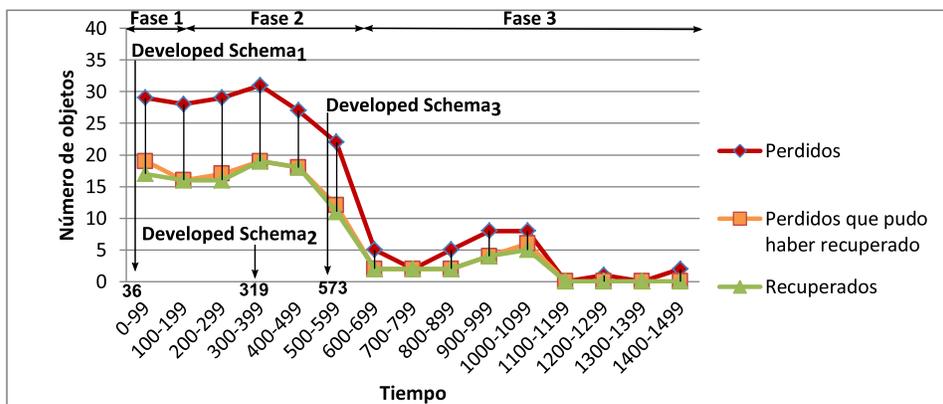
Recordemos que, al igual que en el caso del primer conjunto de experimentos en donde el agente solo podía ver pero no tocar su mundo, las nuevas habilidades que adquiere están basadas en el aprendizaje de cómo conservar las respuestas afectivas de placer causadas por los objetos de su interés y en aprender a recuperarlas cuando las pierde. Con esto en mente, en las gráficas de la Figura 6.28 presentamos en grupos de 100 ciclos: 1) el número de objetos placenteros que el agente perdió, es decir, que tenía agarrados y que al abrir la mano los soltó (mostrados en rombos rojos), 2) el número de objetos perdidos que el agente sí tenía la oportunidad de recuperar ya que al soltarlos el sistema eligió dejarlos en contacto con su mano (mostrados en cuadrados naranjas), y 3) el número de objetos que el agente logró recuperar exitosamente (en triángulos verdes).

En estas gráficas se pueden identificar nuevamente 3 fases:

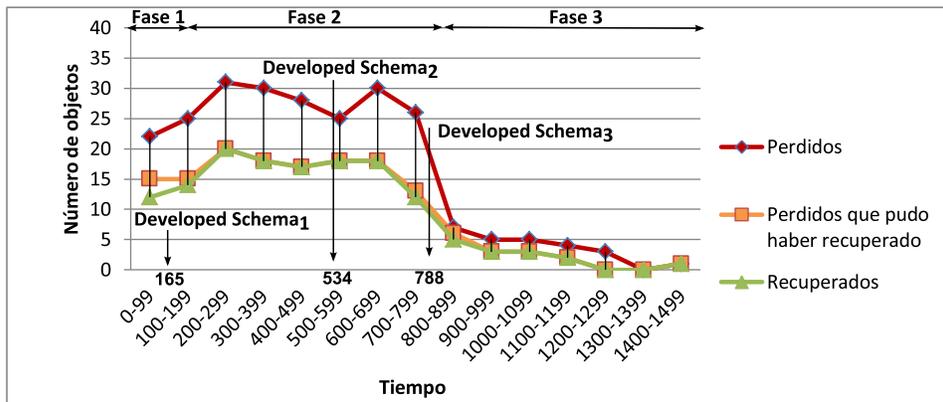
## 6.2 Segundo Conjunto de Experimentos: El Agente Sólo Puede Tocar su Mundo



(a) Ejecución 1



(b) Ejecución 2



(c) Ejecución 3

**Figura 6.28:** Muestran la evolución del número de objetos placenteros perdidos por el agente contrastados contra el número de objetos que pudo recuperar, en cada una de las tres ejecuciones.

## 6. Experimentos y Resultados

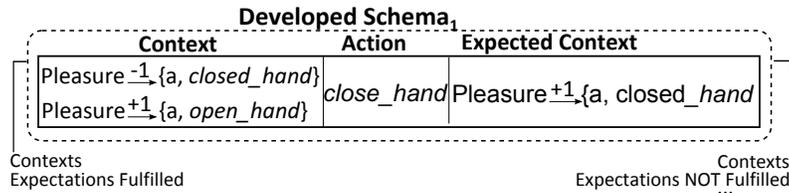
---

1. **Fase 1:** Abarca aproximadamente del ciclo 0 al ciclo al ciclo 200, en las tres ejecuciones. Esta corresponde a un periodo de tiempo en el cual el agente recuperó la menor cantidad de objetos perdidos.
2. **Fase 2:** Abarca aproximadamente del ciclo 200 al ciclo al 700 o 900, dependiendo de la ejecución. Esta corresponde a un periodo de tiempo en el cual el agente comenzó a recuperar prácticamente todos los objetos que perdía y que estaba en la posibilidad de recuperarlos.
3. **Fase 3:** Abarca aproximadamente del ciclo 700 o 900 al ciclo 1500. Esta tercera y última etapa corresponde a un periodo de tiempo en el cual se observa una disminución considerable en el número total de objetos perdidos por el agente, el cual llegó hasta casi 0 hacia el final de las corridas.

A continuación analizaremos cada una de las fases.

**Fase 1.** Durante la fase 1 el agente comenzó a interactuar con su mundo haciendo uso únicamente de sus tres esquemas básicos (mostrados en la Figura 6.27). A partir de ahí, comenzó a crear sus primeros esquemas desarrollados: generalizándolos, diferenciándolos y eliminando aquellos cuyas expectativas asociadas no se cumplían la mayoría de las veces. De tal forma que al término de esta primera fase el agente concluyó con un sólo esquema desarrollado (lo mismo sucedió en las tres ejecuciones), el cual se muestra en la Figura 6.29. Este primer esquema asocia la situación de tener respuestas afectivas encontradas causadas por el mismo objeto (displacer por la pérdida del elemento que tenía agarrado y placer por continuar detectándolo pero ahora con la mano abierta), con la acción de cerrar la mano, y la expectativa de recuperar la respuesta afectiva de placer causada por agarrar nuevamente el objeto de interés. En otras palabras, contiene el conocimiento de que: 1) puede recuperar aquellos objetos placenteros que soltó pero que sigue sensando con su mano abierta, y 2) que los puede recuperar cerrando su mano. Con la creación de este nuevo esquema, el agente ha aprendido a recuperar los objetos táctiles de su interés. Situación que lo lleva a pasar a

## 6.2 Segundo Conjunto de Experimentos: El Agente Sólo Puede Tocar su Mundo

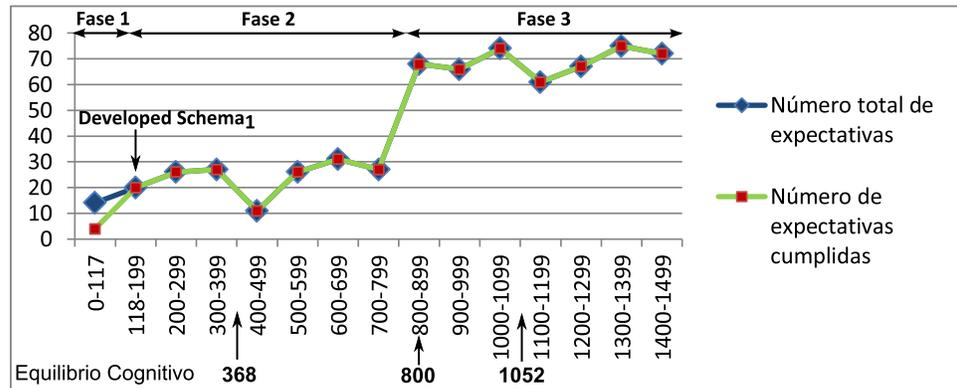


**Figura 6.29:** Esquema creado durante la fase 1.

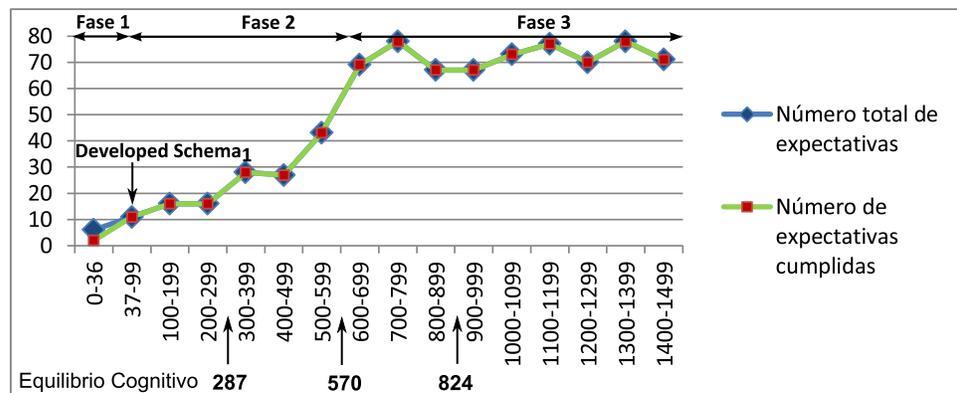
la segunda fase.

**Fase 2.** La creación del esquema construido en la fase anterior, causó por un lado que el agente entrara en un periodo de tiempo en el cual comenzó a recuperar prácticamente todos los objetos que perdía y que estaba en la posibilidad de recuperarlos (ver Figura 6.28). Por otro lado, causó también un cambio en el comportamiento de sus expectativas, que como se muestra en las gráficas de la Figura 6.30 (en donde se presenta el número de expectativas generadas por el agente contrastado contra el número de expectativas cumplidas), éstas comenzaron a satisfacerse el 100 % de las ocasiones a partir de la creación de dicho esquema. Estas dos situaciones (el aprender a recuperar los objetos de su interés de manera exitosa y el que sus expectativas llegaran a cumplirse el 100 % de las ocasiones de manera sostenida) llevaron al agente a poder interactuar con su ambiente durante  $N_C$  ciclos (para estos experimentos  $N_C = 250$ ), sin verse en la necesidad de modificar su conocimiento, causando que durante la fase 2 entrara por primera vez en un estado de equilibrio cognitivo (señalado en la parte inferior de las gráficas de la Figura 6.30). Como resultado de entrar en este estado, el agente comenzó a ser capaz de realizar correspondencias parciales entre sus contextos actuales y su esquema desarrollado (mostrado en la Figura 6.29). Una de tales correspondencias parciales dio como resultado la creación de un segundo esquema, el cual se muestra en la Figura 6.31 (en el apéndice A se presenta un ejemplo paso a paso que ilustra el surgimiento de esta nueva estructura de conocimiento). El nuevo esquema asocia la situación de tener una respuesta afectiva de placer causada por tocar cualquier objeto con la mano abierta, con la acción de cerrar la mano, y con la expectativa de volver a tener una respuesta afectiva

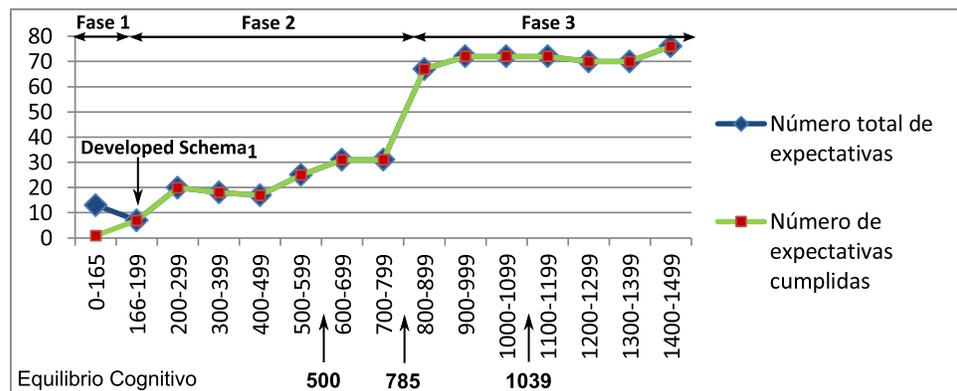
## 6. Experimentos y Resultados



(a) Ejecución 1



(b) Ejecución 2



(c) Ejecución 3

**Figura 6.30:** Muestran el número de expectativas totales generadas por el agente contrastadas contra el número de expectativas cumplidas, en cada una de las tres ejecuciones.



## 6. Experimentos y Resultados

---

un objeto de su interés, el cual soltaba cuando se disparaba un estado emocional de aburrimiento (recordemos que éste estado emocional se dispara cuando el agente mantiene agarrado un mismo objeto durante varios ciclos, 10 ciclos para estos experimentos). Es decir, el agente aprendió a mantener agarrados los objetos de su interés, lo cual lo llevó a la tercera y última fase.

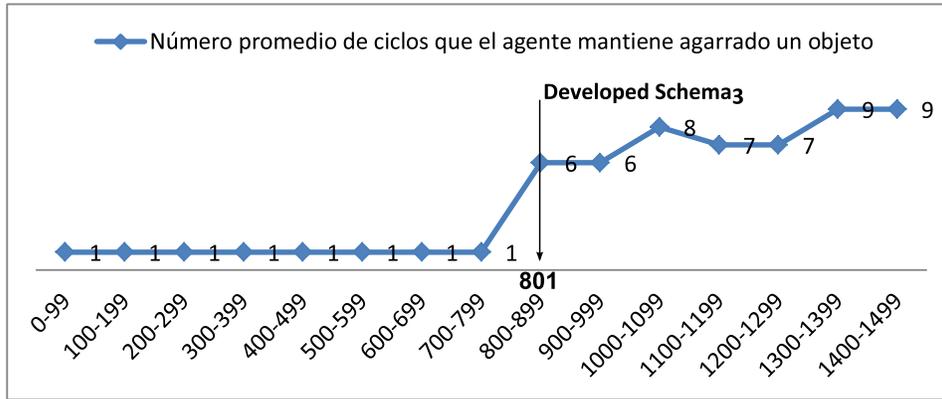
**Fase 3.** La fase 3, caracterizada por ser un periodo de tiempo en el cual se observa una disminución considerable en el número total de objetos perdidos por el agente, fue causada por la creación del tercer esquema, a través del cual logró mantener agarrados los objetos de su interés. Para mostrar el surgimiento de este nuevo comportamiento, generamos las gráficas de la Figura 6.33, en donde se presenta el número promedio de ciclos que el agente mantuvo agarrado un objeto de su interés a lo largo de su ejecución. En ellas podemos observar que a partir de la creación de su tercer esquema, hacia el inicio de la fase 3, se incrementó el número promedio de ciclos que el agente mantuvo agarrados los objetos de su interés.

El agente después de interactuar con su ambiente durante 250 ciclos más, entró nuevamente en un estado de equilibrio cognitivo, en el cual permaneció durante otros 500 ciclos, dando por terminada su ejecución.

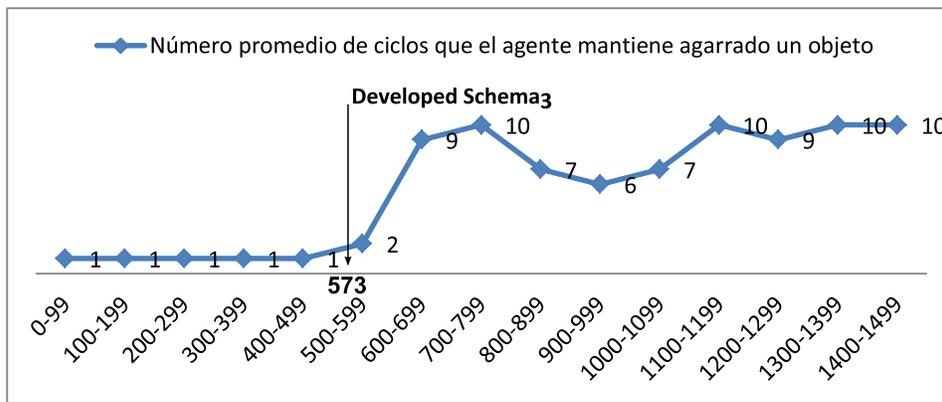
### 6.3 Tercer Conjunto de Experimentos: El Agente Puede Ver y Tocar su Mundo

El tercer conjunto de experimentos consistió en configurar al agente de tal forma que fuera capaz tanto de ver como de tocar su mundo. Su desarrollo se dio por terminado cuando se mantuvo en un estado de equilibrio cognitivo durante los últimos 2000 ciclos. Para realizar los experimentos, se le dotó con los parámetros de *Dev E-R* que se muestran en la Tabla 6.1, así como con el siguiente conocimiento inicial.

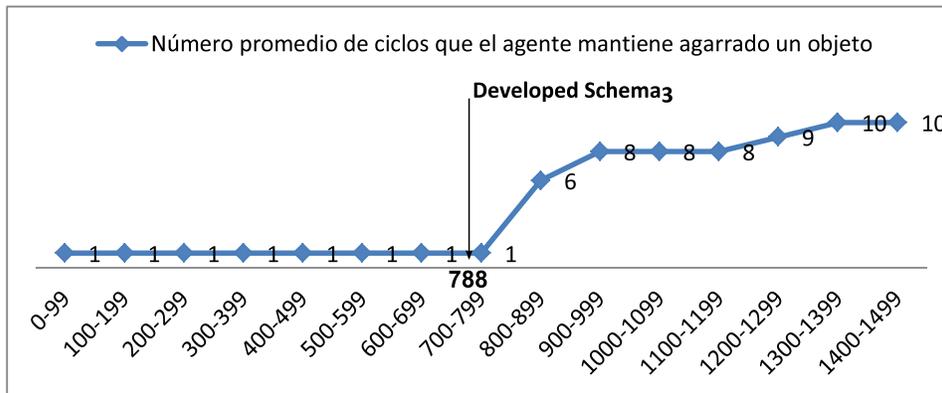
### 6.3 Tercer Conjunto de Experimentos: El Agente Puede Ver y Tocar su Mundo



(a) Ejecución 1



(b) Ejecución 2



(c) Ejecución 3

**Figura 6.33:** Muestran la evolución del número promedio de ciclos que el agente mantuvo agarrado un objeto de su interés, a lo largo de sus tres ejecuciones.

## 6. Experimentos y Resultados

### 6.3.1 Conocimiento Inicial

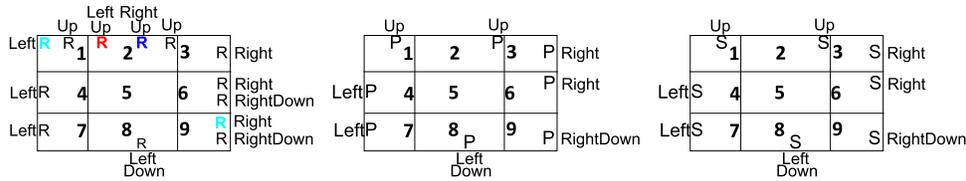
El agente se inicializó con los 3 esquemas básicos de la Figura 6.34, en donde la variable  $A$  representa cualquier elemento visual definido como  $A = \{\text{color, tamaño, movimiento, posición}\}$ , o cualquier elemento táctil definido como  $A = \{\text{textura, estado\_mano}\}$ . Así mismo, se inicializó con los esquemas que desarrolló cuando solo podía ver y cuando sólo podía tocar su mundo (generados en el primer y segundo conjunto de experimentos y mostrados en la Figura 6.35). En otras palabras, se inicializó con el conocimiento acerca de cómo recuperar y conservar los objetos visuales y táctiles de su agrado (lo cual incluye las habilidades de seguir visualmente los objetos de interés, a centrarlos en su campo de visión, así como a mantener agarrados los objetos que le agradan). La razón de esto se debe a que en este experimento estamos interesados en observar el conjunto de comportamientos que emergen cuando el agente ya ha construido y estabilizado tantos sus esquemas visuales como los táctiles.

Finalmente, las acciones físicas o externas que el agente podía realizar incluyeron todos los posibles movimientos de su cabeza y de su mano.

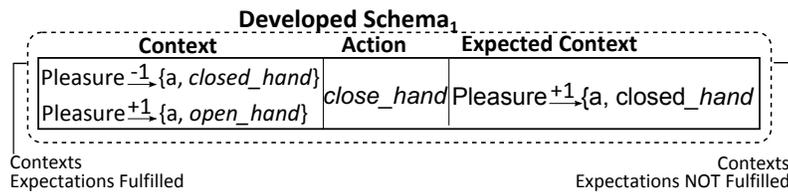
Piaget	Agente				
- Tendencia a preservar los estímulos placenteros.	<b>Basic Schema<sub>1</sub></b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Context</th> <th>Action</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Pleasure <math>+1 \rightarrow A</math></td> <td><i>show_interest_in A</i></td> </tr> </tbody> </table>	Context	Action	Pleasure $+1 \rightarrow A$	<i>show_interest_in A</i>
Context	Action				
Pleasure $+1 \rightarrow A$	<i>show_interest_in A</i>				
- Tendencia a realizar un tanteo para recuperar un objeto placentero cuando éste desaparece.	<b>Basic Schema<sub>2</sub></b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Context</th> <th>Action</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Pleasure <math>-1 \rightarrow A</math></td> <td><i>random_physical_action</i></td> </tr> </tbody> </table>	Context	Action	Pleasure $-1 \rightarrow A$	<i>random_physical_action</i>
Context	Action				
Pleasure $-1 \rightarrow A$	<i>random_physical_action</i>				
- Comportamiento reflejo de cerrar la mano en cuanto ésta entra en contacto con un objeto.	<b>Basic Schema<sub>3</sub></b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Context</th> <th>Action</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Pleasure <math>+1</math>, {t, open_hand}</td> <td><i>close_hand</i></td> </tr> </tbody> </table>	Context	Action	Pleasure $+1$ , {t, open_hand}	<i>close_hand</i>
Context	Action				
Pleasure $+1$ , {t, open_hand}	<i>close_hand</i>				

**Figura 6.34:** Esquemas básicos con los cuales el agente se inicializó en el tercer conjunto de experimentos.

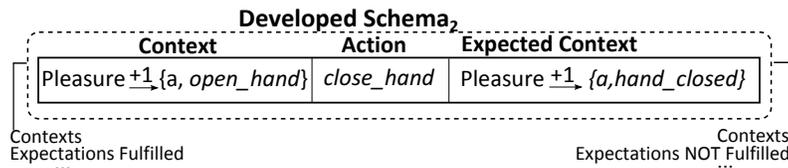
## 6.3 Tercer Conjunto de Experimentos: El Agente Puede Ver y Tocar su Mundo



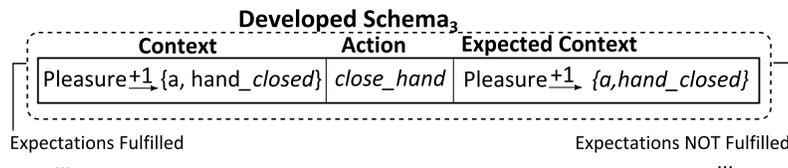
(a) *Recuperación* de objetos visuales placenteros. (b) *Preservación* de objetos visuales placenteros. (c) *Preservación* de objetos visuales placenteros *estáticos*.



(d) Indica que cerrando la mano puede recuperar los objetos placenteros que el agente soltó pero que sigue sensando con la mano abierta.



(e) Indica que cuando el agente esté tocando con la mano abierta algún objeto, puede cerrar la mano con la expectativa de conservarlo.



(f) Indica que manteniendo cerrada la mano puede conservar un objeto agradable.

**Figura 6.35:** Conjunto de esquemas desarrollados con los cuales el agente se inicializó en el tercer conjunto de experimentos.

### 6.3.2 Desarrollo de las Habilidades Visuales y Táctiles del Agente en la Sala de una Casa

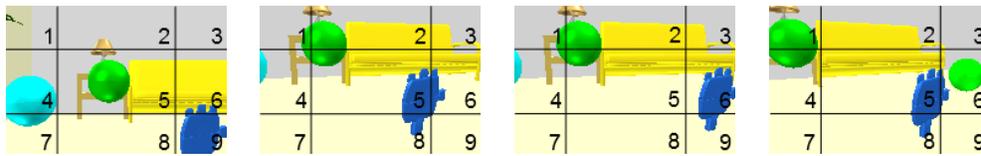
En esta ocasión dejamos que el agente interactuara nuevamente, en tres ejecuciones independientes, con la sala de la casa de la Figura 6.2. Se le colocó sentado en medio del ambiente, con la cabeza mirando hacia el frente y con su mano fuera de su campo de visión. Todos los objetos se encontraban estáticos, a excepción de su mano, la cual se movía en algunas ocasiones en direcciones aleatorias. Más adelante de la corrida, las pelotas comenzaron a moverse de la misma manera en la que se comportaron en el segundo conjunto de experimentos (ver sección 6.2.2).

#### 6.3.2.1 Resultados

Al iniciar la ejecución, lo primero que pudimos observar fue que cuando la mano del agente entraba a su campo de visión, ésta captaba su atención y comenzaba a seguirla con movimientos de su cabeza (haciendo uso de sus esquemas desarrollados mostrados en la Figura 6.35a-c). Este comportamiento se ejemplifica en la Figura 6.36. Es importante hacer notar que hasta este momento el agente observa su mano en movimiento, no porque sea en sí su mano (ya que no ha creado ninguna estructura de conocimiento que la diferencie del resto de los objetos), sino porque le llama la atención por su color, tamaño y movimiento como si fuera cualquier otro elemento de su ambiente.

Después de 500 ciclos las pelotas comenzaron a moverse para colocarse en contacto con la palma de su mano. A partir de ese momento el comportamiento del agente consistió en agarrar los objetos que tocaba, en soltarlos cuando perdía el interés en éstos y en seguir los elementos visuales que captaban su atención. En otras palabras, se mantuvo interactuando con su ambiente haciendo uso de su conocimiento adquirido. Después de 1500 ciclos más entró en un estado de equilibrio cognitivo, causando que sus esquemas construídos hasta el momento se consideraran como estables y por lo tanto comenzara a ser capaz de: 1) representar en un mismo contexto-actual tanto información visual como táctil y 2)

### 6.3 Tercer Conjunto de Experimentos: El Agente Puede Ver y Tocar su Mundo



(a) El agente ve su mano en la posición 9 de su campo de visión. Usa entonces uno de sus esquemas desarrollados para conservarla (ver Figura 6.35b).

(b) La acción ejecutada, un movimiento de su cabeza hacia la derecha y hacia abajo, causa que la mano se coloque en el centro de su campo de visión.

(c) El agente mueve su mano hacia la derecha, colocándola ahora en la posición 6 de su campo de visión. Usa entonces uno de sus esquemas desarrollados para conservarla (ver Figura 6.35b).

(d) La acción ejecutada, un movimiento de su cabeza hacia la derecha causa que la mano se coloque nuevamente en el centro de su campo de visión, en donde la vuelve a atender.

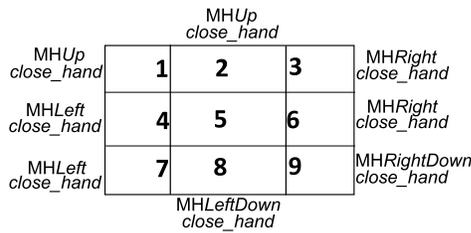
**Figura 6.36:** Ilustra cómo el agente observa su mano en movimiento.

realizar correspondencias parciales con sus estructuras estabilizadas. Estas nuevas capacidades dieron lugar a la creación de 32 nuevos esquemas, 4 por cada posición de la periferia del campo de visión. La Figura 6.37 muestra los 4 esquemas desarrollados correspondientes a la posición 6. El resto (los otros 28) sólo difieren en la posición y en las acciones asociadas necesarias para conservar y/o recuperar el/los objetos de interés (ya que las acciones a llevar a cabo dependen de la posición del campo de visión en la que se ve la mano, como se ilustra en la Figura 6.38).

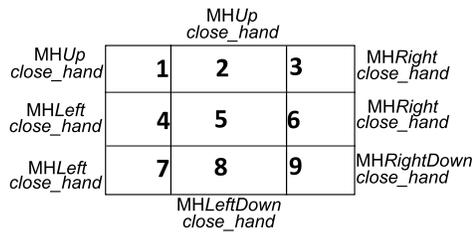
El primer conjunto de esquemas, mostrados en la Figura 6.38a, se creó de la siguiente manera. En el momento en el que el agente vio un objeto que le llamó la atención y al mismo tiempo sentó que estaba tocando algo con su mano (abierta o cerrada), se creó un *contexto-actual* que incluía 2 respuestas afectivas de placer, una causada por el elemento visual y otra por el táctil (por ejemplo aquél que se muestra en la Figura 6.39). Este contexto representó una situación nueva a la que nunca se había enfrentado el agente y ante la cual no tenía ningún esquema desarrollado que le indicara cómo actuar. Esto lo llevó a realizar una correspondencia parcial con 2 esquemas: uno para conservar el objeto visual y otro para



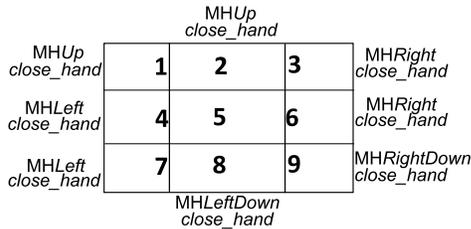
### 6.3 Tercer Conjunto de Experimentos: El Agente Puede Ver y Tocar su Mundo



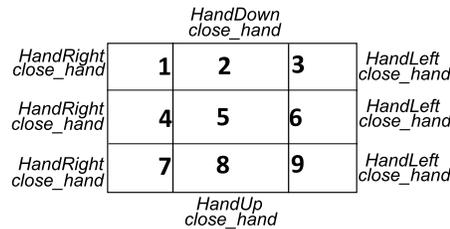
(a) Conservar el objeto visual y el táctil.



(b) Conservar el objeto visual y recuperar el táctil.



(c) Recuperar el objeto visual (con un movimiento de la cabeza) y conservar el táctil.

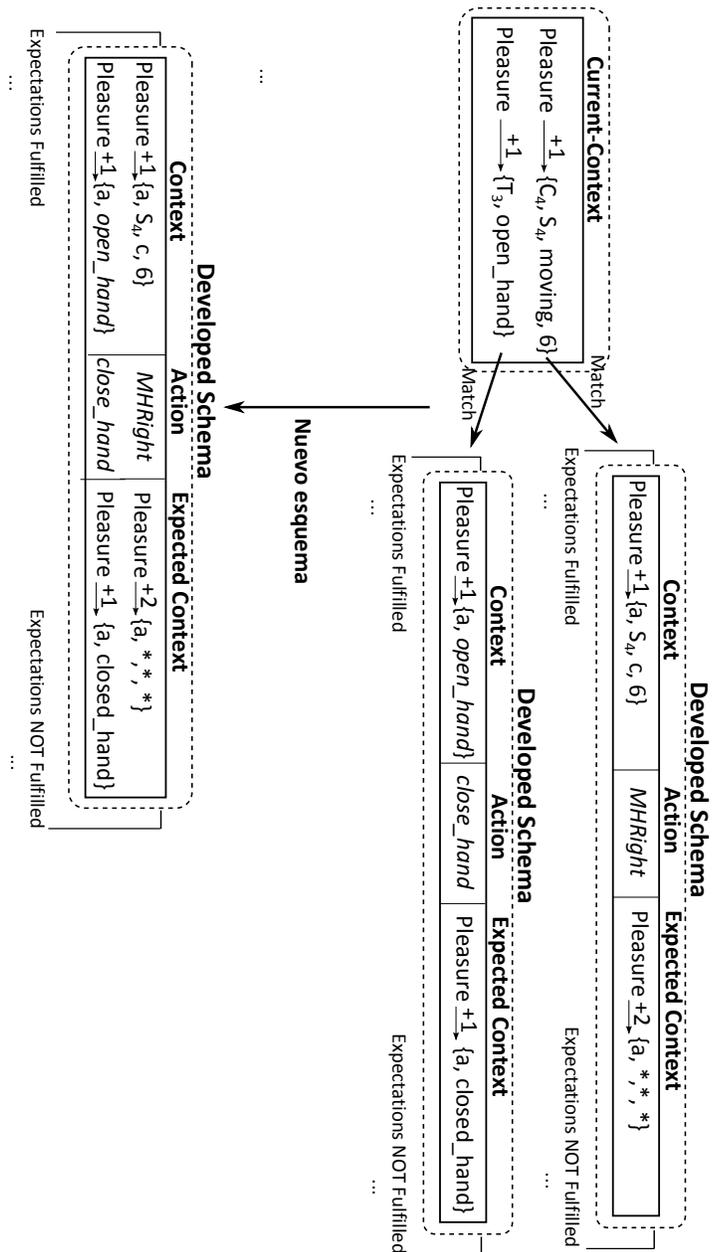


(d) Recuperar el objeto visual (con un movimiento de la mano) y conservar el táctil.

**Figura 6.38:** Conjunto de esquemas creados cuando el agente pudo tanto ver como tocar su mundo, para todas las posiciones del campo de visión.

conservar el táctil (como se ejemplifica en la Figura 6.39). En terminología de Piaget quiere decir que el agente se sintió inclinado al mismo tiempo a conservar lo que veía como lo que tocaba. Al cumplirse las expectativas asociadas a ambos esquemas se generó un estado emocional de sorpresa que dio como resultado la creación de una nueva estructura (ver Figura 6.39), la cual representa el conocimiento acerca de cómo conservar simultáneamente los objetos placenteros que el agente está viendo y que está tocando. Por ejemplo, cuando veía un objeto en la posición 6 de su campo de visión y al mismo tiempo tocaba algo con la palma de su mano, el esquema de la Figura 6.37a le indicaba que podía conservar ambos si simultáneamente movía la cabeza a la derecha y cerraba la mano. En el caso en el que el elemento que estaba tocando era el mismo que estaba viendo, entonces el uso de estos esquemas causaba que se observara al agente agarrar y centrar en su campo de visión (con un movimiento de su cabeza) el objeto de interés.

## 6. Experimentos y Resultados



**Figura 6.39:** Primer esquema desarrollado que involucra tanto placer por lo que ve como placer por lo que siente.

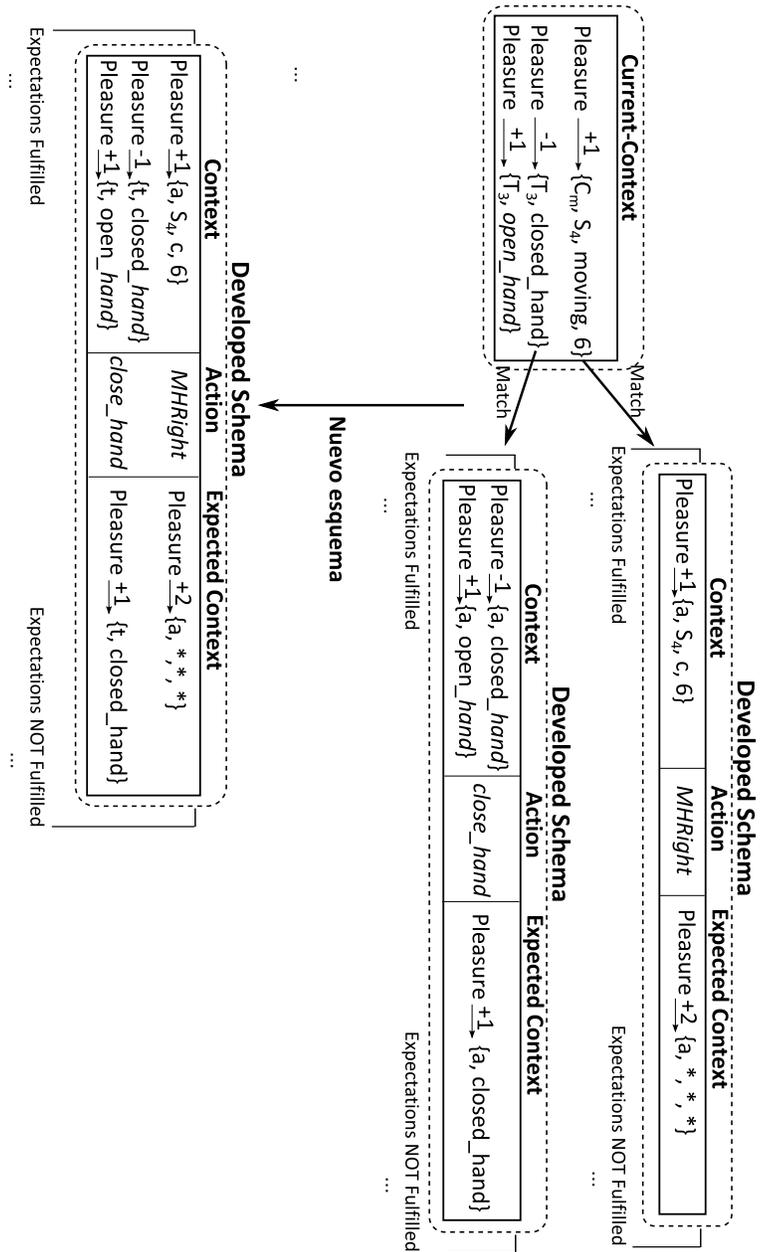
### 6.3 Tercer Conjunto de Experimentos: El Agente Puede Ver y Tocar su Mundo

---

El segundo y tercer conjunto de esquemas, mostrados en las Figuras 6.37b-c y 6.38b-c, surgieron de manera similar al caso anterior. Es decir, se construyeron como resultado de que el agente se enfrentara a una situación desconocida y a que éste respondiera realizando una correspondencia parcial con dos de sus estructuras en memoria, como se ilustra en las Figuras 6.40 y 6.41. Sin embargo, cada uno de ellos representa comportamientos diferentes. Por un lado, el segundo conjunto de esquemas contiene el conocimiento acerca de cómo conservar el objeto visual placentero al mismo tiempo que recupera el táctil. Por ejemplo, si el agente veía un objeto en la posición 6 de su campo de visión y al mismo tiempo soltaba lo que tenía agarrado, entonces el esquema de la Figura 6.37b le indicaba que podía volver a sentir placer por ambos si simultáneamente movía la cabeza a la derecha y cerraba la mano (siempre y cuando siguiera sensando el elemento deseado con la mano abierta). En el caso en el que el objeto que estaba tocando fuera el mismo que estaba viendo, entonces el uso de estos esquemas causaba que se observara al agente ver cómo soltaba y volvía a tomar el objeto de interés. Por otro lado, el tercer conjunto de esquemas representa el conocimiento acerca de cómo recuperar el objeto visual placentero y conservar el táctil. Por ejemplo, si el agente veía su mano agarrando un objeto en la posición 6 y durante ese ciclo eligía moverla aleatoriamente sacándola sin querer de su campo de visión, entonces el uso de estos esquemas causaba que observáramos al agente sacar y regresar a su campo de visión (con un movimiento de la cabeza) su mano tomando un objeto.

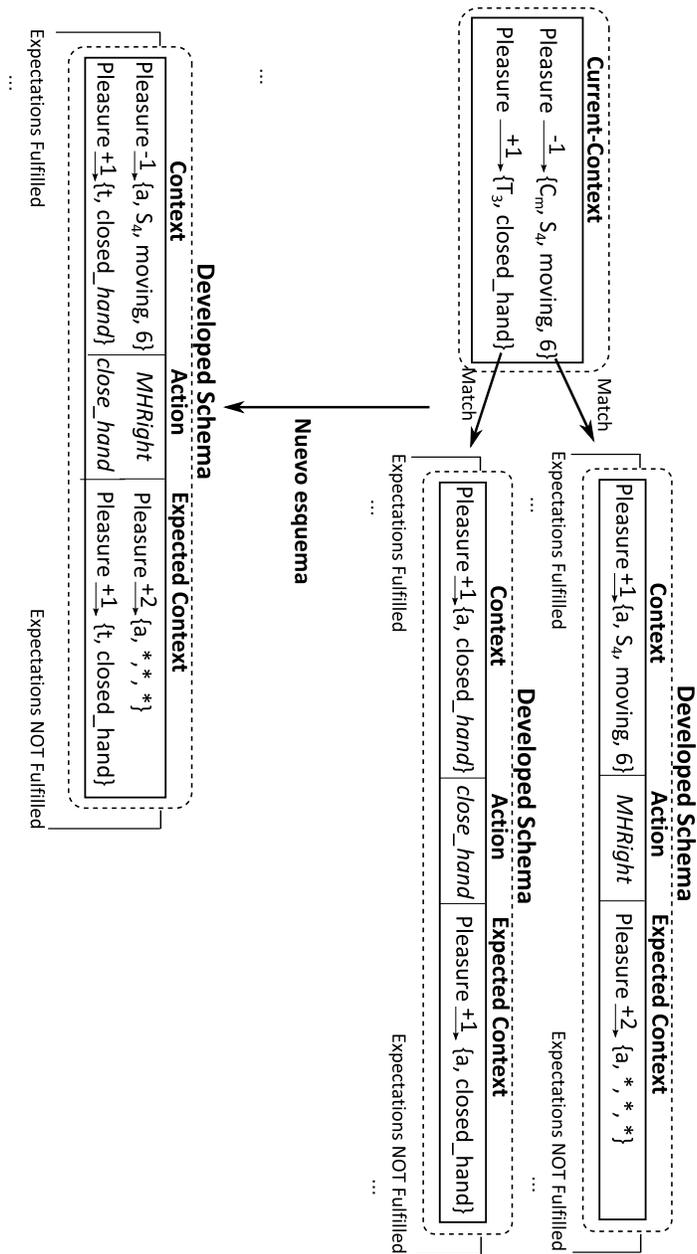
La creación del cuarto conjunto de esquemas es un caso muy interesante ya que a diferencia del resto éstos se construyeron como resultado de una correspondencia parcial entre únicamente un esquema en memoria, permitiendo que el agente encontrara una forma alternativa de recuperar objetos visuales que poseían una característica en particular: eran de un cierto tono azul, al que llamamos  $C_m$ . La forma en la que surgieron se ilustra en la Figura 6.42. En ésta podemos observar que cuando el agente perdió un objeto agradable de color  $C_m$  en la posición 6 al mismo tiempo que sentía placer por un objeto que agarraba con su mano, eligió usar únicamente uno de sus esquemas cuya expectativa era

## 6. Experimentos y Resultados

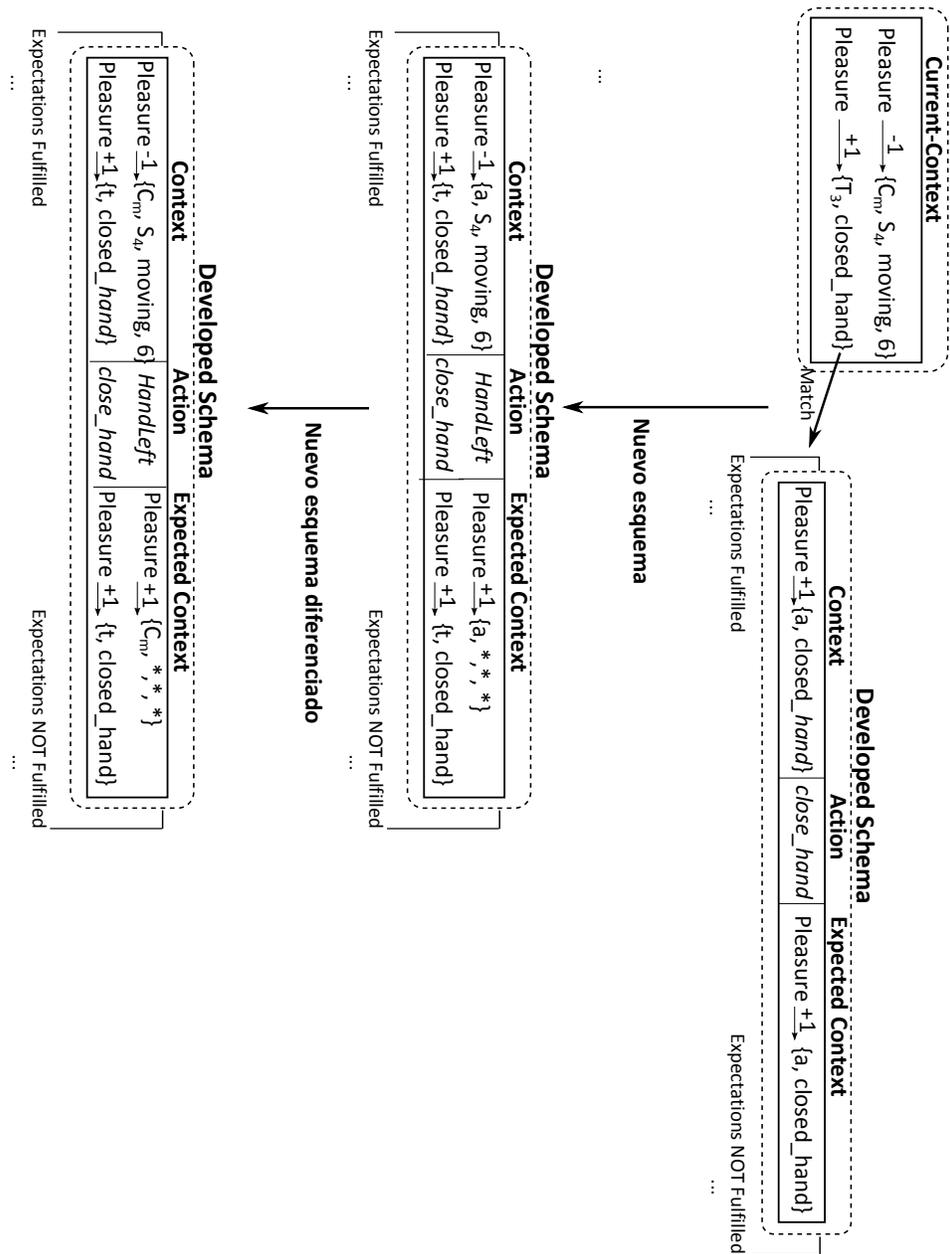


**Figura 6.40:** Segundo esquema desarrollado que involucra tanto placer por lo que ve como placer por lo que siente.

### 6.3 Tercer Conjunto de Experimentos: El Agente Puede Ver y Tocar su Mundo



**Figura 6.41:** Tercer esquema desarrollado que involucra tanto placer por lo que ve como placer por lo que siente.



**Figura 6.42:** Cuarto esquema desarrollado que involucra tanto placer por lo que ve como placer por lo que siente.

### 6.3 Tercer Conjunto de Experimentos: El Agente Puede Ver y Tocar su Mundo

---

la conservación del elemento táctil. Durante ese mismo ciclo, movió aleatoriamente su mano (hacia la izquierda) de tal forma que provocó por “accidente” que el objeto de color  $C_m$  regresara al campo de visión. En ese momento se creó un nuevo esquema general que indicaba que podía recuperar cualquier objeto que perdía en la posición 6 y conservar al mismo tiempo el objeto que agarraba, si movía su mano a la izquierda y la cerraba. Con el tiempo, este esquema se diferenció en uno que indicaba que eso sólo era posible cuando el objeto perdido era de color  $C_m$ : el color de su mano. De esta manera, el agente aprendió que existía una mancha en particular (que era de color  $C_m$ ) que podía controlar (recuperar y conservar) con movimientos de su mano. Así surgió una diferenciación funcional entre la mancha que representa la mano y cualquier otra.

En resumen, los comportamientos que surgieron relacionados con la coordinación visión-tacto cuando el agente pudo tanto ver como tocar su mundo fueron los siguientes:

- Seguir visualmente el movimiento de su mano, con movimientos de su cabeza.
- Centrar en su campo de visión (con un movimiento de su cabeza) el objeto que mantiene agarrado.
- Ver en el centro de su campo de visión cómo su mano suelta y vuelve a tomar el objeto de interés.
- Ver salir de su campo de visión su mano que agarra un objeto y luego la regresa con un movimiento de la cabeza.
- Ver salir de su campo de visión su mano que agarra un objeto y luego la regresa con un movimiento de la mano.



*“Intelligence is what you use when  
you don’t know what to do.”*

Jean Piaget

CAPITULO

# 7

## Evaluación y Discusión

En este capítulo proponemos algunos criterios útiles para evaluar si los comportamientos que aprende un agente computacional lo llevan a mostrar un desarrollo cognitivo, y si éstos se pueden considerar como creativos. Posteriormente, utilizamos tales criterios para evaluar a nuestro agente y discutimos los resultados obtenidos.

### 7.1 Criterios de Evaluación

#### 7.1.1 Desarrollo Cognitivo

Basados en tres aspectos esenciales de la teoría de Piaget, proponemos considerar que los comportamientos que aprende un agente computacional lo llevan a mostrar un desarrollo cognitivo si se cumplen los siguientes criterios:

1. **Tipo de habilidades aprendidas.** Considerando que para Piaget el desarrollo cognitivo es la evolución a través de los distintos subestadios y estadios, los nuevos comportamientos deben representar conductas características de etapas posteriores a la que se inicializó el agente.

2. **Trayectoria de desarrollo.** Es posible construir una trayectoria de desarrollo, de tal forma que se pueda observar la dependencia de los nuevos comportamientos de los ya conocidos. Es decir, es necesario que exista un solapamiento entre el conocimiento previo y la nueva información.
3. **Construcción autónoma.** El agente crea sus nuevos comportamientos de manera autónoma. Esto incluye la transición de una subetapa de desarrollo a la siguiente.

### 7.1.2 Comportamientos Creativos

Inspirados en el trabajo de Maher et al. (2008), proponemos considerar como creativos los comportamientos contruidos por un agente artificial si éstos cumplen con las siguientes características:

1. **Novedad.** Se considera que un comportamiento es novedoso si éste no existía explícitamente en la base de conocimiento inicial del agente (Pérez y Pérez & Sharples, 2004; Pérez y Pérez & Ortiz, 2013; Pérez y Pérez, 2014).
2. **Utilidad.** Se considera que un comportamiento es útil si éste sirve como base para la construcción de nuevo conocimiento que eventualmente lleve al agente a la adquisición de nuevas habilidades que sean características de su siguiente etapa de desarrollo. Por ejemplo, que lo lleven de comportamientos característicos del segundo subestadio del periodo sensoriomotor (comportamientos basados en el cuerpo) a comportamientos característicos del tercer subestadio (comportamientos que involucren consecuencias en objetos externos). La importancia de la reutilización del conocimiento adquirido durante el proceso creativo para la generación de salidas más novedosas, ha sido discutida por Pérez y Pérez en (2014) y (in press).
3. **Emergencia.** Basados en la definición de Steels (1990) proponemos considerar que un comportamiento ha emergido si su origen no se puede rastrear

directamente a los componentes del sistema, sino que se origina como el resultado de la manera en que tales componentes interactúan.

4. **Motivaciones.** Amabile & Collins (1999) distinguieron entre dos tipos de creatividad: 1) la que es motivada intrínsecamente y 2) la que lo es extrínsecamente. La motivación intrínseca se refiere a un comportamiento que es impulsado por recompensas internas (p. ej. porque percibe la actividad como interesante, satisfactoria o como un reto personal), mientras que la extrínseca se enfoca en recompensas externas, reconocimiento, o en evitar castigos. En este trabajo proponemos que un comportamiento que desarrolla un agente debería ser considerado como creativo únicamente si éste surgió como resultado de una motivación intrínseca o extrínseca.
  
5. **Adaptación al medio ambiente.** La habilidad de adaptarnos a nuestro ambiente se ha visto tradicionalmente (quizás desde Darwin) como una condición necesaria para el comportamiento verdaderamente creativo (Runco, 2007). Así mismo, como mencionamos en la introducción, la adaptación y la creatividad están tan relacionadas entre sí que incluso LeoNora Cohen considera a la adaptación como el sinónimo más cercano de la creatividad (Cohen, 1989 citado en Runco, 2007, p.44), quien describe a esta última como una serie de comportamientos adaptativos en un continuo de siete niveles de desarrollo. Inicialmente, la creatividad involucra la adaptación del individuo al mundo y, en los niveles más altos involucra la adaptación del mundo al individuo. En la teoría de Piaget la adaptación se define en términos de los procesos de asimilación y acomodación, en donde el primero puede ayudarnos a comprender las transformaciones cognitivas que algunas veces nos llevan a tener ideas creativas (Guilford, 1968), mientras que el segundo puede ayudarnos a explicar las ideas repentinas que caracterizan muchos de los momentos “a-ha” (Gruber, 1981). Es así, que proponemos que para que una conducta desarrollada por el agente se considere como creativa, ésta debe cumplir con la característica de haber sido adquirida como resultado de un proceso de adaptación a su ambiente.

### 7.2 Evaluación del modelo Dev E-R

Realizamos la evaluación de nuestro modelo en dos partes. Primeramente, basados en los resultados de los experimentos discutimos si se cumplen los 3 criterios que establecimos para considerar que un agente ha logrado un desarrollo cognitivo. Posteriormente, evaluamos si los comportamientos construídos en los diferentes experimentos se pueden considerar como creativos, de acuerdo a los 5 criterios propuestos.

#### 7.2.1 Desarrollo Cognitivo

- **Tipo de habilidades aprendidas.** En el primer y segundo conjunto de experimentos (cuando sólo podía ver o tocar su mundo) el agente se inicializó con esquemas básicos que representaban conductas y tendencias innatas que Piaget observó en los recién nacidos. Es decir, al comienzo de su ejecución únicamente podía interactuar con su mundo a través de comportamientos característicos del primer subestadio del periodo sensoriomotor. Sin embargo, para el final de las corridas había aprendido las siguientes habilidades, todas ellas características del segundo subestadio del periodo sensoriomotor:
  1. Recuperar con un movimiento de la cabeza los objetos agradables que salen del campo de visión,
  2. seguirlos visualmente,
  3. centrar en su campo de visión tanto los elementos visuales estáticos como los que están en movimiento,
  4. recuperar los objetos placenteros que suelta y que sigue sensando con su mano abierta,
  5. agarrar un objeto que entra en contacto con la palma de su mano, y
  6. mantener agarrados los objeto de su interés.

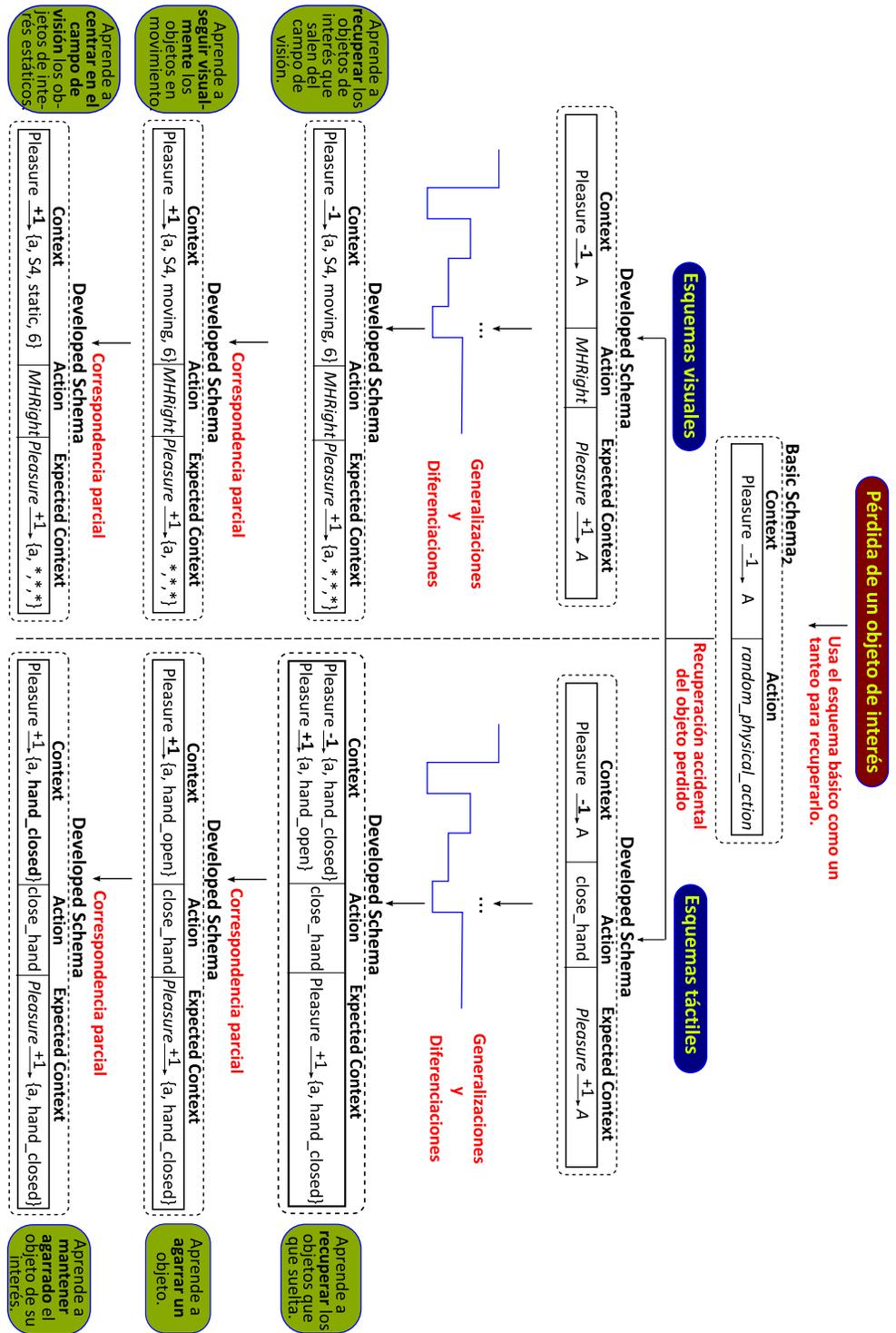
En el tercer conjunto de experimentos, cuando el agente podía tanto ver como tocar su mundo, se inicializó con las conductas listadas anteriormente. Es decir, comenzó su ejecución sabiendo interactuar con su mundo a través de comportamientos característicos del segundo subestadio del periodo sensoriomotor. Al término de las corridas había aprendido las siguientes habilidades, de las cuales la primera es característica del final del segundo subestadio, mientras que el resto son representativas del inicio del tercer subestadio del periodo sensoriomotor:

1. Seguir su mano en movimiento con acciones de su cabeza,
2. centrar en su campo de visión (con un movimiento de su cabeza) el objeto que mantiene agarrado,
3. ver en el centro de su campo de visión cómo su mano suelta y vuelve a tomar el objeto de interés,
4. ver salir de su campo de visión su mano que agarra un objeto y luego la regresa con un movimiento de la cabeza, y
5. ver salir de su campo de visión su mano que agarra un objeto y luego la regresa con un movimiento de la mano.

Por lo tanto, podemos concluir que el agente evolucionó de conductas reflejas (características del primer subestadio), a comportamientos en donde la acción y la consecuencia involucran el cuerpo mismo del agente: su cabeza, su ojo y su mano (característicos del segundo subestadio), y a comportamientos que involucran objetos externos, lo cual incluye la coordinación de la visión y tacto (característicos del tercer subestadio).

- **Trayectoria de desarrollo.** En los conjuntos de experimentos en donde el agente sólo podía ver o tocar su mundo, podemos observar que las primeras habilidades que adquirió surgieron como resultado de la pérdida de objetos de interés, de su recuperación “accidental” (a través del uso de una de sus estructuras de conocimiento básicas), y de la generalización/-diferenciación de tales experiencias. De esta manera, el agente primero

## 7. Evaluación y Discusión



**Figura 7.1:** Ejemplifica la trayectoria desarrollo de las habilidades adquiridas por el agente.

aprendió a regresar a su campo de visión los elementos que salían de éste, y a retomar los objetos que soltaba. La trayectoria de desarrollo de estos dos nuevos comportamientos se ilustra en la parte superior de la Figura 7.1.

Más adelante, el agente entró por primera vez en un estado de equilibrio cognitivo causando que se habilitara su capacidad de realizar correspondencias parciales con los esquemas estabilizados. Es decir, se volvió capaz de usar su conocimiento acerca de cómo recuperar objetos de interés para enfrentar situaciones desconocidas. El resultado de esto fue la adquisición de dos nuevas conductas: 1) seguir visualmente los elementos agradables, y 2) agarrar un objeto que toca la palma de su mano (ver la parte media de la Figura 7.1).

Posteriormente, el agente entró por segunda vez en un estado de equilibrio cognitivo, durante el cual aprendió las siguientes dos habilidades (resultantes de realizar correspondencias parciales entre su situación actual y sus experiencias previas): 1) centrar en el campo de visión los elementos de interés estáticos, y 2) mantener agarrado un objeto (ver la parte inferior de la Figura 7.1).

Finalmente, durante el tercer conjunto de experimentos, el agente logro entrar nuevamente en equilibrio y permaneció en este estado por varios ciclos. Esto causó que al contar con esquemas visuales y táctiles estabilizados, se volviera capaz de representar en su *contexto-actual* tanto lo que le llamaba la atención visualmente como lo táctil, dando origen al aprendizaje de 5 nuevos comportamientos (los cuales volvieron a surgir como resultado de correspondencias parciales): 1) centrar en su campo de visión (con un movimiento de su cabeza) el objeto que mantiene agarrado, 2) ver en el centro de su campo de visión cómo su mano suelta y vuelve a tomar el objeto de interés, 3) ver salir de su campo de visión su mano que agarra un objeto y luego la regresa con un movimiento de la cabeza, y 4) ver salir de su campo de visión su mano que agarra un objeto y luego la regresa con

un movimiento de la mano (las Figuras 6.39, 6.40, 6.41 y 6.42 muestran su surgimiento).

Por lo tanto, podemos concluir que fue posible construir una trayectoria de desarrollo, de tal forma que se pudiera observar la dependencia de los nuevos comportamientos de los ya conocidos. Más aún, dicha trayectoria fue la misma en todos los experimentos, la cual concuerda con la descrita por Piaget.

- **Construcción autónoma.** Todos los comportamientos aprendidos en los tres conjuntos de experimentos fueron el resultado de la interacción del agente con su ambiente virtual, en donde no hubo ningún tipo de intervención humana a partir del inicio de la ejecución y hasta el final de la misma. Esto incluye la transición entre etapas, la cual surgió a consecuencia de que el agente entrara en estados de equilibrio cognitivo y que con ésto se activara su capacidad de realizar correspondencias parciales con esquemas estabilizados, así como de representar en su *contexto-actual* tanto lo que veía como lo que tocaba. Notemos que en el caso particular del tercer conjunto de experimentos el agente se inicializó con los esquemas construídos en los experimentos anteriores. Es decir, comenzó su desarrollo a partir de conductas características del segundo subestadio del periodo sensoriomotor y durante su ejecución construyó de manera autónoma nuevos esquemas que representan comportamientos característicos del tercer subestadio. Sin embargo, en teoría el agente debería ser capaz de evolucionar de manera autónoma de conductas reflejas, a conductas basadas en el cuerpo y a conductas que involucran objetos externos.

### 7.2.2 Comportamientos Creativos

1. **Novedad.** En el capítulo anterior vimos que el agente se inicializó con los tres esquemas básicos de la Figura 6.34, y que para el final de las ejecuciones había construído 29, 26 y 23 esquemas visuales (correspondientes a cada una de las tres corridas), 3 táctiles, y 32 que hacían referencia tanto a

elementos visuales como táctiles. Todos ellos eran diferentes en estructura, contenido y en que representaban distintos comportamientos a aquellos con los que comenzó su ejecución. Es decir, no existían explícitamente en la base de conocimiento del agente. Por tales motivos, bajo el criterio que propusimos, se consideran como novedosos.

2. **Utilidad.** Para evaluar la utilidad de los comportamientos que desarrolló el agente, consideremos primeramente que éste se inicializó con comportamientos característicos de la primera subetapa del periodo sensoriomotor. A partir de ahí, a través de la interacción con su ambiente, construyó sus primeros esquemas referentes a la recuperación de los objetos de interés. Éstos fueron usados posteriormente como base, al aplicarlos parcialmente a las nuevas situaciones que enfrentaba, para la construcción de los siguientes esquemas referentes a la conservación de los elementos agradables. El uso en conjunto de los esquemas visuales y de los táctiles, provocó que el agente adquiriera nuevos comportamientos relacionados con la coordinación de la visión y el tacto. Por lo tanto, los esquemas que desarrolló el agente los consideramos como útiles ya que éstos le permitieron pasar de comportamientos predefinidos o “innatos” (típicos del primer subestadio del periodo sensoriomotor) a comportamientos basados en el cuerpo (típicos del segundo subestadio del periodo sensoriomotor) y a conductas que involucran objetos externos (típicas del tercer subestadio del periodo sensoriomotor).
3. **Emergencia.** El surgimiento de los diferentes comportamientos depende de varios factores, entre los que destacan: 1) las propiedades del ambiente, 2) las características físicas del agente, y 3) el conocimiento actual. Por ejemplo, con respecto al primer punto, si el agente viviera en un mundo en el que para recuperar los objetos siempre tuviera que mover la cabeza hacia arriba, entonces construiría esquemas que representaran esa característica de su ambiente. De la misma manera, si el agente se habilitara con la capacidad de tocar pero no de ver su mundo (es decir, si estuviera ciego), entonces desarrollaría diferentes comportamientos a los que desarrolló con la

visión (usando exactamente los mismos procesos de adaptación en ambos casos). Solo que ahora las nuevas habilidades estarían relacionadas con el tacto. Por ejemplo aprendería a mantener agarrados los objetos de su interés, como en el caso del segundo conjunto de experimentos. Así mismo, con respecto al tercer punto, los comportamientos que desarrolla el agente dependen de su conocimiento actual. Por ejemplo, los esquemas relacionados con la recuperación de objetos de interés se necesitan para que pueda aprender a conservarlos (como se describió en la evaluación de las trayectorias de desarrollo en la sección 7.2.1).

Por lo tanto, podemos concluir que los comportamientos creados por el agente emergieron como resultado de la manera en que los diferentes componentes del sistema interactuaron entre sí, ya que los nuevos comportamientos no están preprogramados y porque además son contextuales. Es decir, porque dependen de la interacción con el medio ambiente, de las características físicas del agente y de su conocimiento actual.

4. **Motivaciones.** Uno de los componentes esenciales del agente es que éste simula respuestas afectivas, estados emocionales y una motivación intrínseca de curiosidad cognitiva que lo empujan a actuar. En particular, con lo que respecta al desarrollo de nuevos esquemas, éstos se crean, modifican o eliminan como resultado de: 1) un estado emocional de sorpresa (p. ej. causada por la recuperación inesperada de un objeto de interés) o 2) por el disparo de una motivación de curiosidad cognitiva (que se genera cuando el agente entra en una situación de conflicto al lidiar con situaciones desconocidas que contradicen su conocimiento actual del mundo). Por lo tanto, en este modelo, el estado emocional de sorpresa y la motivación intrínseca de curiosidad cognitiva disparan la necesidad en el agente de modificar o construir nuevos esquemas.
5. **Adaptación al medio ambiente.** Los esquemas que el agente desarrolló se generaron como consecuencia de que éste se enfrentara a situaciones desconocidas y reaccionara: 1) asimilando la nueva circunstancia a su cono-

cimiento previamente adquirido (por medio de un proceso de búsqueda en memoria de un esquema que representara una situación similar a la de su *contexto-actual*), o 2) acomodando su conocimiento de tal forma que éste se ajustara a la nueva experiencia (creando un nuevo esquema o diferenciando, generalizando o eliminando alguno existente). Por lo tanto, la construcción de nuevas estructuras de conocimiento se llevó a cabo como resultado de la simulación de un proceso complementario de asimilación y acomodación. En otras palabras, se originaron como resultado de la adaptación del agente a su mundo.



“Now this is not the end. It is not even the beginning of the end. But it is, perhaps, the end of the beginning.”

Winston Churchill

CAPITULO

# 8

## Conclusiones

En este trabajo de investigación se propuso un modelo computacional llamado *Dev E-R*, el cual inspirado en la teoría de Piaget simula los procesos de *asimilación, acomodación y equilibración*, mecanismos que conforman la esencia de la teoría del desarrollo cognitivo de dicho autor. Estos se implementaron con una versión extendida del modelo computacional del proceso creativo *Engagement-Reflection* (Pérez y Pérez & Sharples, 2001, 2004; Pérez y Pérez, 2007). En consecuencia *Dev E-R* considera la adaptación, y por lo tanto la construcción del conocimiento, como una actividad creativa. Esta perspectiva es afín a la teoría de Cohen (1989), quien concibe a la creatividad como una serie de comportamientos adaptativos en un continuo de siete niveles de desarrollo (la cual inicialmente involucra la adecuación del individuo al mundo y en los niveles más altos involucra la adecuación del mundo al individuo).

Las principales contribuciones de la versión extendida son:

- Hasta donde sabemos, éste es el primer modelo computacional que simula el proceso del desarrollo cognitivo temprano como una actividad creativa. Siendo también la primera vez que se usa el modelo *Engagement-Reflection* en este contexto.

## 8. Conclusiones

---

- Se propuso que los comportamientos del agente estén regidos por sus “emociones” y “motivaciones”. Por lo cual, su percepción actual del mundo se define en términos de las respuestas afectivas, estados emocionales y motivaciones que le disparan el o los objetos que atiende a su alrededor. Esta percepción se registra en una estructura a la que le llamamos *contexto-actual*. Así mismo, se definieron dos tipos de estructuras de conocimiento: esquemas básicos y esquemas desarrollados. Los primeros representan conductas “innatas” que están compuestas de un contexto y una acción asociada. Los segundos representan comportamientos que se van construyendo durante la ejecución del agente, y están compuestos por un contexto, una acción asociada, un contexto esperado, un conjunto de contextos con los que se cumplieron las expectativas y otro con los que no.
- Se presentó un mecanismo basado en la simulación de la *asimilación* y la *acomodación*, el cual le permite al agente crear, usar, modificar, y eliminar sus estructuras de conocimiento conforme va interactuando con su ambiente. En la versión original de *Engagement-Reflection* esto no era posible. La *asimilación* se modela a través de la asociación o correspondencia del *contexto-actual* con los esquemas en memoria. En un inicio la correspondencia debe de ser del 100%. La *acomodación* se lleva a cabo por medio de procedimientos de generalización y diferenciación, los cuales están basados en la experiencia registrada en los esquemas desarrollados.
- Se propuso modelar el proceso de *equilibrio cognitivo* como el momento en el que el agente logra interactuar con su ambiente por un cierto número de ciclos sin verse en la necesidad de modificar su conocimiento, debido a que sus expectativas se cumplieron la mayoría de las veces; el *desequilibrio* como el momento en el que estando en equilibrio se realiza un cambio a la base de conocimiento del agente; y la *equilibración* como el paso del segundo estado al primero. Basados en estos conceptos se establecieron procedimientos automáticos que van activando: 1) nuevos criterios de preferencia de selección de un esquema sobre otro (por ejemplo, con el tiempo el agente prefiere usar sus esquemas desarrollados sobre los básicos),

---

2) porcentajes menores de correspondencia entre el *contexto-actual* y los esquemas en memoria, y 3) capacidad de representar en el *contexto-actual* tanto lo que ve como lo que toca.

Para probar el modelo propuesto se creó un agente artificial que implementa características físicas y cognitivas que le permiten interactuar con el ambiente virtual en el que se encuentra inmerso. Entre las más importantes destacan: cuenta con sensores de visión y tacto; puede “ver” y “tocar” su mundo; simula un proceso de atención; emula respuestas afectivas, estados emocionales y motivaciones intrínsecas que lo empujan a actuar; cuenta con una memoria; y usa como su componente central el modelo *Dev E-R* para ser capaz de adaptarse a su mundo.

Se diseñaron tres conjuntos de experimentos. El primero de ellos consistió en configurar al agente de tal forma que éste solo pudiera ver pero no tocar su mundo. En el segundo se hizo lo contrario, es decir, se configuró para que pudiera tocar pero no ver su mundo. Finalmente en el tercero le habilitamos su capacidad tanto de ver como de tocar. Los resultados en conjunto mostraron que el agente aprendió a: recuperar con un movimiento de la cabeza los objetos agradables que salen del campo de visión, seguirlos visualmente, centrarlos en su campo de visión, recuperar los objetos placenteros que suelta y que sigue detectando con su mano abierta, agarrar un objeto que entra en contacto con la palma de su mano, mantener agarrados los objetos de su interés, seguir su mano en movimiento con acciones de su cabeza, centrar en su campo de visión (con un movimiento de su cabeza) el objeto que mantiene agarrado, ver en el centro de su campo de visión cómo su mano suelta y vuelve a tomar el objeto de interés, ver salir de su campo de visión su mano que agarra un objeto y luego la regresa con un movimiento de la cabeza, y ver salir de su campo de visión su mano que agarra un objeto y luego la regresa con un movimiento de la misma.

Para evaluar los resultados obtenidos, se propusieron 2 conjuntos de criterios. Estos representan una aportación adicional de este trabajo de investigación, ya que al día de hoy no existe una metodología para juzgar este tipo de sistemas. El primer conjunto es útil para determinar si las habilidades que aprende

## 8. Conclusiones

---

el agente lo llevan a mostrar un desarrollo cognitivo, y está compuesto de los siguientes tres criterios: 1) los nuevos comportamientos deben representar conductas características de etapas posteriores a la que se inicializó el agente; 2) debe de ser posible construir una trayectoria de desarrollo, de tal forma que se pueda observar la dependencia de las nuevas habilidades de las ya conocidas; y 3) la construcción debe de darse de manera autónoma, incluyendo la transición de una subetapa de desarrollo a la siguiente. El segundo conjunto ayuda a establecer si tales comportamientos son creativos, y está compuesto de los siguientes criterios: 1) deben ser novedosos; 2) útiles, en el sentido de que éstos deben de haber servido como base para la construcción de nuevo conocimiento que eventualmente llevara al agente a la adquisición de nuevas habilidades características de su siguiente etapa de desarrollo; 3) deben de haber emergido, es decir su origen no se debe de poder rastrear directamente a los componentes del sistema; 4) deben de haber surgido como resultado de motivaciones intrínsecas o extrínsecas; y 5) deben haber sido adquiridos como resultado de un proceso de adaptación del agente a su ambiente. Bajo estos criterios, se concluyó que el agente mostró haberse desarrollado cognitivamente (en todos los experimentos pasó de conductas características de la primera subetapa del periodo sensoriomotor, a aquellas típicas de la segunda, y a los comienzos de la tercera) y que además los nuevos comportamientos que aprendió se caracterizan por ser creativos.

### 8.1 Trabajo a futuro.

En esta implementación de *Dev E-R* nos enfocamos en las tres primeras subetapas del periodo sensoriomotor, por lo cual tanto la asimilación como la acomodación se realizan de manera automática en modo de *Engagement*. Más adelante, para simular subestadios posteriores de desarrollo, se plantea la posibilidad de dotar al agente (en su módulo de *Reflection*) con capacidades analíticas que le ayuden a construir conductas más razonadas. Por ejemplo, comportamientos orientados a metas (los cuales de acuerdo a Piaget comienzan a observarse a

partir del cuarto subestadio del periodo sensoriomotor) y comportamientos resultantes de razonamientos analógicos (como lo sugiere Stojanov & Indurkha, 2013). Así mismo, siguiendo la teoría de Piaget, proponemos que se incorpore la simulación de reacciones de terminación con sentimientos de éxito o fracaso. Creemos que el habilitar estas nuevas características tendrá como consecuencia que el agente se desarrolle a la cuarta y probablemente a la quinta subetapa del periodo sensoriomotor.



# Apéndices



*Research is formalized curiosity. It is poking and prying with a purpose.*

Zora Neale Hurston

APENDICE



# **Ejemplo paso a paso del desarrollo de los esquemas del tacto**

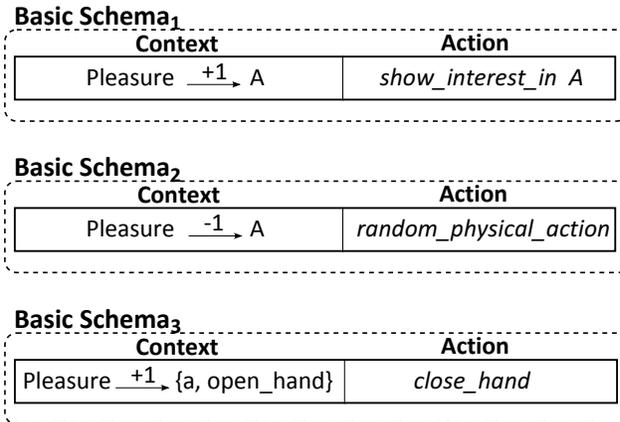
En este apéndice mostramos un ejemplo paso a paso que ilustra la interacción del agente con su mundo cuando éste sólo puede tocarlo pero no verlo, y de cómo esta interacción conlleva a la construcción de nuevos esquemas que representan comportamientos que Piaget describió como característicos del primer y segundo subestadio del periodo sensoriomotor.

## **A.1 Conocimiento inicial**

En este ejemplo el agente se inicializó con los tres esquemas básicos de la Figura A.1, los cuales como se explicó en la sección 6.2.1 representan dos tendencias innatas (referentes a la conservación de los estímulos placenteros) y un comportamiento reflejo que Piaget observó en los recién nacidos.

## A. Ejemplo paso a paso del desarrollo de los esquemas del tacto

---



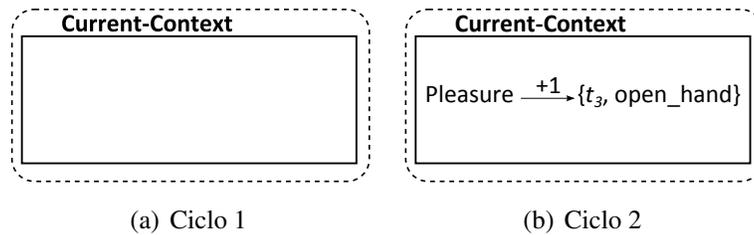
**Figura A.1:** Esquemas básicos iniciales. Estos esquemas representan los comportamientos predefinidos que el agente inicialmente conoce para interactuar con su mundo.

Así mismo, se inicializó al agente con la capacidad de reconocer 6 texturas en los objetos que toca: "t<sub>1</sub>", "t<sub>2</sub>", "t<sub>3</sub>", "t<sub>4</sub>", y "t<sub>5</sub>".

### A.2 El agente interactuando con su ambiente usando sólo sus esquemas básicos

- **Ciclo 1. La mano del agente no toca ningún objeto.**

1. El agente construye el *contexto-actual* de la Figura A.2a, el cual es un contexto vacío debido a que el agente no está tocando ningún objeto.
2. *Dev E-R* no logra hacer corresponder el *contexto-actual* con ninguno de los esquemas conocidos. Entra en modo de *impasse*, y ejecuta una acción física aleatoria. La acción aleatoria seleccionada fue un movimiento de su mano hacia arriba.
3. Ejecuta la acción de mover su mano hacia arriba.
4. El sistema al detectar que la mano del agente no está en contacto con ningún objeto, elige aleatoriamente mover un objeto con textura "t<sub>3</sub>"



**Figura A.2:** (a) *contexto-actual* creado en el ciclo 1; (b) *contexto-actual* creado en el ciclo 2.

a la posición de la mano, de tal forma que el sensor táctil la pueda detectar.

- **Ciclo 2. El agente detecta que está tocando con su mano abierta un objeto con textura “ $t_3$ ”, y cierra su mano como acto reflejo.**

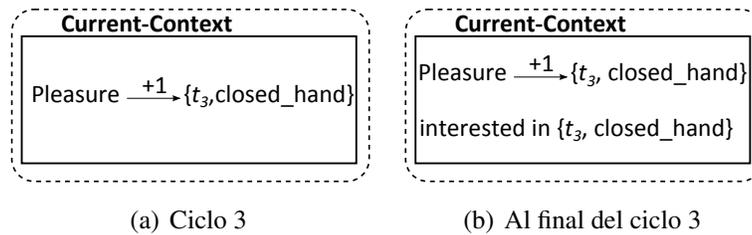
1. El agente detecta que está tocando con su mano abierta un objeto con textura “ $t_3$ ”, lo cual le dispara una respuesta emocional de placer. Con ésta construye el *contexto-actual* de la Figura A.2b.
2. *Dev E-R*, en modo de *Engagement*, encuentra que los esquemas básicos *Basic Schema<sub>1</sub>* y *Basic Schema<sub>3</sub>* de la Figura A.1 corresponden al 100 % con el *contexto-actual*.
3. Elige aleatoriamente el esquema *Basic Schema<sub>3</sub>*, y ejecuta la acción de cerrar la mano.
4. El sistema al detectar que el agente tiene un objeto con la mano cerrada, lo deja en el mismo lugar. El resto de los objetos también permanecen estáticos.

- **Ciclo 3. El agente suelta el objeto que tenía agarrado.**

1. El agente detecta que ahora tiene agarrado el objeto que le causaba placer, con lo cual crea el *contexto-actual* de la Figura A.3a.

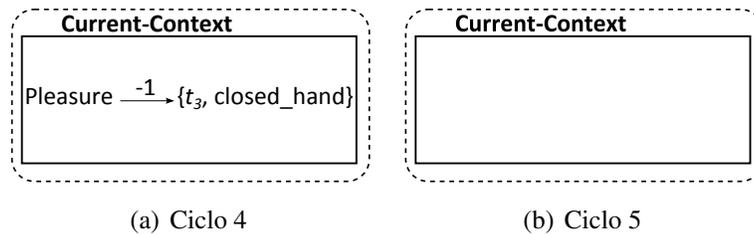
## A. Ejemplo paso a paso del desarrollo de los esquemas del tacto

---



**Figura A.3:** (a) *contexto-actual* creado en el ciclo 3; (b) *contexto-actual* modificado al final del ciclo 3.

2. *Dev E-R*, en modo de *Engagement*, encuentra que sólo el esquema *Basic Schema*<sub>1</sub> de la Figura A.1 corresponde al 100 % con el *contexto-actual*.
  3. Ejecuta la acción asociada al esquema *Basic Schema*<sub>1</sub>, dando como resultado que se dispare un estado emocional de interés hacia el objeto agarrado. Este estado emocional se registra en el *contexto-actual*, como se muestra en la Figura A.3b.
  4. Al final del ciclo abre automáticamente la mano (recordemos que ésta se mantiene cerrada siempre y cuando se ejecute la acción *close-hand*, lo cual no ocurrió en este ciclo).
  5. El sistema al detectar que el agente ha abierto la mano, elige aleatoriamente entre mover el objeto a su posición original o dejarlo en contacto con la mano. En esta ocasión elige moverlo a su posición original.
- **Ciclo 4. El agente detecta que perdió el objeto que tiene registrado como de su interés, y realiza un “tanteo” para recuperarlo.**
    1. El agente detecta que perdió el objeto en el cual estaba interesado, disparándole una respuesta afectiva de *displacer*. Esta respuesta afectiva forma el nuevo *contexto-actual* que se muestra en la Figura A.4a.



**Figura A.4:** (a) *contexto-actual* creado en el ciclo 4; (b) *contexto-actual* creado en el ciclo 5.

2. *Dev E-R*, en modo de *Engagement*, encuentra que el esquema básico *Basic Schema<sub>2</sub>* de la Figura A.1) corresponde al 100 % con el *contexto-actual*.
  3. Ejecuta la acción asociada al esquema *Basic Schema<sub>2</sub>*, la cual corresponde a realizar una acción aleatoria. Elige ejecutar la acción de mover la mano a la izquierda.
  4. El sistema detecta que el agente no está tocando ningún objeto, y elige no mover ningún objeto a su mano.
- **Ciclo 5. El agente detecta que no logró recuperar el objeto de su interés.**
    1. El agente detecta que no logró recuperar el objeto de su interés, y que su mano no está tocando ningún otro objeto. Debido a esto se crea el *contexto-actual* vacío de la Figura A.4b.
    2. *Dev E-R* no logra hacer corresponder el *contexto-actual* con ninguno de los esquemas conocidos. Entra en modo de *impasse*, y ejecuta una acción física aleatoria. La acción aleatoria seleccionada fue un movimiento de su mano hacia abajo.
    3. Ejecuta la acción de mover su mano hacia abajo.
    4. El sistema al detectar que la mano del agente no está en contacto con ningún objeto, elige aleatoriamente mover un objeto con textura “*t<sub>1</sub>*”

## A. Ejemplo paso a paso del desarrollo de los esquemas del tacto

---

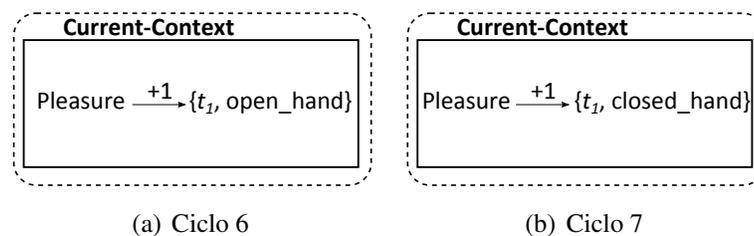
a la posición de la mano, de tal forma que el sensor táctil la pueda detectar.

- **Ciclo 6. El agente detecta que está tocando con su mano abierta un objeto con textura “ $t_1$ ”, y cierra su mano como acto reflejo.**

1. El agente detecta que está tocando con su mano abierta un objeto con textura “ $t_1$ ”, lo cual le dispara una respuesta emocional de placer. Con ésta construye el *contexto-actual* de la Figura A.5a.
2. *Dev E-R*, en modo de *Engagement*, encuentra que los esquemas básicos *Basic Schema<sub>1</sub>* y *Basic Schema<sub>3</sub>* de la Figura A.1 corresponden al 100 % con el *contexto-actual*.
3. Elige aleatoriamente el esquema *Basic Schema<sub>3</sub>*, y ejecuta la acción de cerrar la mano.
4. El sistema al detectar que el agente tiene un objeto con la mano cerrada, lo deja en el mismo lugar. El resto de los objetos también permanecen estáticos.

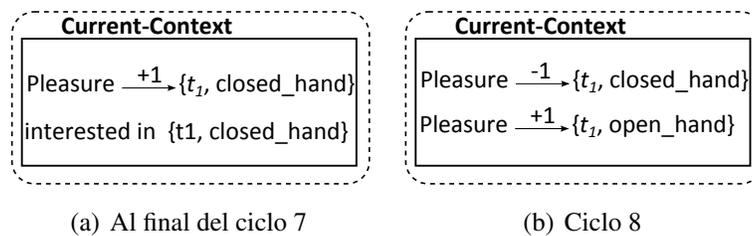
- **Ciclo 7. El agente suelta el objeto que tenía agarrado.**

1. El agente detecta que ahora tiene agarrado el objeto que le causaba placer, con lo cual crea el *contexto-actual* de la Figura A.5b.



**Figura A.5:** (a) *contexto-actual* creado en el ciclo 6; (b) *contexto-actual* creado en el ciclo 7.

2. *Dev E-R*, en modo de *Engagement*, encuentra que sólo el esquema *Basic Schema<sub>1</sub>* de la Figura A.1 corresponde al 100 % con el *contexto-actual*.
3. Ejecuta la acción asociada al esquema *Basic Schema<sub>1</sub>*, correspondiente a mostrar interés hacia el objeto agarrado. El estado emocional de interés disparado por la ejecución de la acción seleccionada se registra en el *contexto-actual*, como se muestra en la Figura A.6a.
4. Al final del ciclo abre automáticamente la mano (recordemos que ésta se mantiene cerrada siempre y cuando se ejecute la acción *close\_hand*, lo cual no ocurrió en este ciclo).
5. El sistema al detectar que el agente ha abierto la mano, elige aleatoriamente entre mover el objeto a su posición original o dejarlo en contacto con la mano. En esta ocasión elige dejarlo en contacto con su mano.



**Figura A.6:** (a) *contexto-actual* modificado al final del ciclo 7; (b) *contexto-actual* creado en el ciclo 8.

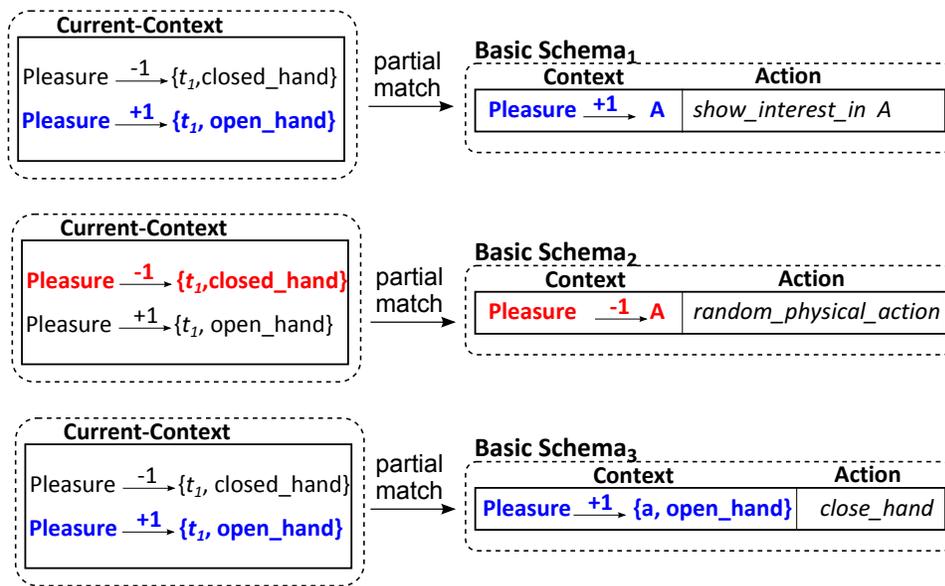
- **Ciclo 8.** El agente detecta que ya no tiene agarrado (con su mano cerrada) el objeto de interés, por lo que lo considera como perdido. Sin embargo, al mismo tiempo detecta que lo sigue tocando pero ahora con la mano abierta. Esta situación le causa respuestas emocionales encontradas.

## A. Ejemplo paso a paso del desarrollo de los esquemas del tacto

---

1. El agente detecta que ya no está tocando el objeto de interés con la mano cerrada, por lo que lo considera como perdido. Esta situación causa que se dispare una respuesta afectiva de displacer. Sin embargo, al mismo tiempo detecta que lo sigue tocando pero ahora con la mano abierta. Esta situación causa que se dispare una respuesta afectiva de placer. Las emociones encontradas de placer y displacer disparadas por el mismo objeto forman el *contexto-actual*, el cual se muestra en la Figura A.6b.
2. Engagement intenta hacer corresponder al 100 % el *contexto-actual* con alguno de los esquemas existentes hasta el momento (mostrados en la Figura A.1), pero no lo logra. Entonces, disminuye al 50 % el porcentaje de correspondencia entre el *contexto-actual* y los esquemas básicos, logrando hacer corresponder parcialmente los esquemas *Basic Schema<sub>1</sub>*, *Basic Schema<sub>2</sub>* y *Basic Schema<sub>3</sub>* (como se ilustra en la Figura A.7). Se consideran correspondencias parciales porque solo se hace corresponder una de las dos respuestas afectivas del *contexto-actual* (la de placer o la de displacer) para decidir cómo actuar, ignorando la otra. De los posibles esquemas a elegir, elige aleatoriamente el esquema *Basic Schema<sub>2</sub>*.
3. Ejecuta la acción asociada al *Basic Schema<sub>2</sub>*, la cual corresponde a realizar una acción aleatoria. Elige ejecutar la acción de cerrar la mano.
4. El sistema al detectar que el agente tiene un objeto con la mano cerrada, lo deja en el mismo lugar. El resto de los objetos también permanecen estáticos.

### A.3 El agente crea su primer esquema desarrollado



**Figura A.7:** Ejemplifica las correspondencias parciales entre el *contexto-actual* del ciclo 8 y los esquemas básicos. Se consideran correspondencias parciales porque sólo una de las dos respuestas afectivas del *contexto-actual* corresponde con la única respuesta afectiva de los esquemas *Basic Schema<sub>1</sub>*, *Basic Schema<sub>2</sub>* y *Basic Schema<sub>3</sub>*. Las correspondencias se encuentran marcadas en rojo y en azul.

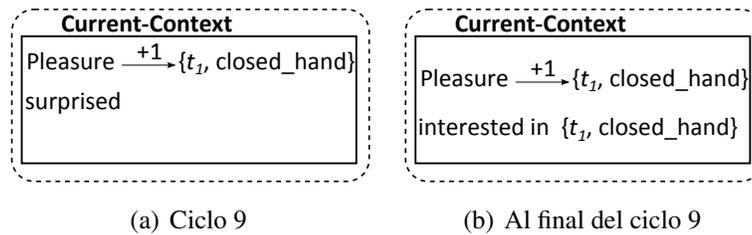
### A.3 El agente crea su primer esquema desarrollado

- **Ciclo 9.** El agente vuelve a sentir el objeto placentero con su mano cerrada, por lo que lo considera como recuperado.

1. El agente vuelve a sentir el objeto placentero con su mano cerrada, por lo que lo considera como recuperado. La recuperación inesperada del objeto placentero dispara un estado emocional de sorpresa. Así mismo, la detección del objeto agarrado le dispara una respuesta afectiva de placer. El estado emocional de sorpresa y la respuesta afectiva de placer se registran en el nuevo *contexto-actual*, como se muestra en la Figura A.8a.
2. *Dev E-R* detecta el estado emocional de sorpresa en el *contexto-actual*. Este estado causa que se construya el nuevo esquema de la

## A. Ejemplo paso a paso del desarrollo de los esquemas del tacto

---



**Figura A.8:** (a) *contexto-actual* creado en el ciclo 9; (b) *contexto-actual* modificado al final del ciclo 9.

- Figura A.9. El nuevo esquema representa una generalización de la experiencia de recuperación del objeto de interés, el cual asocia el tener una respuesta afectiva de displacer causada por la pérdida de una respuesta afectiva de placer, con la acción de cerrar la mano, y con la expectativa de recuperar la respuesta afectiva de placer.
- Después de la creación del nuevo esquema elimina el estado emocional de sorpresa del *contexto-actual* y entra en modo de *Engagement*. En este modo encuentra que sólo el esquema *Basic Schema<sub>1</sub>* de la Figura A.1 corresponde al 100 % con el *contexto-actual*.
  - Ejecuta la acción asociada al esquema *Basic Schema<sub>1</sub>*, correspondiente a mostrar interés hacia el objeto agarrado. El estado emocional de interés disparado por la ejecución de la acción seleccionada se registra en el *contexto-actual*, como se muestra en la Figura A.8b.
  - Al final del ciclo abre automáticamente la mano (recordemos que ésta se mantiene cerrada siempre y cuando se ejecute la acción *close-hand*, lo cual no ocurrió en este ciclo).
  - El sistema al detectar que el agente ha abierto la mano, elige aleatoriamente entre mover el objeto a su posición original o dejarlo en contacto con la mano. En esta ocasión elige dejarlo en contacto con la mano.

## A.4 El agente continúa interactuando con su ambiente usando y modificando sus esquemas desarrollados

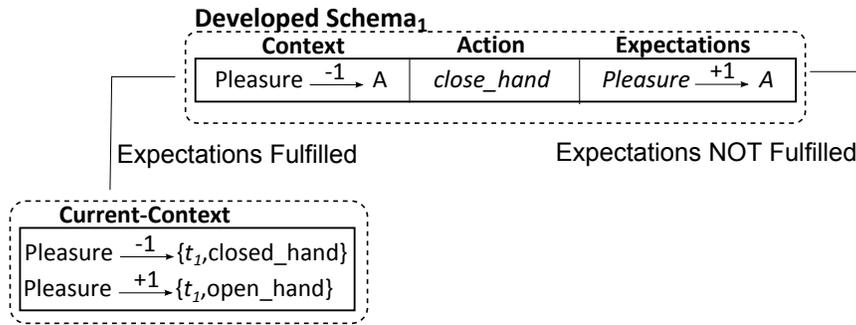
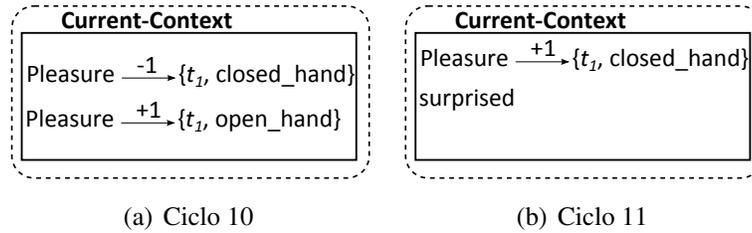


Figura A.9: Primer esquema desarrollado que construye el agente.

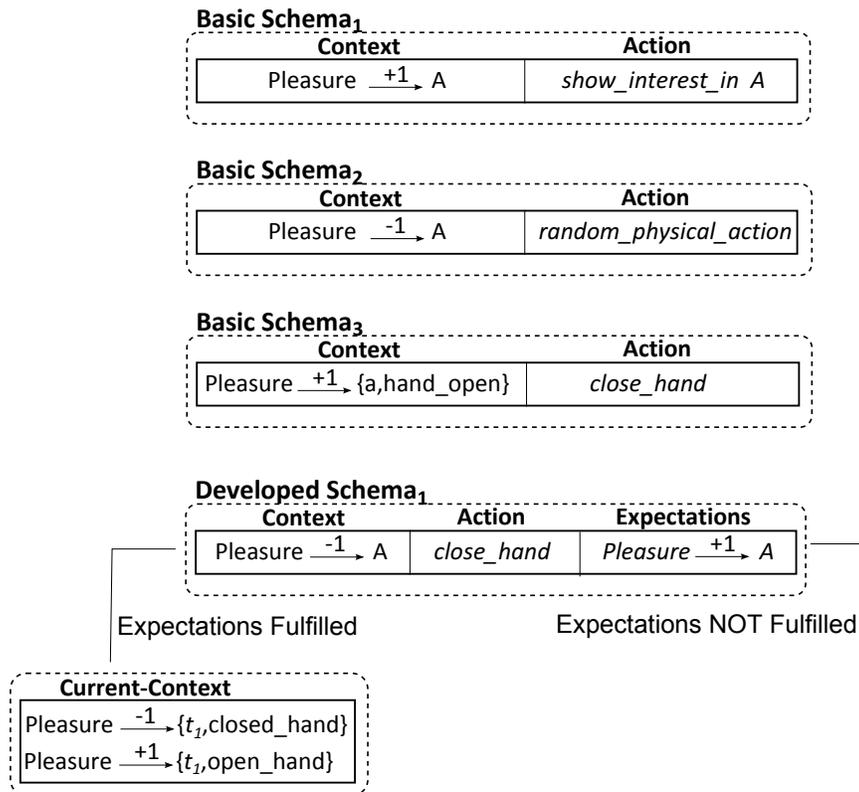
## A.4 El agente continúa interactuando con su ambiente usando y modificando sus esquemas desarrollados

- **Ciclo 10.** El agente detecta que ya no tiene agarrado (con su mano cerrada) el objeto de interés, por lo que lo considera como perdido. Sin embargo, al mismo tiempo detecta que lo sigue tocando pero ahora con la mano abierta. Esta situación le causa respuestas emocionales encontradas.
  1. Al igual que en ciclo 8, el agente detecta que ya no está tocando el objeto de interés con la mano cerrada, por lo que lo considera como perdido. Esta situación causa que se dispare una respuesta afectiva de displacer. Sin embargo, al mismo tiempo detecta que lo sigue tocando pero ahora con la mano abierta. Esta situación causa que se dispare una respuesta afectiva de placer. Las emociones encontradas de placer y displacer disparadas por el mismo objeto forman el *contexto-actual*, el cual se muestra en la Figura A.10a.
  2. Engagement intenta hacer corresponder al 100 % el *contexto-actual* con alguno de los esquemas existentes hasta el momento (mostrados en la Figura A.11), pero no lo logra. Entonces, disminuye al 50 % el porcentaje de correspondencia entre el *contexto-actual* y los esquemas básicos, logrando hacer corresponder parcialmente los es-

## A. Ejemplo paso a paso del desarrollo de los esquemas del tacto



**Figura A.10:** (a) *contexto-actual* creado en el ciclo 10; (b) *contexto-actual* modificado al final del ciclo 10.



**Figura A.11:** Esquemas existentes en el ciclo 10.

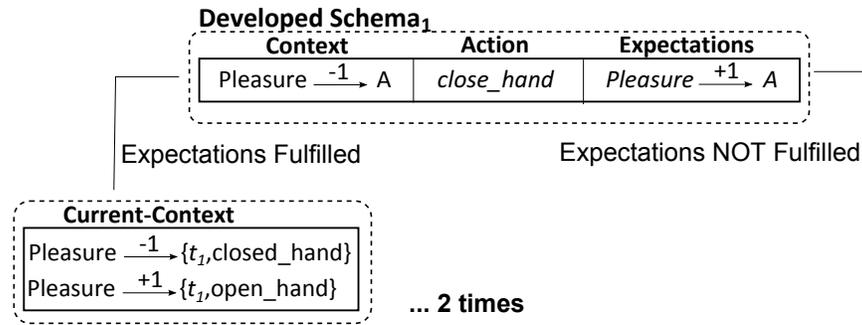
#### A.4 El agente continúa interactuando con su ambiente usando y modificando sus esquemas desarrollados

---

quemas *Basic Schema*<sub>1</sub>, *Basic Schema*<sub>2</sub> y *Basic Schema*<sub>3</sub> (como se ilustró en la Figura A.7). De los posibles esquemas a elegir, elige aleatoriamente el esquema *Basic Schema*<sub>2</sub>.

3. Ejecuta la acción asociada al *Basic Schema*<sub>2</sub>, la cual corresponde a realizar una acción aleatoria. Elige ejecutar la acción de cerrar la mano.
  4. El sistema al detectar que el agente tiene un objeto con la mano cerrada, lo deja en el mismo lugar. El resto de los objetos también permanecen estáticos.
- **Ciclo 11. El agente vuelve a sentir el objeto placentero con su mano cerrada, por lo que lo considera como recuperado.**
    1. El agente vuelve a sentir el objeto placentero con su mano cerrada, por lo que lo considera como recuperado. La recuperación inesperada del objeto placentero dispara un estado emocional de sorpresa. Así mismo, la detección del objeto agarrado le dispara una respuesta afectiva de placer. El estado emocional de sorpresa y la respuesta afectiva de placer se registran en el nuevo *contexto-actual*, como se muestra en la Figura A.10b.
    2. *Dev E-R* detecta el estado emocional de sorpresa en el *contexto-actual*. Este estado causa que intente construir el nuevo esquema de la Figura A.9. Sin embargo, como este esquema ya existía en la base de conocimiento del agente, lo único que hace es guardar el *contexto-actual* anterior en el conjunto “Expectations Fulfilled” del esquema *Developed Schema*<sub>1</sub> (como se muestra en la Figura A.12).
    3. Después de la creación del nuevo esquema elimina el estado emocional de sorpresa del *contexto-actual* y entra en modo de *Engagement*. En este modo encuentra que sólo el esquema *Basic Schema*<sub>1</sub> de la Figura A.11 corresponde al 100 % con el *contexto-actual*.

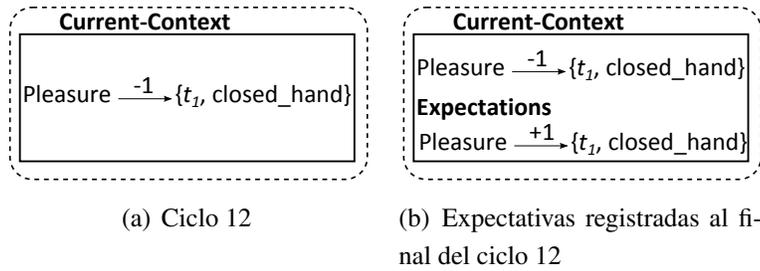
## A. Ejemplo paso a paso del desarrollo de los esquemas del tacto



**Figura A.12:** Ejemplifica cómo en el ciclo 11 se agrega el *contexto-actual* del ciclo 10 al conjunto “Expectations Fulfilled” del esquema *DevelopedSchema<sub>1</sub>*.

4. Ejecuta la acción asociada al esquema *Basic Schema<sub>1</sub>*, correspondiente a mostrar interés hacia el objeto agarrado.
  5. El estado emocional de interés disparado por la ejecución de la acción seleccionada se registra en el *contexto-actual*.
  6. Al final del ciclo abre automáticamente la mano (recordemos que ésta se mantiene cerrada siempre y cuando se ejecute la acción *close-hand*, lo cual no ocurrió en este ciclo).
  7. El sistema al detectar que el agente ha abierto la mano, elige aleatoriamente entre mover el objeto a su posición original o dejarlo en contacto con la mano. En esta ocasión elige moverlo a su posición original.
- **Ciclo 12. El agente detecta que perdió el objeto que tiene registrado como de su interés, y usa su recién esquema desarrollado con la expectativa de recuperarlo.**
    1. El agente detecta que perdió el objeto en el cual estaba interesado, disparándole una respuesta afectiva de displacer. Esta respuesta afectiva forma el nuevo *contexto-actual* que se muestra en la Figura A.13a.

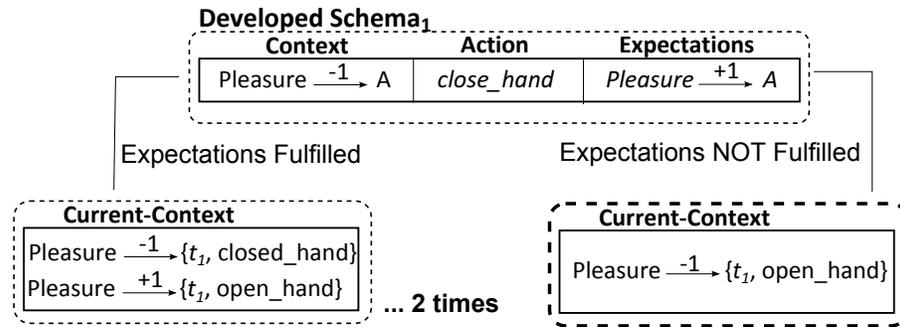
## A.4 El agente continúa interactuando con su ambiente usando y modificando sus esquemas desarrollados



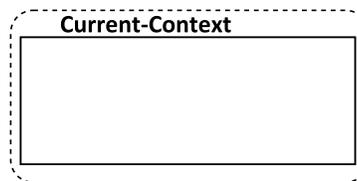
**Figura A.13:** (a) Contexto-actual creado en el ciclo 12; (b) Contexto-actual al final del ciclo 12.

2. *Dev E-R*, en modo de *Engagement*, encuentra que el esquema básico *Basic Schema<sub>2</sub>* y el esquema desarrollado *Developed Schema<sub>1</sub>* de la Figura A.11) corresponden al 100 % con el *contexto-actual*.
  3. Selecciona el esquema *Developed Schema<sub>1</sub>* (ya que tiene asignada una probabilidad más alta de elegir un esquema desarrollado que un esquema básico).
  4. Registra en el *contexto-actual* las expectativas asociadas al esquema seleccionado, como se muestra en la Figura A.13b.
  5. Ejecuta su acción asociada, la cual corresponde a cerrar la mano.
  6. El sistema detecta que el agente no está tocando ningún objeto, y elige no mover ningún objeto a su mano.
- **Ciclo 13. El agente detecta que no logró recuperar el objeto de su interés.**
    1. *Dev E-R* detecta que el agente no logró recuperar el objeto de su interés como lo esperaba. Entonces guarda el *contexto-actual* del ciclo anterior como parte del conjunto “Expectations NOT Fulfilled” del esquema *Developed Schema<sub>1</sub>*, como se muestra en la Figura A.14.
    2. Así mismo el agente detecta que su mano no está tocando ningún objeto. Debido a esto se crea el *contexto-actual* vacío de la Figura A.15.

## A. Ejemplo paso a paso del desarrollo de los esquemas del tacto



**Figura A.14:** Ejemplifica cómo en el ciclo 13 se agrega el *contexto-actual* del ciclo 12 al conjunto “Expectations NOT Fulfilled” del esquema *Developed Schema<sub>1</sub>*.



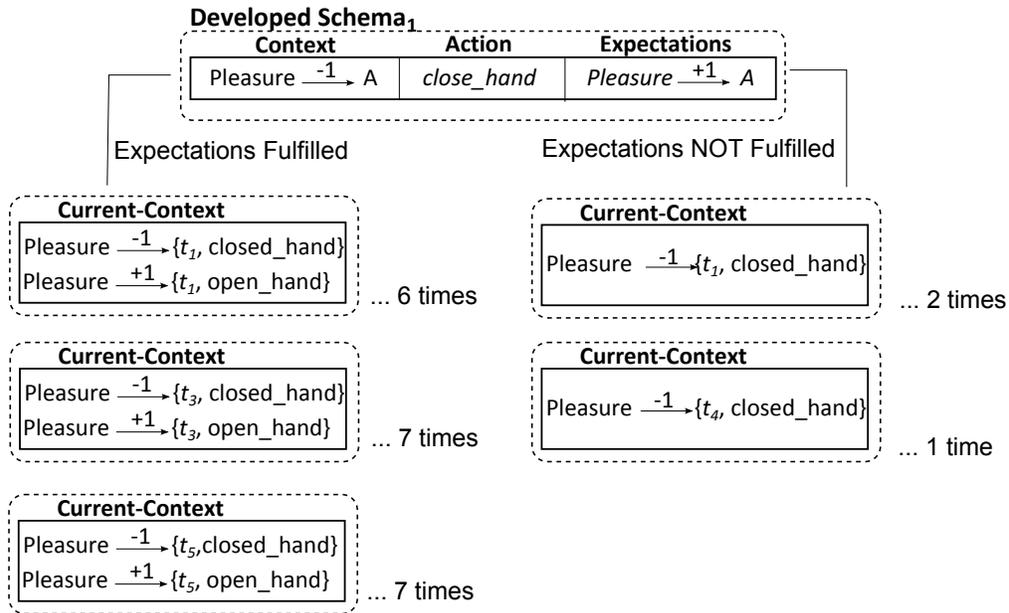
(a) Ciclo 13

**Figura A.15:** Contexto-actual creado en el ciclo 13.

3. Entra en modo de *impasse*, y ejecuta una acción física aleatoria. La acción aleatoria seleccionada fue un movimiento de su mano hacia adelante.
4. Ejecuta la acción de mover su mano hacia adelante.
5. El sistema al detectar que la mano del agente no está en contacto con ningún objeto, elige aleatoriamente mover un objeto con textura “ $t_2$ ” a la posición de la mano, de tal forma que el sensor táctil lo pueda detectar.

De esta manera, el agente continúa interactuando con su mundo haciendo uso de sus esquemas conocidos (tanto de los básicos como del único esquema que ha construido hasta el momento), hasta que para el ciclo 75 el porcentaje de contextos con los cuales no se han cumplido las expectativas del esquema desarrollado *Developed Schema<sub>1</sub>* supera el 10 % (como se muestra en la Figura

## A.4 El agente continúa interactuando con su ambiente usando y modificando sus esquemas desarrollados



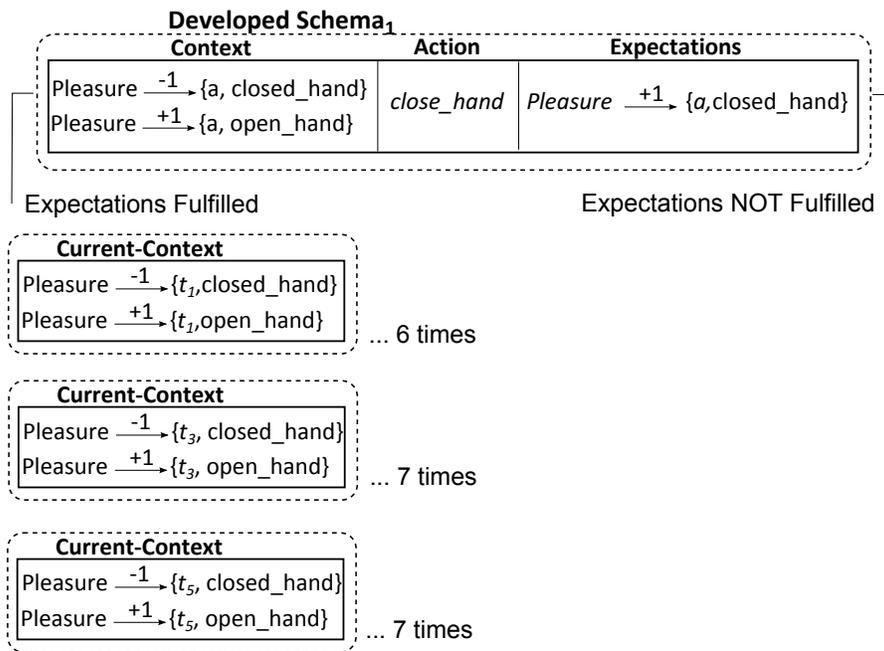
**Figura A.16:** Contextos asimilados al primer esquema desarrollado, en el ciclo 75.

A.16). En ese momento el esquema *Developed Schema<sub>1</sub>* se diferencia en los tres esquemas que se muestran en la Figura A.17. Al ser tres esquemas diferenciados cuya acción asociada es la misma, se generalizan entonces (considerando sus similitudes y diferencias) en el esquema de la Figura A.18. Así, para el final del ciclo 75 los esquemas almacenados en la memoria del agente son aquellos que se muestran en la Figura A.19.



## A.4 El agente continúa interactuando con su ambiente usando y modificando sus esquemas desarrollados

---



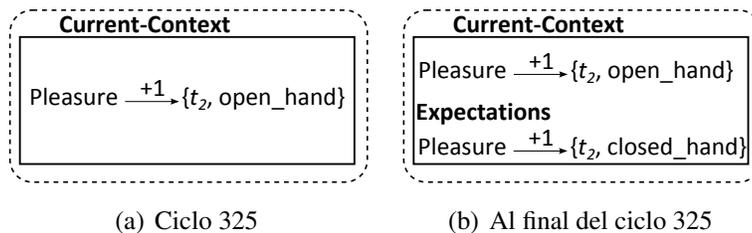
**Figura A.18:** Los tres esquemas diferenciados se generalizan en un solo esquema, en el ciclo 75.



## A.5 El agente alcanza un estado de equilibrio cognitivo por primera vez

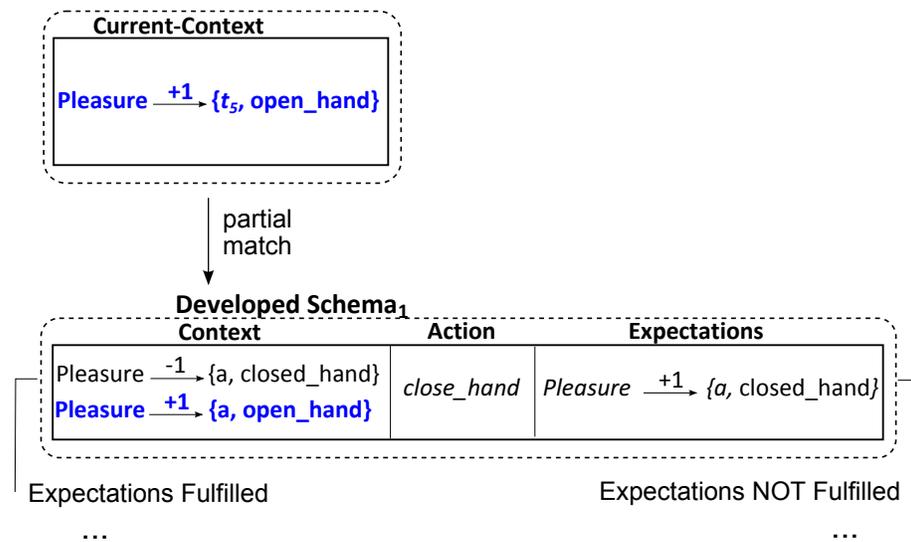
El agente continúa interactuando con su ambiente por 250 ciclos más (hasta llegar al ciclo 325), sin verse en la necesidad de crear, diferenciar, generalizar, ni eliminar ningún esquema existente. Por lo tanto, a partir de este momento se considera que ha entrado en un estado de equilibrio cognitivo, y comenzará a ser capaz de realizar correspondencias parciales con el esquema *Developed Schema*<sub>1</sub>, como se ilustra a continuación.

- **Ciclo 325. El agente detecta que está tocando con su mano abierta un objeto con textura “ $t_2$ ”, y cierra su mano a consecuencia de una correspondencia parcial con un esquema desarrollado estabilizado.**
  1. El agente detecta que está tocando con su mano abierta un objeto con textura “ $t_2$ ”, lo cual le dispara una respuesta emocional de placer. Con ésta construye el *contexto-actual* de la Figura A.20a.
  2. *Dev E-R*, en modo de *Engagement*, elige aleatoriamente si en esta ocasión buscará esquemas que correspondan al 100 % o que correspondan parcialmente con el *contexto-actual*. Elige buscar esquemas que correspondan sólo parcialmente con el *contexto-actual*.



**Figura A.20:** (a) *contexto-actual* creado en el ciclo 325; (b) *contexto-actual* al final del ciclo 326.

## A. Ejemplo paso a paso del desarrollo de los esquemas del tacto

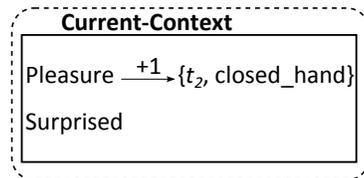


**Figura A.21:** Ejemplifica la correspondencia parcial que realiza *Dev E-R* entre el *contexto-actual* del ciclo 325 y el esquema desarrollado *Developed Schema<sub>1</sub>*.

3. Encuentra que el esquema *Developed Schema<sub>1</sub>* es el único esquema desarrollado que corresponde parcialmente con el contexto actual, como se ilustra en la Figura A.21.
  4. Registra en el *contexto-actual* las expectativas asociadas al esquema *Developed Schema<sub>1</sub>*, como se ilustra en la Figura A.20b.
  5. Ejecuta la acción asociada al esquema *Developed Schema<sub>1</sub>*, la cual corresponde a cerrar la mano.
  6. El sistema al detectar que el agente tiene un objeto con la mano cerrada, lo deja en el mismo lugar. El resto de los objetos también permanecen estáticos.
- **Ciclo 326.** El agente detecta que sus expectativas se cumplieron a pesar de que éstas se registraron como resultado de una correspondencia parcial entre el *contexto-actual* y el esquema al que están asociadas. Esta situación causa que se dispare un estado emocional de sorpresa y que se construya un nuevo esquema.

## A.5 El agente alcanza un estado de equilibrio cognitivo por primera vez

1. El agente detecta que sus expectativas (tocar con la mano cerrada un objeto con textura “ $t_2$ ”) se cumplieron a pesar de que éstas se registraron como resultado de una correspondencia parcial entre el *contexto-actual* del ciclo anterior y el esquema al que están asociadas (*Developed Schema*<sub>1</sub>). Esta situación causa que se dispare un estado emocional de sorpresa. Adicionalmente, la situación de tocar con la mano cerrada un objeto, dispara una respuesta afectiva de placer en el agente. El estado emocional de sorpresa así como la respuesta afectiva de placer se registran en el *contexto-actual*, como se muestra en la Figura A.22.

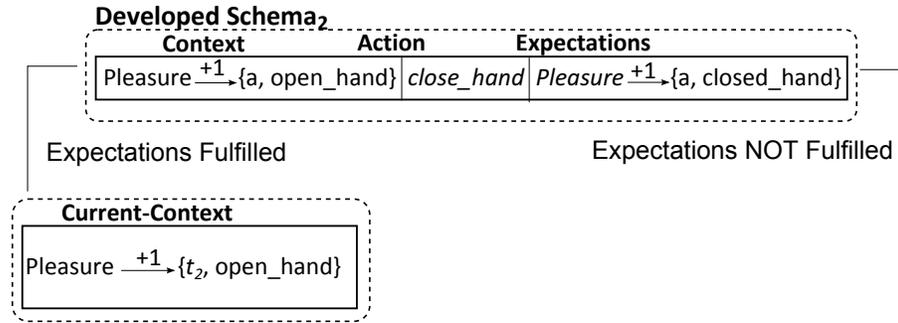


(a) Ciclo 326

**Figura A.22:** Contexto actual creado en el ciclo 326.

2. *Dev E-R* detecta el estado emocional de sorpresa en el *contexto-actual*. Este estado causa que se construya el nuevo esquema de la Figura A.23. El nuevo esquema asocia la situación de tener una respuesta afectiva de placer causada por tocar cualquier objeto con la mano abierta, con la acción de cerrar la mano, y con la expectativa de volver a tener una respuesta afectiva de placer causada por tocar el mismo objeto, pero ahora con la mano cerrada. La construcción de este esquema provoca que a partir de ahora el agente comience a cerrar la mano cuando ésta entra en contacto con cualquier objeto, ya no por un comportamiento reflejo (a través del uso de un esquema

## A. Ejemplo paso a paso del desarrollo de los esquemas del tacto



**Figura A.23:** Nuevo esquema creado en el ciclo 326 como resultado del cumplimiento de las expectativas disparadas por la correspondencia parcial de la Figura A.21.

básico), sino por un comportamiento desarrollado con una expectativa asociada. De esta manera, el conjunto de esquemas que ahora forman parte de la base de conocimiento del agente se muestra en la Figura A.24.

3. *Dev E-R* en modo de *Engagement* encuentra que sólo puede hacer corresponder al 100 % el *contexto-actual* con el esquema *BasicSchema<sub>1</sub>*, y que no puede hacerlo corresponder parcialmente con ningún esquema básico ni con ninguno desarrollado (recordemos que para que pueda realizar correspondencias parciales con un esquema desarrollado éste debe haberse estabilizado, el cual no es el caso del esquema *DevelopedSchema<sub>2</sub>*).
4. Ejecuta la acción asociada al esquema *BasicSchema<sub>1</sub>*, la cual corresponde a mostrar interés en el objeto con textura “*t<sub>2</sub>*”. Este estado emocional se registra en el *contexto-actual*.
5. Al final del ciclo el agente abre automáticamente la mano (recordemos que ésta se mantiene cerrada siempre y cuando se ejecute la acción *close\_hand*, lo cual no ocurrió en este ciclo).
6. El sistema al detectar que el agente ha abierto la mano, elige aleatoriamente entre mover el objeto a su posición original o dejarlo en



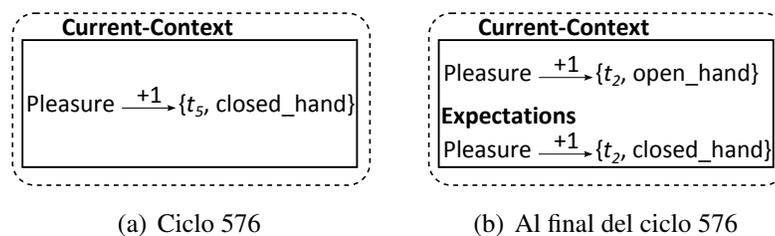
## A. Ejemplo paso a paso del desarrollo de los esquemas del tacto

---

más (hasta el ciclo 576) entra nuevamente en un estado de equilibrio cognitivo debido a que durante esos ciclos no se vio en la necesidad de crear, diferenciar, generalizar, ni eliminar ningún esquema existente. Por lo tanto, a partir de este momento comenzará a ser capaz de realizar correspondencias parciales tanto con el esquema *Developed Schema*<sub>1</sub> como con el el esquema *Developed Schema*<sub>2</sub>, como se ilustra a continuación.

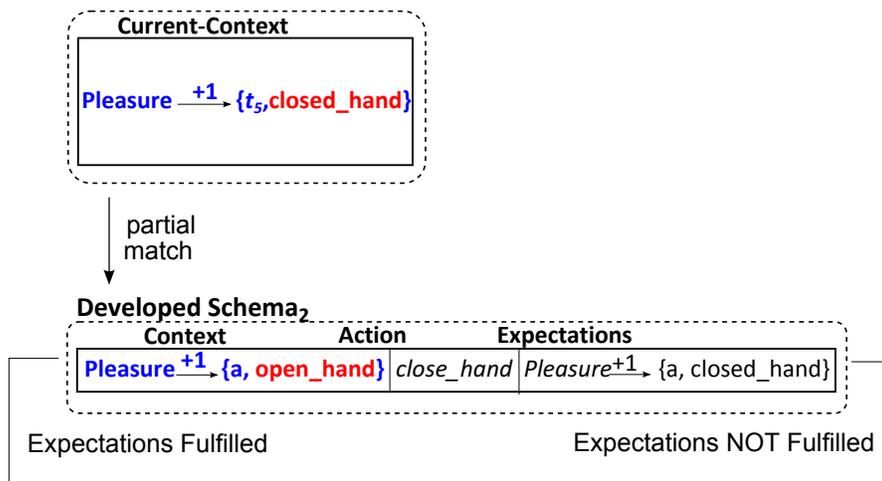
- **Ciclo 576. El agente detecta que está agarrando un objeto y aprende a mantenerlo agarrado.**

1. El agente detecta que está agarrando un objeto (con textura “*t*<sub>5</sub>” y con su mano cerrada), lo cual le dispara una respuesta afectiva de placer que se registra en el *contexto-actual* (como se muestra en la Figura A.25a).
2. *Dev E-R* en modo de *Engagement* elige aleatoriamente si en esta ocasión buscará esquemas que correspondan al 100 % o que correspondan parcialmente con el *contexto-actual*. Elige buscar esquemas que correspondan sólo parcialmente con el *contexto-actual*.
3. Encuentra que el esquema *Developed Schema*<sub>1</sub> es el único esquema desarrollado que corresponde parcialmente con el contexto actual, como se ilustra en la Figura A.26.
4. Registra en el *contexto-actual* las expectativas asociadas al esquema *Developed Schema*<sub>1</sub>, como se ilustra en la Figura A.25b.



**Figura A.25:** (a) *contexto-actual* creado en el ciclo 576; (b) *contexto-actual* al final del ciclo 576.

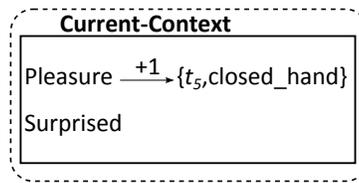
## A.6 El agente alcanza un estado de equilibrio cognitivo por segunda vez



**Figura A.26:** Ejemplifica la correspondencia parcial que realiza *Dev E-R* entre el *contexto-actual* del ciclo 576 y el esquema desarrollado *Developed Schema<sub>2</sub>*

5. Ejecuta la acción asociada al esquema *Developed Schema<sub>1</sub>*, la cual corresponde a cerrar la mano.
  6. El sistema al detectar que el agente tiene un objeto con la mano cerrada, lo deja en el mismo lugar. El resto de los objetos también permanecen estáticos.
- **Ciclo 577. El agente detecta que sus expectativas se cumplieron a pesar de que éstas se registraron como resultado de una correspondencia parcial entre el *contexto-actual* y el esquema al que están asociadas. Esta situación causa que se dispare un estado emocional de sorpresa y que se construya un nuevo esquema.**
    1. El agente detecta que sus expectativas (sentir placer por tocar con la mano cerrada un objeto con textura “t<sub>5</sub>”) se cumplieron a pesar de que éstas se registraron como resultado de una correspondencia parcial entre el *contexto-actual* del ciclo anterior y el esquema al que están asociadas (*Developed Schema<sub>2</sub>*). Esta situación causa que se

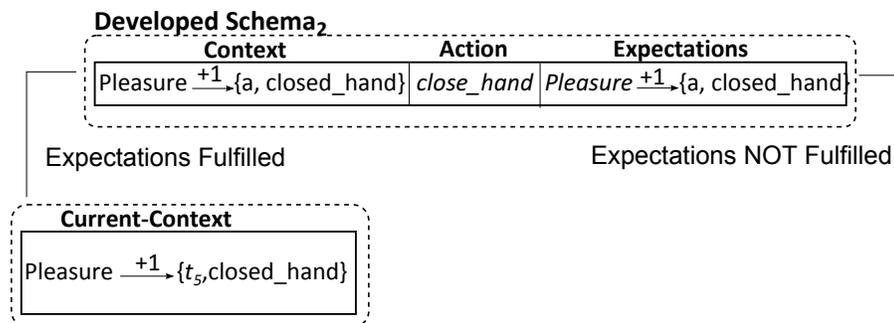
## A. Ejemplo paso a paso del desarrollo de los esquemas del tacto



**Figura A.27:** Contexto actual creado en el ciclo 577.

dispare un estado emocional de sorpresa. Adicionalmente, la situación de tocar con la mano cerrada un objeto, dispara una respuesta afectiva de placer en el agente. El estado emocional de sorpresa así como la respuesta afectiva de placer se registran en el *contexto-actual*, como se muestra en la Figura A.27.

2. *Dev E-R* detecta el estado emocional de sorpresa en el *contexto-actual*. Este estado causa que se construya el nuevo esquema de la Figura A.28. El nuevo esquema asocia la situación de tener una respuesta afectiva de placer causada por tocar cualquier objeto con la mano cerrada, con la acción de cerrar la mano, y con la expectativa de conservar la respuesta afectiva de placer causada por mantener agarrado el mismo objeto.



**Figura A.28:** Nuevo esquema creado en el ciclo 577 como resultado del cumplimiento de las expectativas disparadas por la correspondencia parcial de la Figura A.26.

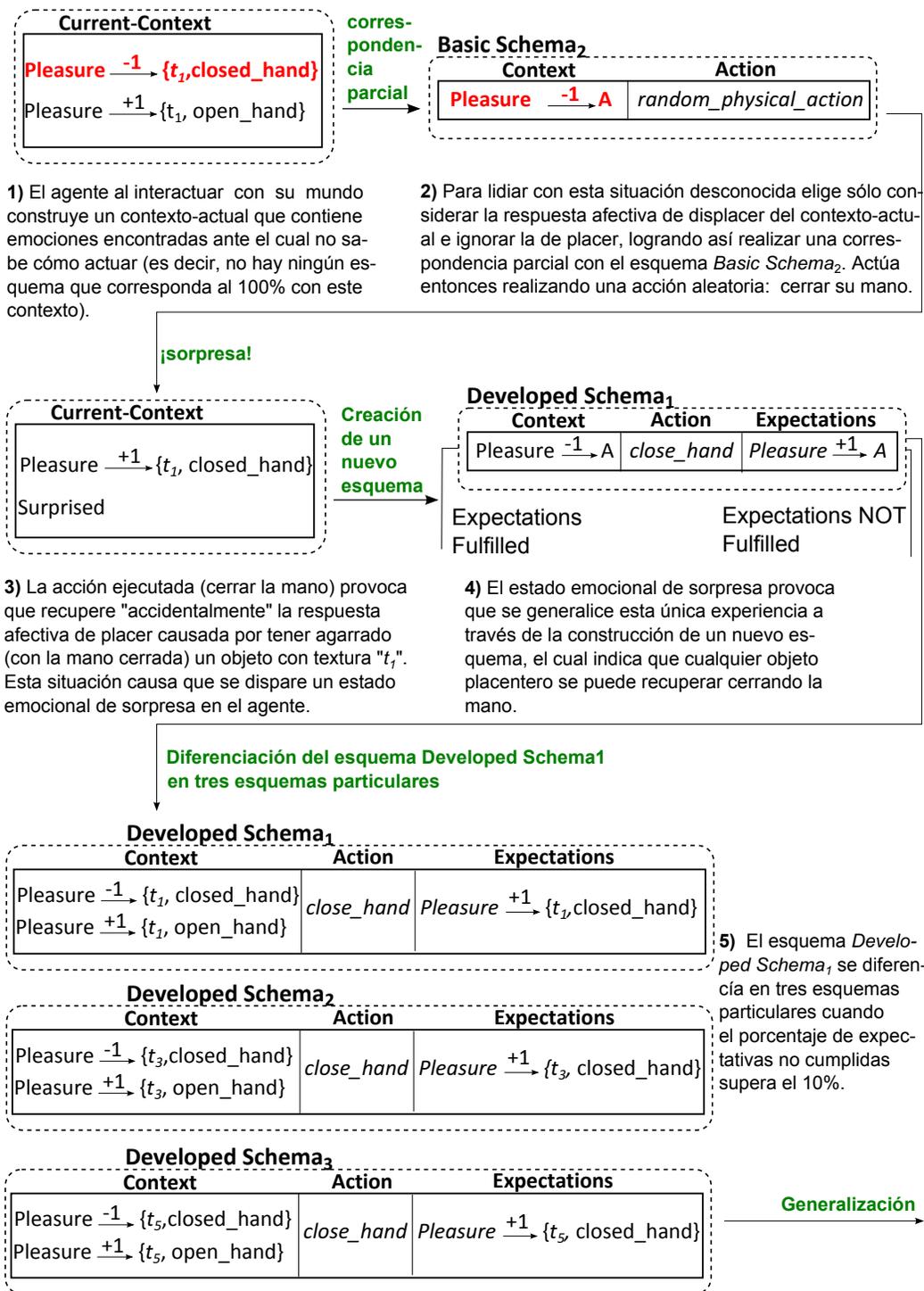
3. La construcción de este nuevo esquema provoca que a partir de ahora el agente comience a mantener cerrada la mano cuando ésta se encuentra agarrando un objeto de su interés, el cual soltará cuando se dispare un estado emocional de aburrimiento (recordemos que éste estado emocional se dispara cuando el agente mantiene agarrado un mismo objeto durante varios ciclos). De esta manera, el conjunto de esquemas que ahora forman parte de la base de conocimiento del agente se muestra en la Figura A.29.
4. *Dev E-R* en modo de *Engagement* encuentra que el contexto- actual corresponde al 100 % el esquema *BasicSchema<sub>1</sub>* y con el nuevo esquema *Developed Schema<sub>3</sub>*. Elige el esquema *Developed Schema<sub>3</sub>*.
5. Ejecuta su acción asociada, la cual corresponde a cerrar la mano.
6. El sistema al detectar que el agente tiene un objeto con la mano cerrada, lo deja en el mismo lugar. El resto de los objetos también permanecen estáticos.

El agente continúa interactuando con su ambiente haciendo uso de sus esquemas conocidos (mostrados en la Figura A.29), hasta que después de 250 ciclos más (hasta el ciclo 827) entra nuevamente en un estado de equilibrio cognitivo debido a que durante esos ciclos no se vio en la necesidad de crear, diferenciar, generalizar, ni eliminar ningún esquema existente. Por lo tanto, a partir de este momento comenzará a ser capaz de realizar correspondencias parciales tanto con los esquemas *Developed Schema<sub>1</sub>* y *Developed Schema<sub>2</sub>*, como con el esquema *Developed Schema<sub>3</sub>*. Sin embargo, después de otros 250 ciclos más (hasta el ciclo 1077) el agente se mantiene sin realizar ningún cambio en su base de conocimiento, con lo cual se da como terminada la ejecución.

## A.7 Resumen

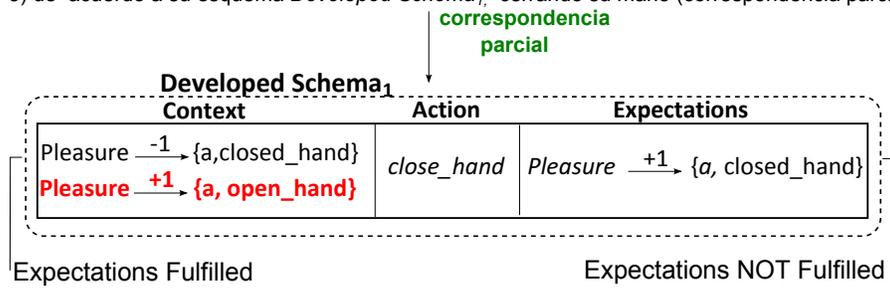
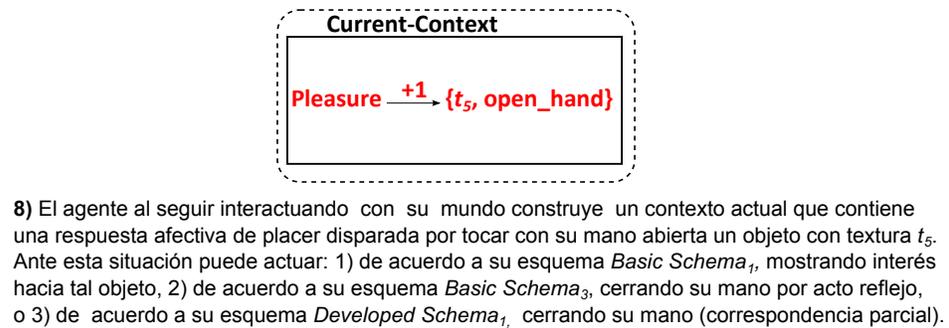
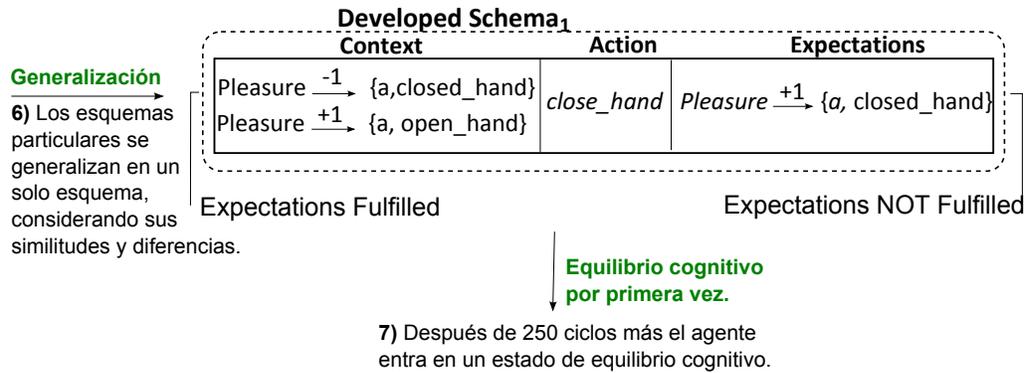
Para resumir el proceso de generación de conocimiento del agente, cuando éste sólo puede tocar pero no ver su mundo, creamos las Figuras A.30, A.31, A.32 y A.33 en las cuales se ilustra todo este proceso.



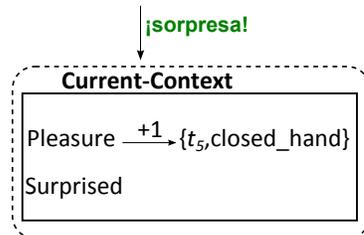


**Figura A.30:** Resume el proceso de construcción del conocimiento del agente cuando éste puede tocar pero no ver su mundo.

## A. Ejemplo paso a paso del desarrollo de los esquemas del tacto

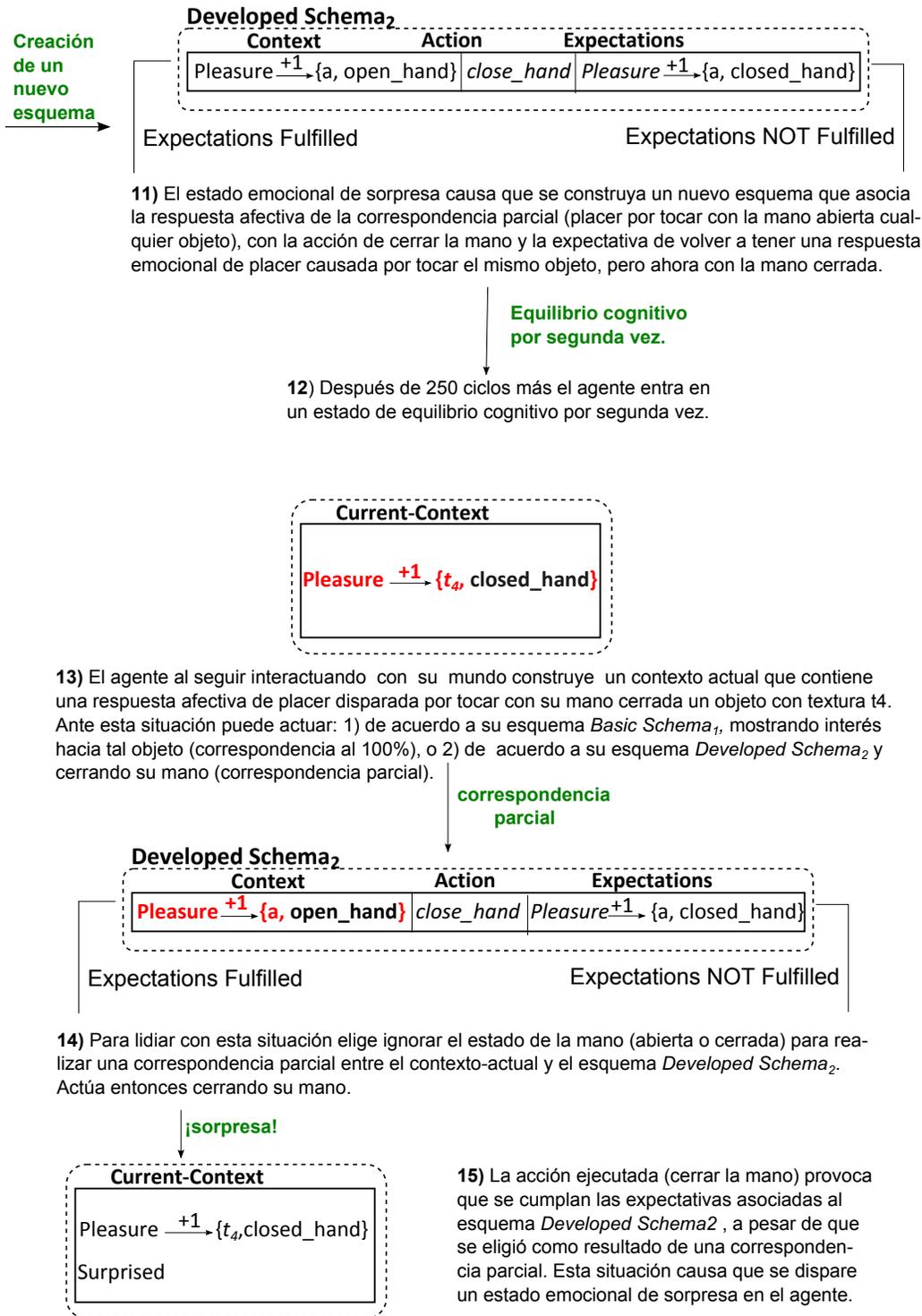


9) Para lidiar con esta situación elige realizar una correspondencia parcial ignorando la respuesta afectiva de displacer del esquema *Developed Schema<sub>1</sub>*, para sólo considerar la de placer. Actúa entonces cerrando su mano.



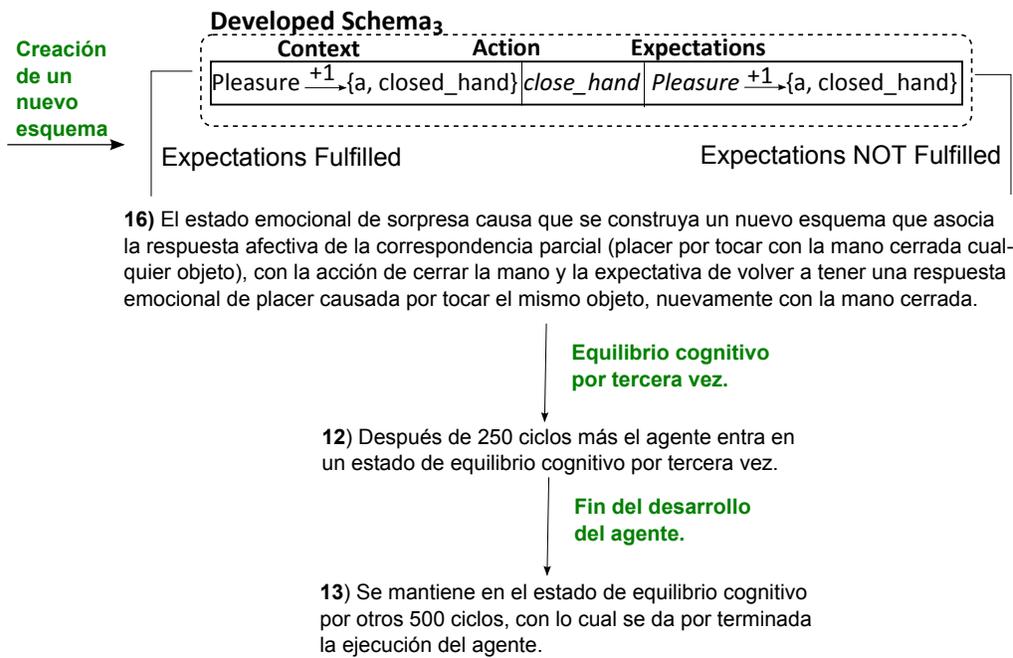
10) La acción ejecutada (cerrar la mano) provoca que se cumplan las expectativas asociadas al esquema *Developed Schema<sub>1</sub>*, a pesar de que se eligió como resultado de una correspondencia parcial. Esta situación causa que se dispare un estado emocional de sorpresa en el agente.

**Figura A.31:** Continuación (parte 2) del resumen del proceso de construcción del conocimiento del agente cuando éste puede tocar pero no ver su mundo.



**Figura A.32:** Continuación (parte 3) del resumen del proceso de construcción del conocimiento del agente cuando éste puede tocar pero no ver su mundo.

## A. Ejemplo paso a paso del desarrollo de los esquemas del tacto



**Figura A.33:** Continuación (parte 4) del resumen del proceso de construcción del conocimiento del agente cuando éste puede tocar pero no ver su mundo.

APENDICE

# B

## Publicaciones

- Wendy Aguilar and Rafael Pérez y Pérez, **Dev E-R: A computational model of early cognitive development as a creative process**, *Cognitive Systems Research*, vol. 33, p.p 17-41, 2015.
- Wendy Aguilar and Rafael Pérez y Pérez, **Criteria for Evaluating Early Creative Behavior in Computational Agents**, *International Conference on Computational Creativity*, 2014.
- Wendy Aguilar and Rafael Pérez y Pérez, **A Computer Model of a Developmental Agent to Support Creative-Like Behavior**, *AAAI Spring Symposium: Creativity and (Early) Cognitive Development*, Technical Report, vol. SS1302, pp. 813, 2013.
- Wendy Aguilar, Rafael Pérez y Pérez and Eduardo Peñalosa, **Emergence of Creative-Like Behavior on a Developmental Agent**, *International Conference on Computational Creativity*, 2011.



# Referencias

- Acosta, E., & Pérez y Pérez, R. (2005). The geometrician: a computer model for problem solving in the field of geometry. In *Proceedings of the Second Joint Workshop on Computational Creativity, at the 19TH International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'05)*, (pp. 10–16). 9, 25
- Acosta, E., & Pérez y Pérez, R. (2006). The geometrician: a computer prototype of problem solving in geometry construction. In *In Sun, R. ed. Proceedings of the 28th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, (pp. 24–35). 9, 25
- Amabile, T. M., & Collins, M. A. (1999). In: *R.J. Sternberg (Editor) Handbook of creativity*, chap. Motivation and creativity, (pp. 197–312). Cambridge University Press, Cambridge. 117
- Asada, M., MacDorman, K., Ishiguro, H., & Kuniyoshi, Y. (2001). Cognitive developmental robotics as a new paradigm for the design of humanoid robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 37, 185–193. 8
- Baillargeon (2004). Infant's physical worlds. *Current Directions in Psychological Science*, (pp. 89–94). 24
- Beer, R., Chiel, H., Quinn, R., & Ritzmann, R. (1998). Biorobotics approaches to the study of motor systems. *Current Opinion in Neurobiology*, 8, 777–782. 7

## REFERENCIAS

---

- Beghetto, R. A., & Kaufman, J. C. (2007). Toward a broader conception of creativity: A case for mini-c creativity. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 2(1), 73–79. 1
- Boden, M. A. (1988). *Artificial Intelligence in Psychology*. Cambridge, MA: MIT Press. 24
- Boden, M. A. (1995). *Piaget (2nd edition)*. Modern Masters, Fontana Press. 24
- Brooks, R. (1991). Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, 47, 139–160. 7
- Chaput, H. H. (2004). *The constructivist learning architecture: a model of cognitive development for robust autonomous robots*. Ph.D. thesis, AI Laboratory, The University of Texas at Austin. 9
- Clark, A. (1997). *Being There: Putting Brain, Body and World Together Again*. Cambridge MA: MIT Press. 7
- Cohen, L. (1989). A continuum of adaptive creative behaviors. *Creativity Research Journal*, 3. v, 1, 117, 127
- Colton, S. (2012). *The Painting Fool: Stories from Building an Automated Painter*; In J. McCormack, M. d'Inverno (eds.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 9
- Drescher, G. L. (1991). *Made-Up Minds, A Constructivist Approach to Artificial Intelligence*. MIT Press. 7, 9
- Elliott, T., & Shadbolt, N. (2003). Developmental robotics: manifesto and application. *Philosophical Transaction: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 361, 2187–2206. 8
- Epstein, H. (1978). *Growth spurts during brain development; Implications for educational policy and practice*. Chicago:University of Chicago Press. 16

- Flavell, J. H., Miller, P. H., & Miller, S. A. (2002). *Cognitive Development*. Upper Saddle River, NJ:Prentice Hall. 24
- Gervás, P. (2001). An expert system for the composition of formal spanish poetry. *Knowledge Based System, 14*, 181–188. 9
- Gorney, E. (2007). Dictionary of creativity: terms, concepts, theories and findings in creativity research.  
URL <http://creativity.netslova.ru/Adaptation.html> 1
- Gruber, H. E. (1981). On the relation between “a-ha” experiences and the construction of ideas. *History of Science, 19*, 41–59. 117
- Guerin, F. (2011a). Learning like a baby: a survey of artificial intelligence approaches. *The Knowledge Engineering Review, 26*, 209–236. 5, 8
- Guerin, F. (2011b). *Sensorimotor Schema(s)*. In *Encyclopedia of the Sciences of Learning*, Norbert Seel (ed.). Springer Science+Business Media. 45, 65
- Guerin, F., & McKenzie, D. (2008). A piagetian model of early sensorimotor development. In *Proceedings of the Eighth International Conference on Epigenetic Robotics Modeling Cognitive Development in Robotic Systems*, (pp. 29–36). 9
- Guilford, J. P. (1968). *Creativity, intelligence, and their educational implications*. San Diego, CA: EDITS/Knapp. 117
- Harris, P. L. (1983). *Infant cognition*. In M. M. Haith and J. J. Campos (Eds.), *Handbook of child psychology*, vol. 2. New York:Wiley. 25
- Holmes, M., & Isbell., C. (2005). Schema learning: Experience-based construction of predictive actionmodels. *Advances in Neural Information Processing Systems, 17*, 585–562. 9
- Hudspeth, W. J. (1985). Developmental neuropsychology: Functional implications of quantitative eeg maturation. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, (p. 606). 16

## REFERENCIAS

---

- Kozbelt, A., Beghetto, R. A., & Runco, M. A. (2010). *Theories of Creativity. In James C. Kaufman and Robert J. Sternberg. The Cambridge Handbook of Creativity.*. Cambridge University Press. 1
- Lemaitre, C. (1974). *Problemes de Planification et Apprentissage dans le cas d'un programme de simulation de robot.* Ph.D. thesis, Universite Paris VI, Institut de Programmation. 9
- Lungarella, M., Mettay, G., Pfeiferz, R., & Sandini, G. (2003). Developmental robotics: a survey. *Connection Science*, 15, 151–190. 5, 8
- Maher, M., Merrick, K., & Saunders, R. (2008). Achieving creative behaviour using curious learning agents. In *Proceedings of the AAAI Spring Symposium on Creative Intelligent Systems*, (pp. 26–28). Stanford University. 116
- Manurung, R., Ritchie, G., Pain, H., Waller, A., O'Mara, D., & Black, R. (2008). The construction of a pun generator for language skills development. *Applied Artificial Intelligence*, 22:9, 841–869. 9
- Mareschal, D., & Thomas, M. S. (2006). How computational models help explain the origins of reasoning. *IEEE Computational Intelligence Machine*. 4, 5
- McClelland, J. (1995). *A connectionist perspective on knowledge and development, In T.Simon and G. Halford (Eds.), Developing Cognitive Competence: New Approaches to Process Modeling.* Hillsdale, NJ: Erlbaum. 9
- Metta, G., Sandini, G., Natale, L., & Panerai, F. (2001). Development and robotics. In *In Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, (pp. 33–42). 8
- Ormrod, J. (2012). *Essentials of Educational Psychology: Big Ideas to Guide Effective Teaching.* Boston, MA: Pearson Education Inc. 53
- Parisi, D., & Schlesinger, M. (2002). Artificial life and piaget. *Cognitive development*, 17, 1301–1321. 8

- Pérez y Pérez, R. (1999). *Mexica: a Computer Model of Creativity in Writing*. Ph.D. thesis, University of Sussex. 25
- Pérez y Pérez, R. (2007). Employing emotions to drive plot generation in a computer-based storyteller. *Cognitive Systems Research*, 8(2), 89–109. v, 4, 9, 48, 51, 127
- Pérez y Pérez, R. (2014). The three layers evaluation model for computer-generated plots. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Computational Creativity*, (pp. 220–229). 116
- Pérez y Pérez, R. (in press). A computer-based model for collaborative narrative generation. *Cognitive Systems Research*. 116
- Pérez y Pérez, R., Aguilar, A., & Negrete, S. (2010). The eri-designer: A computer model for the arrangement of furniture. *Minds an Machines*, 20(4), 483–487. 9, 25
- Pérez y Pérez, R., González de Cossío, M., & Guerrero, I. (2013). A computer model for the generation of visual compositions. In *Fourth International Conference on Computational Creativity*, (pp. 105–112). 25
- Pérez y Pérez, R., & Ortiz, O. (2013). A model for evaluating interestingness in a computer-generated plot. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Computational Creativity*, (pp. 131–138). 116
- Pérez y Pérez, R., & Sharples, M. (2001). Mexica: a computer model of a cognitive account of creative writing. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 13, number 2, 119–139. v, 4, 9, 25, 48, 51, 127
- Pérez y Pérez, R., & Sharples, M. (2004). Three computer-based models of storytelling: Brutus, minstrel and mexica. *Knowledge Based Systems Journal*, 17, number 1. v, 4, 9, 25, 48, 51, 116, 127

## REFERENCIAS

---

- Perotto, F., Buisson, J., & Alvares, L. (2007). Constructivist anticipatory learning mechanism (calm): Dealing with partially deterministic and partially observable environments. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Epigenetic Robotics, Piscataway, NJ, USA*, (pp. 117–127). 9
- Piaget, J. (1952). *The Origins of Intelligence in Children*. London: Routledge and Kegan Paul, 1936 (French version published in 1936, translation by Margaret Cook published 1952). 19
- Piaget, J. (1954). *The construction of reality in the child*. Cook, Margaret (Trans). New York, NY.: Basic books. 19
- Piaget, J. (1971). *Psychology and epistemology: Towards a theory of knowledge*. Middlesex, UK: Penguin Books. 24
- Piaget, J. (1981). *Intelligence and Affectivity: Their Relationship during Child Development (Trans. and Ed. T.A Brown and C.E Kaegi)*. Oxford, England: Annual reviews. 18
- Ritchie, G. (2007). Some empirical criteria for attributing creativity to a computer program. *Minds and Machines*, 17, 67–99. 9
- Runco, M. A. (2007). *Creativity Theories and Themes: Research, Development, and Practice*. Academic Press in an imprint of Elsevier. 1, 4, 117
- Runco, M. A., & Pritzker, S. R. (1999). *Encyclopedia of Creativity*. Academic Press. 2, 4
- Sandini, G., Metta, G., & Konczak, J. (1997). Human sensori-motor development and artificial systems. In *Proceedings of the International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Intellectual Human Activity Support for Applications*, (pp. 303–314). 8
- Scandura, J. (1977). *Problem solving: a structural process approach with instructional implications*. Academic Press, London. 3

- Shultz, T. R., Schmidt, W. C., Buckingham, D., & Mareschal, D. (1995). *Modeling cognitive development with a generative connectionist algorithm*, In T. Simon and G. Halford (Eds.), *Developing Cognitive Competence: New Approaches to Process Modeling*. Hillsdale, NJ: Erlbaum. 9
- Steels, L. (1990). Towards a theory of emergent functionality,. In *From Animals to Animats: First International Conference on Simulation of Adaptive Behaviour*, (pp. 451–461). Bradford Books (MIT Press). 116
- Stojanov, G. (2001). Petitagé: A case study in developmental robotics. In C. Balkenius, J. Zlatev, H. Kozima, K. Dautenhahn, and C. Breazeal, editors, *Proceedings of Epigenetic Robotics 1*. 9
- Stojanov, G. (2009). History of usage of piaget's theory of cognitive development in ai and robotics: a look backwards for a step forwards. In *Proceedings of the 9th International Conference on Epigenetic Robotics: Modeling Cognitive Development in Robotic Systems*. 9
- Stojanov, G., & Indurkha, B. (2013). Creativity and cognitive development: The role of perceptual similarity and analogy. In *Creativity and (Early) Cognitive Development: Papers from the 2013 AAAI Spring Symposium*. 131
- Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59, 433–460. 5, 7
- Varela, F., Thompson, E., & Rosch, E. (1991). *The Embodied Mind*. Cambridge MA: MIT Press. 7
- Weng, J., McClelland, J., Pentland, A., Sporns, O., Stockman, I., Sur, M., & Thelen, E. (2001). Autonomous mental development by robots and animals. *Science*, 291, 599–600. 5, 8